



Université de Toulouse

MASTER 2 GEOMATIQUE

« **ScIences Géomatiques en environneMent et AménageMent** » (SIGMA)

<http://sigma.univ-toulouse.fr>

RAPPORT DE STAGE

Estimation du potentiel de développement des énergies renouvelables en Région Grand Est

FERNANDEZ Tommy



Maître de stage : Camille WEISSE
Enseignant-référent : Sébastien LE CORRE

Septembre 2020

Sommaire

Sommaire

Résumé

Abstract

Remerciements

Introduction

- I. Présentation de la structure d'accueil
- II. Contexte du stage et objectifs
- III. Identification du potentiel d'installation de panneaux solaires sur toiture
- IV. Etude du potentiel de développement éolien dans le Grand Est

Conclusion

Bibliographie

Annexes

Table des matières

Table des figures

Table des tableaux

Résumé

Dans le cadre de son Programme Régional de Surveillance de la Qualité de l'Air, ATMO Grand Est s'est engagée à alimenter le volet Air Climat Energie des observatoires et bilans territoriaux. La structure a ainsi souhaité réaliser un premier inventaire spatialisé des potentiels de développements des énergies renouvelables en région Grand Est.

Le stage a consisté à réaliser une estimation des gisements en énergies renouvelables sur l'ensemble de la région à partir d'études bibliographiques et d'échanges avec différents partenaires locaux. Les recherches se sont finalement concentrées à l'étude du potentiel solaire photovoltaïque sur toitures et sur le développement du grand éolien.

Les résultats dégagés à l'issue des divers traitements géographiques ont été satisfaisant et paraissent cohérents par rapport à d'autres données de références. Les méthodologies utilisées sont reproductibles et peuvent être potentiellement mis à jour en réutilisant les scripts SQL qui ont permis de traiter les importants volumes de données.

Des améliorations peuvent être apportées, elles impliquent toutefois de lourds traitements qu'il est possible d'optimiser via une alliance conjuguée entre le logiciel FME et l'intégration de scripts Python. Les résultats ne sont pour autant pas garantis et il est possible que le ratio entre temps de travail et qualité des résultats ne soient pas optimal.

Mots clés : énergies renouvelables – panneaux photovoltaïques sur toitures – développement éolien

Abstract

As part of its Regional Air Quality Monitoring Program, ATMO Grand Est is committed to supply the Air Climate Energy aspect of local monitoring and regional balance. The association expressed the wish to carry out a first spatialized inventory of renewable energies potential in Grand Est.

The internship consisted to estimate renewable energies potential throughout the land from bibliographic studies and discussions with various local partners. Finally the researches focused on studying the solar photovoltaic potential on roofs and wind turbines development.

The results obtained from geographic treatments were fulfilling and appear consistent relative to other data. The methods used are replicable and can potentially be updated by reusing the SQL scripts used to process the large amount of data.

Improvements can be made, however, they involve cumbersome process that can be optimized through a combination of FME software and the incorporation of Python scripts. The results are not guaranteed, and the ratio between working time and quality of the results may not be significant.

Keys word : renewable energy - photovoltaic panels on roofs - wind turbines development

Remerciements

Je tenais tout d'abord à remercier Camille WEISSE, responsable de l'unité Inventaire, et ma tutrice de stage, pour m'avoir fait confiance tout au long du stage.

Je remercie aussi vivement l'ensemble de l'équipe Inventaire, Matthieu BOSANSKY, Sabine MAZURAI, Julie MAUCHAMP, Isabelle DIDIERJEAN et Maxime CARETTE pour leur disponibilité, leur conseils techniques et leurs très bonnes blagues pendant nos vidéoconférences.

Je n'oublie pas aussi les autres agents d'ATMO Grand Est qui ont contribué au bon déroulement de mon stage, et notamment l'équipe SI qui m'a souvent bien dépanné. Un merci donc à Gilles, Bianca, Serge, Christophe, Sébastien, David, Florent et Anthony.

Un remerciement particulier à Sébastien LE CORRE, pour la qualité de son encadrement, son engagement constant, et aussi et surtout, ses rappels à l'ordre.

Je souhaitais une nouvelle fois remercier Matthieu et Julie pour avoir eu la gentillesse de relire mon rapport de stage en l'absence de Camille.

Merci à Olivia, ma partenaire de télétravail, pour avoir égailé mes journées de labeur.

Introduction

Au premier semestre 2020, les énergies renouvelables ont produits plus d'électricité que les énergies fossiles au sein de l'Union Européennes¹. C'est une première, qualifiée d'historique par les professionnels de l'énergie et envoi un signal fort pour le développement de l'énergie dite « verte ».

C'est à travers la loi de transition énergétique que la France a fixé ses objectifs en matière d'énergies renouvelables en prévoyant de porter à 32% la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie et à 40% leur part dans la production d'électricité d'ici 2030. En région Grand Est, cette volonté nationale s'est traduite en 2018 par l'objectif ambitieux de couvrir 41% de la consommation énergétiques par de la production en énergies renouvelables dans le Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires (SRADDET). A l'horizon 2050, l'objectif affiché est de devenir un territoire à énergie positive.

Du 16 mars au 4 septembre 2020, j'ai effectué mon stage de fin de formation en Master 2 SIGMA au sein de la structure ATMO Grand Est sous la responsabilité de Camille Weisse, responsable de l'unité Inventaire. Lors de mes précédentes expériences professionnelles, j'avais déjà eu l'occasion de travailler sur la thématique des énergies renouvelables, en proposant notamment des méthodes d'évaluation de potentiels, sans toutefois les mettre techniquement en œuvre. Ce stage devait donc me permettre d'achever ce travail muni d'un œil nouveau et de compétences élargies en SIG et gestion de base de données. Je souhaitais par ailleurs développer et explorer ces compétences que je juge clés pour mon futur travail de géomaticien.

ATMO Grand Est est une association à but non lucratif en charge de la surveillance de la qualité de l'air sur la région Grand Est. La structure a été créée le 1^{er} janvier 201. Elle est issue de la fusion des ATMO d'Alsace, de Lorraine et de Champagne Ardenne et son siège est localisé à Schiltigheim.

Mon stage au sein de la structure a consisté à réaliser une estimation des gisements en énergies renouvelables sur l'ensemble de la région Grand Est à partir d'études bibliographiques et d'échanges avec différents partenaires locaux. Ma mission m'a conduit à principalement m'intéresser à l'étude du potentiel solaire sur toiture et sur le développement du grand éolien.

Dans les premières parties du rapport, nous décrivons plus en détails la structure et son activité en insistant notamment sur son côté d'aide à la décision auprès des collectivités locales. Nous reviendrons aussi sur les objectifs du stage et son organisation particulière dues à la COVID-19. Dans la partie IV, nous présenterons l'étude du potentiel solaire sur toitures en détaillant la méthodologie employée, les données et traitements utilisées. Nous discuterons aussi des résultats et préconiserons des pistes d'améliorations. La partie V portera sur l'étude du potentiel éolien et sera construite de la même manière que la partie précédente. Enfin, nous dresserons un bilan global de ce stage en mettant en avant les compétences que j'ai pu développer et mes perspectives professionnelles.

¹<https://www.novethic.fr/actualite/energie/energies-renouvelables/isr-rse/les-renouvelables-deviennent-la-premiere-source-d-electricite-en-europe-devant-les-energies-fossiles-148844.html> (consulté le 02/09/2020)

I. Présentation de la structure d'accueil

ATMO Grand Est constitue une association à but non lucratif agréée par le Ministère chargé de l'environnement. Elle est en charge de la surveillance de la qualité de l'air dans la région Grand Est, conformément à la Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie (Loi LAURE) du 30 décembre 1996 intégrée au code de l'environnement. Cette Loi donne le droit à chacun de respirer un air qui ne nuise pas à sa santé.

L'association est administrée par des acteurs régionaux au sein de quatre collèges :

- Les représentants de l'Etat et de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie ;
- Les collectivités territoriales et leurs groupements ;
- Les représentants des diverses activités contribuant à l'émission des substances surveillées ;
- Des associations de protection de l'environnement et des personnalités qualifiées.

La structure est intégrée au sein du réseau national, des Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'air (AASQA) dont l'objectif général est de contribuer, aux côtés des autres acteurs nationaux, à doter la France d'un dispositif assurant la surveillance de la qualité de l'air et l'évaluation des actions visant à l'améliorer.

Afin de répondre aux enjeux de protection de la santé des populations et de l'environnement, ATMO Grand Est mène les missions suivantes :

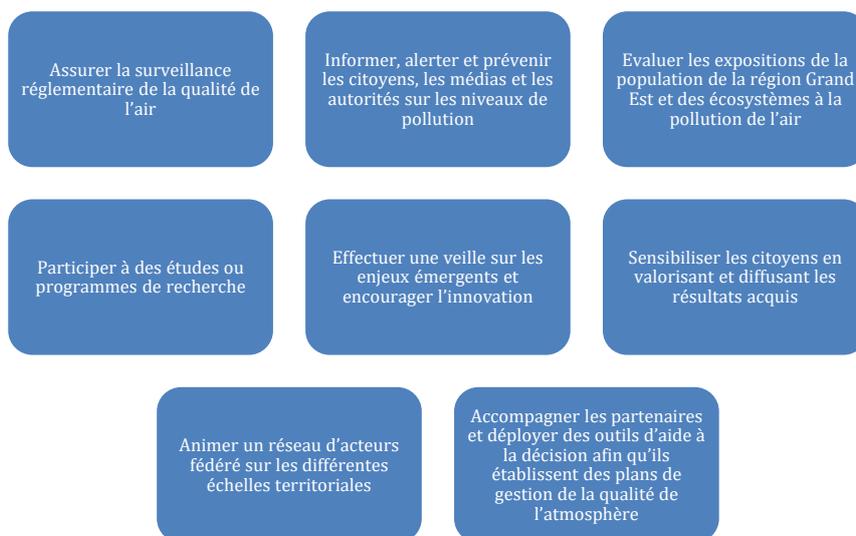


Figure 1 : Missions d'ATMO Grand Est

ATMO Grand Est se compose d'une équipe d'environ 80 personnes, répartis sur trois antennes, dont des experts en physico-chimie, métrologie, modélisation, bigdata/numérique, évaluation de la qualité de l'air et exposition de la population, information/éducation/formation, climat/énergie, etc.

II. Contexte du stage et objectifs

Dans le cadre de ses missions, ATMO Grand Est met à jour annuellement des inventaires des consommations et productions d'énergie, des émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques. Ces travaux permettent de disposer d'une information détaillée sur les sources de pollution atmosphérique, et d'alimenter les modèles de prévision de la qualité de l'air mais aussi les diagnostics air-climat-énergie des différents plans et programmes territoriaux (SRCAE, PPA, PCAET, PDU, PLU, etc.).

Les Plans Climat Air Energie Territoriaux doivent intégrer une estimation des potentiels de développement des énergies renouvelables et de récupération. ATMO Grand Est s'est engagé, dans le cadre de son Programme Régional de Surveillance de la Qualité de l'Air, à alimenter le volet Air Climat Energie des observatoires et bilans territoriaux. Dans ce cadre, ATMO Grand Est a souhaité réaliser un premier inventaire spatialisé des potentiels de développement des énergies renouvelables en région Grand Est par le biais d'un stage de six mois.

Au départ, mes missions de stage ont été les suivantes :

- réaliser une étude bibliographique des études de potentiels déjà existantes ;
- échanger avec des partenaires ayant déjà réalisé ce type d'études (Lig'Air, Atmo Bourgogne Franche Comté), les énergéticiens (RTE, GRTGaz, Grdf, enedis, etc.) ainsi que les parties prenantes de l'Observatoire régional climat-air-énergie (ADEME, DREAL, Région et unité Accompagnement d'ATMO Grand Est) ;
- collecter les données nécessaires et de les intégrer dans une base de données spatialisée ;
- développer une méthodologie à partir des éléments précédemment mentionnés ;
- réaliser une première estimation des potentiels existants pour les différentes collectivités du Grand Est ;
- mettre en forme les résultats de l'étude sous forme des cartes et d'indicateurs statistiques ;
- rédiger une note méthodologique sur les travaux effectués, et une note de synthèse des résultats obtenus.

A l'issu d'échanges avec les acteurs locaux et notamment de la Région, il a été convenu que je m'intéresse plus particulièrement à l'étude du potentiels solaires photovoltaïques sur toitures et au développement de l'éolien. Une de mes tâches annexes a consisté à réaliser un inventaire des ressources forestières pour une utilisation énergétique.

Le stage s'est étalé sur une période de 5 mois et demi, son déroulement est illustré sur la Figure 2. Les restrictions des déplacements liées au confinement m'ont contraint de débiter le stage en télétravail. A la fin du confinement, j'ai proposé à ma responsable de continuer de travailler à distance jusqu'à la fin de mon stage et ma demande a été acceptée.

Avant les événements liés à la COVID-19, ATMO Grand Est avait mis en place un système d'ordinateurs distants pour que ses agents puissent travailler depuis chez eux. J'avais ainsi un ordinateur distant à ma disposition sur lequel étaient installés les logiciels QGIS, ArcGIS, FME, pgAdmin et DBeaver.

Afin de traiter mes données, j'ai préféré travailler sur DBeaver plutôt que pgAdmin car je le trouve plus ergonomique et il est plus facile d'écrire des requêtes SQL. J'ai employé QGIS pour réaliser certains traitements géographiques et pour visualiser mes résultats de traitement sous PostGIS. J'ai aussi utilisé FME lorsque les données étaient trop volumineuses et que j'avais besoin d'avoir un reporting lors de l'exécution de mes traitements.

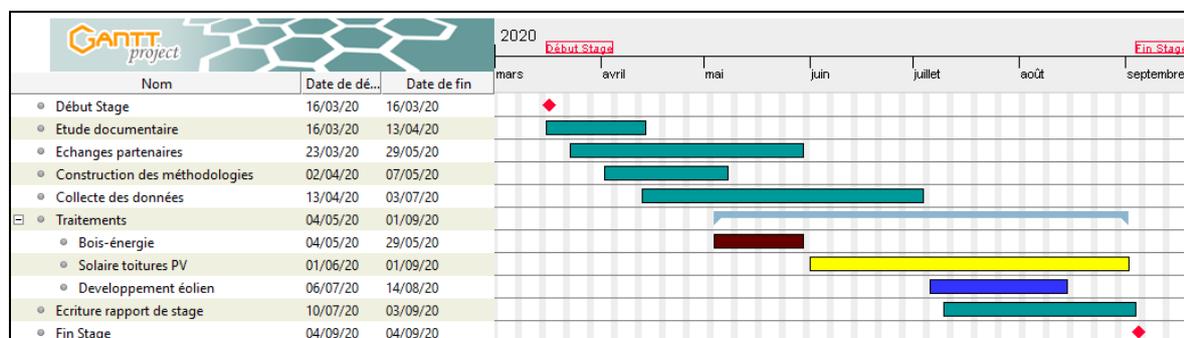


Figure 2 : Diagramme de GANTT illustrant l'organisation du stage

III. Identification du potentiel d'installation de panneaux solaires sur toiture

A. L'énergie solaire photovoltaïque en région Grand Est

En 2018, la production d'énergie à partir de panneaux photovoltaïques (sur toitures et au sol) s'élevait à environ 550 GWh², soit une augmentation de près de 10% par rapport à 2017 (505 GWh). Le solaire photovoltaïque connaît une nouvelle dynamique de croissance après avoir connu une relative baisse de production entre 2015 et 2016.

Le photovoltaïque est développé sur l'ensemble du territoire et tout particulièrement à l'est (départements du Bas-Rhin et du Haut-Rhin). La plus grande installation se situe Meurthe et Moselle (centrale PV de la Base aérienne 136 Toul-Rosières ouverte en 2012) et représente 115 MW.

D'après le SRADDET, la filière photovoltaïque est confrontée à une faible rentabilité, à des contraintes foncières, techniques et réglementaires qui freine son développement. Toutefois, pour se relancer dans la région, la filière pourra compter sur une diminution des prix d'installation et la multiplication des possibilités d'applications dont le développement de l'autoconsommation. Les acteurs des territoires espèrent multiplier par 10 la production d'énergie à partir de panneaux photovoltaïques d'ici 2050.

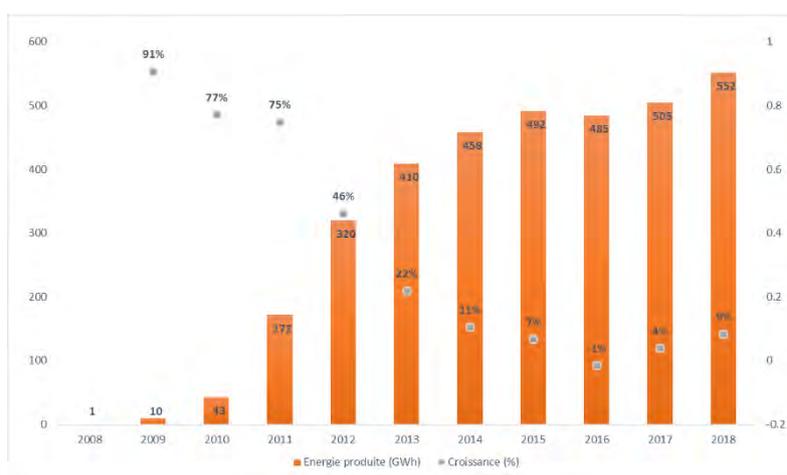


Figure 3 : Evolution de la production d'énergie photovoltaïque entre 2008 et 2018 (source : RTE, Panorama DREAL)

B. L'étude du potentiel solaire sur toiture, de quoi parle-t-on ?

Les panneaux solaires photovoltaïques produisent de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen de cellules photovoltaïques. Les rayons du soleil, composés de photons, viennent frapper ces cellules et permettent sous certaines circonstances de mettre en mouvement les électrons contenus dans les matériaux des cellules (silicium), produisant ainsi un courant électrique.

Indépendamment du rendement propre aux cellules du panneau solaire, la quantité d'électricité produite par ce dernier dépend de la quantité d'énergie solaire qu'il reçoit. Deux paramètres déterminent la quantité d'énergie reçue par un panneau : l'orientation, que l'on mesure à l'aide de l'azimut, et l'inclinaison.

L'inclinaison représente l'angle formé par le panneau et une surface horizontale. Si le panneau est posé à plat, son inclinaison est de 0°. Si le panneau est fixé à un mur vertical, son inclinaison est de 90°.

L'azimut représente l'angle formé par l'intersection de deux lignes imaginaires : une ligne qui va du nord au sud d'une part, et une ligne tracée au sol dans la direction dans laquelle le panneau est tourné, d'autre part. Dans le cas d'un panneau posé sur le toit d'une maison, cette ligne est perpendiculaire à l'axe du faîtage de la maison.

² chiffre Panorama des énergies renouvelables de la DREAL Grand Est

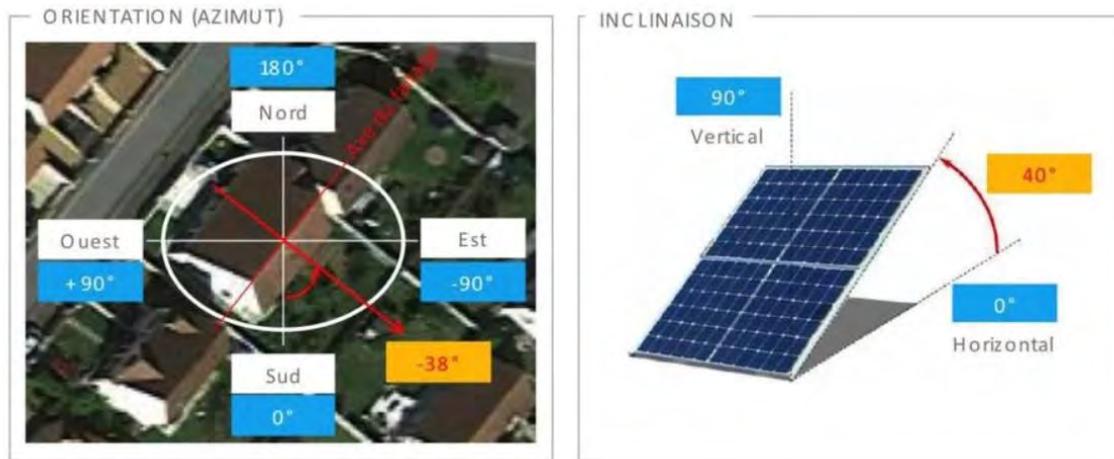


Figure 4 : Paramètres influençant la quantité d'énergie reçue par un panneau solaire (source www.terresolaire.com)

La quantité d'énergie reçue sur la surface d'un panneau est maximale lorsque le rayonnement est perpendiculaire à cette surface. Ainsi, la production annuelle d'un panneau est maximisée lorsqu'il est incliné perpendiculairement au rayonnement solaire au moment où le soleil est au plus haut dans le ciel et pour la saison qui offre les journées d'ensoleillement les plus longues.

La position du soleil dans le ciel varie selon la latitude de l'endroit où l'on se trouve. En France, l'inclinaison idéale se situe entre 35 et 45 degrés. Cela correspond à l'inclinaison des toitures traditionnelles dans le nord de la France. Dans le sud de la France, les toitures sont moins pentues avec des inclinaisons de l'ordre de 15°. En région Grand Est, l'inclinaison optimale pour la production d'électricité solaire serait de 30 degrés (B.Anastasiu, 2018)

Plus l'orientation du panneau est proche du sud, meilleure sera sa production. S'il est orienté vers l'est, il aura une très bonne production le matin puisque le rayonnement solaire sera perpendiculaire à sa surface, mais il tournera le dos au soleil dans l'après-midi et sa production sera faible. De même, s'il est orienté vers l'ouest, sa production sera très bonne l'après-midi mais il tournera le dos au soleil en début de journée.

En l'absence de montagne ou d'immeuble susceptible de masquer le soleil à certains moments, la production d'un panneau orienté sud-est sera identique à celle d'un panneau orienté sud-ouest : le rayonnement solaire est parfaitement symétrique entre l'est et l'ouest.

© www.ef4.be

		inclinaison par rapport à l'horizontale (°)						
		0	15	25	35	50	70	90
orientation	est	88%	87%	85%	83%	77%	65%	50%
	sud-est	88%	93%	95%	95%	92%	81%	64%
	sud	88%	96%	99%	max 100%	98%	87%	68%
	sud-ouest	88%	93%	95%	95%	92%	81%	64%
	ouest	88%	87%	85%	82%	76%	65%	50%

Figure 5 : Facteur de correction à appliquer à la production d'électricité d'un panneau selon l'orientation et l'inclinaison des toitures (source : <http://www.ef4.be>)

La quantité d'énergie produite par un panneau dépendra aussi de la technologie utilisée et notamment de sa puissance nominale et de son rendement. Les installations les plus courantes sur le marché sont celles à base de silicium (monocristallin et polycristallin). En 2011, elles représentaient près de 90% des installations photovoltaïques installées dans le monde. Les panneaux en monocristallins bénéficie d'un meilleur rendement ainsi qu'un meilleur ratio Wc/m² que le polycristallin mais pour un coût plus élevé.

Technologie	Ratio puissance crête par surface (Wc/m ²)	Rendement (%)
Monocristallin	175 Wc/m ²	16 à 24 %
Polycristallin	150 Wc/m ²	14 à 18 %

Tableau 1: Caractéristiques des installations solaires photovoltaïques monocristallins et polycristallins (source : www.insunwetrust.solar)

C. Méthodologie et données utilisées

Nous l'avons vu précédemment, la production d'énergie solaire via des panneaux photovoltaïques dépend de nombreux paramètres :

- le type de technologie utilisée ;
- l'orientation des toitures des bâtiments - contrainte technique ;
- l'inclinaison de la pente de ces mêmes toitures - contrainte technique ;
- la quantité de rayonnement solaire reçu par les panneaux ;
- la surface de toiture réellement disponible pour l'installation de panneaux représente aussi un facteur déterminant pour le calcul du potentiel. Il tient compte de l'encombrement des toitures (présence de puits de lumière, bouches d'aération, *etc.*) et des effets de masque (ombres portées par les bâtiments proches ou la végétation) - contrainte technique.

La présence ou non de contraintes d'ordre réglementaire ou patrimoniale sont aussi des éléments à considérer pour évaluer le potentiel solaire sur toiture. En effet, des dispositifs réglementaires existent et peuvent rendre plus ou moins difficile l'installation de panneaux PV sur certains bâtiments.

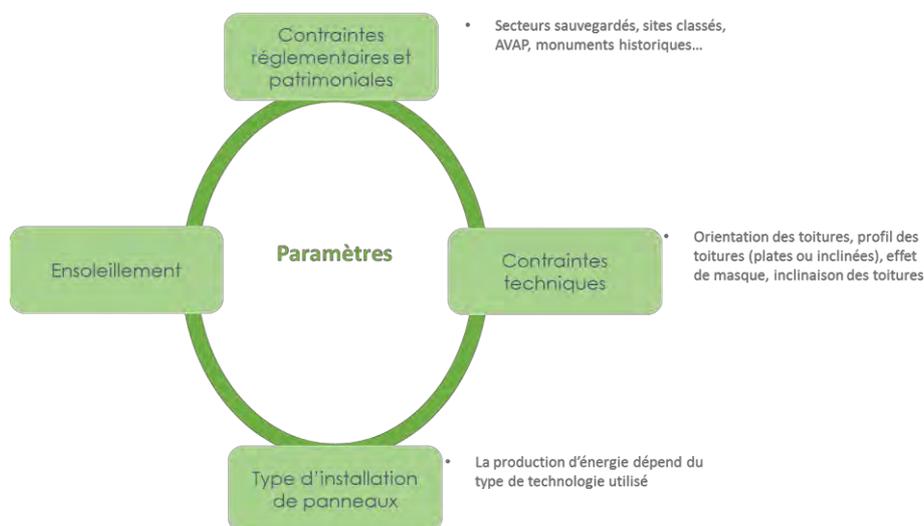


Figure 6 : Paramètres à prendre compte pour l'étude du potentiel solaire sur toiture

Pour construire ma méthode je me suis principalement reposé sur deux études :

- CEREMA, Direction territoire Ouest, Identifier le potentiel d'installation de panneaux solaires sur toiture – Cas de l'Ille-et-Vilaine, aout 2014, 44p.
- Direction départementale des territoires de la mer, Identification du potentiel d'installation de panneaux photovoltaïques sur toiture des bâtiments supérieurs à 1000 m² dans les Côtes-d'Armor, avril 2018, 29p.

J'ai pu bénéficier des travaux réalisés par Lig'Air sur l'évaluation des potentiels en énergies renouvelables en région Centre-Val de Loire ainsi que ceux produits par la Région Grand Est dans le cadre du SRADDET. J'ai aussi pu profiter des conseils d'agents d'ATMO Grand Est qui avaient déjà travaillé sur ce sujet.

a. Les données clés : les contours des bâtiments de la BD TOPO de l'IGN et d'OSM

Afin de déterminer le potentiel solaire sur toiture, il est impératif d'avoir à disposition l'emprise géographique de chaque bâtiment du territoire étudié. C'est en effet grâce à cet élément que seront déterminées les surfaces de toiture disponibles pour l'installation de panneaux solaires.

Plusieurs couches géographiques vectorielles sur les bâtiments sont produites par différents organismes. Mes premières réflexions m'ont conduit à vouloir exploiter la table « bâtis » produite par l'IGN et composante de la BD TOPO.

Toutefois, j'avais connaissance de certains défauts de cette table pour l'étude de potentiel solaire, de nombreux bâtiments pouvaient manquer et la définition de leur nature était souvent imprécise. Dès lors, l'utilisation de cette table imposait de la compléter avec d'autres jeux de données telles que les fichiers fonciers du CEREMA.

Ce n'était sans compter sur la version 3 de la BD TOPO qui apporte des éléments nouveaux réemployables pour l'analyse du potentiel solaire. En effet, depuis 2008, l'IGN a intégré dans la table « bâtis » les bâtiments du cadastre issus de la BD PARCELLAIRE, apportant une granularité plus fine des bâtiments et une plus grande complétude des données. De plus, quatre attributs ont été appariés grâce aux fichiers fonciers produits par le CEREMA. Ils consistent à deux attributs sur l'usage des bâtiments et deux autres sur la nature des matériaux de construction (murs et toitures). Ces éléments, qui auraient pu être obtenus par ailleurs mais avec un temps de réception des données long, s'avéreront fort utiles pour estimer le potentiel solaire.

Mes recherches m'ont aussi amené à regarder du côté des données OSM. En effet, J'avais l'ambition de proposer une estimation du potentiel pour chacun des bâtiments du Grand Est avec leur caractéristiques propres (orientation des toitures, surfaces de toiture suffisamment ensoleillées, etc.). C'est pourquoi, je n'étais pas satisfait des contours parfois « grossiers » de la table des bâtiments produites par l'IGN : une même entité pouvait regrouper de multiples bâtiments.

En comparant les données sur les bâtiments d'OSM et de l'IGN, il s'avère que celles d'OSM proposent un degré de précision bien plus fin que celles de l'IGN comme le montre le comparatif en Figure 7.

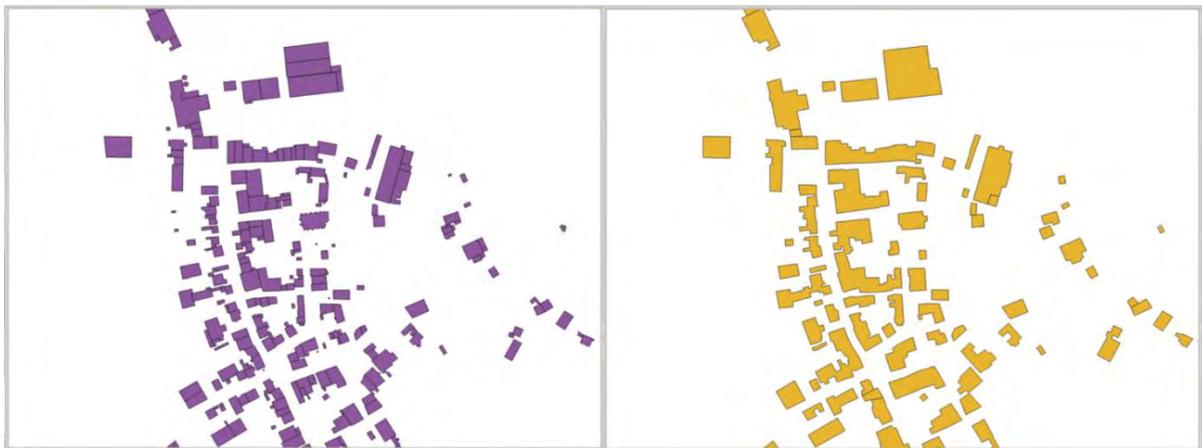


Figure 7 : Comparaison des polygones des bâtiments entre la couche bâtiment d'OpenStreetMap (à gauche) et celle de la BD TOPO (à droite)

Ce phénomène s'explique par la différence entre les méthodes utilisées de modélisation des bâtiments. Au contraire d'OSM, dans les données produites par l'IGN, les bâtiments contigus ou superposés de même nature et de même usage sont généralement considérés comme un seul et même objet pour lesquels seul le contour extérieur est saisi. Pour autant, deux objets contigus ou superposés peuvent être représentés s'ils présentent des caractéristiques particulières en termes de :

- hauteur, différence de hauteur entre les deux bâtiments supérieur à 10 m ;
- surface, surface de chaque objet supérieur à 400 m².

Compte tenu de ces éléments, je me suis posé les questions suivantes. Quelle est la couche géographique des bâtiments à utiliser pour déterminer les caractéristiques des toitures des bâtiments dans une optique de calcul du potentiel solaire ? Quels sont les éléments déterminants pour mes calculs ? Quelles données sur les bâtis seront les plus à même à me fournir ces éléments ?

Pour y répondre, j'ai réalisé une rapide analyse des résultats obtenus à la suite du lancement d'un script de calcul (Cf page 22) permettant de calculer l'orientation des toitures des bâtiments.

Le mode opératoire utilisé a été le suivant :

- lancement du script de calcul d'orientation sur une zone géographique test avec des données extraites de la BD TOPO et d'OSM.
- vérification visuelle des résultats obtenus avec superposition d'images satellites (Cf Figure 8), suivant les résultats, une valeur de 0 à 2 est ajoutée dans une colonne dédiée dans les deux tables avec indiqué :
 - 0 lorsque l'orientation calculée par le script s'avère incorrect par rapport aux images satellites ;
 - 1 lorsque l'orientation de la toiture calculée par le script s'avère correct par rapport aux images satellites ;
 - 2 lorsqu'une erreur n'ayant pas de rapport avec l'orientation est survenue : petites surfaces ne correspondant généralement pas à un bâtiment.

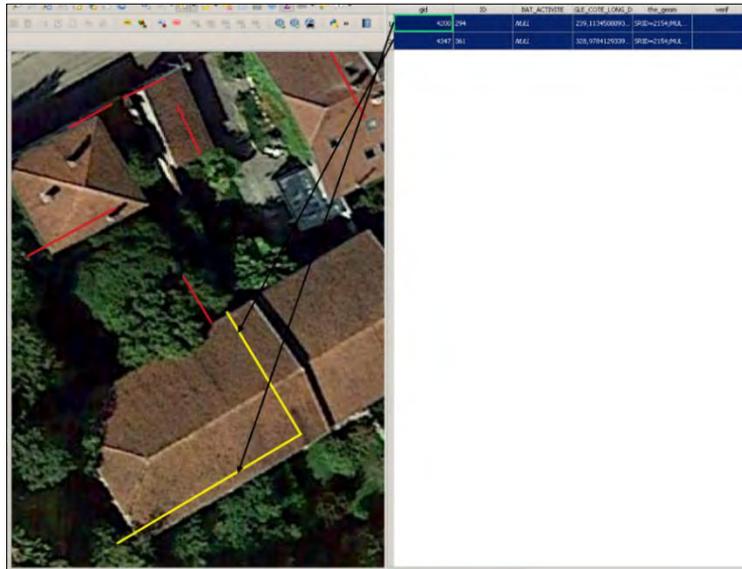


Figure 8 : Illustration de la vérification visuelle des résultats du calcul de l'orientation des toitures

Le premier constat qu'il est possible de faire est qu'il y a plus d'entités géographiques représentant un bâtiment dans les données d'OSM que dans la BD TOPO pour une même zone étude, respectivement 232 contre 68. On peut considérer cela comme normal compte tenu des méthodes de modélisation utilisées.

Près de 35% des bâtiments d'OSM ont leur orientation fautive, ce qui correspond à 35% des surfaces de toiture des bâtiments analysés. Le pourcentage de bâtiment avec une orientation incorrecte dans la BD TOPO est similaire à celui d'OSM. Toutefois, cela concerne une surface de toiture plus importante, environ 40% des surfaces totales étudiées.

Résultats	OSM		BD TOPO	
	Nombre de bâtiments	Surface de toiture correspondante ha	Nombre de bâtiments	Surface de toiture correspondante m ²
Orientation correcte	129	2.4 ha	50	2.7 ha
Orientation incorrecte	84	1.3 ha	18	1.7 ha
Erreur	19	< 0.1 ha	RAS	RAS

Tableau 2 : Comparaison des résultats du calcul de l'orientation des bâtiments entre les données d'OSM et de la BD TOPO.

En conclusion, les résultats du calcul de l'orientation des bâtiments entre les données d'OSM et de la BD TOPO sont équivalents. Les données OSM sont toutefois plus complètes même s'il apparaît assez souvent que des entités référencées ne correspondent pas à des bâtiments (ex : puits, paravent, etc.). Sur l'étendue de la zone test, ces dernières correspondent à environ 8% des entités référencées comme bâtiments dans OSM pour environ 1% des toitures. Leur présence pourrait poser un problème sur une étendue plus grande.

Pour donner suite à ce travail et dans un premier temps, nous avons décidé avec ma responsable d'utiliser la BD TOPO pour évaluer le gisement solaire sur toiture et ce pour plusieurs raisons :

- éviter une phase de pré-traitement pour filtrer les erreurs de saisie présentes dans les données d'OSM ;
- bien que certains bâtiments soient regroupés en une seule entité, les résultats des calculs d'orientation sont les mêmes que celles d'OSM alors que mon hypothèse de départ était en faveur d'OSM ;
- la présence d'attributs issus des fichiers fonciers qui nous permettront de mieux qualifier le gisement solaire sur toiture (nature et hauteur des bâtiments, nature des matériaux de construction utilisés, etc.).
- le nombre moindre d'entités allégera les temps de calcul.

	Avantages	Inconvénients
OSM	<ul style="list-style-type: none"> ▪ exhaustivité des bâtiments ▪ granularité des contours des bâtiments ▪ bonne détection des orientation des toitures 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ présence de polygones qui ne correspondent pas à des bâtiments ▪ bâtiment parfois fragmenté en plusieurs morceaux
BD TOPO	<ul style="list-style-type: none"> ▪ données de référence ▪ bonne détection des orientation des toitures 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ une entité peut représenter plusieurs bâtiments ▪ bâtiment parfois fragmenté en plusieurs morceaux ▪ manque d'exhaustivité des données

Tableau 3 : Avantages et inconvénients de l'utilisation des données OSM et de la BD TOPO pour l'étude du gisement solaire sur toiture

Toutefois, dans un second temps, à la suite des premiers résultats de calcul du potentiel avec les données issues de la BD TOPO, il s'est avéré que de nombreux bâtiments manquaient sur des portions du territoire de la région Grand Est. Face à ces résultats tronqués, j'ai proposé de refaire les traitements avec les données d'OSM qui sont plus complètes et homogène sur le Grand Est. Le Tableau 4 met en évidence la différence d'exhaustivité entre les deux tables : il y a deux fois plus d'entités représentant des bâtiments dans OSM, ce qui correspond à près de 9 000m² de toiture en plus (+18%) possiblement viables pour l'installation de panneau solaire.

Données	Nombre total de bâtiments	Surface totale des bâtiments en m²
OSM	4 259 235	51 637
BD TOPO	2 694 720	42 533

Tableau 4 : Comparatif du nombre total de bâtiments et les surfaces de toiture correspondantes des bâtiments issus d'OSM et de la BD TOPO

b. BD TOPO : préparation de la table de travail sur les bâtiments et identification de leur typologie

Lors de l'évaluation du potentiel solaire, un premier travail a consisté à déterminer la nature des bâtiments des données en entrée. On entend par nature l'utilité principale d'un bâtiment : habitat individuel, industrie ou encore bâtiment agricole. Cette information nous importe car elle déterminera le type d'installation qui sera mis en place sur le bâtiment.

En effet, dans le cas d'une autoconsommation de l'électricité produite, le besoin en énergie sera différent selon qu'on soit dans une maison ou dans un complexe sportif. Par exemple, on privilégiera une installation d'une puissance de 3 kWc dans le premier cas et une installation de 100 kWc dans le second cas. De plus, en fonction de la puissance installée, les tarifs de rachat du kWh varient décroissant quand la puissance augmente. Ce dernier paramètre est déterminant pour calculer la rentabilité d'une installation et donc sa réalisation, toutefois l'aspect financier ne sera pas traité dans cette étude.

D'autre part, les caractéristiques des toitures diffèrent selon la nature des bâtiments. En connaissant leur nature, il sera alors possible de réutiliser des coefficients issus de différentes études pour déterminer certaines caractéristiques qu'il n'aurait pas été possible de spécifier autrement.

Le tableau suivant précise la typologie finale retenue pour l'étude et les bâtiments qui peuvent correspondre avec les intitulés des différentes tables utilisées.

Nature d'activités retenues	Table bâti (champs usage 1 et usage 2)	Table Sirene	Table zone d'activité	Table zone d'habitation
Habitat individuel	résidentiel, agricole et résidentiel, résidentiel et commercial et service, résidentiel et annexe, indifférencié (hauteur < 10m)			lieu-dit, quartier (hauteur > 10m)
Habitat collectif	résidentiel et commercial et service, résidentiel, agricole et résidentiel, résidentiel et annexe, indifférencié (hauteur < 10m)			lieu-dit, quartier (hauteur > 10m)
Sport, culture et loisirs	sportif, sportif et commercial et services, tribune		culture et loisirs, sport	
Tertiaire	commercial et services, commercial et services et annexe	tertiaire	commercial et services	
Industrie	industriel, industriel et commercial et services, résidentiel et industriel	industrie, production d'énergie	industriel et commercial, gestion des eaux, industriel	
Santé			santé	
Enseignement			science et enseignement	
Agricole	silos, agricole, agricole et commercial et service	agriculture	agricole	
Administratif			administratif ou militaire	
Activités Mixtes	industriel, agricole ou commercial			

Tableau 5 : Nature des bâtiments retenues pour l'étude solaire toiture

L'identification de la nature des bâtiments a été réalisée sur les données de la BD TOPO et peut être découpée en 6 phases :

- Phase 1 : Préparation de la table de travail - Figure 10

La table « bâti » de la BD TOPO fournit les contours des bâtiments d'un territoire donné. Ces derniers proviennent majoritairement de deux sources, soit des fichiers cadastraux, soit de la numérisation d'images aériennes. Un des principaux intérêts de cette table, outre les contours en eux-mêmes, sont les attributs portant sur la nature des bâtiments et, depuis la version 3, leur usage.

Un premier travail a consisté à sélectionner les bâtiments susceptibles de présenter un gisement solaire sur leur toiture d'après leur nature.

Nature du bâtiment	Définition
Indifférenciée	Regroupe tous les bâtiments qui ne sont pas industriel, agricole ou commercial : Bâtiment d'habitation, Bâtiments administratifs, Bâtiments publics, Immeuble collectif d'habitation, Immeuble, Maison Lavoisier, Bergerie, Borie, Bungalow, Bureaux, Chalet, Grange, Garage, Gymnase, Gare, <i>etc.</i>
Industriel, agricole ou commercial	Regroupe les bâtiments dont l'architecture générale révèle une fonction industrielle, agricole ou commerciale : Atelier, Auvent de quai de gare, Bâtiment d'élevage industriel, Bâtiment industriel, Centre commercial, Construction technique, Entrepôt, Hangar agricole, Hangar industriel, Hypermarché, Supermarché, Usine, Usine électrique, Coopérative, <i>etc.</i>
Serre	Abri clos à parois translucides destiné à protéger les végétaux du froid.
Silo	Réservoir, qui chargé par le haut se vide par le bas, et qui sert de dépôt, de magasin, <i>etc.</i> pour des denrées agricoles.
Tribune	Tribune de terrain de sport (stade, hippodrome, vélodrome, ...)

Tableau 6 : Nature des bâtiments pris en compte dans l'étude de potentiel solaire

Les bâtiments de la BD TOPO qui n'ont pas été pris en compte sont ceux qui du fait de leur nature sont incompatibles avec l'installation de panneaux solaire : Arc de triomphe, Arène ou théâtre antique, Château, Chapelle, Eglise, Fort, Blockhaus, Casemate, Monument, Tour, donjon, Moulin à vent.

Les bâtiments qualifiés dans la table de « construction légère » ont été exclus pour ne conserver que ceux en « durs ». Les bâtiments légers regroupent entre autres les hangars et les espaces de stationnement construits en dur, comme les garages, des annexes de faible envergure, notamment le cas des abris de jardin, ou des poulaillers / clapiers et parfois les avancées de toiture ou de balcon pour les bâtiments de plusieurs niveaux de plancher.

Dans l'étude solaire sur toiture en Ille et Vilaine, réalisée par le CEREMA, les bâtiments isolés inférieurs à 50m² sont exclus de l'étude du potentiel car en dessous de cette surface, les toitures ne sont pas assez grandes pour accueillir une installation de 3 kWc (puissance minimum pour bénéficier des tarifs de rachats). Les bâtiments inférieurs à 50 m² accolés à d'autres bâtiments sont conservés car il est possible de considérer que la hauteur est homogène entre bâtiments mitoyens. Les toitures pourraient être alors mutualisées pour accueillir un équipement solaire commun. Les mêmes hypothèses de travail ont été prises dans cette étude.

De plus, il arrive souvent que les contours des bâtiments issus de la BD TOPO (et même d'OSM) soient construits en plusieurs petites parties accolées distinctes. Si on venait à retirer les bâtiments juste selon un critère de surface nous risquons de ne pas avoir la surface réelle de nombreux bâtiments mais seulement une partie.

Afin de réaliser cette opération sous PostGis, j'ai directement pensé à utiliser la fonction « ST_Touches » pensant que la fonction me permettrait de sélectionner les bâtiments isolés en ajoutant l'argument « false » à la fonction. Mon parti pris était le suivant : si le contour extérieur d'un de mes polygones touchent celui d'un autre alors il sera sélectionné. L'analyse des résultats m'apprit que son utilisation n'avait eu aucun impact sur ma sélection. La relecture attentive de la documentation de PostGis m'apprit que j'avais mal interprété son fonctionnement. La fonction retourne « false » si au moins un des points communs aux deux géométries en entrée, intersecte les intérieurs des deux géométries. Je ne pouvais pas avoir de résultat à ma sélection car aucun des points constituant mes bâtiments n'intersectaient l'intérieur d'un autre.

J'ai fini par solutionner cette étape du traitement en créant un buffer de 0.5 mètres à chacun des bâtiments avec une surface inférieure à 50 m² et en réalisant une intersection de ces bâtiments avec ceux de la table avec l'ensemble des bâtiments d'origine. La figure suivante schématise cette étape.

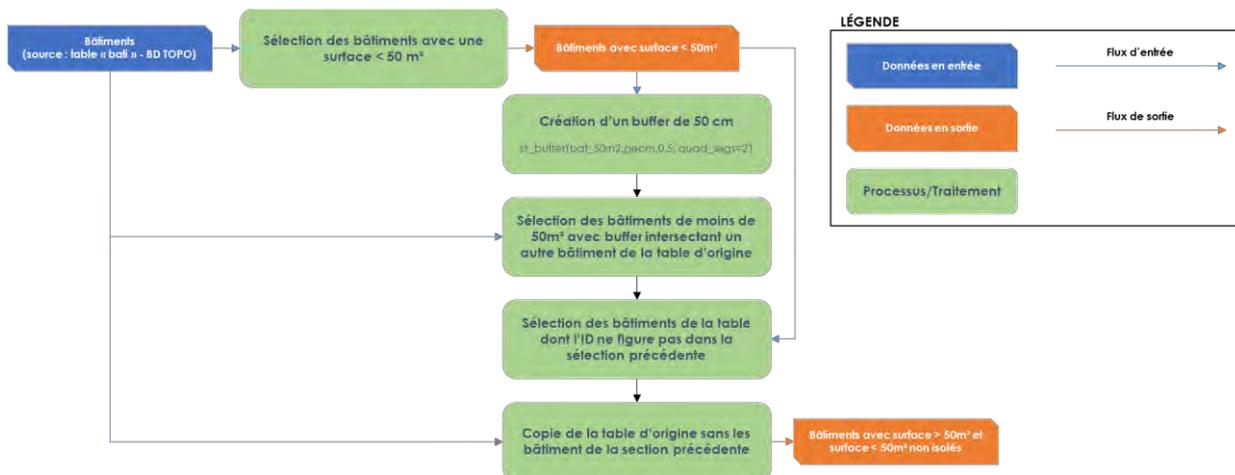


Figure 9 : Méthode pour exclure les bâtiments inférieurs à 50m² et isolés

Les données exploitées donnent des surfaces planes qui correspondent aux emprises des bâtiments au sol. L'hypothèse d'assimiler les surfaces planes aux surfaces de toitures donne une valeur assez exacte des surfaces de toitures terrasses (Cerama 2014), mais sous-estime la surface réelle des toitures inclinées. Ainsi, certaines toitures de plus de 50m² peuvent donc ne pas avoir été sélectionnées.

- Phase 2 : Identification de la typologie grâce aux attributs de la table « bâti » - Figure 10

Il a été nécessaire d'affiner la catégorisation des bâtiments de la table « bâti » grâce aux attributs portant sur les usages des bâtiments et issus des fichiers fonciers du CEREMA. Le seul champ « nature » manque en effet de précision. C'est en particulier vrai pour les bâtiments de nature « indifférenciée » qui regroupent des constructions de nature très hétérogène. Il en est de même des bâtiments de type « Industriel, agricole ou commercial ».

J'ai répertorié les différentes combinaisons possibles entre les champs « nature », « usage_1 » et « usage_2 » et en fonction des résultats j'ai décidé de l'intitulé à indiquer pour les bâtiments impliqués.

Nature	Usage 1	Usage 2	Choix
Indifférenciée	annexe	vide	indifférenciée
Indifférenciée	indifférenciée	vide	indifférenciée
Indifférenciée	usage	vide	usage_1
Indifférenciée	usage	annexe	usage_1
Indifférenciée	usage	usage	à départager
Indifférenciée	annexe	usage	usage_2
Industrielle, commerciale ou agricole	usage	vide	usage_1
Industrielle, commerciale ou agricole	usage	usage	à départager
Industrielle, commerciale ou agricole	annexe	usage	usage_2
Industrielle, commerciale ou agricole	annexe	vide	indifférenciée
Industrielle, commerciale ou agricole	indifférenciée	vide	indifférenciée
Silo			Agricole
Tribune			Sport, culture et loisirs
Serre			Agricole

Tableau 7 : Matrice de sélection de la nature des bâtiments en fonction des champs de la table bâti de la BD TOPO

A noter qu'il n'y a pas de notion de prévalence entre les champs « Usage 1 » et « Usage 2 » dans la BD TOPO en cas de double usage d'un bâtiment. Dans le cas où un bâtiment s'avérait avoir de multiples usages, sa nature était départagée suivant les combinaisons figurant dans le tableau suivant.

Usage 1	Usage 2	Choix
Agricole	Résidentiel	Habitat individuel
Commercial et services	Industriel	Industrie
Industriel	Résidentiel	Industrie
Industriel	Commercial et services	Industrie
Agricole	Industriel	Agricole
Agricole	Commercial et services	Agricole
Résidentiel	Commercial et services	Habitat collectif
Commercial et services	Résidentiel	Habitat collectif
Sportif	Commercial et services	Sport, culture et loisirs

Tableau 8 : Matrice de sélection de la nature des bâtiments à double usage

- Phase 3 : Complément à l'identification de la typologie des bâtiments par la jointure de le BD Sirène géolocalisée d'ATMO GE - Figure 10

Dans cette phase, l'objectif est d'identifier la nature des bâtiments qui sont toujours « Indéterminée » à la suite de la phase 2. Cette identification complémentaire est réalisée à partir d'un fichier construit par les agents d'ATMO Grand Est dans lequel sont géolocalisés les établissements de la base de données Sirene à partir de leur adresse et à l'aide un geocodeur en ligne. La table n'a pas fait l'objet d'une évaluation sur la bonne localisation des établissements. C'est pourquoi, la nature des bâtiments extraite à partir de cette table ne sera utilisée qu'en dernier recours.

L'identification de la nature des bâtiments à partir du fichier Sirene géolocalisés s'est faite en opérant une intersection entre ce fichier et la table « bâti » de la BD TOPO. Un bâtiment de la BD TOPO pouvait intersecter plusieurs établissements de nature différente. Dans ce cas, j'ai comptabilisé le nombre d'établissement par nature et la nature des bâtiments dominant. Si le nombre de bâtiments par nature est égale alors la nature est considérée comme « mixte ».

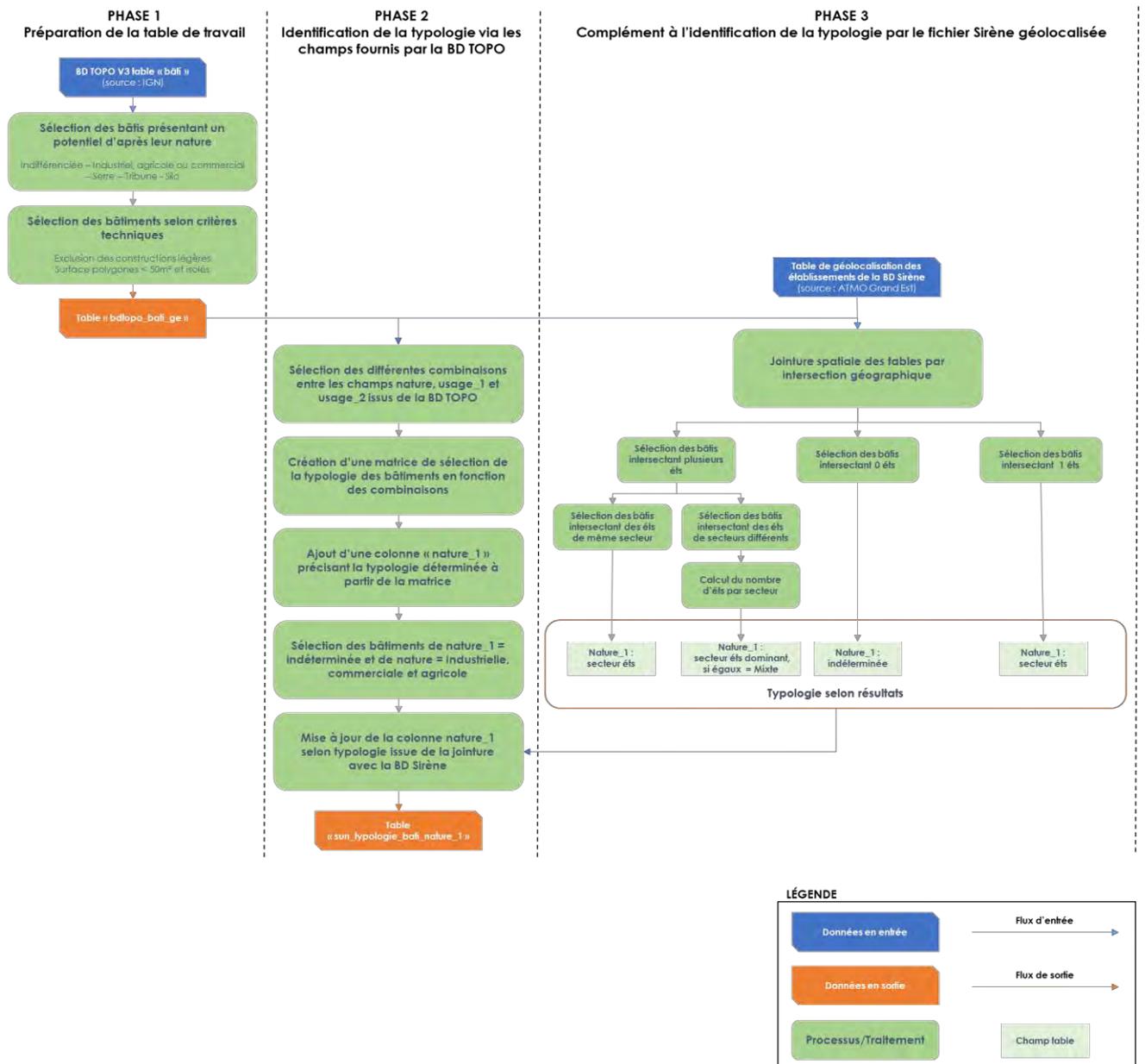


Figure 10 : Phase 1,2 et 3 de l'identification de la typologie des bâtiments de la BD TOPO

- Phase 4 : Complément à l'identification de la typologie des bâtiments par jointure de la table « zone d'activité ou d'intérêt » de la BD TOPO - Figure 11

La finalité de cette phase sert aussi à identifier la nature des bâtiments qui sont toujours « Indéterminée » à la suite de la phase 3 en utilisant les données de la table « zone d'activité et point d'intérêt » de la BD TOPO.

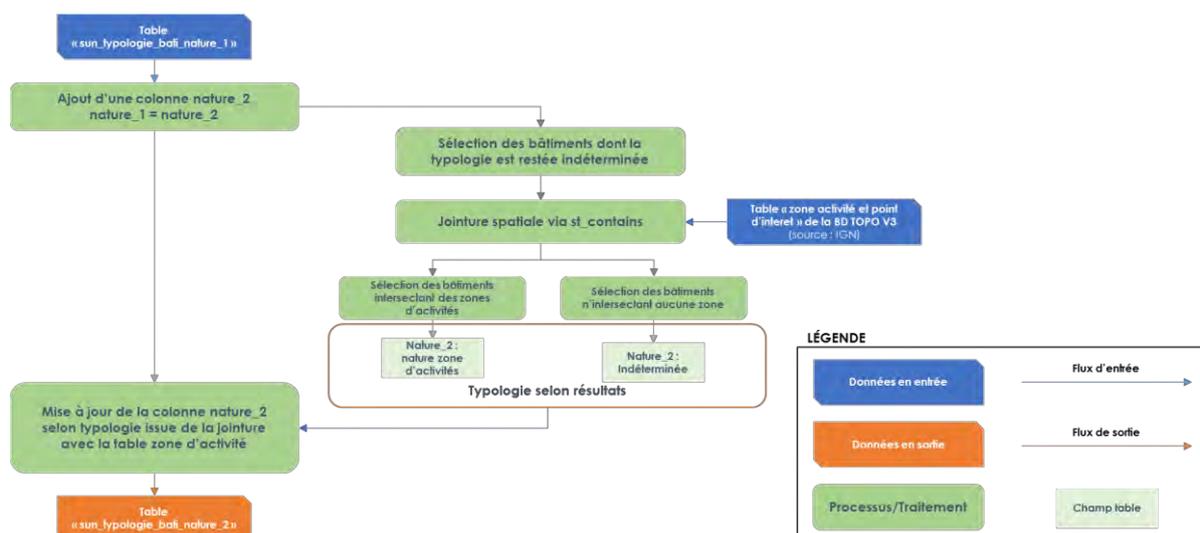


Figure 11 : Phase 4 de l'identification de la typologie des bâtiments de la BD TOPO

- Phase 5 : Complément à l'identification de la typologie des bâtiments par jointure de la table « zone d'habitation » de la BD TOPO - Figure 12

L'objectif de cette phase est de finaliser l'identification de la nature des bâtiments qui sont toujours « Indéterminée » à la suite de la phase 4 en utilisant les données de la table « zone d'habitation » de la BD TOPO.

Dans les faits, un bâtiment pouvait très bien être localisé à la fois sur une zone d'activité et sur une zone habitée. J'ai priorisé l'utilisation de la première pour catégoriser les bâtiments car les zonages sont construits de manière plus précise en comparaison de la table sur les zones d'habitation. Ils recouvrent généralement l'entièreté d'une zone urbaine du fait de sa construction à partir d'un buffer englobant les zones habitées. Pour plus de détail sur la construction de cette table, veuillez consulter la page 35.

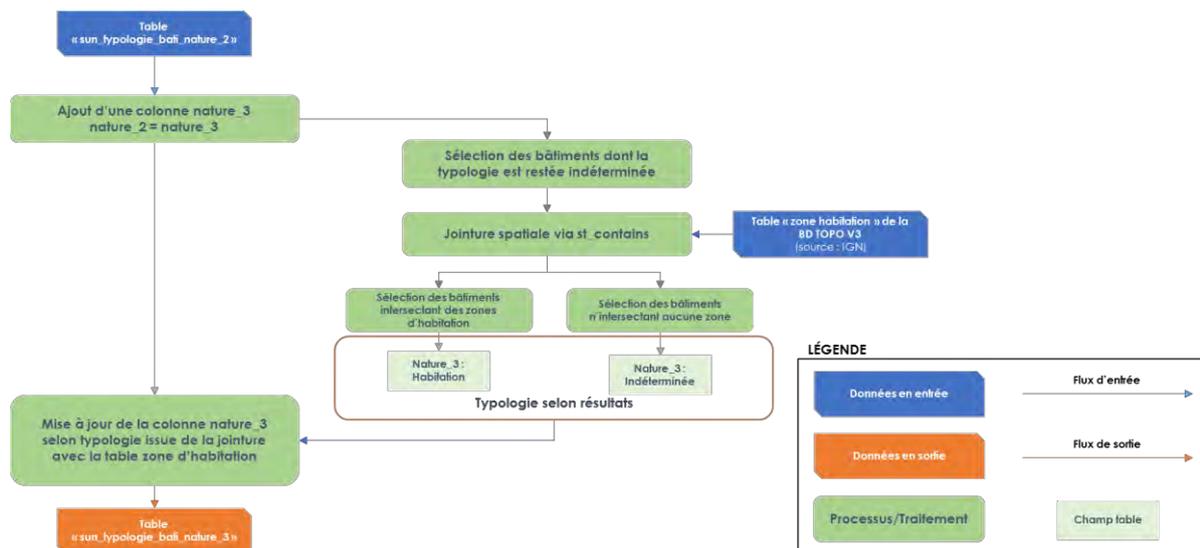


Figure 12 : Phase 5 de l'identification de la typologie des bâtiments de la BD TOPO

Phase 6 : Finalisation et homogénéisation de la typologie des bâtiments - Figure 13

À l'issu de cette phase, les intitulés extraits des différentes tables sont homogénéisés et les bâtiments de nature religieuse sont supprimés.

Les bâtiments d'habitation sont distingués en fonction de leur hauteur. Les bâtiments de moins de 10 mètres, équivalent à un bâtiment de 3 étages, sont considérés comme des habitats individuels et le reste comme des habitats collectifs.

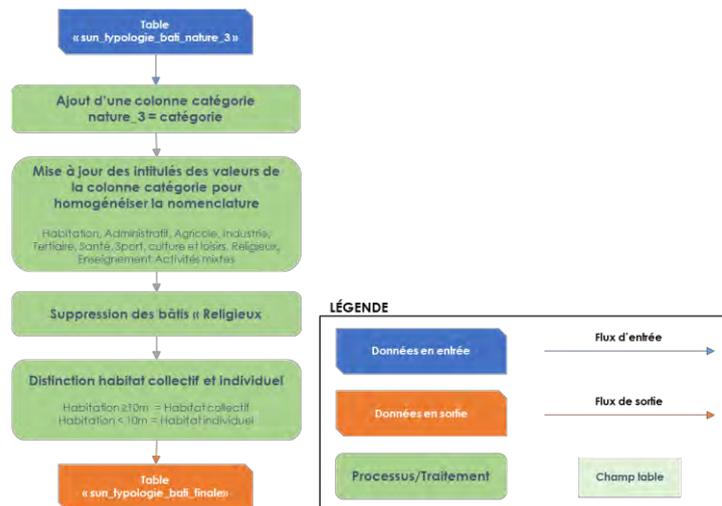


Figure 13 : Phase 6 de l'identification de la typologie des bâtiments de la BD TOPO

Lors de mes traitements, je me suis aperçu que certaines valeurs indiquées dans le champ « hauteur » de la BD TOPO étaient multipliées par un facteur 1000. Pour remédier à ce problème, j'ai sélectionné tous les bâtiments d'une hauteur supérieure à 100 mètres et divisé par 1000 la valeur de la hauteur. On aboutit à des valeurs de hauteur beaucoup plus cohérentes.

La répartition des surfaces de toiture par type de bâtiments figure dans le tableau suivant.

Type de bâtiments	Nombre de bâtiments	Surface totale (ha)	Répartition des surfaces
Activités Mixtes	76 992	2 248	5.6%
Administratif	4 020	226	0.6%
Agricole	40 479	3 020	7.5%
Enseignement	9 644	514	1.3%
Habitat collectif	87 696	2 834	7.0%
Habitat individuel	1 978 067	23 778	58.8%
Industrie	47 497	5 174	12.8%
Santé	2 648	186	0.5%
Sport, culture et loisirs	6 945	405	1.0%
Tertiaire	34 801	2 082	5.1%
Total	2 288 789	40 466	100%

Tableau 9 : Répartition des surfaces de toiture par type de bâtiments sur l'ensemble de la région Grand Est (source : BD TOPO)

c. Données OSM : préparation de la table de travail sur les bâtiments et identification de leur typologie

Les données sur les bâtiments d'OpenStreetMap intègrent un attribut permettant de qualifier la nature des bâtiments. Toutefois, il est en très grande majorité non référencé avec plus de 95% des bâtiments d'OSM en région Grand Est qui ne bénéficient pas de valeur sur cet attribut. De plus, son écriture n'est pas tout le temps homogène d'un bâtiment à un autre, ce qui entrainerait un travail de traitement supplémentaire pour les exploiter.

Du fait de cette absence de données, j'ai croisé les données OSM avec les bâtiments de la BD TOPO pour lesquels j'avais déjà déterminé la typologie ainsi qu'avec les tables sur les zones d'habitation et d'activités afin de compléter l'identification.

Pour autant, malgré ces croisements de données, il reste des bâtiments non identifiés. Certains bâtiments dans OSM n'ont pas d'équivalent dans la BD TOPO, cela peut s'expliquer par une date de création de construction des données différentes et par le manque d'exhaustivité de la BD TOPO sur certains territoires. Pour remédier à ce

problème, j'ai pris pour hypothèse qu'un bâtiment était de même nature que son plus proche voisin dont la nature a été déterminé.

Type de bâtiments	Nombre de bâtiments	Surface totale (ha)	Répartition des surfaces
Activités Mixtes	107 127	3 500	7.3%
Administratif	7 682	347	0.7%
Agricole	44 049	2 619	5.5%
Enseignement	19 396	701	1.5%
Habitat collectif	143 130	2 547	5.3%
Habitat individuel	2 100 463	21 720	45.4%
Habitat Mixte	1 166 256	9 100	19.0%
Industrie	37 279	4 613	9.6%
Santé	5 002	236	0.5%
Sport, culture et loisirs	13 071	452	0.9%
Tertiaire	36 730	2 006	4.2%
Total	3 680 185	47 841	100%

Tableau 10 : Répartition des surfaces de toiture par type de bâtiments sur l'ensemble de la région Grand Est (source : OSM)

Les bâtiments de type « habitat mixte » constituent le groupe d'habitat qu'il n'a pas été possible de distinguer entre collectif et individuel faute d'éléments caractérisant la hauteur des bâtiments.

On constate qu'en pourcentage les répartitions des surfaces des toitures par type de bâtiments sont de même ordre de grandeur entre les données OSM et de la BD TOPO. On observe environ 7 000 ha de surface de toitures supplémentaires correspondant en grande partie à de plus nombreux bâtiments de catégorie habitat.

d. Détermination des ratios de contraintes techniques

Les contraintes techniques pour l'installation de panneaux solaire sont de trois types : le type de toiture des bâtiments (terrasse, inclinée) ; l'inclinaison des toitures et les effets de masque.

Pour les déterminer, j'ai soit calculé des ratios moyens par catégorie de bâtiments à partir de l'étude de zones tests, ou bien repris des coefficients déjà existants.

▪ Type de toiture des bâtiments (terrasse, inclinée)

Dans un premier temps, j'avais l'ambition de déterminer la nature des toitures à partir du calcul des pentes sur la base d'un MNE à résolution fine (1 mètre). Toutefois, les temps de traitement se sont avérés excessivement long. La méthodologie utilisée est décrite plus précisément en page 27.

J'ai donc opté pour une autre solution qui demandait moins de temps de traitement. Cette solution, issue de l'étude du CEREMA, consiste à utiliser les informations sur les matériaux des toitures pour identifier leur type comme indiqué dans le Tableau 11. Cette donnée est disponible directement dans la BD TOPO depuis la V3.

Toiture inclinée	Toiture terrasse
Ardoises, Ardoises – autres, Ardoise – béton, Ardoise – zinc aluminium ; Tuiles, Tuiles – zinc aluminium ; Béton - tuiles	Béton, Béton – autres, Zinc aluminium, Zinc aluminium – autres, Autres

Tableau 11 : Type de toiture en fonction de leurs matériaux de construction (source : CEREMA 2014)

L'attribut sur les matériaux n'est toutefois pas rempli pour tous les bâtiments et suivant le type de bâtiment étudié l'information sera plus ou moins présente.

Type de bâtiment	Taux de peuplement de la colonne sur les matériaux de toiture dans la BD TOPO
Activités Mixtes	7 %
Administratif	< 1%
Agricole	< 1%
Enseignement	< 1%
Habitat collectif	47 %
Habitat individuel	36 %
Industrie	1.5 %
Santé	< 1%
Sport, culture et loisirs	< 1%
Tertiaire	< 1%

Tableau 12 : Taux de peuplement de la colonne "matériaux de construction des toitures" dans la BD TOPO

Compte tenu de ces éléments, j'ai déterminé un coefficient de répartition des toitures terrasses/inclinées sur la base des données fournies par la BD TOPO lorsque le taux de peuplement de la catégorie de bâtiment était jugé satisfaisant. Lorsque ce n'était pas le cas, ils étaient fixés sur la base de l'analyse d'échantillon.

Ainsi les coefficients de répartition des toitures ont été déterminés par échantillonnage pour les bâtiments de type Administratif, Enseignement, Santé, Sport, culture et loisirs, et Tertiaire.

Ils ont été calculés en sélectionnant aléatoirement 100 bâtiments pour chaque catégorie sur l'ensemble de la région Grand Est puis en les superposant à des images satellites afin d'identifier visuellement si leur toiture était en terrasse ou inclinée. Certains bâtiments sélectionnés de cette manière ne pouvaient parfois pas être visible sur les orthophotos (mauvaise qualité de l'image, zones militaires protégées). C'est pourquoi d'autres bâtiments ont dû être pris aléatoirement dans l'échantillon afin d'avoir au minimum 100 bâtiments dont la toiture a été vérifiée et pour chaque catégorie. Les résultats sont disponibles dans le Tableau 13.

Type de bâtiment	Coefficient de répartition	
	Terrasse	Inclinée
Activités Mixtes	0.4	0.6
Administratif	0.35	0.65
Agricole	0.5	0.5
Enseignement	0.65	0.35
Habitat collectif	0.15	0.85
Habitat individuel	0.05	0.95
Industrie	0.25	0.75
Santé	0.6	0.4
Sport, culture et loisirs	0.5	0.5
Tertiaire	0.3	0.7

Tableau 13 : Coefficient de répartition toiture terrasse/inclinée par type de bâtiment

La suite du travail a consisté à prendre les bâtiments dont la nature de la toiture n'a pas pu être identifiée et de sélectionner aléatoirement parmi ces derniers, le nombre de bâtiments égal au nombre total de bâtiment non identifié multiplié par un des coefficients de répartition.

- **Inclinaison des toitures**

La valeur de l'inclinaison des pentes des toitures nous est utile pour déterminer le facteur de correction à prendre dans le calcul d'estimation du potentiel de production des bâtiments. D'après mes recherches³, l'inclinaison des toitures est plus importante en région Grand Est que dans le reste de la France, elle peut être considérée entre 35 et 50 degrés.

- **Effet de masque**

L'identification de la surface utile de toiture pour l'installation de panneaux solaire doit tenir compte de l'effet de masque associé à l'ombre portée d'obstacles environnants ou de l'encombrement et des accès sur toitures.

En effet, l'espace disponible pour l'installation de panneaux solaires sur une toiture est conditionné par la présence de divers dispositifs pré-existants : puits de lumière, échangeurs thermiques, accès, cheminement, ouvertures, etc. De plus, les panneaux solaires classiques installés en toitures terrasses sont inclinés, induisant un phénomène de masque entre panneaux (CEREMA, 2014).

L'ombre portée peut également être la conséquence de l'ombre de bâtiments voisins et de la végétation. Cette source d'ombre portée est plus particulièrement contraignante pour le petit bâti et d'autant plus en milieu plus urbain. Cette ombre portée est toutefois délicate à déterminer sans modélisation 3D du bâti et de l'aménagement urbain, ce qui est difficilement réalisable à l'échelle régionale (CEREMA 2014). Un autre moyen est présenté dans la partie portant sur l'amélioration de la méthode en page 27.

Des coefficients de masque ont été retenus par la CEREMA dans le cadre d'une étude de potentiel solaire sur toiture sur le département d'Ille-et-Vilaine. Ils ont été déterminés par analyse orthophoto sur plusieurs zones tests, ils sont réutilisés pour notre étude.

Type de bâtiment	Coefficient de masque	
	Terrasse	Inclinée
Activités Mixtes	0.75	0.75
Administratif	0.75	0.75
Agricole	0.9	0.9
Enseignement	0.75	0.5
Habitat collectif	0.75	0.5
Habitat individuel	0.75	0.5
Habitat Mixte	0.75	0.5
Industrie	0.75	0.75
Santé	0.75	0.75
Sport, culture et loisirs	0.75	0.75
Tertiaire	0.75	0.75

Tableau 14 : Coefficient de masque selon le type de bâtiment (source : CEREMA, 2014)

e. Calcul de l'orientation des toitures

L'orientation des toitures est un paramètre déterminant pour estimer la production de panneaux solaire (Cf page 7) notamment pour les toitures avec surfaces inclinées. Dans le cas d'une toiture terrasse, moyennant l'utilisation de supports réglables, l'installation de panneaux est possible quelle que soit l'orientation de la toiture.

Dans le but d'avoir une production optimale, il est conseillé d'orienter les panneaux au sud. Il s'agit de l'exposition qui reçoit le plus d'énergie solaire au cours d'une même journée, quelle que soit la saison. Les valeurs des angles jugés bien orientées sont comprises entre [45 ;135°] et [225 ;315°] par rapport au sud. Toutefois, dans le cadre de cette étude, toutes les orientations ont été prises en compte. En effet, certaines toitures pourraient compenser leur mauvaise orientation par une plus grande surface de toiture. La montée en puissance des rendements des panneaux solaires pourrait aussi venir amortir les pertes dues à l'orientation et permettre de répondre aux besoins en énergie du bâtiment sur lequel ils sont installés.

³ <https://www.construiesamaison.com/construire/choisir-sa-region/champagne-ardenne-des-maisons-pas-si-classiques/a19206> ; <https://www.vacances-alsace.com/immobilier-en-alsace/quelle-pente-ont-les-toits-dalsace/>

Pour déterminer l'orientation des toitures, j'ai repris et adapté une fonction sous PostGis réalisée par Lig'Air. Cette fonction s'inspire de la méthode définie par le CEREMA dans l'étude du potentiel photovoltaïque du département d'Ille-et-Vilaine. Le script figure en annexe (Tableau 26).

La fonction crée le plus petit rectangle qui enveloppe l'entité représentant un bâtiment. Elle renvoie ensuite la valeur de l'angle de la plus grande longueur du polygone selon un axe Nord-Sud. La Figure 14 fournit une illustration des opérations réalisées par la fonction. L'hypothèse prise par la méthode est de considérer que le plus grand côté d'un bâtiment est parallèle à son faîtage⁴.



Figure 14 : Illustration des opérations géométriques réalisées par la fonction permettant de déterminer l'orientation des toitures des bâtiments (source : DDTM 2018)

Deux limites à cette méthode sont toutefois à considérer :

- certains bâtiments peuvent ne pas avoir leur orientation bien calculée en raison de leur forme géométrique complexe.
- l'hypothèse de dire que la plus grand segment du polygone formé par l'enveloppe est parallèle au faîtage n'est pas tout le temps vrai (Cf résultats de calcul d'orientation page 9).

f. Identification des contraintes réglementaires et patrimoniales

L'installation de panneaux solaires sur toitures doit tenir compte des contraintes réglementaires de protection du bâti, qui discriminent des zones plus ou moins favorables aux équipements solaires. Les secteurs de protection

⁴ Le faîtage est la ligne haute horizontale qui recouvre la toiture d'un bâtiment.

du patrimoine bâti peuvent être classés selon plusieurs niveaux d'enjeux comme illustré en annexe Figure 42. Seuls les bâtiments localisés dans les zones à enjeux réhabilitaires (secteurs sauvegardés) ont été exclus de l'étude. A l'échelle de la région Grand Est, cela représente environ 4% des surfaces de toiture.

g. Calcul gisement solaire sur toiture

Le calcul du gisement solaire annuel sur toiture peut être calculé via la formule suivante :

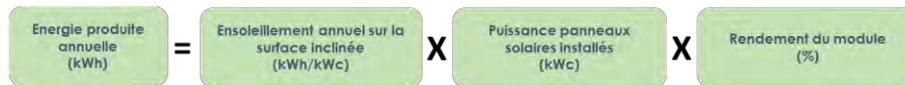


Figure 15 : Formule pour calculer l'énergie produite par une installation photovoltaïque sur toiture

▪ **Ensoleillement**

Le rayonnement solaire reçu sur une surface varie au cours du temps en fonction de la position du Soleil et de la couverture nuageuse.

L'entreprise Solargis met à disposition sur son site internet des données sur le potentiel annuel et journalier de production d'électricité via des panneaux solaires exprimée en kilowatt heures (kWh) pour 1 kilowatt crête (kWc) sur la France entière et sur la période 1994-2018⁵. Elles ont été produites en collaboration avec The World Bank qui a travaillé sur la publication d'un atlas solaire mondiale. Les données sont calculées à partir d'un algorithme de Solargis pour des panneaux solaires cristallin au sol dans des conditions optimales. Les calculs prennent en compte l'irradiation solaire, la température de l'air et l'occupation du sol pour simuler l'énergie converti et perdues par les modules photovoltaïques et les autres composants. Les pertes dues à la poussière et la saleté sont estimées à 3.5%. Les pertes cumulées (réflectivité entre panneaux, faible éclairage, onduleur, câble, transformateur, etc.) sont considérées à 7.5%.

Les données sont calculées avec des données atmosphériques et satellitaire avec un pas de temps de 10 min, 15min et 30 min, et à une résolution nominale de 1 km.

▪ **Puissance des panneaux solaires installés**

Au départ ma méthode de calcul de potentiel consistait à installer autant de m² de panneaux qu'il y a de surface de toiture disponible. Toutefois, dans la réalité, la technologie installée sur les toitures est fortement conditionnée par la prime d'investissement dont il est possible de bénéficier et qui est fonction de la puissance de l'installation. C'est pourquoi, j'ai réalisé des traitements pour tenir des comptes des différents tarifs d'achat. Pour ce faire, trois éléments m'ont été nécessaires :

- la surface de toiture disponible pour l'installation de panneaux photovoltaïques de chaque bâtiment
- la puissance installée disponible pour l'installation de panneaux photovoltaïques de chaque bâtiment résultante de la surface de toiture disponible
- les montants des primes par type d'installation

○ Surface de toiture disponible

Pour rappel, les BD TOPO et OSM donne des surfaces planes qui correspondent aux emprises des bâtiments au sol. L'hypothèse d'assimiler les surfaces planes aux surfaces de toitures donne une valeur assez exacte des surfaces de toitures terrasses, mais sous-estime la surface réelle des toitures inclinées. Par exemple, pour une pente de toit de 45°, la surface de toit est environ d'un tiers supérieur à sa projection en plan.

⁵ <https://solargis.com/maps-and-gis-data/tech-specs>

La surface d'une toiture est calculable grâce à la formule suivante :

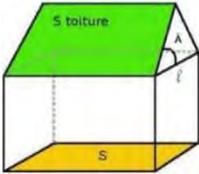
$$\text{Stoiture} = \frac{S}{l} * \frac{l}{2 * \cos A} = \frac{S}{2} * 1,1223 \approx S * 0,6$$


Figure 16: Formule pour calculer la surface d'une toiture inclinée (DDTM 2018)

avec S : Surface du bâtiment au sol
 A : angle d'inclinaison de la toiture
 l : largeur de la toiture

Pour une pente de toiture en moyenne de 35°, le coefficient à appliquer pour récupérer la surface réelle des toitures inclinées est de 0.6 en considérant l'installation de panneaux sur un seul pan.

La surface disponible d'une toiture terrasse est déterminée à partir de la formule suivante (à multiplier par 0.6 pour une toiture inclinée) :

$$\text{Surface de toiture disponible (m}^2\text{)} = \text{Surface de toiture brute (m}^2\text{)} \times \text{Coefficient de masque (\%)}$$

Figure 17: Formule pour calculer la surface de toiture disponible pour l'installation de panneaux photovoltaïques

- Puissance panneaux photovoltaïques disponible

La puissance considérée est celle d'un panneau monocristallin. Ce sont les panneaux les plus présents sur le marché et bénéficient d'un meilleur rendement. La puissance nominale d'une installation photovoltaïque monocristallin est de 300 Wc pour une surface de panneaux de 1.7 m² en moyenne, soit un ratio puissance surface d'environ 175 Wc/m² pour un rendement moyen de 20% (Cf Tableau 1).

- Tarifs d'achats par puissance d'installation

Prix/kWc	Puissance de l'installation en kWc	Montant de la prime en euro
390	≤ 3	1 170
290	≤ 6	1 740
290	≤ 9	2 610
180	≤ 36	6 480
90	≤ 100	9 000

Figure 18 : Prime à l'investissement par rapport à la puissance installée pour de la vente partielle du 1^{er} juillet au 30 septembre 2020 (source : picbleu.fr)

Dans le but de maximiser le montant de la prime à l'installation de panneaux photovoltaïques, les étapes de traitement ont été les suivantes :

- calcul du montant de la prime de chaque bâtiment en fonction de l'intervalle de puissance dans lequel il est situé.
- le montant de la prime pour les bâtiments disposant d'une puissance disponible supérieure à 100 kWc est égale à la prime pour une installation à 100 kWc, soit 9 000 euros. Les installations au-dessus de cette puissance ne bénéficient pas de prime particulière ; on privilégiera alors une installation à 100 kWc.
- pour chaque bâtiment, j'ai comparé la prime calculée avec celle qu'il pourrait avoir avec une installation type et bénéficiant d'une puissance moindre :
 - si le montant de la prime de l'installation type est supérieur à celui calculée alors c'est la puissance de l'installation type qui est retenue pour le bâtiment ;
 - s'il n'y a aucune installation type dont le montant de la prime est supérieur à celui calculé alors c'est la puissance de l'installation disponible qui est retenue pour le bâtiment.

D. Analyse des résultats et pistes d'amélioration

a. Résultats

Le potentiel de production d'électricité à partir de panneaux solaires sur toiture est évalué à environ 7 400 GWh par an sur l'ensemble de la région Grand Est. Les bâtiments de catégorie habitat représentent 58% du gisement total, suivi des bâtiments industriels (13%), des bâtiments à activités mixtes (10%) et les bâtiments agricoles (10%).

Type de bâtiments	Potentiel de production en GWh	Part de la production totale
Activités Mixtes	731	10%
Administratif	59	1%
Agricole	712	10%
Enseignement	160	2%
Habitat collectif	561	8%
Habitat individuel	2 557	35%
Habitat Mixte	1 124	15%
Industrie	928	13%
Santé	58	1%
Sport, culture et loisirs	104	1%
Tertiaire	405	5%
Total	7 399	100%

Tableau 15: Potentiel de production par type de bâtiments en région Grand Est

Les potentiels de production d'énergie solaire sur toitures sont principalement localisés dans les centre-urbains du Grand Est en raison des fortes densités de leurs habitations. L'Eurométropole de Strasbourg est l'EPCI qui bénéficie du gisement le plus important avec 364 GWh, soit 5% du gisement total du Grand Est, suivi du Grand Reims (328 GWh), de la Communauté Urbaine de Mulhouse (287 GWh), de la Métropole du Grand Nancy (189 GWh), et de Communauté d'Agglomération de Troyes-Champagne (187 GWh).

Nom EPCI	Potentiel de production solaire sur toiture en GWh	Part dans la production totale
Eurométropole de Strasbourg	364	5%
Grand Reims	328	4%
CU de Mulhouse	287	4%
Grand Nancy	189	3%
CA de Troyes-Champagne	187	3%
CA d'Épinal	181	2%
Metz Métropole	168	2%
Ardenne Métropole	130	2%
CA Colmar	121	2%
CA de Haguenau	119	2%
Autres	5 326	72%
Total	7 399	100%

Tableau 16: Potentiel de production PV des principaux EPCI

Potentiel de production d'électricité à partir de panneaux solaires en GWh sur les toitures des bâtiments de la région Grand Est par EPCI

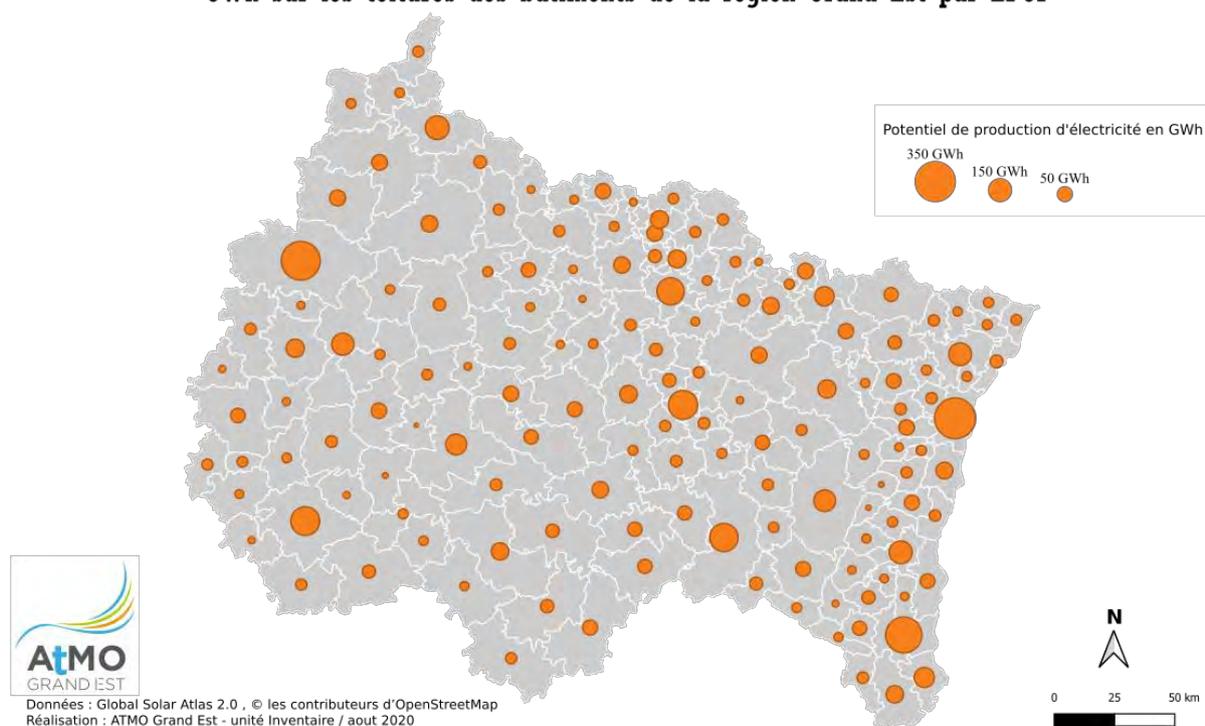


Tableau 17 : Carte des potentiels de productions d'énergie à partir de panneaux photovoltaïques sur toiture par EPCI en région Grand Est

b. Pistes d'amélioration

Durant le stage, j'ai recherché différentes manières d'évaluer le potentiel solaire PV ; certaines n'ont pas été retenues car elles demandaient des ressources trop importantes (temps de travail, volume de données à exploiter, etc.). J'ai tenu à les évoquer brièvement dans cette partie. Je proposerai aussi des pistes pour améliorer la méthode utilisée dans cette étude.

▪ Identification des pentes des toitures des bâtiments avec le MNE

Le Modèle Numérique d'Élévation est la représentation d'un ensemble de points 3D comprenant les éléments du terrain naturel mais aussi le sur-sol, c'est-à-dire la végétation et le bâti. Comme le Modèle Numérique de Terrain (MNT), ce fichier numérique contient les données d'altitude d'un territoire, sous forme de semis de points irréguliers, de grille de points à maille carrée ou triangulée. La classification semi-automatisée du nuage de points bruts en différentes catégories (sol, végétation, bâtiment, route, eau,...) permet la réalisation du MNE.

Le MNE constitue une piste intéressante pour déterminer l'inclinaison des toitures mais aussi la surface totale de toiture utile pour l'installation de panneaux PV.

Dans la perspective de réaliser des tests, j'ai fait une demande de données auprès de la région Grand Est qui dispose d'un MNE à 25 cm de résolution sur l'ensemble de la région. Les données étant extrêmement volumineuses (650 Go de données pour le seul département du Bas-Rhin), j'ai sélectionné des zones géographiques tests couvrant le PETR Cœur de Lorraine afin de comparer mes résultats à leur étude solaire PV déjà existante.

Les traitements pour exploiter les données MNE ont été les suivants et ont nécessité l'utilisation du logiciel FME et QGIS :

- Extraction des données + redimensionner de la résolution des MNE à 1 mètre [FME]
- Création d'un raster virtuel avec les tuiles MNE sur un territoire test [QGIS]
- Calcul de la pente avec la fonction « Slop » en pourcentage [QGIS]
- Utilisation de l'algorithme « Stat raster to polygon » qui permet d'extraire les pixels des MNE situés à l'intérieur des bâtiments de la zone test pour avoir la valeur moyenne des pentes des pixels [QGIS]

Il en résulte que les pentes moyennes calculées pour les bâtiments effectivement en terrasse ne sont pas égales à 0% comme on pourrait s'y attendre. Une vérification visuelle par analyse orthophoto montre que les toitures sont généralement plates en dessous d'une valeur moyenne de pente à 12%. Cette valeur élevée peut s'expliquer de plusieurs manières :

- présence d'encombrants sur les toitures (cheminés, barrières, etc.) ;
- les pixels pris pour déterminer la valeur moyenne peuvent ne pas être totalement situés dans les polygones des bâtiments. La valeur de ces pixels pourrait ainsi intégrer les pentes au sol.

Il est envisageable d'employer cette méthode afin de différencier une toiture terrasse d'une toiture inclinée en remplacement de la méthode d'identification par l'étude des matériaux de toitures ou par l'extrapolation de coefficients de répartition des types de toitures.

Dans le cadre de ce stage, cette méthode n'a pas été employée compte tenu du volume très important des données et des temps longs de traitement qu'impliquaient leur exploitation.

▪ **Détermination de l'ensoleillement et des effets de masque des toitures des bâtiments**

Nous l'avons vu précédemment, le potentiel solaire PV sur toitures dépend en majeure partie de la surface réellement disponible sur les bâtiments tenant compte des effets de masques.

Il existe plusieurs modules sur QGIS et ArcGIS pour faire des calculs d'ensoleillement à partir d'un MNE, on peut ainsi citer r.sun, r.sunmask de GRASS, le module « rayonnement solaire zonale » sur ArcGIS ou encore le plugin SEBE⁶.

En exploitant un de ces modules, l'idée était d'identifier les pixels situés en dessous d'un certain seuil de rayonnement solaire duquel l'installation de panneaux PV n'est pas rentable⁷ pour chacun des bâtiments. Puis, il était question de déduire de la surface totale de la toiture, les pixels en dessous de ce seuil et de déterminer ensuite la surface utile des toitures.

J'ai principalement testé le module r.sun de GRASS sur QGIS et celui proposé par ArcGIS. La zone de test consistait en une portion de territoire de 6 km². À la suite de mes différents tests, j'ai conclu que r.sun permet de calculer de manière rapide l'ensoleillement à une date et une heure donnée ($t < 5\text{min}$). Il est cependant inefficace lorsqu'il s'agit de réaliser des calculs sur l'année. Il est aussi complexe à prendre en main car il y a de nombreux paramètres à indiquer. De plus, il nécessite d'avoir au préalable trois couches en entrée (MNE, pentes, orientation) et donc autant de temps de traitement en plus. A contrario, le module proposé par ArcGIS est très simple à prendre en main et ne nécessite que le MNE en couche d'entrée. Le module réalise lui-même les calculs de pente et d'orientation. Cet avantage induit que les temps de calcul sont particulièrement longs que ce soit pour des calculs sur une journée ou une année entière ($t > 25\text{min}$). Les résultats sont équivalents ; B.Anastasiu, dans son étude sur l'identification des toitures à meilleur rendement solaire sur le territoire de la communauté des communes de Sauer-Pechelbronn, indique toutefois que le module r.sun est plus cohérent avec les données nationales sur l'ensoleillement. C'est donc ce dernier qu'il faudrait privilégier pour l'étude de potentiel solaire PV.

Les temps de traitement excessivement longs n'ont pas permis de conserver cette solution pour étudier l'ensoleillement et les effets de masque sur les bâtiments du territoire du Grand Est.

▪ **Calcul des ratios de répartition des types de toitures (terrasses/inclinées)**

Pour rappel, le calcul du gisement solaire PV sur toitures est différent selon que l'on est affaire à une toiture en terrasse ou inclinée. Faute de données, j'ai déterminé des coefficients de répartition entre toitures terrasses/inclinées par type de bâtiments en prenant aléatoirement 100 bâtiments de chaque type sur l'ensemble du territoire du Grand Est. Cet échantillon est très faible compte tenu de l'étendue du territoire étudié. De plus, l'architecture des bâtiments n'est pas uniforme d'un département à l'autre. Afin que les coefficients soient davantage représentatifs des territoires, il serait envisageable de déterminer des coefficients sur différentes zones géographiques (par ancienne région ou département) voire différents milieux (urbain, rural, péri-urbain, etc.). Cette tâche peut toutefois s'avérer énergivore et rébarbative. Il pourrait alors être envisagé de sélectionner des zones représentatives du territoire du Grand Est et d'utiliser la méthode d'identification des toitures via le MNE sur ces zones pour dégager des coefficients. Une vérification visuelle serait tout de même nécessaire pour valider les données.

⁶ <https://umep-docs.readthedocs.io/projects/tutorial/en/latest/Tutorials/SEBE.html>

⁷ habituellement 900 kWh/h

IV. Etude du potentiel de développement éolien dans le Grand Est

1. L'énergie éolienne au Grand Est

La région Grand Est constitue la 2^{ème} région de France en termes de puissance installée et de production d'énergie à partir d'éoliennes. En 2018, son total de puissance raccordée était d'environ 3 300 MW, soit 22% de la puissance installée en France métropolitaine (source : DREAL Grand Est), pour une production d'environ 6 300 GWh. Les départements de la Marne (850 MWh), de l'Aube (800 MWh) et de la Meuse (470 MWh) disposent des principales installations sur leur territoire.

Production éolien en région Grand Est par commune en 2018

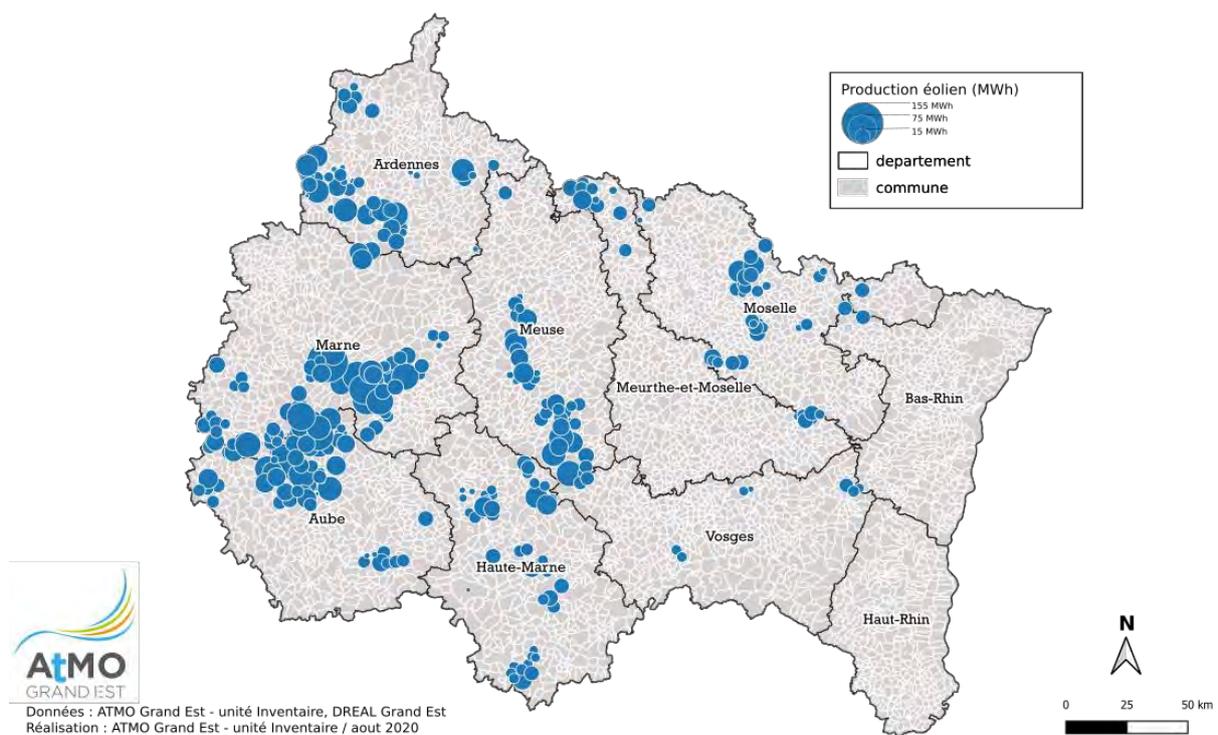


Figure 19 : Carte de la production d'énergie à partir des parcs éoliens en région Grand par commune en 2018

Dans le SRADDET du Grand Est, les acteurs du territoire définissent l'éolien comme une véritable force pour la région d'un point de vue énergétique dans la mesure où la production à partir d'éoliennes est prévisible. De plus, grâce à l'éolien, il est possible de bénéficier d'une production accentuée en hiver par vents plus forts, permettant de répondre aux pics de demande d'énergie.

La consolidation de la filière éolienne constitue un axe stratégique fort pour le territoire régional, elle formerait la troisième filière de production d'énergie renouvelable en 2050, avec pour ambition de multiplier par cinq la production actuelle.

Toutefois, le développement de la filière est aujourd'hui freiné par l'acceptabilité citoyenne des parcs éoliens qui impactent l'environnement paysager et sonore.

2. L'étude du potentiel éolien, de quoi parle-t-on ?

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. D'un point de vue physique, le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pressions atmosphériques différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent⁸. En effet, lorsque le vent se met à souffler, les forces qui s'appliquent sur les pales des hélices induisent la mise en rotation d'un rotor. L'énergie électrique ainsi produite peut être distribuée sur le réseau électrique grâce à un transformateur.

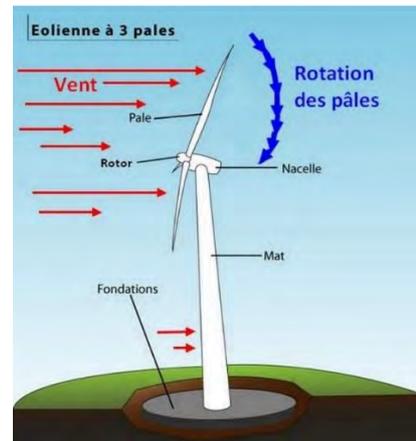


Figure 20 : Fonctionnement d'une éolienne
(source : <http://college.lutterbach.free.fr/>)

3. Méthodologie utilisée pour évaluer le potentiel éolien

La loi du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement (dite « Loi Grenelle 2 ») prévoyait l'élaboration d'un Schéma Régional du Climat, de l'Air et de l'Energie (SRCAE) par l'État et le Conseil Régional. Un schéma régional éolien (SRE), annexé au SRCAE, définissait les parties du territoire favorables au développement de l'énergie éolienne. Ces schémas devaient contribuer à la planification d'un développement harmonieux de l'énergie éolienne, prenant en considération les différents enjeux du territoire.

La région Grand Est, constituée des anciennes régions d'Alsace, de Lorraine et de Champagne Ardenne, dispose de trois SRE, réalisés indépendamment entre 2011 et 2012.

Dans chacun des documents sont recensées :

- Les contraintes s'opposant strictement à l'implantation d'éoliennes du fait de la réglementation ou bien de contraintes physiques (pentes fortes, zones urbaines, etc.).
- Les contraintes ne s'opposant pas strictement à l'implantation d'éoliennes mais pouvant entraîner la définition de zones incompatibles en fonction des orientations stratégiques de chacune des anciennes régions. Les contraintes ainsi étudiées sont alors classées par niveau d'enjeu : moyen, fort, incompatible.

Une de mes premières tâches a ainsi consisté à analyser ces trois documents afin d'en dégager les méthodologies et données employées. L'intérêt était en particulier d'identifier les éléments pris en compte pour définir les zones favorables à l'éolien.

Pour ce faire, j'ai réalisé, pour chacun des documents, un schéma synthétique qu'il est possible de retrouver en annexe du rapport (Figure 37, Figure 38, Figure 39).

J'ai aussi listé dans un tableau les différentes contraintes étudiées, le niveau d'enjeu qui leur a été attribué, une note explicative justifiant l'enjeu, les données utilisées ainsi que leurs fournisseurs. Un extrait de ce tableau figure en annexe (Figure 40).

C'est sur la base de ce tableau que j'ai échangé avec les services de la DREAL Grand Est, principaux détenteurs des données nécessaires pour l'étude de l'éolien. C'est en effet les DREAL qui ont en charge la validation et le suivi des projets de parcs éoliens. Ils possèdent donc la plupart des données relatives à ce sujet telles que les données brutes qui ont permis de réaliser les SRE ou encore certains périmètres de protections en vigueur qui restreint l'implantation d'éoliennes.

Afin d'évaluer le gisement, j'ai réétudié, mis à jour et parfois repris telles quelles les données sur les contraintes prises en compte dans les SRE. Toutefois, dans le but de simplifier le travail et de ne conserver que l'essentiel, seules les zones avec des contraintes s'opposant strictement à l'implantation d'éoliennes ainsi que les zones jugées incompatibles ont été retenues pour analyser le potentiel éolien. Ne figurent donc pas les zones sous contraintes présentant des niveaux d'enjeux moyens ou forts pour le développement de l'éolien. Ceci implique que les zones à potentiel éolien définies à la fin de l'étude ne peuvent pas être considérées comme des zones exempts

d'enjeux locaux. Des études techniques et d'impact environnementaux sont nécessaires pour valider avec certitude la faisabilité de l'implantation d'éoliennes sur les zones identifiées.

La Figure 21 ci-après récapitule les éléments de contraintes prises en compte ainsi que leur nature.

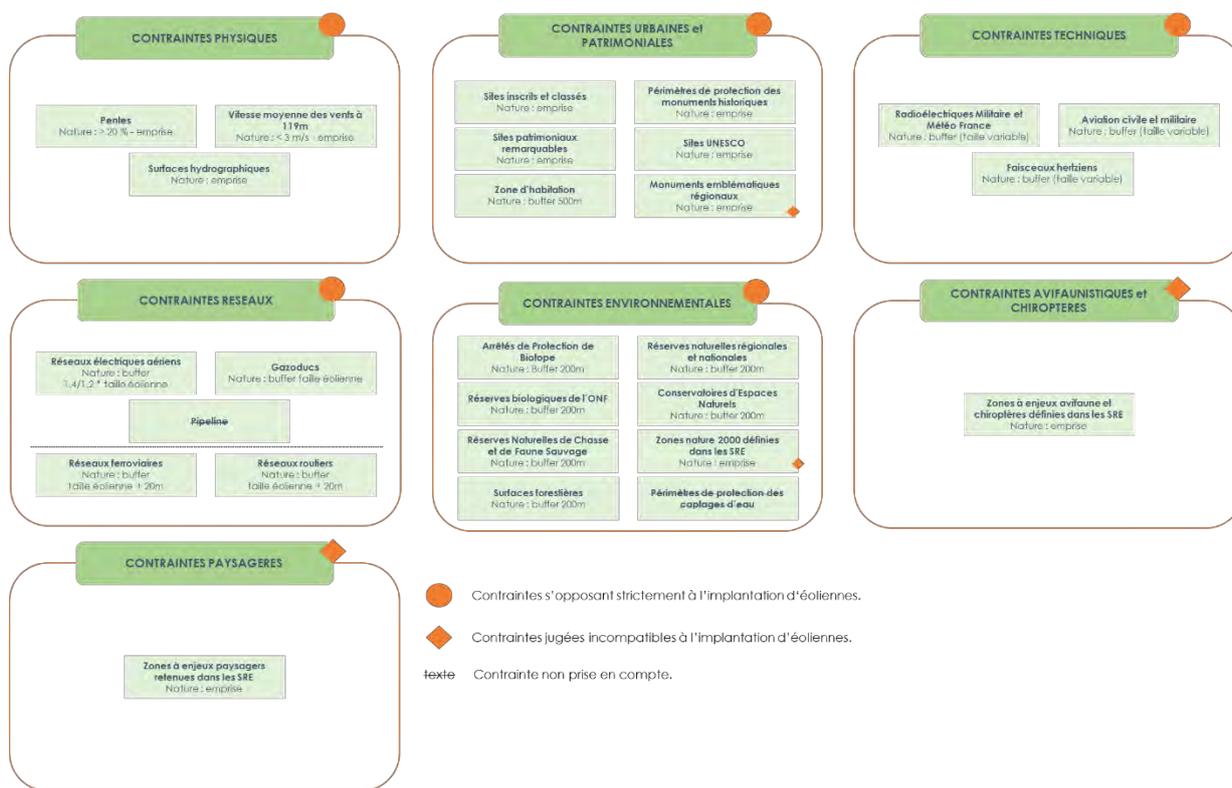


Figure 21: Liste des contraintes prises en compte pour l'étude du gisement éolien

4. Les contraintes pour évaluer le potentiel éolien

A. Les contraintes physiques

a. Gisement de vent

Le gisement de vent peut être qualifié à l'aide des vitesses moyennes des vents sur une voire plusieurs années. ATMO Grand Est bénéficie d'un partenariat privilégié avec Météo France qui permet d'obtenir des données météorologiques plus facilement. Les données qui leur sont fournies sont celles de référence, corrigées par la mesure aux stations et disponibles sur une large profondeur historique. Toutefois, dans le cadre de cette étude, la livraison des données impliquait un délai non négligeable, associé à un coût. C'est pourquoi, l'utilisation d'autres données produites en interne par ATMO Grand Est a été privilégiées.

Depuis une dizaine d'années, ATMO Grand Est dispose d'une plateforme de modélisation interrégionale, nommée PREV'EST, qui permet de simuler la qualité de l'air sur un large périmètre. Des données météo dont la vitesse moyenne des vents sont ainsi modélisées et intégrées sur la plateforme à partir du modèle Weather Research and Forecasting⁹ (WRF). Les services techniques d'ATMO Grand Est m'ont confirmé la bonne qualité des données issues de ce modèle pour l'étude de la vitesse des vents. Les données produites tiennent compte de l'occupation des sols mais ne sont pas corrigées par la mesure. Des écarts plus ou moins importants peuvent ainsi exister entre les valeurs modélisées par WRF et celles mesurées, la Figure 41 en annexe en donne une illustration.

Une moyenne a été faite sur les quatre années d'historiques en possession d'ATMO Grand Est (2016-2019) afin de tenir des variations annuelles et de manière à lisser les écarts entre les valeurs mesurées et calculées. Les données transmises par l'Unité Modélisation et Spatialisation ont été construites sous forme de raster avec une résolution de 3 km à deux altitudes différentes, estimées à environ 33 mètres et 119 mètres. Les hauteurs indiquées

⁹ Modèle informatique de prévision numérique du temps pour effectuer des prévisions météorologiques, conçu à la suite d'un partenariat de recherche entre le NOAA, le NCAR et des universités aux Etats-Unis.

sont des estimations réalisées à partir des niveaux de pression. Ces hauteurs correspondent à une estimation « large » sur l'ensemble du Grand Est.

Dans un premier temps, j'ai tenu à obtenir la vitesse des vents à la hauteur correspondante aux éoliennes que j'étudiais (100 mètres de hauteur correspondant à la hauteur sol-rotor). Les données étant fournies à des altitudes de 33 mètres et de 119 mètres, il me fallait trouver un moyen de les convertir à l'altitude que je souhaitais. J'ai ainsi découvert qu'il était possible, via des formules mathématiques, de convertir une vitesse de vent de référence à une hauteur voulue¹⁰. J'ai réalisé les calculs à partir des deux jeux de données qu'on m'avait transmis et les résultats étaient assez différents selon qu'on utilisait les vitesses de vent à 33 mètres ou 119 mètres. Il y avait un différentiel de 2 à 4 m/s suivant le lieu du territoire régional étudié. Quel jeu de données prendre pour évaluer la vitesse des vents à 100 mètres de hauteur compte tenu de ces résultats ?

J'ai échangé avec les agents de l'unité Modélisation sur mes résultats et ils m'ont informé que les formules utilisées peuvent se révéler inadaptées aux données d'entrée ou bien apporter davantage d'erreur. De plus, les hauteurs des vitesses des vents qu'ils m'avaient fournies étant des valeurs estimées, pouvaient très bien correspondre à des altitudes de 100 mètres à certains endroits du Grand Est. D'autre part, une éolienne prend un vent sur une longueur de pôle importante et n'est donc pas strictement dépendante aux vents situés à une hauteur précise. Fort de ces échanges et sur les conseils de l'unité Modélisation, j'ai décidé de directement utiliser les données sur les vitesses de vent à 119 mètres de hauteur pour déterminer le gisement.

Comme vu précédemment, l'énergie produite à partir d'une éolienne dépend de la vitesse des vents mais aussi de leur fréquence. Dans l'étude des contraintes à l'installation de parcs éoliens, il s'agit alors d'exclure des zones favorables celles où la vitesse moyenne des vents est en dessous d'un seuil acceptable pour rentabiliser une installation. Dès lors, quel seuil prendre ?

Si on s'intéresse au mode de fonctionnement d'une éolienne, il est possible de distinguer 4 phases directement liées à la vitesse du vent. Selon le type de turbine de l'éolienne, ces plages peuvent avoir une taille différente. Sur la figure suivante, on peut voir la courbe de fonctionnement générale d'une éolienne.

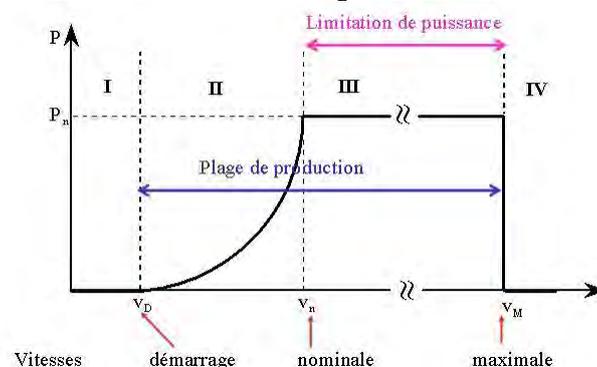


Figure 22 : Plages d'exploitation d'une turbine éolienne (axe horizontal) en fonction de la vitesse du vent (Source : <https://www.encyclopedie-energie.org>)

- Phase I : la vitesse du vent ne permet pas la rotation de la turbine. Les pâles de l'éolienne peuvent tourner mais la puissance à capter est trop faible. V_d , la vitesse de démarrage, est de l'ordre de 3 m/s à 5 m/s.
- Phase II : le vent atteint une vitesse permettant à l'éolienne de démarrer et de produire de l'énergie. Elle atteint sa puissance maximale vers 15 m/s qui est sa vitesse nominale V_n .
- Phase III : la vitesse du vent est supérieure à la vitesse nominale de l'éolienne et inférieure à la vitesse maximale acceptable par l'éolienne. La puissance nominale est ici atteinte et reste constante. Elle est souvent égale à la puissance électrique maximale qui peut être extraite de l'éolienne.
- Phase IV : la vitesse est au-delà de celle acceptée par l'éolienne, V_m est de l'ordre de 25 m/s. La tenue mécanique de ces divers composants n'est plus assurée (ou simplement prévue). L'éolienne est mise à l'arrêt pour préserver son intégrité et sa puissance devient nulle.

Dans le SRE d'Alsace le seuil minimal de vitesse de vent considéré était de 4,5 m/s pour une éolienne de 100 mètres de hauteur, conformément aux critères définis pour la mise en place des Zones de Développement Eolien¹¹ et supprimées par la loi n° 2013-312 du 15 avril 2013. A l'époque, ce seuil représentait la vitesse minimale du vent

¹⁰ <https://energieplus-lesite.be/theories/eolien8/ressources-du-vent-et-eoliennes/>

¹¹ <https://www.lemoniteur.fr/article/dispositions-relatives-a-la-creation-des-zones-de-developpement-de-l-eolien-terrestre.1042994> (consulté le 22/07/2020)

permettant d'assurer la rentabilité des projets éoliens. L'évolution des technologies a rendu possible de rapidement dépasser ce seuil et n'est aujourd'hui plus valable.

Les SRE de Lorraine et de Champagne-Ardenne ne définissent pas de seuil minimal. Le SRE Champagne-Ardenne précise que « les technologies actuelles permettent un développement sur des zones présentant un potentiel éolien faible. Aujourd'hui, le critère gisement éolien n'est pas l'élément le plus discriminant pour le développement de l'éolien ».

Selon plusieurs études techniques, la vitesse minimale de démarrage d'une éolienne de 100 mètres est d'environ 3 m/s (DDT Yonne, 04/06/2018).

Compte tenu de l'ensemble de ces éléments, le seuil retenu est de 3 m/s. Les zones ne respectant pas ce critère ne pourront donc pas être considérées comme des zones favorables à l'implantation d'éoliennes.

Vitesse moyenne des vents à 110 mètres de hauteur en région Grand Est sur la période 2016 - 2019

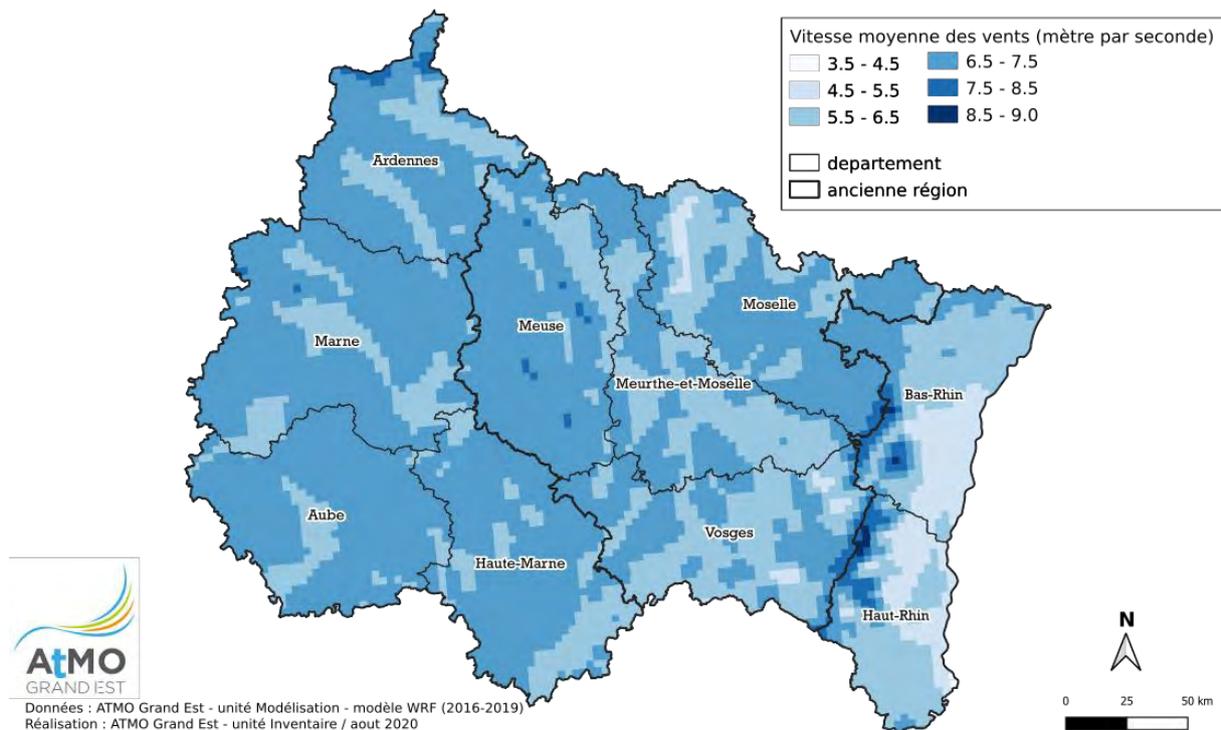


Figure 23 : Carte des vents à 110 mètres de hauteur en région Grand Est sur la période 2016-2019 (source ATMO Grand Est)

Dans le Grand Est, il n'y a aucune zone en dessous d'une vitesse moyenne de vent de 3 m/s. Près de la totalité du territoire bénéficie de vents dotés d'une vitesse moyenne estimée entre 4.5 et 8.5 m/s. Dans le détail, un peu plus de 60% du territoire bénéficie d'une vitesse moyenne comprise entre 6.5 et 7.5 m/s, notamment en Champagne Ardenne, et un tiers entre 5.5 et 6.5 m/s.

b. Les pentes

La pente du terrain augmente les coûts d'implantation, particulièrement si la pente est élevée. Au niveau ingénierie, plus la pente est forte et plus l'implantation de l'éolienne est compliquée sans compter la phase de construction pour laquelle la machinerie est indispensable.

Il est difficile de trouver dans la littérature française des indications quant aux limites de pente qui seraient favorables ou non à l'installation d'éoliennes. Plusieurs seuils sont habituellement définis avec des niveaux de contrainte (ex faible en dessous d'une pente à 10%, fort entre 30 et 40%) qui rendent compte d'un contexte local. Au-delà d'une pente à 40% l'installation d'un parc n'est jamais envisagée.

Selon une étude britannique, basée sur le retour d'expérience de quatre promoteurs, une pente au-dessus de 10% rendrait difficile l'installation des éoliennes à cause d'une accessibilité limitée lors de la mise en place des composants des turbines (Rob van Haaren, 2011 ; B.Maingueneau, 2016).

Du côté des SRE, celui de l'Alsace intègre un seuil maximal de pente à 20% tandis que les autres SRE ne tiennent pas compte de ce critère.

L'analyse des pentes des terrains des projets de parcs éoliens passés, présents et en cours d'installation sur la région Grand Est peut nous fournir des indications quant aux limites de pente pour des projets techniquement faisables et économiquement viables. Les résultats de cette analyse figurent dans le Tableau 18.

On peut constater que la grande majorité des éoliennes sont implantées sur des terrains à faible niveau de pente, 78% des éoliennes sont ainsi situées sur des pentes inférieures à 5% et 98.5% à moins de 10% de pente. Les éoliennes restantes (<1%) sont implantées sur des pentes entre 10 et 20 %.

Pente (%)	Nombre d'éoliennes	Part d'éoliennes (%)
pente ≤ 5	2 670	78.1%
5 < pente ≤ 10	700	20.5%
10 < pente ≤ 15	47	1.4%
15 < pente ≤ 20	2	<1%

Tableau 18 : Part des éoliennes dans la région Grand Est en fonction de la pente des terrains (%) au 01/06/2020 (Sources : DREAL – BD ALTI 75m IGN)

Une pente de 20% a été choisie comme seuil maximal pour l'installation d'éoliennes compte tenu :

- de l'état actuel de l'éolien en région Grand Est : présence d'éoliennes entre 10 et 20% de pente, les terrains les plus favorables sont déjà occupés ce qui oblige les promoteurs d'envisager des terrains avec de plus fortes contraintes ;
- des possibles avancées techniques réduisant les coûts des installations.

Pentes supérieures à 20% en région Grand Est, contraintes physiques pour l'installation d'éoliennes

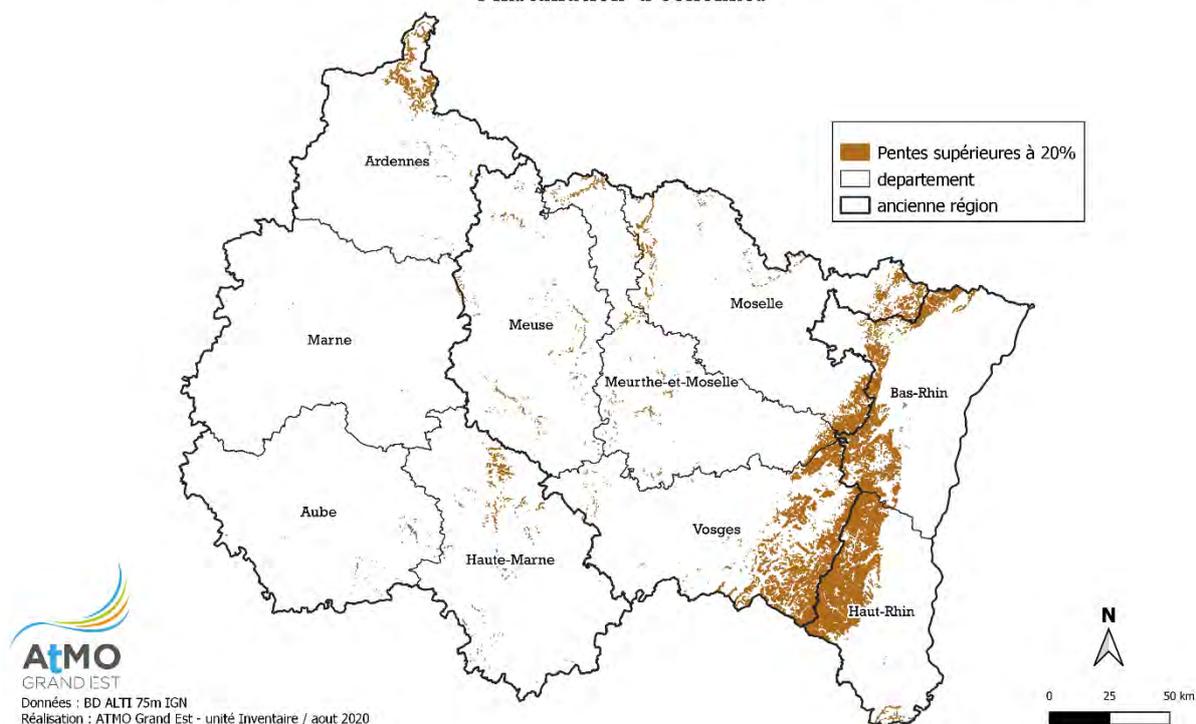


Figure 24 : Carte des pentes supérieures à 20% en région Grand Est - Contraintes physiques pour l'installation d'éoliennes (Source :BD ALTI 75m IGN)

c. Les surfaces en eau

Les surfaces en eau sont considérées comme des zones inconstructibles et correspondent dans l'étude aux emprises des plans d'eau de la BD TOPO de l'IGN. J'ai choisi d'utiliser ce jeu de données afin de correspondre aux données utilisées dans les schémas. Les surfaces en eau de la BD TOPO sont définies comme « une ou

plusieurs étendue(s) d'eau continentale de surface, d'origine naturelle ou anthropique, possédant un toponyme ou identifiée(s) par un code hydrographique. ».

Les SRE d'Alsace et de Lorraine définissent aussi les plans d'eau comme zones inconstructibles avec un critère de taille pour celui de la Lorraine (plans d'eau > 8ha). Le SRE de Champagne Ardenne ne tient pas compte de cette contrainte.

Les emprises de toutes les surfaces en eau sont ainsi exclues des zones favorables au développement éolien.

Surfaces en eau en région Grand Est, contraintes physiques pour l'installation d'éoliennes

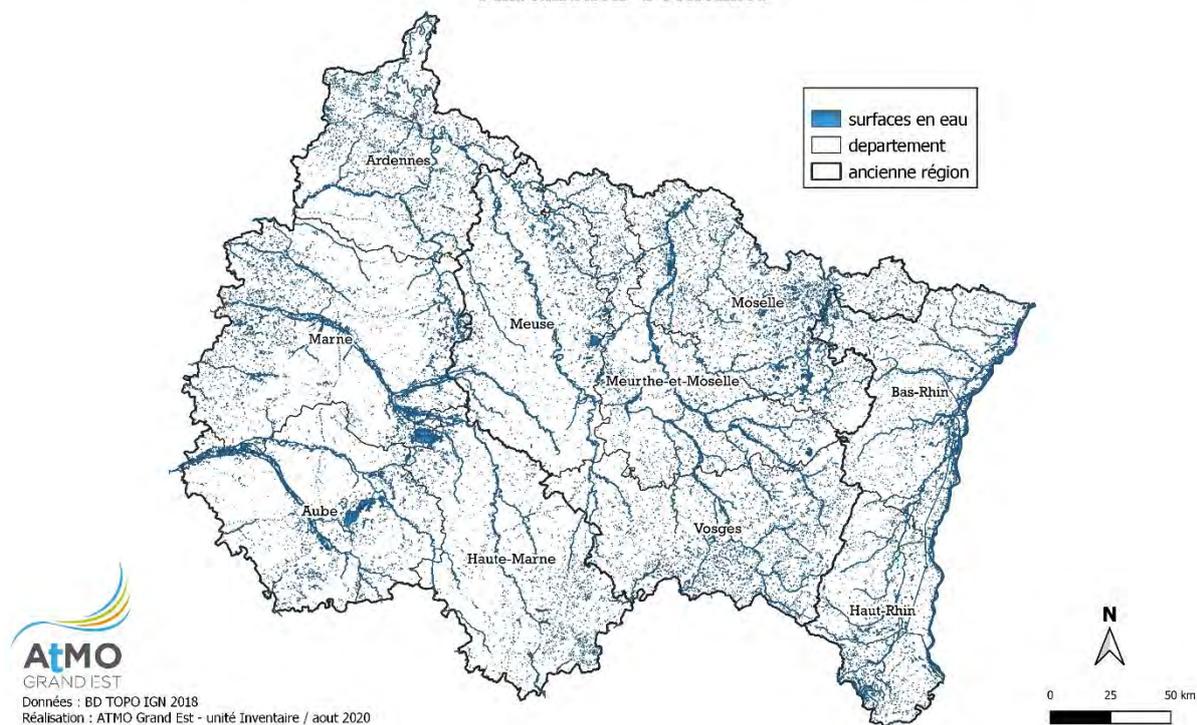


Figure 25 : Carte des surfaces en eau en région Grand Est - Contraintes physiques pour l'installation d'éoliennes (source : BD TOPO IGN 2018)

B. Les contraintes urbaines et patrimoniales

a. Les zones d'habitation

La Loi du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement dite Loi Grenelle 2, précise que l'éloignement des installations de parcs éoliens doit être à une distance de minimum 500 mètres par rapport aux constructions à usage d'habitation, aux immeubles habités et aux zones destinées à l'habitation définies dans les documents d'urbanisme en vigueur à la date de publication de la même loi.

Pour respecter cette réglementation, j'ai choisi d'utiliser la table « zone d'habitation » de la BD TOPO de l'IGN. Cette table est construite à partir d'un algorithme qui crée des buffers autour des bâtiments, avec une distance de 100 mètres pour les villes les plus importantes, et de 50 mètres sinon. A noter que les bâtiments de surface inférieure à 50 m² ne sont pas pris en compte. Les terrains de sport, cimetières, réservoirs et les ponts surfaciques sont pris en compte dans le calcul.

Pour faciliter les traitements, un buffer de 450 mètres a été ajouté à l'ensemble des zones d'habitation définies dans la BD TOPO. Ces zones exclusions sont donc un peu plus larges que ce qui est requis par la réglementation pour les grandes villes.

Quant aux zones d'habitation futures, elles n'ont pas pu être prises en compte faute de données.

Zones d'habitation exclues des zones favorables au développement de l'éolien en région Grand Est

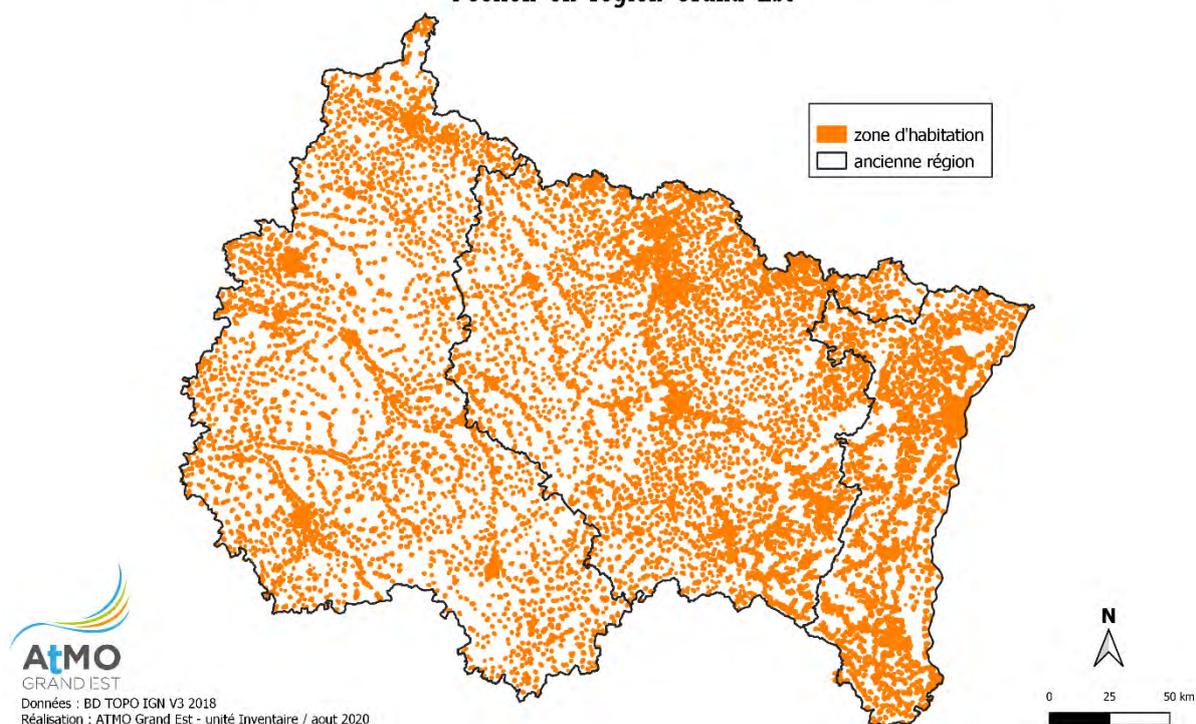


Figure 26 : Cartes des zones d'habitation exclus des zones favorables au développement de l'éolien en région Grand Est (BD TOPO IGN V3 2018)

b. Les sites inscrits et classés

La politique des sites a pour objectif de préserver les espaces de qualité et remarquables au plan paysager. Tous les travaux susceptibles de modifier l'état ou l'aspect des lieux d'un site sont soumis au contrôle du Ministre chargé des sites ou du Préfet du département.

Il existe deux niveaux de protection : l'inscription au titre des monuments naturels et des sites, et le classement au titre des monuments naturels et des sites. L'inscription et le classement sont régis par le code de l'environnement (loi du 2 mars 1930, articles L341-1 à 22). Les sites classés ne peuvent être ni détruits ni modifiés dans leur état ou dans leur aspect sauf autorisation spéciale.

Les sites inscrits et classés constituent donc bien des contraintes pour l'implantation d'éoliennes. Néanmoins, du fait de leur nature, l'insertion d'éoliennes dans leur périmètre est soumise à autorisation et y paraît difficilement réalisable. Les emprises des sites, transmises par la DREAL, sont donc exclues des zones favorables à l'implantation d'éoliennes comme c'était le cas dans les SRE.

c. Les périmètres de protection des monuments historiques

L'article L. 621-30 du code du patrimoine a institué le régime « des abords » qui vise à protéger les bâtiments qui forment avec un monument historique un ensemble cohérent ou qui sont susceptibles de contribuer à sa conservation ou à sa mise en valeur. La protection au titre des abords s'applique sur un périmètre délimité créé par décision administrative après enquête publique.

En l'absence de périmètre délimité, il est demandé que « la protection au titre des abords s'applique à tout immeuble, bâti ou non bâti, visible du monument historique ou visible en même temps que lui et situé à moins de cinq cents mètres de celui-ci ».

Le régime des abords n'existant pas à l'époque de la création des SRE, les monuments historiques étaient alors délimités par une zone de 500 mètres.

Ces dispositifs de protection sont donc exclus des zones favorables à l'éolien dont les périmètres sont disponibles sur le site du ministère de la culture.

d. Les monuments emblématiques régionaux

Lors de la construction des SRE, les acteurs des territoires ont choisi d'exclure certains monuments jugés emblématiques des zones favorables à l'éolien et qui ne bénéficiaient pas de protection réglementaire. Les zonages originels issues des travaux des schémas ont été repris pour l'étude.

SRE	Monuments emblématiques
Champagne Ardenne	Le site de Colombey-les-Deux-Eglises représente un site emblématique au niveau national, c'est à la fois un point de repère visible à distance et un belvédère sur le paysage. A ce titre, ce site fait l'objet d'une protection de 10 km vis-à-vis de l'éolien.
Alsace	Château du Haut Koenigsbourg, Cathédrale de Strasbourg, l'abbaye du Mont Saint Odile, Le Camp du Struthof, Neuf Brisach, Le champ de bataille de Hartmannswillerkopf, le centre urbain d'Altkirch, la Petite Pierre, le Château du Lichtenberg

Tableau 19 : Monuments emblématiques régionaux définis dans les SRE par les acteurs locaux

e. Les sites inscrits sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO

L'inscription d'un site au patrimoine mondial de l'UNESCO implique que les Etats aient l'obligation « d'assurer l'identification, la protection, la conservation, la mise en valeur et la transmission aux générations futures du patrimoine culturel et naturel visé » (Source : convention UNESCO).

Les sites inscrits au 1^{er} janvier 2018 au patrimoine mondial de l'UNESCO et leur délimitation correspondante figure dans le Tableau 20.

Nom du site UNESCO	Délimitation
Place Stanislas	régime « des abords »
Place de la Carrière	régime « des abords »
Place d'Alliance	régime « des abords »
Grande île	500 m
Cathédrale Notre-Dame	régime « des abords »
Ancienne abbaye Saint-Remi	régime « des abords »
Palais du Tau	zone d'habitation
Chemins de Saint-Jacques-de-Compostelle en France : Basilique Notre-Dame de l'Épine et Église Notre-Dame-en-Vaux à Châlons-en-Champagne	zone d'habitation
Fortifications de Vauban : Citadelle de Longwy et Neuf-Brisach	zone d'habitation
Coteaux, maisons et caves de Champagne	10 km
Site Le Corbusier	zone d'habitation
Neustadt : extension au quartier de la Neustadt du bien Strasbourg	zone d'habitation

Tableau 20 : Sites Unesco au 1^{er} janvier 2018 et leur délimitation pour l'implantation d'éoliennes (source : site du Ministère de la Culture)

Les sites UNESCO sont donc considérés comme incompatibles avec la définition de zones favorables à l'implantation d'éoliennes

Certains sites n'ont pas pu être délimités du fait de l'absence de données. Pour autant ils sont pris en compte de manière indirecte car ils sont tous situés en zone d'habitation et bénéficient donc d'une zone exclusion d'au moins 500 mètres.

En 2018, les communes détentrices de l'appellation « Coteaux, maisons et caves de Champagne » se sont engagées dans une charte éolienne à « limiter le développement de grands aménagements verticaux à proximité d'une zone d'engagement ». Deux zones sont identifiées et délimitent un périmètre de protection aux abords de cette zone :

- Une zone d'exclusion de 10 km : l'implantation de l'éolien est fortement déconseillée car générant un impact sur l'intégrité du bien inscrit.
- Une zone de vigilance de 20 km : la démonstration d'un effet acceptable des projets éoliens devra être faite, guidée par des préconisations d'implantation. Il est conseillé aux projets éoliens de répondre aux critères d'acceptabilité fixés par la charte éolienne.

Seul la zone d'exclusion de 10 km a été pris en compte dans l'étude du potentiel. Elle a été réalisée à partir des limites communales des communes concernées par la zone d'engagement.

f. Les sites patrimoniaux remarquables

Les sites patrimoniaux remarquables ont été créés par la loi du 7 juillet 2016 relative à la liberté de la création, à l'architecture et au patrimoine. Ils se substituent aux anciens dispositifs de protection :

- secteurs sauvegardés ;
- zones de protection du patrimoine architectural, urbain et paysager (ZPPAUP) ;
- aires de mise en valeur de l'architecture et du patrimoine (AVAP).

Ce dispositif a pour objectif de protéger et mettre en valeur le patrimoine architectural, urbain et paysager des territoires. Les sites patrimoniaux remarquables sont donc considérés comme incompatible avec la définition de zones favorables à l'implantation d'éoliennes.

La Figure 27 reprend l'ensemble des contraintes patrimoniales pour l'implantation d'éoliennes sur le territoire régional.

Ensemble des contraintes patrimoniales en région Grand Est pour l'implantation d'éoliennes

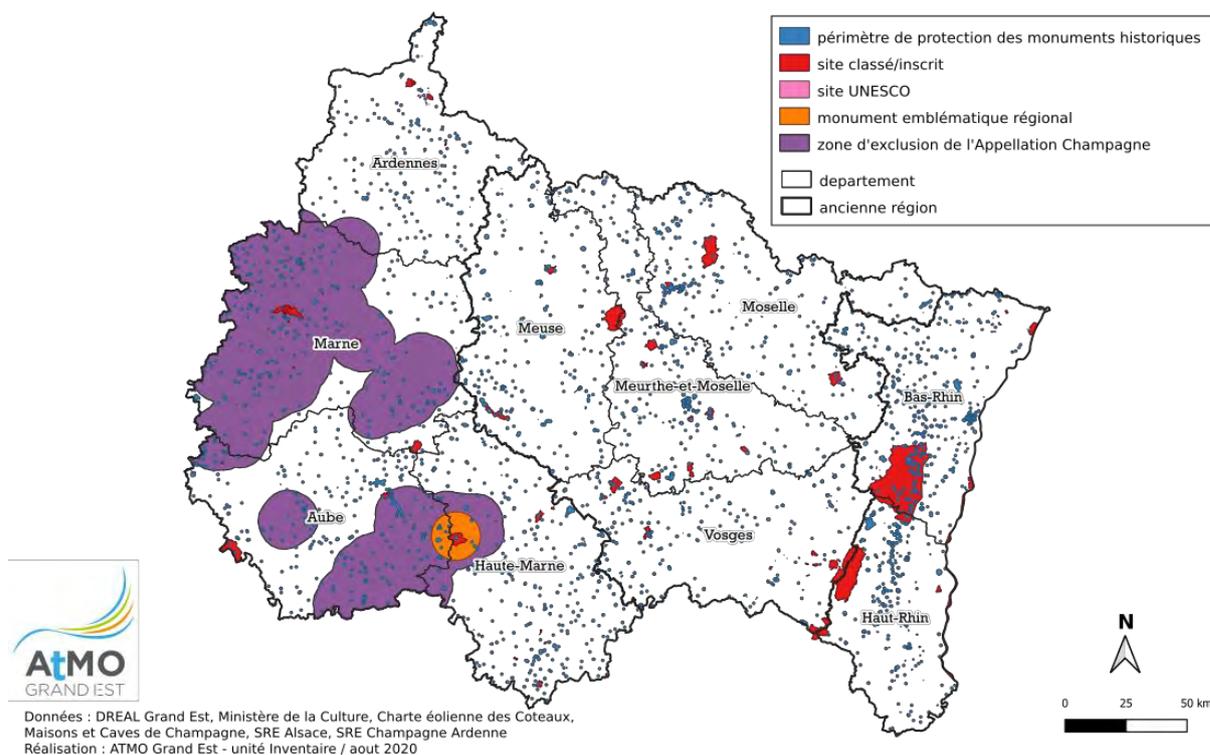


Figure 27 : Carte sur l'ensemble des contraintes patrimoniales en région Grand Est pour l'installation d'éoliennes.

C. Les contraintes techniques

Les contraintes techniques retenues pour l'évaluation du potentiel éolien proviennent des travaux des SRE. On distingue 4 types de servitudes :

- servitudes radioélectriques :
 - servitudes Météo France
 - les Plans de Servitudes Radioélectriques (protection contre les obstacles et les perturbations électromagnétiques)
 - les zones de protection radioélectriques de 5 km autour des radars
- servitudes aéronautiques
 - Plans de Servitudes Aéronautiques (servitudes de dégagement et servitudes de balisage)
 - zones interdites, réglementées et dangereuses de l'armée de l'air

- servitudes hertziennes
 - servitudes de protection contre les perturbations électromagnétiques ;
 - servitudes de protection contre les obstacles ;
 - servitudes de protection contre les obstacles pour une liaison hertzienne.

- servitudes liées aux espaces particuliers :
 - champs de tir
 - zone de parachutage
 - zone drone
 - zones d'interdiction de survol (centrales nucléaires)

Ensemble des contraintes techniques pour l'installation d'éoliennes en région Grand Est

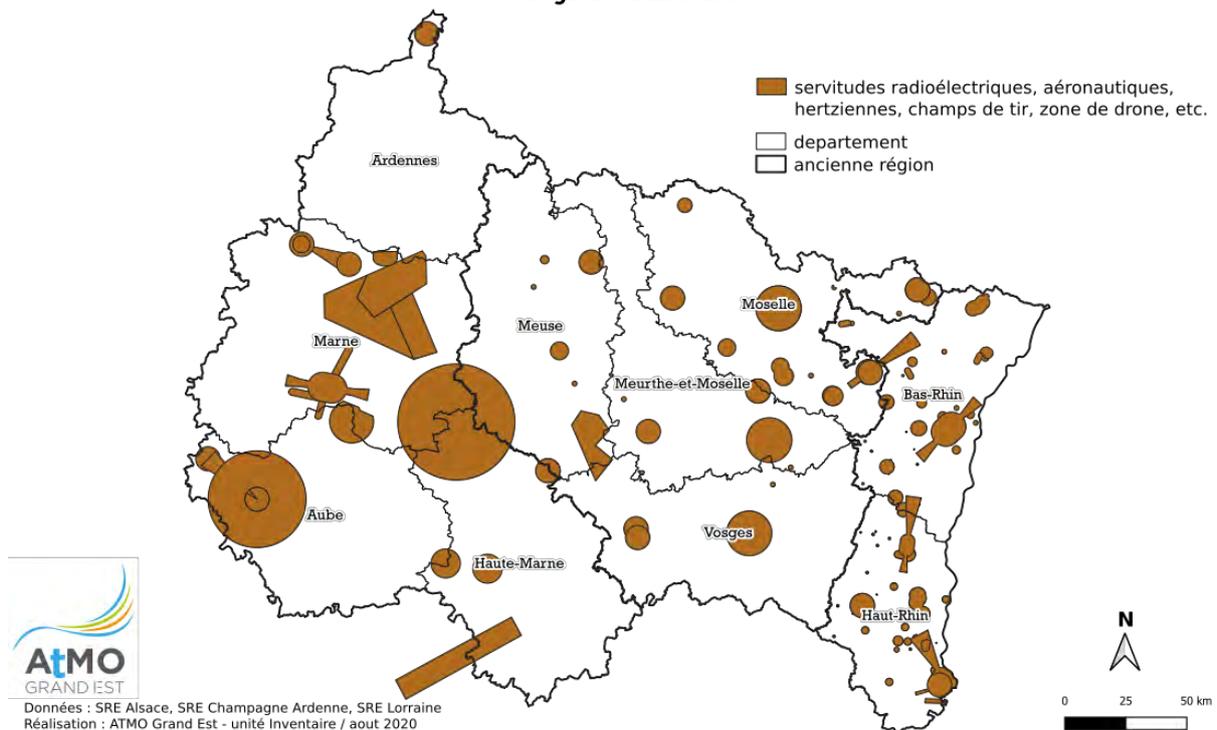


Figure 28 : Carte sur l'ensemble des contraintes techniques pour l'installation d'éoliennes en région Grand Est (source : SRE Alsace, Champagne Ardenne, Lorraine)

D. Les contraintes réseaux

a. Les réseaux de transport d'énergie

Les réseaux électriques :

L'arrêté interministériel du 17 mai 2001 fixant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire le transport et la distribution d'énergie électrique ne fixe pas expressément une distance minimale spécifique entre les éoliennes et les ouvrages électriques. Toutefois, si l'on se réfère à l'article 26 de cet arrêté relatif à la « distance aux arbres et obstacles divers » : la distance totale minimale ne doit pas être inférieure à 2 mètres lorsqu'il s'agit de lignes haute tension.

Dans un autre document relatif aux prescriptions réglementaires et techniques liées aux ouvrages de transport d'énergie électrique¹², le gestionnaire de réseau de transport français, RTE, préconise les distances de sécurité suivantes pour les réseaux de transport d'électricité HTB :

¹²<http://www.nord.gouv.fr/content/download/41720/287000/file/12%20-20Servitudes%20%C3%A9lectriques.pdf> - page 4 partie 5

- 1,4 x la hauteur maximale des éoliennes (pâles incluses) pour les réseaux 225 kV et 400 kV ;
- 1,2 x la hauteur maximale des éoliennes (pâles incluses) pour les réseaux 63 kV et 90 kV.

Le SRE d'Alsace a tenu compte d'une délimitation de 2 mètres par rapport aux réseaux électriques tandis qu'aucune délimitation n'a pas été prise en compte dans les autres schémas.

C'est sur la base des prescriptions de RTE qu'ont été définies les délimitations sur la base des emprises des lignes électriques contenues dans la BD TOPO.

Les réseaux de gaz

Dans un document officiel¹³, GRT gaz, gestionnaire des réseaux de gaz en France, spécifie que la réglementation prévoit que la distance qui doit séparer une éolienne d'une canalisation est environ deux fois supérieure à la hauteur de l'éolienne (qui équivaut à la hauteur cumulée du mat et d'une pale). Je n'ai pas retrouvé la réglementation en question, toutefois, cette indication peut prévaloir à titre de prescription.

Une longueur de 150 mètres a donc été prise pour délimiter les réseaux de gaz sur la base des emprises des tracés de réseaux disponibles sur le site du Ministère de l'environnement et le CEREMA.

Dans le SRE d'Alsace, c'est l'emprise des gazoducs qui a servi de délimitation, tandis qu'ils n'ont pas été pris en compte dans les autres schémas.

Les pipelines

Les pipelines n'ont pas pu être pris en compte dans l'étude, faute de données.

b. Les réseaux de transport routiers et ferroviaires

Les réseaux routiers

Les dispositions prévues par l'article L 111-1-4 du code de l'urbanisme prévoient une distance de recul pour toute installation ou construction (et donc les éoliennes) de 100 mètres par rapport à l'axe des autoroutes, routes express et déviations, et de 75 mètres par rapport à l'axe des routes classées à grande circulation. Au-delà des règles de cet article, aucune distance de sécurité n'est édictée dans les lois et règlements.

Toutefois, les récentes études¹⁴ pour l'implantation d'éoliennes tendent à exclure, pour des raisons de sécurité, les zones situées à moins d'une distance égale à la hauteur totale de l'éolienne de la voirie à laquelle est rajoutée 20 mètres. Les routes considérées sont les suivantes : routes départementales, nationales et autoroutes identifiées dans la base de données BD Topo de l'IGN.

Dans le SRE d'Alsace c'est seulement l'emprise des réseaux routiers qui a été prise comme délimitation tandis que les routes n'ont pas été prises en compte dans les autres schémas.

Une distance de 170 mètres a ainsi été prise pour délimiter les réseaux routiers sur la base des emprises des routes de la BD TOPO.

Les réseaux ferroviaires

Par un courrier¹⁵ en date du 13/08/2014, la SNCF indique qu'il est nécessaire d'établir « une bande d'interdiction de part et d'autre de l'infrastructure ferroviaire d'une largeur égale à hauteur de l'éolienne, pale en position verticale augmentée de 20 mètres » soit dans notre cas une distance de 170 mètres.

A l'époque, le SRE d'Alsace a considéré l'emprise des réseaux ferroviaires comme délimitation tandis qu'ils n'ont pas été pris en compte dans les autres schémas.

C'est donc la distance prescrite par la SNCF qui a été prise pour délimiter les réseaux ferroviaires sur la base des emprises contenues dans la BD TOPO.

¹³ http://www.grtgaz.com/fileadmin/grands_projets/val-de-saone/documents/04-Synthese-Pouilly-sur-Saone.pdf - page 3

¹⁴ [https://eolienne.f4jr.org/contraintes_et_servitudes?s\[\]=ferroviaire](https://eolienne.f4jr.org/contraintes_et_servitudes?s[]=ferroviaire)

¹⁵ http://www.eure-et-loir.gouv.fr/content/download/12917/99514/file/DDAE_EtudeDeDangers_ResumeNonTechnique_Nordex.pdf - page 15

Ensemble des contraintes liées aux réseaux d'énergie et de transport pour l'installation d'éoliennes en région Grand Est

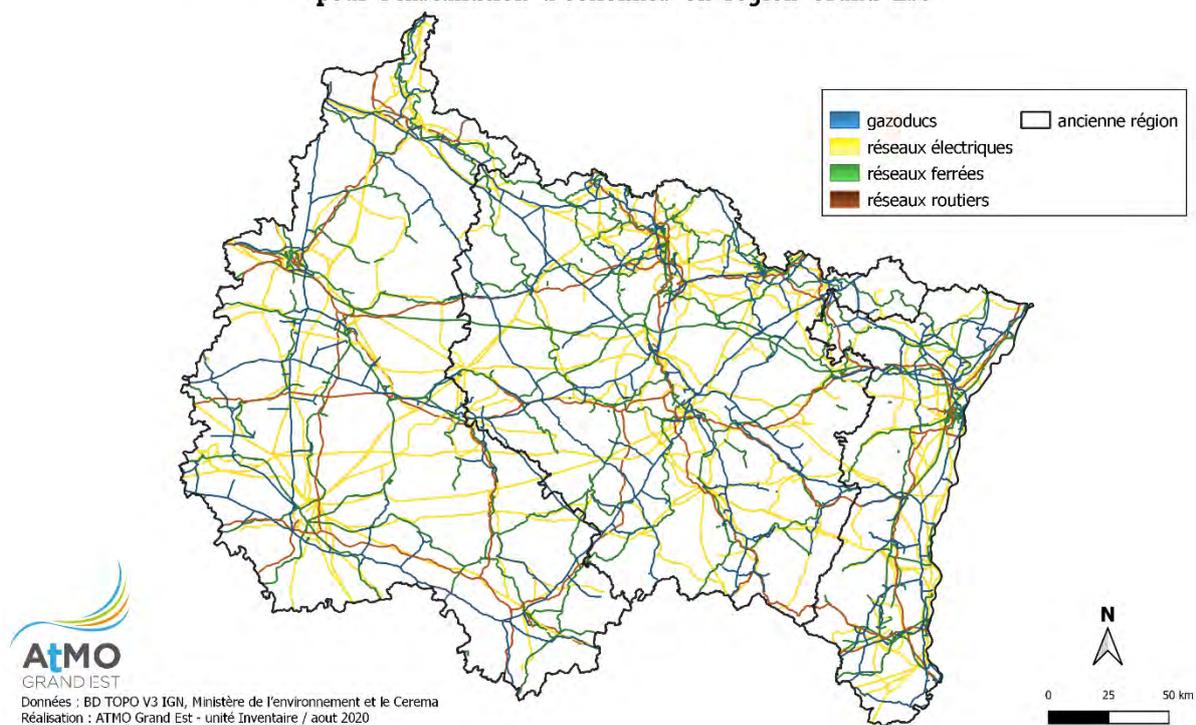


Figure 29 : Carte sur l'ensemble des contraintes liées aux réseaux d'énergie et de transport pour l'installation d'éoliennes en région Grand Est (source : BD TOPO IGN - Ministère de l'environnement et le CEREMA)

E. Les contraintes paysagères

Les acteurs du Grand Est ont défini dans chacun des SRE des zones présentant des enjeux paysagers territoriaux que l'installation d'éoliennes pourrait compromettre. Ces derniers ont été repris pour cette étude.

Ensemble des contraintes liées aux enjeux paysagers pour l'installation d'éoliennes en région Grand Est

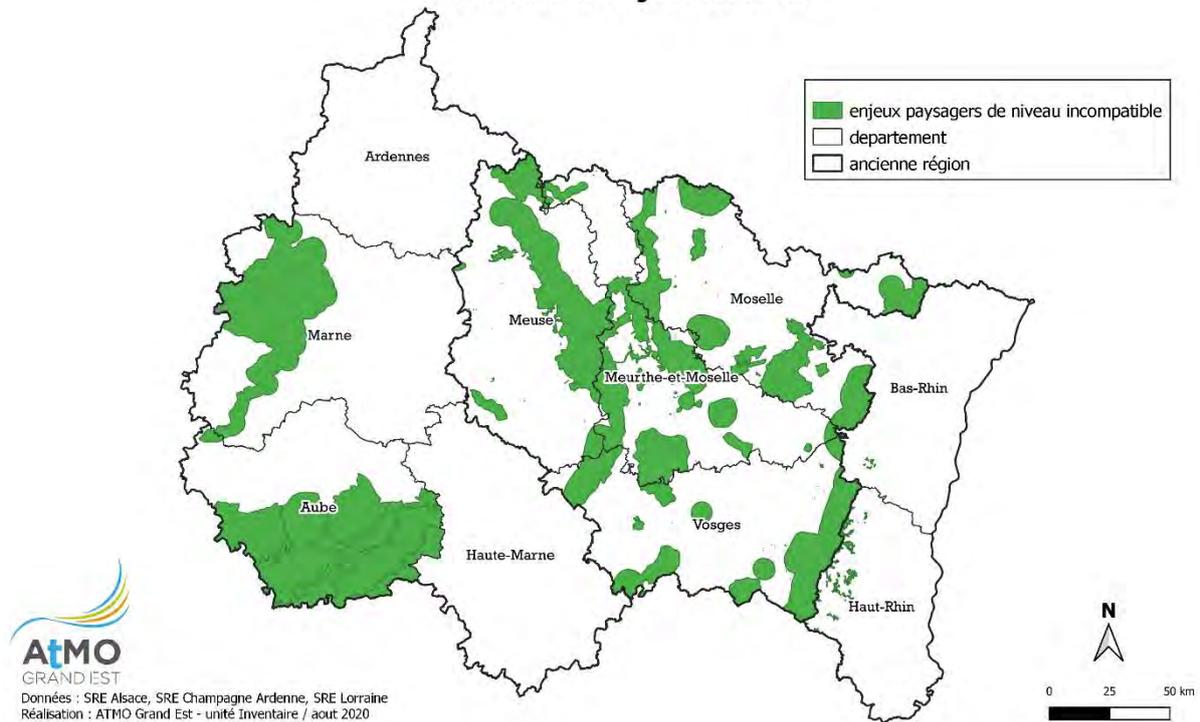


Figure 30 : Carte sur l'ensemble des contraintes liées aux enjeux paysagers pour l'installation d'éoliennes en région Grand Est (source SRE Alsace, Champagne Ardenne, Lorraine)

F. Les contraintes environnementales

a. Les zones boisées

Un périmètre de 200 mètres autour des zones boisées est généralement retenu pour l'implantation de projet éolien car il permet à l'avifaune effectuant des trajets entre la plaine agricole et les boisements de conserver un temps de réaction suffisant pour éviter les collisions éventuelles avec les machines¹⁶.

Chacun des RSE a tenu compte d'une délimitation de 200 mètres autour des zones boisées. Seules les forêts de plus de 20 ha ont été retenues dans le SRE de Champagne Ardenne.

La construction des périmètres s'est faite à partir des données Corine Land Cover 2018, plus spécifiquement ce sont les forêts de feuillus, résineux et mixtes qui ont été intégrées à l'intérieur des périmètres.

b. Les périmètres de protection rapprochée des captages d'eau

Les périmètres de protection rapprochée des captages d'eau destinés à l'alimentation humaine n'ont pas pu être pris en compte dans l'étude, faute de données. Les éoliennes peuvent être source de pollution de nature à rendre l'eau impropre à la consommation humaine.

¹⁶http://www.meuse.gouv.fr/content/download/8583/55482/file/234_pdfBAALON%20ENERGIES%20-%20Etude%20d - page4

c. Les sites Natura 2000

Les sites Natura 2000 visent une meilleure prise en compte des enjeux de biodiversité dans les activités humaines. Ces sites sont désignés pour protéger un certain nombre d'habitats et d'espèces représentatifs de la biodiversité européenne.

Ces sites ne sont pas destinés à être des zones où tout aménagement est interdit, de nouveaux aménagements n'y sont pas automatiquement exclus. Les directives établissent simplement que les nouveaux plans ou projets devront être entrepris de façon à ne pas nuire à l'intégrité des sites Natura 2000.

Toutefois, certains sites ont été exclus à l'implantation d'éoliennes dans les SRE régionaux et sont repris dans l'étude, notamment :

- la Zone de Protection Spéciale (ZPS) du Grand Tétras dans le SRE d'Alsace ;
- les ZPS d'une superficie supérieure à 5 000 ha dans le SRE de Champagne Ardenne.

d. Les contraintes réglementaires

Il existe un nombre important de contraintes réglementaires environnementales n'autorisant pas l'installation d'éoliennes :

- Les Réserves Naturelles Nationales et Régionales : ces territoires ne peuvent ni n'être détruits ni modifiés dans leur état ou dans leur aspect (sauf autorisations spéciales du Préfet, du Ministre).
- Les Arrêtés de Protection de Biotope : les activités susceptibles de nuire à la conservation des biotopes nécessaires aux espèces protégées y sont interdites ou réglementées.
- Les Forêts de Protection : il y est interdit tout changement d'affectation ou tout mode d'occupation du sol de nature à compromettre la conservation ou la protection des boisements, aucun défrichement, aucune infrastructure qui n'ont pour but la mise en valeur ou la protection de la forêt.
- Les Réserves Biologiques (domaniales ou forestières) : des règles particulières de gestion y sont définies, en particulier, l'arrêté qui crée la réserve biologique, peut interdire ou soumettre à des conditions particulières, les activités susceptibles de compromettre la réalisation des objectifs de l'aménagement.
- Les Espaces Boisés Classés : le défrichement y est interdit (non pris en compte faute de données).
- Les Conservatoires du patrimoine et du littoral.
- Les Réserves de Chasse et de Faune Sauvage.

Aucune indication de distance limite à l'implantation de parcs éolien à proximité de ces zones réglementaires existe. Une distance de 200 mètres, similaire à celle pour les zones boisées, a toutefois été retenue pour préserver la faune et flore environnantes.

Ensemble des contraintes liées aux enjeux environnementaux pour l'installation d'éoliennes en région Grand Est

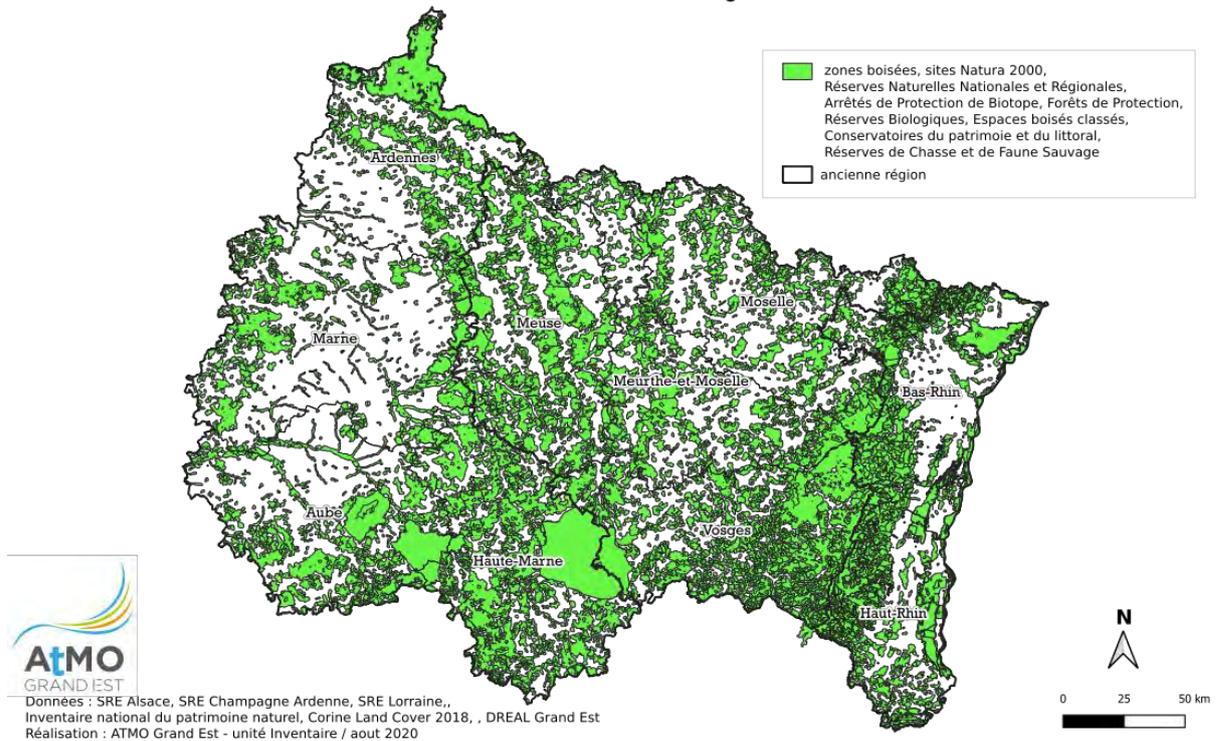


Figure 31 : Carte sur l'ensemble des contraintes environnementales pour l'installation d'éoliennes en région Grand Est

G. Les contraintes avifaunistiques et chiroptères

L'installation d'éoliennes a un impact majeur sur l'avifaune et les chiroptères dont les promoteurs ont l'obligation d'étudier pour la réalisation de leur projet.

Les contraintes sur l'avifaune et les chiroptères reprennent les zones définies dans les SRE et qui ont été classées comme incompatibles à l'implantation d'éoliennes.

Ensemble des contraintes liées aux enjeux avifaunistiques et chiroptères pour l'installation d'éoliennes en région Grand Est

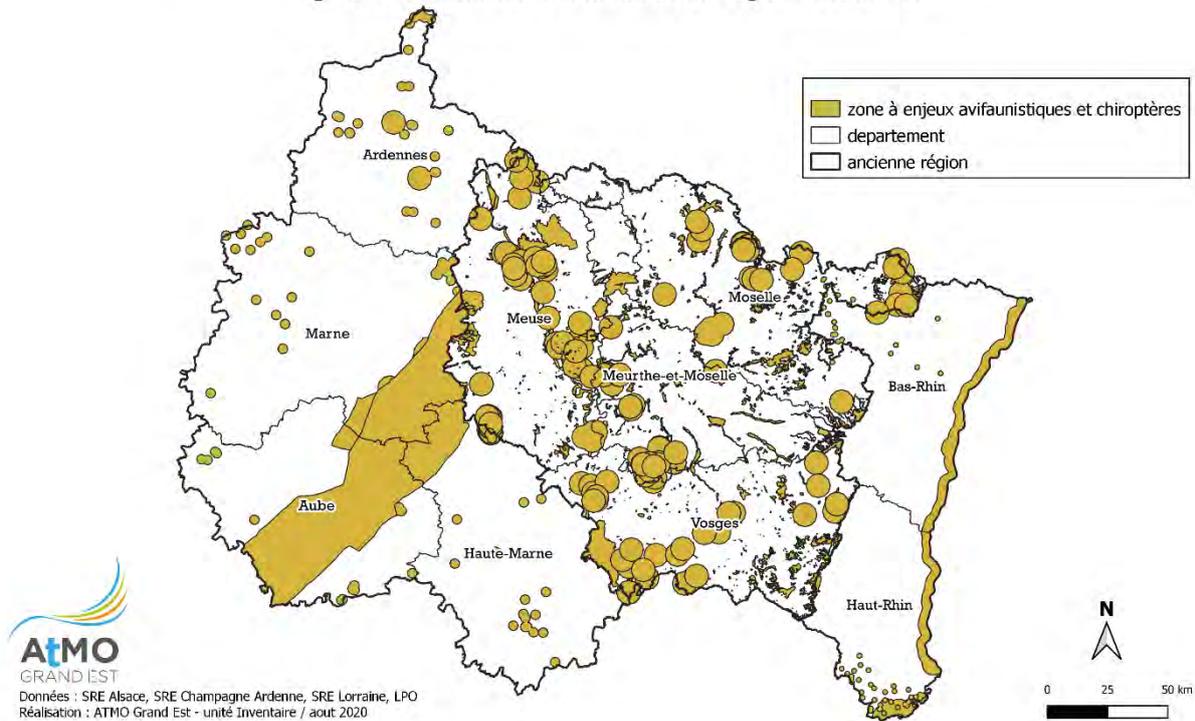


Figure 32 : Carte sur l'ensemble des contraintes liées aux enjeux avifaunistiques et chiroptères pour l'installation d'éoliennes en région Grand Est (source : SRE Alsace, Champagne Ardenne, Lorraine, LPO)

a. L'avifaune

Le terme « avifaune » désigne l'ensemble des espèces d'oiseaux sur un lieu spécifique. L'avifaune réunit les espèces d'oiseaux sédentaires et les saisonnières qui migrent en fonction des saisons.

L'installation de parcs éoliens peut impliquer pour l'avifaune (source : Ligue pour la Protection des Oiseaux)

- une perte de leur habitat (les oiseaux fuient la zone du fait du dérangement et/ou la modification du milieu ce qui entraîne une baisse d'attractivité) ;
- une augmentation de leur mortalité (collision avec les pales ou projection au sol par les mouvements d'air) ;
- des dérangements, perturbations, notamment dans la phase des taux et de l'effet barrière qu'entraîne une éolienne.

Ancienne région	Zones à enjeux
Alsace	- La zone natura 2000 : ZPS Grand Tetras et espèces avifaune prioritaires au niveau national. - Milan royal : 1 km autour des nids. - Couloir de migration du Jura Alsacien. - Couloir de migration de la bande rhénane.
Champagne Ardenne	- Couloir de migration principal de l'avifaune : localisé au niveau de la Champagne humide (lacs du Der-Chantecoq, de la Forêt d'Orient, d'Amance et du Temple). La zone recouvre de nombreuses zones Natura 2000, ZICO, zones RAMSAR, ZNIEFF ainsi qu'un couloir de migration majeur pour les chiroptères.
Lorraine	- Les sites Natura 2000 ayant été désignés pour leur richesse avifaunistique.

Tableau 21 : Enjeux avifaunistiques par ancienne région

a. Chiroptères

Les éoliennes ont aussi un impact direct sur la mortalité des chauves-souris. Ces dernières entrent en collision avec les pales ou sont victimes de la surpression occasionnée par le passage des pales devant le mât.

Les connaissances actuelles montrent que, parmi les mammifères, les chauves-souris sont les plus sensibles à l'installation d'un parc éolien. Or ce sont aussi des espèces souvent mal connues, qui jouissent d'une protection totale au sein de l'Union Européenne.

Ancienne région	Zones à enjeux
Alsace	- La zone natura 2000 : ZPS Grand Tetras et espèces chiroptères prioritaires au niveau national
Champagne Ardenne	- Gîtes de mise-bas, d'hibernation, de transit et de regroupements automnaux
Lorraine	- Les sites Natura 2000 ayant été désignés pour leur richesse chiroptérologique. - Les gîtes à chiroptères inscrits au réseau Natura 2000. Les sites ponctuels ont fait l'objet d'une délimitation d'un rayon de 5km, correspondant au rayon moyen de déplacement de l'ensemble des espèces autour des gîtes.

Tableau 22: Enjeux chiroptères par ancienne région

5. Analyse des résultats et pistes d'amélioration

a. Les zones favorables au développement éolien

Le croisement des différentes contraintes fait apparaître un mitage important des zones favorables à l'implantation d'éoliennes sur l'ensemble de la région Grand Est.

Cet important mitage a entraîné la réalisation d'un traitement visant à ne conserver que les zones respectant les critères suivants :

- surface disponible ≥ 6 ha, équivalent à l'installation d'un parc à 3 éoliennes. Ce seuil a été retenu afin de coïncider avec les hypothèses prises dans le SRADDET.
- les surfaces comprises entre 2 ha et 6 ha et localisées à moins de 1 km d'une autre zone favorable à l'implantation d'une éolienne (surface ≥ 2 ha) sont retenues dans la mesure où l'implantation d'une éolienne dans ces zones pourrait venir s'ajouter à un parc déjà existant.

Le résultat de ce traitement a abouti à la définition des zones favorables à l'éolien sur la région Grand Est et sont visibles sur la Figure 33. La surface totale est environ égale à 690 000 ha, soit 12% de la superficie de la région.

Zones favorables à l'implantation d'éoliennes dans la région Grand Est

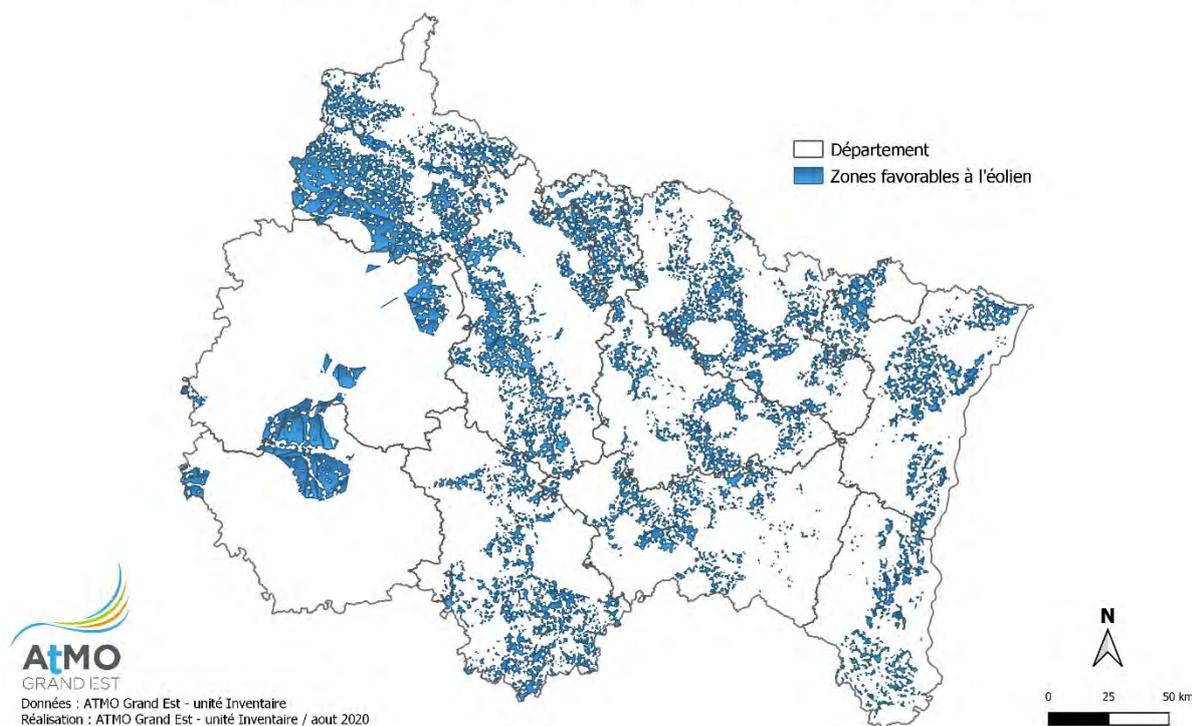


Figure 33 : Carte des zones favorables à l'implantation d'éoliennes dans la région Grand Est

Les principaux territoires favorables à l'éolien sont localisés par région :

- Alsace :
 - le long d'une bande nord-sud dans la plaine d'Alsace,
 - sur le plateau Lorrain alsacien.
- Champagne Ardenne
 - au niveau des plaines en Champagne Crayeuse et humide, au nord du département de l'Aube,
 - en plaine et plateau sur le département des Ardennes,
 - le long d'un axe Nord-Ouest, Sud-Est des Ardennes au département de Haute-Marne et traversant le département de la Meuse.
- Lorraine :
 - sur l'ensemble des plateaux du Haut-Marnais, du Barrois, de la Haye, Lorrain et du Pays Haut.

Ce sont les espaces boisés qui engendrent le plus de contraintes pour l'installation d'éoliennes ; leur surface totale représente 57% de la surface régionale. En seconde position, on retrouve les zones urbaines qui recouvrent 30% du territoire. Les enjeux paysagers définis dans les SRE sont aussi un point important en termes de surface, ils représentent 22 % de la surface régionale. La liste complète des surfaces par contraintes figure en annexe (Tableau 24)

En juxtaposant l'occupation des sols issus des données de Corine Land Cover aux zones favorables à l'éolien, il s'avère que les zones sont en très grande majorité (97%) situées sur des territoires agricoles, dont :

- 75 % en terres arables hors périmètres d'irrigation,
- 19 % en prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole,
- 4 % en autres terres agricoles.

Afin d'obtenir davantage de précision sur les cultures qui sont concernées, j'ai couplé les données avec celles du registre parcellaire graphique (RPG) de 2020. Il en résulte que les zones favorables à l'éolien se répartissent en majorité sur des cultures de blé tendre (25%), des prairies permanentes (21%), d'orge (15%), de maïs (12%) et de colza (12%).

Ainsi l'implantation d'éoliennes impliquera forcément la disparition de certaines cultures agricoles. Il pourrait alors être important pour les acteurs du territoire de prioriser les cultures à conserver.

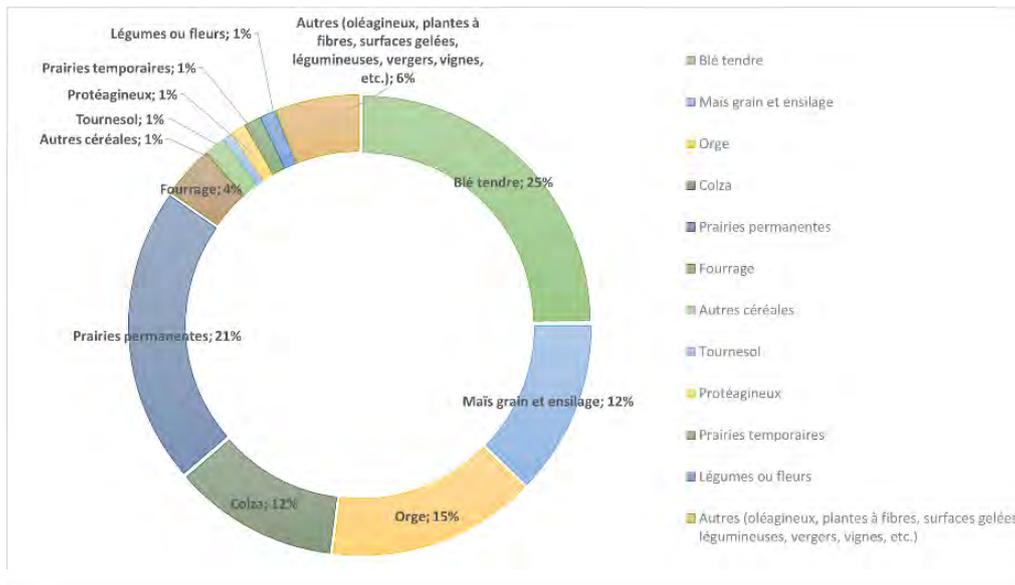


Figure 34: Répartition par type de culture agricole des zones favorables à l'éolien (source RPG 2020)

b. Evaluation des résultats

Dans le but d'évaluer la pertinence des résultats, j'ai réalisé une comparaison entre les zones de potentiel identifiées dans l'étude et les emplacements actuels des éoliennes en calculant les distances les séparant.

La région Grand Est dispose déjà d'un nombre important d'éoliennes sur son territoire. Ainsi, en juin 2020, on décomptait plus de 2 150 éoliennes.

Zones favorables à l'implantation d'éoliennes et état de l'éolien en région Grand Est

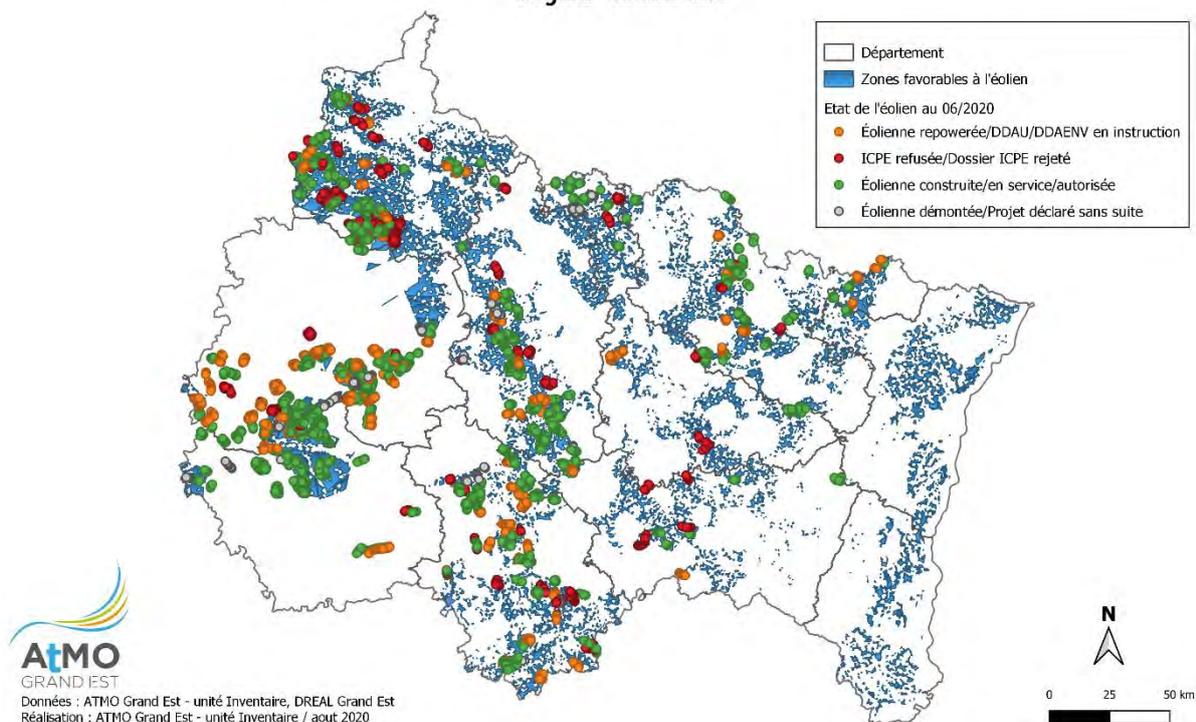


Figure 35 : Carte des zones favorables à l'implantation d'éoliennes et état de l'éolien en région Grand Est

A l'issu de cette analyse, il s'avère que près de la moitié des emplacements des éoliennes installées en 2020 ne sont pas dans les zones favorables identifiées. Si on étend ces zones de 100 mètres de distance, on atteint un taux d'identification de 60%, de 72% si on monte à 500 mètres et 94% à 1 km.

Distance par rapport aux zones de potentiel identifiées (mètre)	Nombre d'éoliennes à l'intérieur des zones (autorisée/construite/en service)	Taux d'identification des emplacements
0 m (à l'intérieur des zones)	1 116	52 %
100 m	1 297	60 %
500 m	1 543	72 %
1 000 m	2 019	94 %
Total	2 154	

Tableau 23 : Taux d'identification des emplacements des éoliennes existantes en fonction de leur distance par rapport aux zones favorables au développement éolien identifiées

L'analyse des contraintes qui ont conduit à l'exclusion de ces emplacements, nous donne des pistes de compréhension. Ainsi, parmi les éoliennes non localisées dans les zones à potentiel :

- 47% se situent à l'intérieur du périmètre d'exclusion définie dans la charte éolienne des Coteaux, Maisons et Caves de Champagne. La charte ayant été récemment finalisée (2018), il est normal d'y retrouver des éoliennes déjà installées. Toutefois, il ne devrait plus avoir de projet à l'avenir.
- 22 % se situent dans des espaces boisés, en limite des zones d'exclusion. Pour rappel, un périmètre de 200 mètres en lisère de forêts a été établi. Ce dernier peut être qualifié de très restrictif et pourrait être aménagé au niveau local. De plus, toutes les surfaces de forêts ont été prises en compte, sans seuil limite comme c'était le cas dans le SRE de Champagne Ardenne. L'intégration d'un tel seuil pourrait être à envisager, limitant ainsi un mitage trop important des zones favorables à l'éolien.
- 10 % sont localisées sur des zones à enjeux avifaunistiques et chiroptères définis dans les SRE. Les périmètres de ces zones seraient sans doute à actualiser compte tenu de leur date de création. De nouvelles études pourraient restreindre ou bien éteindre les zones de protection destinées à ces espèces. Les périmètres qui ont été construits sont généralement larges, des accommodations ont pu être faites au niveau local par les acteurs des territoires.
- 7 % se situent sur des zones avec des enjeux liées aux radars.
- 6 % se situent sur des zones à enjeux paysagers. Mêmes remarques que pour l'avifaune et les chiroptères.
- 6 % se situent à proximité de réseaux électriques.

Ces résultats nous apprennent que les zones à enjeux définis dans les SRE (paysagers, radars, avifaunistiques et chiroptères, etc.) ne sont pas complètement réhabilitaire à l'installation d'éoliennes. Elles peuvent subir quelques ajustements si les porteurs de projets apportent suffisamment d'éléments attestant la non remise en cause de ces enjeux locaux ou par des mesures compensatoires. La totalité des résultats se trouve en annexe (Tableau 24)

Il est aussi important de signaler que certains périmètres d'exclusion pris dans cette étude ont été élaborés d'après les recommandations des principaux acteurs de la filière mais ne sont parfois pas de l'ordre du réglementaire (ex : 200 mètres de distance d'une zone boisée, 170 mètres de distance d'un réseau électrique).

c. Identification des gisements éoliens supplémentaires et détermination du potentiel de production d'énergie

Dans le but de tenir compte des éoliennes déjà existantes, j'ai déduit des résultats les zones avec des parcs existants.

Sous QGIS, j'ai créé des rectangles convexes regroupant les éoliennes d'un même parc et représentées géométriquement par des points. J'ai ensuite ajouté aux polygones ainsi construits une zone tampon de 400 mètres de distance pour respecter la distance minimale entre éoliennes. Les résultats de ce traitement sont visibles sur la Figure 36.

Zones favorables à l'implantation d'éoliennes supplémentaires dans la région Grand Est

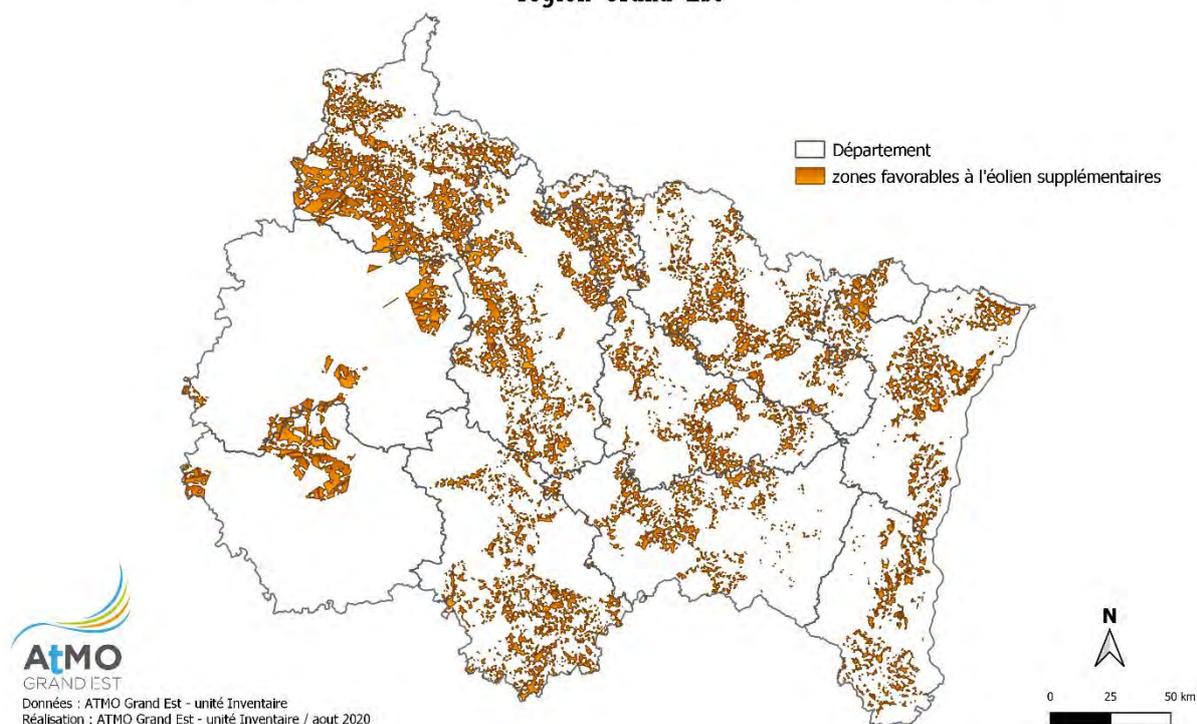


Figure 36 : Carte des zones favorables à l'implantation d'éoliennes supplémentaires dans la région Grand Est

Dans le cadre de la réalisation du SRADDET, la Région a cherché à quantifier le gisement éolien sur l'ensemble du territoire à partir des résultats des SRE. La méthodologie et les hypothèses utilisées ont été les suivantes :

- Calcul du nombre de commune disposant de zones d'au moins 20 ha et d'un seul tenant favorable au développement éolien identifiées dans les trois précédents SRE et dont les surfaces sont d'au moins 20 ha (3 271 communes favorables au titre des SRE pour 5 137 communes au total en Grand Est).
- Un espacement entre les unités de 400 m minimum sur cette surface conduit à implanter potentiellement 4 unités d'une puissance moyenne 3,3 MW¹⁷.
- Un facteur de charge pris en considération : 21,13% (moyenne 2014-2015-2016 GE selon données RTE).
Le facteur de charge renvoie au rapport entre l'énergie effectivement produite pendant une période donnée et l'énergie qui aurait pu être générée à la puissance nominale de la machine pendant la même période.

La Région a considéré qu'un certain nombre de contraintes fortes qui ne présentent pas d'incompatibilité au développement de l'éolien risque de complexifier voire d'annuler des projets sur le territoire du Grand Est. C'est pourquoi il n'a été conservé que la moitié des communes disposant de zones favorables au développement éolien pour le calcul du gisement final.

De plus, la réalité de mise en œuvre des projets et la gestion de ces contraintes réduisent les possibilités d'implantation du nombre d'unités par zone a conduit la Région à réduire d'une unité les parcs installés. Le gisement corrigé théorique serait alors de **30 000 GWh annuels**.

En reprenant ces éléments et en considérant les zones identifiées, on aboutit à un gisement théorique d'environ **25 500 GWh annuels**.

J'ai tenté de quantifier le gisement éolien d'une manière plus « géographique » en utilisant les outils de SIG à ma disposition afin de tenir compte des réalités physiques du territoire et des critères d'installation de parcs. J'ai cherché des solutions dans la littérature scientifique, toutefois les études de potentiel ne vont généralement pas

¹⁷ En 2016, la puissance installée moyenne des machines en France est de 1,8 MW. Des machines de 3,3 MW sont aujourd'hui disponibles sur le marché et permettent d'envisager une production d'électricité plus importante en tenant compte de repowering.

plus loin que l'identification des zones favorables à l'éolien. Le SRE d'Alsace a cherché à quantifier le potentiel mais la méthodologie utilisée n'est pas explicitée et semble avoir été réalisée manuellement. On pourrait en effet très bien placer manuellement sur une carte des polygones représentant un parc et qui respecterait nos critères d'installation. Toutefois, cette méthode pourrait s'avérer très longue et hasardeuse au vu de l'étendue de la zone d'étude.

Une solution que j'ai envisagée a été de créer une grille de points espacés de 400 mètres sur l'étendue de la région Grand Est, puis de ne conserver que les points localisés à l'intérieur des zones favorables. En utilisant cette méthode et en sommant la production hypothétique de chacun des points retenus de la grille, on aboutit à un gisement de plus de 200 000 GWh. Un chiffre astronomique qu'il est difficile à assumer compte tenu du potentiel défini dans le SRADDET. On pourrait considérer ce gisement comme le potentiel maximal qu'il est possible d'atteindre dans le cas d'une densité maximale d'éoliennes.

Toutefois à partir de cette grille, il serait plus facile de créer manuellement des projets de parcs. Automatiser cette tâche est relativement complexe car les configurations de parcs sont multiples. Ils peuvent autant former une ligne horizontale ou verticale que prendre la forme d'un arc ou bien être alignés en diagonale. Cela est d'autant plus complexe que les zones favorables à l'éolien ne sont pas des formes géométriquement homogènes.

Conclusion

L'objectif d'évaluer les potentiels de production d'énergie solaire photovoltaïque et éolien à l'échelle du Grand Est est accompli. Les méthodologies utilisées sont reproductibles et peuvent être potentiellement mises à jour en réutilisant les scripts SQL qui ont permis de traiter les importants volumes de données. De plus, les potentiels dégagés à l'issue des traitements paraissent cohérents par rapport à d'autres données de références.

Des améliorations peuvent être bien évidemment apportées. Certaines impliquent toutefois de lourds traitements qu'il est probablement possible d'optimiser via une alliance conjuguée entre le logiciel FME et l'intégration de scripts Python. Les résultats ne sont pour autant pas garantis et il est possible que le ratio entre temps de travail et qualité des résultats ne soit pas optimal.

Ce stage m'a permis de parachever un premier travail que j'avais initié lors de mes précédentes expériences professionnelles. J'ai pu concevoir mes propres méthodes d'évaluation de gisement en énergies renouvelables, et les mettre en application. Leurs mises en œuvre m'ont parfois confronté à des limites d'ordre technique qui m'ont demandé de trouver des alternatives et de faire preuves d'ingéniosité.

J'ai pu fortement développer mes compétences en langage SQL, et utiliser de manière approfondie PostgreSQL et surtout PostGIS. J'ai eu l'occasion de traiter d'importants volumes de données et de mettre en place des astuces pour optimiser mes traitements.

J'ai aussi pu observer le grand intérêt d'avoir à sa disposition, pour travailler, une large gamme de logiciels de traitement de données et de SIG. PostGIS a été par exemple très performant pour faire des traitements géographiques simples comme des intersections entre tables. Il a été en revanche décevant lors de traitements plus techniques tel que la fusion de polygones, m'obligeant de passer par l'intermédiaire de QGIS ou FME.

Par ailleurs, ce dernier m'a grandement impressionné par sa facilité d'utilisation et la qualité de son *reporting* lors de l'exécution de tâches. On peut facilement retrouver les erreurs rencontrées et on a une visibilité claire sur les traitements en cours et sur leur durée. La visibilité des temps de traitement est, je pense, un des éléments essentiels dans le travail de géomaticien d'autant plus lorsqu'on est amené à traiter d'importants volumes de données. Il est en effet décevant d'attendre plusieurs heures qu'un traitement se termine sous PostGIS pour finalement être renvoyé vers une erreur.

Ayant été amené à collecter des données auprès de nombreux fournisseurs, je retiendrai l'importance d'une lecture attentive des métadonnées et de la manière dont elles ont été construites, d'autant plus que la production de données va croissante et qu'il est facile de se tromper dans leur usage.

Enfin, les événements liés à la COVID-19 m'ont contraint de réaliser l'entièreté de mon stage en télétravail depuis Toulouse. Cela n'a heureusement eu que peu d'impacts sur son déroulement. Toutefois, cela m'a permis de découvrir que je suis en capacité de remplir mes missions à distance mais que ce n'est pas une expérience que je souhaite poursuivre dans mes futurs emplois. Il est pour ma part primordial d'être en contact avec mes collègues car il est plus simple et plus aisé d'échanger, parfois autour d'un café, sur des questions techniques et ainsi de débloquer plus facilement certaines situations.

Bibliographie

SOLAIRE

Axenne, Auxilia. Réalisation du profil énergétique territorial sur le territoire du PETR Coeur de lorraine. 2018. 135p.

B.Anastasiu. Identification des toitures à meilleur rendement solaire sur le territoire de la communauté des communes de Sauer-Pechelbronn. 2018. 18p.

CEREMA, Direction territoire Ouest, Identifier le potentiel d'installation de panneaux solaires sur toiture – Cas de l'Ille-et-Vilaine. Aout 2014. 44p. Disponible sur http://www.bretagne.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/14_09_04_RAP_Potentiel_toiture_solaire_D35_cle7efd74-1.pdf.

Connaissance des énergies, publié le 26/01/2016, [consulté le 04/09/2020]. Photovoltaïque : que signifie la puissance « crête » ?. Disponible sur <https://www.connaissancedesenergies.org/>.

Direction départementale des territoires de la mer, Identification du potentiel d'installation de panneaux photovoltaïques sur toiture des bâtiments supérieurs à 1000 m² dans les Côtes-d'Armor. Avril 2018. 29p. Disponible sur https://www.cotes-darmor.gouv.fr/content/download/44455/311719/file/etude_photovoltaique_22_batplus1000m2_Final.pdf.

Dorman, M., Erell, E., Vulkan, A., & Kloog, I. (2019). shadow: R Package for Geometric Shadow Calculations in an Urban Environment. *R J.*, 11(1), 287.

Geeohspatial, publié le 08/05/2013, [consulté le 04/09/2020]. K Nearest Neighbor Search in PostGIS 2.0: Solved!. Disponible sur <https://web.archive.org/web/20141104185651/http://geeohspatial.blogspot.com/2013/05/k-nearest-neighbor-search-in-postgis.html>.

Intermezzo, publié le 27/07/2012, [consulté le 04/09/2020]. Calcul du potentiel photovoltaïque intégré au bâti d'un territoire. Disponible sur <https://www.intermezzo-coop.eu/fr/actualites/calcul-du-potentiel-photovoltaique-integre-au-bati-dun-territoire>.

Novethic, publié le 06/08/2020, [consulté le 04/09/2020]. Les renouvelables deviennent la première source d'électricité en Europe, devant les énergies fossiles. Disponible sur <https://www.novethic.fr/actualite/energie/energies-renouvelables/isr-rse/les-renouvelables-deviennent-la-premiere-source-d-electricite-en-europe-devant-les-energies-fossiles-148844.html>.

Picbleu, publié le 02/08/2020, [consulté le 04/09/2020]. Tarifs d'achat de l'électricité panneaux solaires photovoltaïques. Disponible sur <https://www.picbleu.fr/page/tarifs-d-achat-de-l-electricite-panneaux-solaires-photovoltaïques>.

Souvestre Quentin. (2015). Estimation de la production d'énergie photovoltaïque par une agglomération. 43p. Disponible sur http://www.applis.univ-tours.fr/scd/EPU_DA/2015PFE_Souvestre_Quentin.pdf.

UMEP, publié en 2018, [consulté le 04/09/2020]. Solar Energy - Introduction to SEBE. Disponible sur <https://umep-docs.readthedocs.io/projects/tutorial/en/latest/Tutorials/SEBE.html#solar-energy-introduction-to-sebe>.

EOLIEN

Direction départementale des territoires de l'Yonne. Approche économique des projets éoliens. 04/06/2018. 58p. Consultable sur http://www.yonne.gouv.fr/content/download/25291/201544/file/DIAPORAMA_Economie-Eolien.pdf.

La gazette des communes, publié le 20/12/2019, [Consulté le 04/09/2020]. Implanter des éoliennes aux abords des sites inscrits au patrimoine de l'Unesco sera-t-il interdit ?. Consultable sur <https://www.lagazettedescommunes.com/655651/implanter-des-eoliennes-aux-abords-des-sites-inscrits-au-patrimoine-de-lunesco-sera-t-il-interdit/>.

Maingueneau, B. (2016). Analyse multicritère pour l'implantation d'éoliennes aux îles de la Madeleine. Consultable sur https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/9440/Maingueneau_Benjamin_MSc_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Van Haaren, R., & Fthenakis, V. (2011). GIS-based wind farm site selection using spatial multi-criteria analysis (SMCA): Evaluating the case for New York State. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(7), 3332-3340.

La Région Alsace, DREAL Alsace. Schéma régional Climat Air Énergie Alsace – Schéma régional éolien. Juin 2012. Consultable sur http://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/srcae-alsace-6-schema_regional_eolien.pdf.

La Région Lorraine, DREAL Lorraine. Schéma régional Climat Air Énergie Lorraine – Schéma régional éolien. Décembre 2012. Consultable sur http://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/sre_lorraine.pdf.

La Région Champagne Ardenne, DREAL Champagne Ardenne. Schéma régional Climat Air Énergie Champagne Ardenne – Schéma régional éolien. mai 2012. Consultable sur http://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/sre_mai_2012.pdf.

Table des matières

Sommaire	1
Résumé	2
Abstract	2
Remerciements	3
Introduction	4
I. Présentation de la structure d'accueil	5
II. Contexte du stage et objectifs	6
III. Identification du potentiel d'installation de panneaux solaires sur toiture	7
A. L'énergie solaire photovoltaïque en région Grand Est	7
B. L'étude du potentiel solaire sur toiture, de quoi parle-t-on ?	7
C. Méthodologie et données utilisées	9
a. Les données clés : les contours des bâtiments de la BD TOPO de l'IGN et d'OSM	9
b. BD TOPO : préparation de la table de travail sur les bâtiments et identification de leur typologie	12
c. Données OSM : préparation de la table de travail sur les bâtiments et identification de leur typologie	19
d. Détermination des ratios de contraintes techniques	20
e. Calcul de l'orientation des toitures	22
f. Identification des contraintes réglementaires et patrimoniales	23
g. Calcul gisement solaire sur toiture	24
D. Analyse des résultats et pistes d'amélioration	26
a. Résultats	26
b. Pistes d'amélioration	27
IV. Etude du potentiel de développement éolien dans le Grand Est	29
1. L'énergie éolienne au Grand Est	29
2. L'étude du potentiel éolien, de quoi parle-t-on ?	30
3. Méthodologie utilisée pour évaluer le potentiel éolien	30
4. Les contraintes pour évaluer le potentiel éolien	31
A. Les contraintes physiques	31
a. Gisement de vent	31
b. Les pentes	33
c. Les surfaces en eau	34
B. Les contraintes urbaines et patrimoniales	35
a. Les zones d'habitation	35
b. Les sites inscrits et classés	36
c. Les périmètres de protection des monuments historiques	36
d. Les monuments emblématiques régionaux	37
e. Les sites inscrits sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO	37
f. Les sites patrimoniaux remarquables	38
C. Les contraintes techniques	38
D. Les contraintes réseaux	39
a. Les réseaux de transport d'énergie	39

b.	Les réseaux de transport routiers et ferroviaires	40
E.	Les contraintes paysagères	42
F.	Les contraintes environnementales	42
a.	Les zones boisées	42
b.	Les périmètres de protection rapprochée des captages d'eau	42
c.	Les sites Natura 2000	43
d.	Les contraintes réglementaires	43
G.	Les contraintes avifaunistiques et chiroptères	44
a.	L'avifaune	45
a.	Chiroptères	46
5.	Analyse des résultats et pistes d'amélioration	46
a.	Les zones favorables au développement éolien	46
b.	Evaluation des résultats	48
c.	Identification des gisements éoliens supplémentaires et détermination du potentiel de production d'énergie	49
	Conclusion	52
	Bibliographie	53
	Annexes	55
	Table des matières	66
	Table des figures	68
	Table des tableaux	69

Table des figures

Figure 1 : Missions d'ATMO Grand Est	5
Figure 2 : Diagramme de GANNT illustrant l'organisation du stage	6
Figure 3 : Evolution de la production d'énergie photovoltaïque entre 2008 et 2018 (source : RTE, Panorama DREAL).....	7
Figure 4 : Paramètres influençant la quantité d'énergie reçue par un panneau solaire (source www.terresolaire.com)	8
Figure 5 : Facteur de correction à appliquer à la production d'électricité d'un panneau selon l'orientation et l'inclinaison des toitures (source : http://www.ef4.be).....	8
Figure 6 : Paramètres à prendre compte pour l'étude du potentiel solaire sur toiture.....	9
Figure 7 : Comparaison des polygones des bâtiments entre la couche bâtiment d'OpenStreetMap (à gauche) et celle de la BD TOPO (à droite).....	10
Figure 8 : Illustration de la vérification visuelle des résultats du calcul de l'orientation des toitures	11
Figure 9 : Méthode pour exclure les bâtiments inférieurs à 50m ² et isolés	15
Figure 10 : Phase 1,2 et 3 de l'identification de la typologie des bâtiments de la BD TOPO	17
Figure 11 : Phase 4 de l'identification de la typologie des bâtiments de la BD TOPO	18
Figure 12 : Phase 5 de l'identification de la typologie des bâtiments de la BD TOPO	18
Figure 13 : Phase 6 de l'identification de la typologie des bâtiments de la BD TOPO	19
Figure 14 : Illustration des opérations géométriques réalisées par la fonction permettant de déterminer l'orientation des toitures des bâtiments (source : DDTM 2018).....	23
Figure 15 : Formule pour calculer l'énergie produite par une installation photovoltaïques sur toiture	24
Figure 16: Formule pour calculer la surface d'une toiture inclinée (DDTM 2018).....	25
Figure 17: Formule pour calculer la surface de toiture disponible pour l'installation de panneaux photovoltaïques	25
Figure 18 : Prime à l'investissement par rapport à la puissance installée pour de la vente partielle du 1 ^{er} juillet au 30 septembre 2020 (source : picbleu.fr).....	25
Figure 19 : Carte de la production d'énergie à partir des parcs éoliens en région Grand par commune en 2018 ..	29
Figure 20 : Fonctionnement d'une éolienne (source : http://college.lutterbach.free.fr/).....	30
Figure 21: Liste des contraintes prises en compte pour l'étude du gisement éolien	31
Figure 22 : Plages d'exploitation d'une turbine éolienne (axe horizontal) en fonction de la vitesse du vent (Source : https://www.encyclopedie-energie.org)	32
Figure 23 : Carte des vents à 110 mètres de hauteur en région Grand Est sur la période 2016-2019 (source ATMO Grand Est).....	33
Figure 24 : Carte des pentes supérieures à 20% en région Grand Est - Contraintes physiques pour l'installation d'éoliennes (Source :BD ALTI 75m IGN)	34
Figure 25 : Carte des surfaces en eau en région Grand Est - Contraintes physiques pour l'installation d'éoliennes (source : BD TOPO IGN 2018)	35
Figure 26 : Cartes des zones d'habitation exclus des zones favorables au développement de l'éolien en région Grand Est (BD TOPO IGN V3 2018).....	36
Figure 27 : Carte sur l'ensemble des contraintes patrimoniales en région Grand Est pour l'installation d'éoliennes.	38
Figure 28 : Carte sur l'ensemble des contraintes techniques pour l'installation d'éoliennes en région Grand Est (source : SRE Alsace, Champagne Ardenne, Lorraine).....	39
Figure 29 : Carte sur l'ensemble des contraintes liées aux réseaux d'énergie et de transport pour l'installation d'éoliennes en région Grand Est (source : BD TOPO IGN - Ministère de l'environnement et le CEREMA)	41
Figure 30 : Carte sur l'ensemble des contraintes liées aux enjeux paysagers pour l'installation d'éoliennes en région Grand Est (source SRE Alsace, Champagne Ardenne, Lorraine)	42
Figure 31 : Carte sur l'ensemble des contraintes environnementales pour l'installation d'éoliennes en région Grand Est	44
Figure 32 : Carte sur l'ensemble des contraintes liées aux enjeux avifaunistiques et chiroptères pour l'installation d'éoliennes en région Grand Est (source : SRE Alsace, Champagne Ardenne, Lorraine, LPO)	45
Figure 33 : Carte des zones favorables à l'implantation d'éoliennes dans la région Grand Est	47
Figure 34: Répartition par type de culture agricole des zones favorables à l'éolien (source RPG 2020)	48
Figure 35 : Carte des zones favorables à l'implantation d'éoliennes et état de l'éolien en région Grand Est.....	48
Figure 36 : Carte des zones favorables à l'implantation d'éoliennes supplémentaires dans la région Grand Est ...	50
Figure 37 : Méthodologie résumée du SRE d'Alsace	56
Figure 38 : Méthodologie résumée du SRE de Champagne Ardenne	57
Figure 39 : Méthodologie résumée du SRE de Lorraine	58
Figure 40 : Tableau de suivi des données pour la réalisation de l'étude sur l'éolien	59

Figure 41 : Biais en m/s sur les vitesses de vent sur 2019 (source : ATMO Grand Est – Unité Modélisation).....	60
Figure 42 : Liste des contraintes patrimoniales pour l’installation de panneaux photovoltaïques (source : Schéma de développement des énergies renouvelables sur le territoire du Gresivaudan,2015)	65

Table des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques des installations solaires photovoltaïques monocristallins et polycristallins (source : www.insunwetrust.solar).....	9
Tableau 2 : Comparaison des résultats du calcul de l’orientation des bâtiments entre les données d’OSM et de la BD TOPO.....	11
Tableau 3 : Avantages et inconvénients de l'utilisation des données OSM et de la BD TOPO pour l'étude du gisement solaire sur toiture	12
Tableau 4 : Comparatif du nombre total de bâtiments et les surfaces de toiture correspondantes des bâtiments issus d’OSM et de la BD TOPO	12
Tableau 5 : Nature des bâtiments retenues pour l'étude solaire toiture	13
Tableau 6 : Nature des bâtiments pris en compte dans l'étude de potentiel solaire.....	14
Tableau 7 : Matrice de sélection de la nature des bâtiments en fonction des champs de la table bâti de la BD TOPO	15
Tableau 8 : Matrice de sélection de la nature des bâtiments à double usage.....	16
Tableau 9 : Répartition des surfaces de toiture par type de bâtiments sur l’ensemble de la région Grand Est (source : BD TOPO).....	19
Tableau 10 : Répartition des surfaces de toiture par type de bâtiments sur l’ensemble de la région Grand Est (source : OSM).....	20
Tableau 11 : Type de toiture en fonction de leurs matériaux de construction (source : CEREMA 2014)	20
Tableau 12 : Taux de peuplement de la colonne "matériaux de construction des toitures" dans la BD TOPO	21
Tableau 13 : Coefficient de répartition toiture terrasse/inclinée par type de bâtiment.....	21
Tableau 14 : Coefficient de masque selon le type de bâtiment (source : CEREMA, 2014).....	22
Tableau 15: Potentiel de production par type de bâtiments en région Grand Est.....	26
Tableau 16: Potentiel de production PV des principaux EPCI.....	26
Tableau 17 : Carte des potentiels de productions d’énergie à partir de panneaux photovoltaïques sur toiture par EPCI en région Grand Est.....	27
Tableau 18 : Part des éoliennes dans la région Grand Est en fonction de la pente des terrains (%) au 01/06/2020 (Sources : DREAL – BD ALTI 75m IGN)	34
Tableau 19 : Monuments emblématiques régionaux définis dans les SRE par les acteurs locaux	37
Tableau 20 : Sites Unesco au 1 ^{er} janvier 2018 et leur délimitation pour l'implantation d'éoliennes (source : site du Ministère de la Culture)	37
Tableau 21 : Enjeux avifaunistiques par ancienne région	45
Tableau 22: Enjeux chiroptères par ancienne région	46
Tableau 23 : Taux d'identification des emplacements des éoliennes existantes en fonction de leur distance par rapport aux zones favorables au développement éolien identifiées.....	49
Tableau 24 : Liste des contraintes et de leur surface en hectare.....	61
Tableau 25 : Récapitulatif des contraintes ayant entraîné l'exclusion des emplacements d'éoliennes existantes ..	62
Tableau 26 : Fonction PostGis pour calculer l'orientation des toitures des bâtiments (source : Lig'Air).....	63