



HAL
open science

Évaluation du gisement éolien dans un contexte insulaire complexe : le cas de l'île de La Réunion

Vincent Déodat

► **To cite this version:**

Vincent Déodat. Évaluation du gisement éolien dans un contexte insulaire complexe : le cas de l'île de La Réunion. Economies et finances. Université de la Réunion, 2017. Français. NNT : 2017LARE0057 . tel-02082926

HAL Id: tel-02082926

<https://theses.hal.science/tel-02082926v1>

Submitted on 28 Mar 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de La Réunion

Thèse pour obtenir le grade de Docteur en Sciences Economiques

Spécialité : Méthodes quantitatives

Section 5

présentée et soutenue publiquement par

Vincent DÉODAT

le samedi 28 janvier 2017

**Evaluation du gisement éolien dans un contexte insulaire
complexe**

Le cas de l'île de La Réunion

Directeurs de thèse :

Fabrizio CARLEVARO, professeur, Geneva School of Economics and Management
(GSEM), Université de Genève

et

Dominique LEPELLEY, professeur, Centre d'Economie et de Management de l'Océan Indien
(CEMOI), Université de La Réunion

Jury :

M. Alain BASTIDE, professeur, Université de La Réunion - Président du jury

M. Georg ERDMANN, professeur, Technische Universität Berlin - Rapporteur

M. Bernard GIOVANNINI, professeur, Université de Genève - Rapporteur

à mes grands pères, Marcel et Raymond.

Remerciements

Je voudrais remercier le professeur Fabrizio Carlevaro de m'avoir transmis sa passion pour les statistiques et d'avoir rendu possible ma post-formation à l'Université de Genève. J'ai trouvé grâce à lui un domaine d'étude dans lequel j'ai pu m'investir avec enthousiasme.

Je voudrais également remercier le professeur Dominique Lepelley d'avoir ouvert les portes de son département de Sciences Economiques à un étudiant en Philosophie.

Je voudrais remercier la Région Réunion d'avoir financé cette thèse.

Je voudrais remercier mon père de m'avoir appris à frapper aux portes.

Je voudrais remercier ma mère qui a toujours été là.

Je voudrais remercier ma sœur avec qui j'échange en permanence.

Enfin, je remercie Jaci de m'avoir supporté tout au long de cette thèse.

Résumé

Cette thèse de doctorat propose une méthodologie d'identification et de quantification du gisement éolien dans un contexte insulaire caractérisé par une topographie complexe et une forte pression sur l'usage des sols, puis elle l'applique au cas de l'île de La Réunion. Notre approche est interdisciplinaire, faisant appel tour à tour au droit, à la géographie, à la statistique et à la physique pour quantifier le gisement éolien à l'île de La Réunion, puis à l'économie pour évaluer le coût d'exploitation de ce gisement et définir des politiques publiques de soutien à la production d'électricité éolienne.

La première partie de la thèse évalue l'impact du cadre réglementaire foncier sur le potentiel éolien en termes de puissance éolienne crête installable à La Réunion. Ce cadre réglementaire est défini en termes de scénarios décrivant les enjeux sociaux et environnementaux propres à l'installation de capacités éoliennes à l'île de La Réunion. Une approche basée sur les Systèmes d'Information Géographique est développée pour identifier la répartition spatiale des sites éoliens accessibles en fonction de l'évolution du cadre juridique foncier à La Réunion.

La deuxième partie de la thèse vise à quantifier le gisement éolien sur les sites accessibles du point de vue réglementaire. La thèse expose la méthodologie d'étude de la distribution jointe de la distribution de la vitesse et de la direction horizontales du vent basée sur une analyse des variations saisonnières et journalières, et identifie les différents régimes de vent en vigueur à La Réunion. Elle justifie le recours au modèle paramétrique de Weibull dans un cadre probabiliste et montre l'intérêt d'utiliser un mélange de distributions de Weibull conditionnelles à la direction du vent, pour quantifier le potentiel éolien d'un site, par rapport au modèle conventionnel de Weibull à deux paramètres. La thèse présente également une méthodologie de construction de l'information géographique concernant les obstacles au sol, nécessaire pour profiler le cisaillement vertical du vent à La Réunion. Elle propose ensuite deux méthodes de prévision spatiale de la ressource éolienne permettant de l'évaluer à partir des observations réalisées aux stations météorologiques disponibles et utilise ces méthodes pour modéliser l'évolution spatiale de la moyenne et du coefficient de variation empiriques de la vitesse du vent.

La dernière partie de notre thèse présente une méthode d'évaluation croisée de la politique réglementaire et de la politique de subvention de l'électricité éolienne par le biais de systèmes de tarifs de rachat garantis. Pour chaque scénario de politique réglementaire, on identifie les éoliennes qui sont économiquement profitables dans le cadre de la politique publique de subvention de l'éolien pratiquée à La Réunion. Pour chaque scénario réglementaire, on évalue également le niveau du tarif de rachat garanti de l'électricité éolienne permettant d'atteindre les objectifs publics de développement de l'éolien à La Réunion, ce qui permet de chiffrer le montant du subventionnement public nécessaire pour atteindre ces objectifs.

Mots clés : Electricité éolienne, Evaluation du gisement éolien, Scénarios de réglementation foncière pour la production d'électricité éolienne, Modélisation spatiale du gisement éolien, Evaluation technico-économique de la rentabilité de l'éolien

Abstract

This doctoral thesis proposes a methodology to identify and quantify the wind power resource in a context characterized by a complex topography and a strong competition for land use, and then it applies it to the case of Reunion island. Our approach is interdisciplinary by using in turn law, geography, statistics and physics to quantify the wind power resource in Reunion Island, then economics to cost the mining of this deposit and to formulate public policies to support wind power generation.

The first part of the thesis assesses the impact of land regulatory framework on the wind power resource defined in terms of installable peak power. This regulatory framework is defined in terms of scenarios depicting the social and environmental challenges associated with wind power generation in Reunion Island. A methodology based on Geographic Information Systems is developed to identify the spatial distribution of installable wind farms and to assess the impact of an evolution of land legal framework in Reunion.

The second part of the thesis aims at quantifying the wind power on sites accessible from a regulatory point of view. The thesis presents a methodology to study the joint distribution of horizontal wind speed and direction based on the analysis of its seasonal and daily variations, and identifies the different wind regimes in force in Reunion. The thesis supports the use of Weibull distribution model on ground of probability theory, and provides evidence of superiority of using a mixture of Weibull distributions conditional on wind direction to quantify the wind power resource of an accessible site with respect to the use of the conventional marginal two parameters Weibull model. The thesis also provides a methodology to construct the geographical information regarding ground obstacles necessary for profiling the vertical wind shear profile in Reunion. Then, the thesis proposes two spatial prediction methods to assess the spatial distribution of wind resource allowing its estimation from the observations recorded at the available weather stations, and uses these methods to model the spatial evolution of the wind speed mean and variation coefficient.

The last part of the thesis provides a method to cross assess the regulatory public policy and the public subsidy policy for wind power generation through feed-in-tariff schemes. For each regulatory scenario, we identify the wind power plants which are profitable under existing feed-in-tariff schemes. For each regulatory scenario, we also evaluate the level at which the feed-in-tariff must be set to reach public objectives of wind power development in Reunion, which allows to assess the amount of public subsidy needed to achieve these objectives.

Mots clés : Wind power, Wind resource assessment, Land regulatory scenarios for wind power generation, Spatial modeling of wind power resource, Technical-economic assessment of wind power profitability

Table des matières

Chapitre 1 Introduction	15
1.1 Préambule.....	16
1.2 Situation de la production d'électricité à La Réunion.....	18
1.1 Objectifs des politiques publiques de développement de l'éolien.....	22
1.1.1 Engagements internationaux	22
1.1.2 Engagements européens	22
1.1.3 Engagements nationaux.....	23
1.1.4 Engagements régionaux	24
1.2 Evaluation de la politique publique de soutien à la production d'électricité éolienne	25
Chapitre 2 Méthodologie technico-économique d'évaluation du potentiel éolien d'un territoire ...	27
2.1 Identification des gisements éoliens accessibles à l'aide de systèmes d'information géographiques (SIG).....	28
2.2 Mesure du vent.....	38
2.3 Loi de distribution du vent	44
2.3.1 Distribution empirique de la vitesse et de la direction horizontales du vent	44
2.3.2 Distributions analytiques de la vitesse et de la direction horizontales du vent	63
2.4 Profil vertical de la vitesse du vent à l'Île de La Réunion.....	83
2.4.1 Eléments de météorologie	83
2.4.2 Loi logarithmique.....	84
2.4.3 Loi de puissance	86
2.4.4 Limitations	88
2.4.5 Extrapolation verticale du paramètre d'échelle de la distribution de Weibull.....	90
2.4.6 Méthodologie de création des couches SIG des paramètres d'extrapolation	90
2.4.7 Comparaison des lois d'extrapolation verticale de la vitesse du vent	96
2.5 Prévision de l'évolution spatiale du vent	99
2.5.1 Méthodes d'interpolation par pondération par l'inverse de la distance aux observations.....	99
2.5.2 Méthodes géostatistiques.....	100
2.6 Evaluation énergétique d'un gisement éolien.....	102
2.6.1 Principes physiques d'évaluation d'un gisement éolien.....	102
2.6.2 Choix du modèle statistique de la distribution du vent	105
2.7 Evaluation économique d'un gisement éolien.....	107
2.7.1 Calcul du coût unitaire espéré du kWh	107
2.7.2 Evaluation des politiques publiques de soutien à la production d'électricité éolienne ..	108
Chapitre 3 Evaluation du potentiel éolien installable à La Réunion dans le cadre de sa réglementation environnementale et sociale.....	111
3.1 Encadrement réglementaire de l'investissement en capacité de production d'électricité éolienne.....	112
3.2 Identification des enjeux environnementaux.....	114
3.2.1 Protection du littoral de La Réunion	114

3.2.2 Les espaces de protection forte : une zone naturelle sanctuarisée.....	115
3.2.3 Conservation de la biodiversité	118
3.3 Identification des enjeux sociaux	124
3.3.1 Zones à destination d’habitation.....	124
3.3.2 Servitudes techniques.....	127
3.4 Quantification en scénarios des puissances éoliennes installables à La Réunion	130
3.5 Conclusion.....	136
Chapitre 4 Analyse spatiale du potentiel éolien à la Réunion	137
4.1 Analyse descriptive	138
4.1.1 Description des données.....	138
4.1.2 Variables étudiées.....	140
4.1.3 Analyse descriptive des corrélations entre les séries temporelles des stations météorologiques	141
4.1.4 Analyse descriptive de la moyenne	148
4.1.5 Analyse descriptive du coefficient de variation de la vitesse du vent	154
4.2 Modélisation.....	159
4.2.1 Méthodologie	159
4.2.2 Modélisation de la moyenne de la vitesse du vent	160
4.2.3 Modélisation du coefficient de variation de la vitesse du vent.....	168
4.3 Conclusion.....	177
Chapitre 5 Evaluation des politiques publiques de soutien à la production d’électricité éolienne	179
5.1 Quantification de la production d’électricité par scénario	180
5.1.1 Scénario BAU	180
5.1.2 Scénario Biodiversité	183
5.1.3 Scénario Habitat	186
5.1.4 Scénario Eolien A.....	189
5.1.5 Scénario Eolien B.....	192
5.1.6 Scénario Eolien C.....	195
5.1.7 Scénario Eolien D.....	199
5.2 Evaluation des politiques publiques de soutien à la production d’électricité éolienne	203
5.2.1 Scénario BAU	203
5.2.2 Scénario Biodiversité	206
5.2.3 Scénario Habitat	208
5.2.4 Scénario Eolien A.....	211
5.2.5 Scénario Eolien B.....	214
5.2.6 Scénario Eolien C.....	217
5.2.7 Scénario Eolien D.....	220
5.3 Conclusions	222
Chapitre 6 Conclusion.....	226
Bibliographie.....	229

Liste des figures

Figure 1: Evolution de la production annuelle d'électricité à La Réunion par type d'énergie primaire. Source : Bilan Energétique de La Réunion 2014, Oer, 2015.	18
Figure 2: Evolution de la puissance électrique installée à La Réunion par type d'énergie primaire. Source : Bilan Energétique de La Réunion 2014, Oer, 2015.	19
Figure 3: Mix électrique à La Réunion en 2014. Source : EDF, Bilan prévisionnel 2015.	20
Figure 4: Evolution de la puissance crête P_V , P_G et $P_G - P_V$, en fonction de la longueur du parc éolien en rangée.	32
Figure 5: Cartographie des zones accessibles selon le scenario BAU et du parc éolien installé à Sainte-Suzanne en 2011.	33
Figure 6 : Délimitation de la zone accessible à Sainte-Suzanne pour la détermination du réseau de rangées d'éoliennes à installer.	34
Figure 7 : Positionnement de deux rangées d'éoliennes dans la zone accessible à Sainte-Suzanne qui maximisent la taille d'un parc éolien Gamesa G58.	35
Figure 8: Positionnement de trois rangées d'éoliennes dans la zone accessible à Sainte-Suzanne qui maximisent la taille d'un parc éolien Vergnet GEV MP.	35
Figure 9 : Positionnement de deux rangées d'éoliennes dans la seconde zone accessible à Sainte-Suzanne qui maximisent la taille d'un parc éolien Gamesa G58.	36
Figure 10: Positionnement de trois rangées d'éoliennes dans la zone seconde accessible à Sainte-Suzanne qui maximisent la taille d'un parc éolien Vergnet GEV MP.	37
Figure 11 : Système de coordonnées cartésien rectangulaire.	38
Figure 12: Système de coordonnées cylindrique.	39
Figure 13: Système de coordonnées sphérique.	39
Figure 14 : Répartition des stations météorologiques à La Réunion.	42
Figure 15: Histogramme des mesures de vitesse et direction horizontales du vent à la station météorologique de Pierrefonds en 2010.	46
Figure 16: Histogramme des mesures de vitesse horizontale du vent à la station météorologique de Pierrefonds en 2010.	46
Figure 17: Histogramme des mesures de direction horizontale du vent à la station météorologique de Pierrefonds en 2010.	47
Figure 18: Rose des vents pour la station météorologique de Pierrefonds en 2010.	48
Figure 19: Circulation atmosphérique au sein d'une cellule de Hadley.	49
Figure 20: Force de Coriolis et trajectoires des alizés.	50
Figure 21: Histogrammes des distributions saisonnières 2010 des vitesses et directions du vent à la station météorologique de Pierrefonds.	53
Figure 22 : Rose des vents saisonnières 2010 à la station météorologique de Pierrefonds.	53
Figure 23: Histogrammes des distributions journalières estivales 2010 des vitesses et directions du vent à la station météorologique de Pierrefonds.	56
Figure 24: Roses des vents journalières estivales 2010 à la station météorologique de Pierrefonds.	56
Figure 25: Cellule de Hadley d'une brise de mer.	57
Figure 26: Cellule de Hadley d'une brise de terre.	58
Figure 27: Régimes de vent à la station météorologique de Pierrefonds.	58
Figure 28: Histogrammes des distributions journalières hivernales 2010 des vitesses et directions du vent à la station météorologique de Pierrefonds.	61
Figure 29: Rose des vents journalières hivernales 2010 à la station météorologique de Pierrefonds.	61
Figure 30 : Histogrammes des distributions de la vitesse horizontale du vent à la station météorologique de Pierrefonds en 2010, conditionnelles aux 12 secteurs 30° de la rose des vents.	63
Figure 31: Transformation des axes du repère cartésien de la densité de probabilité du modèle Normal Elliptique Décalé.	67
Figure 32: Profils de la fonction de densité de Weibull standardisée ($c=1$) pour $0 < k < 1$	71
Figure 33: Profils de la fonction de densité de Weibull standardisée ($c=1$) pour $k > 1$	72

Figure 34: Graphes de la moyenne, de la médiane et du mode de la distribution de Weibull standardisée ($c=1$) en fonction du paramètre $k \geq 1$.	73
Figure 35: Graphe de la variance de la distribution de Weibull standardisée ($c=1$) en fonction du paramètre $k \geq 1$.	74
Figure 36: Graphe du coefficient d'asymétrie (skewness) de la distribution de Weibull standardisée ($c=1$) en fonction du paramètre $k \geq 1$.	75
Figure 37: Graphe du coefficient d'aplatissement (kurtosis) de la distribution de Weibull standardisée ($c=1$) en fonction du paramètre $k \geq 1$.	76
Figure 38: Profils de la fonction de densité de Weibull pour $k=0.5$ en fonction de la valeur du paramètre c .	77
Figure 39: Profils de la fonction de densité de Weibull pour $k=1$ en fonction de la valeur du paramètre c .	77
Figure 40: Profils de la fonction de densité de densité de Weibull pour $k=3$ en fonction de la valeur du paramètre c .	78
Figure 41: Fonction de densité de Weibull à deux paramètres ajustée à la distribution empirique marginale de la vitesse du vent observée à la station météorologique de Pierrefonds en 2010.	80
Figure 42: Fonctions de densité de Weibull à deux paramètres ajustées aux distributions empiriques de la vitesse du vent conditionnelles aux 12 classes de directions du vent 30° observées à la station météorologique de Pierrefonds en 2010.	81
Figure 43: Mélange de distributions de Weibull à deux paramètres ajustées aux distributions empiriques de la vitesse du vent conditionnelles aux 12 classes de direction du vent 30° observées à la station météorologique de Pierrefonds en 2010.	82
Figure 44: Sous-couches de la couche limite de l'atmosphère.	84
Figure 45: Profils de la loi logarithmique.	86
Figure 46: Profils de la loi de puissance.	88
Figure 47: Rugosité: tâche urbaine et champs de canne à sucre à l'île de La Réunion.	92
Figure 48: Répartition spatiale du coefficient d'extrapolation α de la loi de puissance pour le raster 2.	95
Figure 49: Différence entre la vitesse relative $v(z_2)/v(z_1)$ extrapolée par la loi logarithmique et la loi de puissance en fonction de la hauteur relative z_2/z_1 .	97
Figure 50: Volume d'une masse d'air traversant à la vitesse v pendant une durée t une surface S perpendiculairement.	102
Figure 51: Courbes de puissance des modèles d'éoliennes en compétition à La Réunion pour une masse volumique moyenne annuelle de l'air de $1.193 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$.	103
Figure 52: Méthodologie d'évaluation des politiques publiques de soutien à l'électricité éolienne.	110
Figure 53: Cartographie des espaces naturels de protection forte et des espaces protégés du littoral.	117
Figure 54: Cartographie des zones de protection de la biodiversité.	119
Figure 55: Pétrel noir de Bourbon.	120
Figure 56: Busard de Maillard.	121
Figure 57: Cartographie des enjeux de préservation de l'avifaune.	123
Figure 58: Cartographie du périmètre d'éloignement défini par le régime d'autorisation ICPE. ...	125
Figure 59: Cartographie des zones accessibles du scénario BAU et du parc éolien de Sainte-Suzanne.	126
Figure 60: Cartographie des zones accessibles du scénario BAU et du parc éolien de Sainte-Rose.	126
Figure 61: Cartographie des servitudes techniques.	129
Figure 62: Puissance éolienne crête totale installable à La Réunion selon différents scénarios réglementaires et deux technologies d'éoliennes.	133
Figure 63: Répartition spatiale des stations météorologiques.	139
Figure 64: Méso-maillage des points de données du modèle Arôme.	140
Figure 65: Corrélation des vitesses de vent en fonction de la distance séparant les stations de mesure.	142
Figure 66: Corrélation des vitesses de vent en fonction de la distance séparant les stations de	

mesure selon leur répartition spatiale.....	144
Figure 67 : Corrélation des vitesses de vent en fonction de la différence d'élévation entre les stations de mesure.....	145
Figure 68: Corrélation des vitesses de vent en fonction de la différence d'élévation entre les stations de mesure selon leur répartition spatiale.....	146
Figure 69: Corrélation des vitesses de vent en fonction de la différence de rugosité entre les stations de mesure.....	147
Figure 70: Corrélation des vitesses de vent en fonction de la différence de rugosité entre les stations de mesure selon leur répartition spatiale.....	148
Figure 71: Relation entre la vitesse moyenne du vent et la longitude.....	149
Figure 72: Relation entre la vitesse moyenne du vent et la longitude selon le découpage côte sous le vent et côte au vent.....	150
Figure 73: Relation entre la vitesse moyenne du vent et la latitude.....	150
Figure 74: Relation entre la vitesse moyenne du vent et la latitude selon le découpage côte sous le vent et côte au vent.....	151
Figure 75 : Relation entre la moyenne de la vitesse du vent (résidus) et la longitude.....	151
Figure 76 Relation entre la vitesse moyenne du vent et l'altitude.....	152
Figure 77 : Relation entre la vitesse moyenne du vent et l'altitude selon le découpage côte sous le vent et côte au vent.....	152
Figure 78 : Relation entre la moyenne de la vitesse du vent (résidus) et l'altitude.....	153
Figure 79 : Relation entre la vitesse moyenne du vent et l'altitude.....	153
Figure 80 : Relation entre la vitesse moyenne du vent et l'altitude selon le découpage côte sous le vent et côte au vent.....	154
Figure 81 : Relation entre le coefficient de variation et la longitude selon le découpage côte sous le vent et côte au vent.....	155
Figure 82 : Relation entre le coefficient de variation et la longitude selon le découpage côte sous le vent et côte au vent.....	155
Figure 83 : Relation entre le coefficient de variation et la latitude.....	156
Figure 84 : Relation entre le coefficient de variation et la latitude selon le découpage côte sous le vent et côte au vent.....	156
Figure 85: Relation entre le coefficient de variation et l'altitude.....	157
Figure 86: Relation entre le coefficient de variation et l'altitude selon le découpage côte sous le vent et côte au vent.....	157
Figure 87: Relation entre le coefficient de variation et la rugosité.....	158
Figure 88: Relation entre le coefficient de variation et la rugosité selon le découpage côte sous le vent et côte au vent.....	158
Figure 89: Evaluation des prédictions de la vitesse moyenne par le modèle de la moyenne pondérée.....	161
Figure 90 : Evaluation des prédictions de la vitesse moyenne par le modèle de tendance.....	162
Figure 91: Evaluation pour chacun des sous-échantillons des prédictions de la vitesse moyenne par le modèle de tendance.....	165
Figure 92: Evaluation des prédictions de la moyenne à partir des données des stations météorologiques.....	167
Figure 93: Evaluation des prédictions du coefficient de variation de la vitesse par le modèle de la moyenne pondérée.....	169
Figure 94 : Evaluation des prédictions du coefficient de variation de la vitesse par le modèle de la tendance.....	171
Figure 95 : Evaluation pour chaque sous-échantillon des prédictions du coefficient de variation par le modèle de tendance.....	174
Figure 96: Evaluation des prédictions de du coefficient de variation à partir des données des stations météorologiques.....	176
Figure 97: Histogramme des productions annuelles espérées du scénario BAU pour chaque technologie d'éolienne.....	181
Figure 98: Courbe cumulative des taux d'utilisation des éoliennes installables du scénario BAU pour chaque technologie.....	182

Figure 99: Répartition spatiale des éoliennes installables prometteuses du scénario BAU.	183
Figure 100: Histogramme des productions annuelles espérées du scénario Biodiversité pour chaque technologie d'éolienne.	184
Figure 101: Courbe cumulative des taux d'utilisation des éoliennes installables du scénario Biodiversité pour chaque technologie.	185
Figure 102: Impact des nouvelles normes de protection de la biodiversité sur les éoliennes installables prometteuses du scénario BAU et répartition spatiale des éoliennes installables prometteuses du scénario Biodiversité.	186
Figure 103: Histogramme des productions annuelles espérées du scénario Habitat pour chaque technologie d'éolienne.	187
Figure 104: Courbe cumulative des taux d'utilisation des éoliennes installables du scénario Habitat pour chaque technologie.	188
Figure 105: Répartition spatiale des éoliennes installables prometteuses du scénario Habitat.	189
Figure 106: Histogramme des productions annuelles espérées du scénario Eolien A pour chaque technologie d'éolienne.	190
Figure 107: Courbe cumulative des taux d'utilisation des éoliennes installables du scénario Eolien A pour chaque technologie.	191
Figure 108: Répartition spatiale des éoliennes installables prometteuses du scénario Eolien A. ..	192
Figure 109: Histogramme des productions annuelles espérées du scénario Eolien B pour chaque technologie d'éolienne.	193
Figure 110: Courbe cumulative des taux d'utilisation des éoliennes installables du scénario Eolien B pour chaque technologie.	194
Figure 111: Répartition spatiale des éoliennes installables prometteuses du scénario Eolien B.	195
Figure 112: Histogramme des productions annuelles espérées du scénario Eolien C pour chaque technologie d'éolienne.	196
Figure 113: Courbe cumulative des taux d'utilisation des éoliennes installables du scénario Eolien C pour chaque technologie.	197
Figure 114: Répartition spatiale des éoliennes installables prometteuses du scénario Eolien C.	198
Figure 115: Impact des nouvelles normes de protection de la biodiversité sur les éoliennes installables prometteuses du scénario Eolien B.	199
Figure 116: Histogramme des productions annuelles espérées du scénario Eolien D pour chaque technologie d'éolienne.	200
Figure 117: Courbe cumulative des taux d'utilisation des éoliennes installables du scénario Eolien D pour chaque technologie.	201
Figure 118: Répartition spatiale des éoliennes installables prometteuses du scénario Eolien D. ..	202
Figure 119: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Vergnet dans le cas du scénario BAU.	204
Figure 120: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Gamesa dans le cas du scénario BAU.	205
Figure 121: Potentiel éolien économique sous le scénario BAU et une politique de subvention optimale.	206
Figure 122: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Vergnet dans le cas du scénario Biodiversité.	207
Figure 123: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Gamesa dans le cas du scénario Biodiversité.	208
Figure 124: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Vergnet dans le cas du scénario Habitat.	209
Figure 125: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Gamesa dans le cas du scénario Habitat.	210
Figure 126: Potentiel éolien économique sous le scénario Habitat et une politique de subvention optimale.	211
Figure 127: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Vergnet dans le cas du scénario Eolien A.	212
Figure 128: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Gamesa dans le cas du scénario Eolien A.	213

Figure 129: Potentiel éolien économique sous le scénario Eolien A et une politique de subvention optimale.....	214
Figure 130: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Vergnet dans le cas du scénario Eolien B.	215
Figure 131: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Gamesa dans le cas du scénario Eolien B.	216
Figure 132 : Potentiel éolien économique sous le scénario Eolien B et une politique de subvention optimale.....	217
Figure 133 : Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Vergnet dans le cas du scénario Eolien C.	218
Figure 134 : Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Gamesa dans le cas du scénario Eolien C.	219
Figure 135: Potentiel éolien économique sous le scénario Eolien C et une politique de subvention optimale.....	219
Figure 136: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Vergnet dans le cas du scénario Eolien D.	220
Figure 137: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Gamesa dans le cas du scénario Eolien D.	221
Figure 138: Puissance éolienne crête totale installable à La Réunion selon différents scénarios réglementaires et deux technologies d'éoliennes.	222
Figure 139 : Production électrique espérée totale à La Réunion selon différents scénarios réglementaires et deux technologies d'éoliennes.	223
Figure 140: Puissance économiquement installable à La Réunion selon différents scénarios réglementaires et deux technologies d'éoliennes.	224
Figure 141 : Tarif de rachat optimal à La Réunion selon différents scénarios réglementaires et deux technologies d'éoliennes.	225

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques techniques des anémomètres à La Réunion.	40
Tableau 2 : Localisation géographique des stations météorologiques et durée des campagnes de mesure.	43
Tableau 3: Distribution des mesures de vitesse (en m/s) et direction (en degrés) horizontales du vent par classes de vitesse et direction à la station météorologique de Pierrefonds en 2010.	45
Tableau 4: Distribution estivale 2010 des vitesses et directions horizontales du vent à la station météorologique de Pierrefonds.....	51
Tableau 5 : Distribution hivernale 2010 des vitesses et directions horizontales du vent à la station météorologique de Pierrefonds.....	52
Tableau 6: Distribution diurne estivale 2010 des vitesses et directions horizontales du vent à la station météorologique de Pierrefonds.	54
Tableau 7 : Distribution nocturne estivale 2010 des vitesses et directions horizontales du vent à la station météorologique de Pierrefonds.	55
Tableau 8: Distribution diurne hivernale 2010 des vitesses et directions du vent à la station météorologique de Pierrefonds.....	59
Tableau 9 : Distribution nocturne hivernale 2010 des vitesses et directions du vent à la station météorologique de Pierrefonds.....	60
Tableau 10: Principales caractéristiques numériques de la distribution de Weibull à deux paramètres.	69
Tableau 11: Caractéristiques de la densité de Weibull en fonction du paramètre de forme k.	79
Tableau 12: Coefficients d'extrapolation z_0 pour divers types de terrains. Source: Manwell (2009).	85
Tableau 13: Coefficients d'extrapolation α pour divers types de terrains. Source: Bechrakis et al. (2000).	87
Tableau 14: Plages d'altitudes pour les pour divers types de terrains et les coefficients	

d'extrapolation α . Source: Bechrakis et al. (2000).....	92
Tableau 15: Plages d'altitudes pour les pour divers types de terrains et les coefficients d'extrapolation z_0 . Source: Manwell et al.(2003).	93
Tableau 16: Coefficients d'extrapolation α et z_0 pour chaque type de culture agricole à La Réunion.	94
Tableau 17: Paramètres de rugosité pour les stations météorologiques de l'île de La Réunion.....	95
Tableau 18 : Extrapolation à l'altitude z_2 de la vitesse moyenne du vent observée à l'altitude z_1 d'après les lois logarithmique et de puissance calibrées avec les paramètres des rasters 1 et 2.	98
Tableau 19 : Extrapolation à l'altitude z_2 du paramètre d'échelle de la loi de Weibull estimée avec les observations réalisées à l'altitude z_1 d'après les lois logarithmique et de puissance calibrées avec les paramètres des rasters 1 et 2.	98
Tableau 20 : Courbes de puissance des modèles d'éoliennes en compétition à La Réunion pour une masse volumique moyenne annuelle de l'air de 1.193 [kg.m ⁻³].	104
Tableau 21: Evaluation du productible électrique pour les éoliennes de technologie Gamesa G58 et Vergnet GEV HP d'après les observations météorologiques réalisées à la station de Pierrefonds en 2010.....	105
Tableau 22: Evaluation de la production d'électricité annuelle espérée [MWh] d'une éolienne à la station de Pierrefonds en 2010 d'après des distributions analytiques de Weibull de la vitesse du vent et comparaison à l'évaluation basée sur la distribution empirique.....	106
Tableau 23: Postes de coût unitaires annualisés en [€·kW ⁻¹ ·an ⁻¹] des éoliennes Gamesa G58 et Vergnet GEV HP.....	107
Tableau 24: Estimation du coût unitaire annuel espéré des éoliennes Gamesa G58 et Vergnet GEV MP d'après les observations de la station météorologique de Pierrefonds en 2010.....	108
Tableau 25 : Espaces naturels de protection forte.	116
Tableau 26: Listes des espèces protégées à l'île de La Réunion.....	120
Tableau 27 : Distance d'éloignement minimale d'une éolienne par rapport à l'habitat.	124
Tableau 28: Présentation d'ensemble des scénarios réglementaires d'évaluation des zones accessibles à l'exploitation du gisement éolien.....	131
Tableau 29: Puissance éolienne crête totale installable à La Réunion selon différents scénarios réglementaires et deux technologies d'éoliennes.	132
Tableau 30 : Localisation géographique des stations météorologiques et durée des campagnes de mesure.	138
Tableau 31: Répartition des stations météorologiques selon le découpage côte sous le vent/côte au vent.	143
Tableau 32: Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions de la moyenne de la vitesse. ..	161
Tableau 33: Régressions de la moyenne pour les données Arôme.	162
Tableau 34: Régressions de la moyenne pour les données Stations, modèle 1.	163
Tableau 35: Régressions de la moyenne pour les données Stations, modèle 2.	163
Tableau 36: Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions de la moyenne pour le modèle de tendance Stations.....	163
Tableau 37: Régressions de la moyenne pour les données Arôme au vent, modèle 1.....	164
Tableau 38: Régressions de la moyenne pour les données Arôme au vent, modèle 2.....	164
Tableau 39: Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions de la moyenne pour le modèle de tendance Arôme au vent.	165
Tableau 40: Régressions de la moyenne pour les données Arôme sous le vent, modèle 1.	166
Tableau 41: Régressions de la moyenne pour les données Arôme sous le vent, modèle 2.	166
Tableau 42: Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions de la moyenne pour le modèle de tendance Arôme sous le vent.	166
Tableau 43: Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions des moyennes des stations météorologiques.	168
Tableau 44: Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions du coefficient de variation de la vitesse.	169
Tableau 45: Régressions du coefficient de variation pour les données Arôme, modèle 1.....	170
Tableau 46: Régressions du coefficient de variation pour les données Arôme, modèle 2.....	170
Tableau 47 : Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions du coefficient de variation pour	

le modèle de tendance Arôme.	170
Tableau 48 : Régressions du coefficient de variation pour les données Stations, modèle 1.....	171
Tableau 49 : Régressions du coefficient de variation pour les données Stations, modèle 2.....	172
Tableau 50 : Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions du coefficient de variation pour le modèle de tendance Stations.	172
Tableau 51: Régressions du coefficient de variation pour les données Arôme au vent, modèle 1.	173
Tableau 52: Régressions du coefficient de variation pour les données Arôme au vent, modèle 2.	173
Tableau 53: Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions du coefficient de variation pour le modèle de tendance Arôme au vent.....	173
Tableau 54 : Régressions du coefficient de variation pour les données Arôme sous le vent, modèle 1.....	174
Tableau 55 : Régressions du coefficient de variation pour les données Arôme sous le vent, modèle 2.....	175
Tableau 56 : Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions du coefficient de variation pour le modèle de tendance Arôme sous le vent.....	175
Tableau 57: Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions des coefficients de variation des stations météorologiques.	176
Tableau 58: Production électrique annuelle totale espérée par scénario de politique réglementaire et type d'éolienne.	180
Tableau 59: Moyennes et coefficient de variation de la production annuelle totale espérée pour chaque scénario.	184
Tableau 60: Résultats de l'évaluation de la politique publique de promotion de l'éolien à La Réunion.	203

Table des unités de mesure

h	heure
W	Watt
W _c	Watt-crête
m	mètre
s	seconde
g	gramme
°	degré
€	euro

Chapitre 1 Introduction

1.1 Préambule

« *Imitant en cela les voyageurs qui, se trouvant égarés en quelque forêt, ne doivent errer en tournoyant, tantôt d'un côté, tantôt d'un autre, ni encore moins s'arrêter en une place, mais marcher toujours le plus droit qu'ils peuvent vers un même côté, et ne le changer point pour de faibles raisons, encore que ce n'ait peut être été au commencement que le hasard seul qui les ait déterminés à choisir: car, par ce moyen, s'ils ne vont justement où ils le désirent, ils arriveront au moins à la fin quelque part, où vraisemblablement ils seront mieux que dans le milieu d'une forêt* »¹.

Bien heureusement, cette allégorie n'a pas vocation à illustrer le travail de thèse. La forêt que Descartes décrit dans son Discours de la méthode pose le cadre d'un milieu peu hospitalier, potentiellement une zone de non droit à son époque, et renvoie à une situation peu favorable dont il est vital de s'extirper malgré un déficit d'information sur la marche à suivre, le niveau d'effort à produire, la garantie de succès. Par cette allégorie, Descartes pose le cadre de toute action et définit les grands principes de sa morale provisoire. Cette allégorie de la forêt illustre la démarche de cette thèse à deux égards.

En premier lieu, la problématique de cette thèse contribue à répondre à une urgence, celle de l'action d'atténuation du changement climatique. La prise de décision en avenir incertain caractérise de manière adéquate l'urgence de la problématique climatique, laquelle appelle à des investissements immédiats sans feuille de route optimale. La troisième maxime de la morale provisoire de Descartes appelle à l'action même en cas de déficit d'information. Cette thèse a été pensée pour produire une information qui puisse assister à la prise de décision, lever une part de l'incertitude et en dernière instance favoriser l'action d'atténuation du changement climatique à l'île de La Réunion.

Ensuite la morale de Descartes est le renversement point par point de sa méthode en théorie de la connaissance qui consiste à écarter toute opinion douteuse. Enfermé dans son poêle, Descartes transformait le doute en négation afin de dégager la certitude absolue de la pensée et de l'être du « *cogito ergo sum* ». Cette fois exposé aux dangers de la forêt et à l'urgence de l'action, Descartes transforme le doute en résolution absolue, « *les actions de la vie ne souffrant aucun délai* ». Cette métaphore pose la base d'une distinction radicale entre le domaine de la connaissance et le domaine de la pratique, entre le lieu de la réflexion et le lieu de l'action. Cette thèse s'inscrit en faux contre cette distinction radicale entre connaissance et pratique, entre savoir et savoir-faire.

En premier lieu, il s'agit d'un travail de recherche appliquée qui a pour ambition de répondre à une problématique concrète celle du développement de la production d'électricité éolienne à La Réunion à un horizon de moyen terme fixé à 2050. L'île de La Réunion, île volcanique jeune, est située dans l'archipel des Mascareignes à l'ouest de l'Océan Indien, dans l'hémisphère Sud. La topographie de l'île est complexe du fait de son relief accidenté, et la population est donc majoritairement concentrée sur le littoral de l'île. La densité de population y est très importante, environ deux fois supérieure à celle de la France métropolitaine (322 habitants/km² contre 112 habitants/km²). Au cœur de l'île, le parc national classé au patrimoine mondial de l'UNESCO constitue une zone sanctuarisée pour ses paysages iconiques et la richesse de sa biodiversité. Le développement des capacités éoliennes dans une île tropicale comme La Réunion est donc en premier lieu une problématique d'affectation des sols. Par ailleurs, l'insularité est du point de vue de l'approvisionnement

¹René DESCARTES, *Discours de la méthode*, Paris, GF Flammarion, 2000, p.57.

électrique synonyme d'isolement. Le système électrique réunionnais ne bénéficie pas d'interconnexions et l'équilibre du réseau de distribution d'électricité est assuré à partir de capacités électriques domestiques uniquement. L'intégration de la production d'électricité renouvelable de nature intermittente, dans le cas de l'éolien et du photovoltaïque, nécessite de prendre en compte cet impératif d'équilibre du réseau particulièrement contraignant en contexte insulaire. Cette thèse n'embrasse néanmoins pas la perspective du gestionnaire de réseau mais celle de l'investisseur en capacité éolienne puis du décideur politique afin de répondre au questionnement suivant. Quelles zones sont les plus favorables au développement de l'éolien à La Réunion ? Quelles sont les contraintes au développement de l'éolien sur l'île de La Réunion ? Quel rôle le développement technologique est-il amené à jouer pour favoriser le développement des énergies renouvelables locales ? La Réunion possède-t-elle le potentiel éolien nécessaire pour atteindre des objectifs publics de développement de l'éolien fixé pour le territoire ? Et enfin, la politique publique de soutien à la production d'électricité éolienne est-elle adaptée au contexte réunionnais ?

Ce travail de thèse a pour ambition de répondre à ce questionnement, de produire un savoir sur la question éolienne dans le contexte réunionnais. Nous avons donc mis en place une méthode de quantification du potentiel éolien à La Réunion, qui est également une méthodologie d'évaluation de la politique publique de soutien à la production d'électricité éolienne. Cette thèse a donc pour vocation d'exposer un savoir appliqué fruit d'une méthodologie technico-statistique faisant appel aux ressources de la statistique et des systèmes d'information géographique (SIG). Son ambition est donc de mettre en place une méthode qui converge à la frontière du savoir et du savoir-faire à travers l'utilisation d'outils permettant l'évaluation du potentiel d'une énergie renouvelable stochastique telle que l'énergie éolienne.

Cette thèse, du fait de son objet, prolonge l'investigation au-delà du champ de l'économie quantitative en convoquant les ressources de la physique, de la statistique et du droit afin de répondre à la problématique posée. Nous achèverons donc ce préambule par une ultime référence à la théorie de la connaissance cartésienne, qui fonde l'unité de la connaissance sur l'unité de la raison:

« Toutes les sciences ne sont en effet rien d'autre que l'humaine sagesse, qui demeure toujours une et identique à elle-même, quelques différents que soient les objets auxquels elle s'applique, et qui ne reçoit pas d'eux plus de diversité que n'en reçoit la lumière du soleil de la variété des choses qu'elle éclaire ; il n'y a donc pas lieu de contenir l'esprit en quelques bornes que ce soit »².

La première section de cette introduction présente le contexte électrique réunionnais, la seconde les objectifs des politiques publiques de développement de l'éolien, et la troisième la structure de la thèse.

² René DESCARTES, *Règles pour la direction de l'esprit*, Paris, Œuvres philosophiques, Tome 1, Classiques Garnier, 1963, p.78.

1.2 Situation de la production d'électricité à La Réunion

Pendant les trente dernières années, l'île de La Réunion a connu une croissance très importante de ses besoins en électricité, dans des proportions bien supérieures à celles de la France métropolitaine. Cette augmentation de la demande d'électricité a été historiquement compensée par un accroissement de la production d'électricité à partir de centrales thermiques fonctionnant au diesel et au charbon. Cette tendance soulève néanmoins deux problèmes à résoudre pour l'île de La Réunion. Le premier est celui de la dépendance énergétique du territoire, les ressources fossiles nécessaires au fonctionnement des centrales thermiques étant absentes des sous-sols de l'île. L'augmentation de la consommation d'énergies fossiles par les centrales thermiques a donc induit une croissance des importations de diesel lourd et de charbon, dont les volumes ont quasiment doublé (89.12%) entre 2000 et 2014 (Figure 1). Le second problème relève du caractère polluant de la production d'électricité à partir du diesel ou du charbon. Le secteur électrique constitue désormais le principal contributeur à la facture anthropique de La Réunion à hauteur de 47%³ des émissions totales de dioxyde de carbone, dans des proportions équivalentes au secteur du transport.

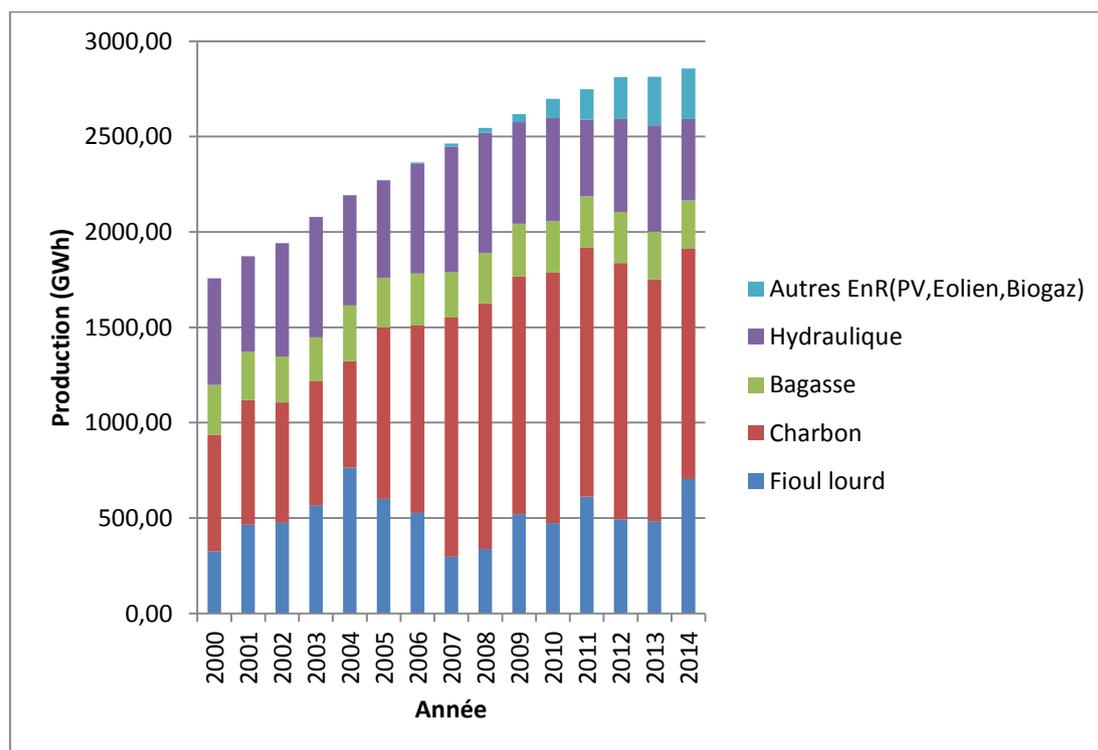


Figure 1: Evolution de la production annuelle d'électricité à La Réunion par type d'énergie primaire. Source : Bilan Energétique de La Réunion 2014, Oer, 2015.

Afin de répondre à cette double problématique, le plan STARTER (STratégie d'Autosuffisance énergétique et pour la Relance et la Transition Energétique à La Réunion) à l'échelle régionale, et l'initiative GERRI (Grenelle de l'environnement à La Réunion : Réussir l'innovation - Green Energy revolution : Reunion Island) au niveau national, ont

³ Donnée 2014. Source : Bilan énergétique de La Réunion 2014, Oer, 2015.

affirmé l’ambition politique de parvenir à l’autonomie énergétique de l’île de La Réunion à l’horizon 2050. Cette situation d’autonomie énergétique avait déjà été atteinte pour le système électrique en 1982 lorsque les capacités hydrauliques suffisaient à couvrir les besoins électriques de l’industrie et des habitants de l’île. La mise en œuvre d’un tel plan visant à revenir à la production d’électricité exclusivement à partir de ressources locales non polluantes s’amorce par la maîtrise de la demande d’électricité et la couverture de la croissance résiduelle de la demande par le développement de capacités de production d’électricité renouvelable. Entre 2005 et 2014, 218 MW de puissances photovoltaïques et éoliennes ont ainsi été installées, soit plus d’un quart (26.3%) de la puissance installée totale⁴. Les puissances photovoltaïques ont connu notamment une croissance importante sur la période 2007-2014, pour atteindre 172.7 MWc de puissance électrique installée totale. Parallèlement, l’investissement en capacités de production d’électricité éolienne a été bien plus modeste. La puissance totale des éoliennes installées à La Réunion s’élève à 19.25 MWc en 2016, bien que seuls 14.8 MWc soient actuellement en exploitation⁵.

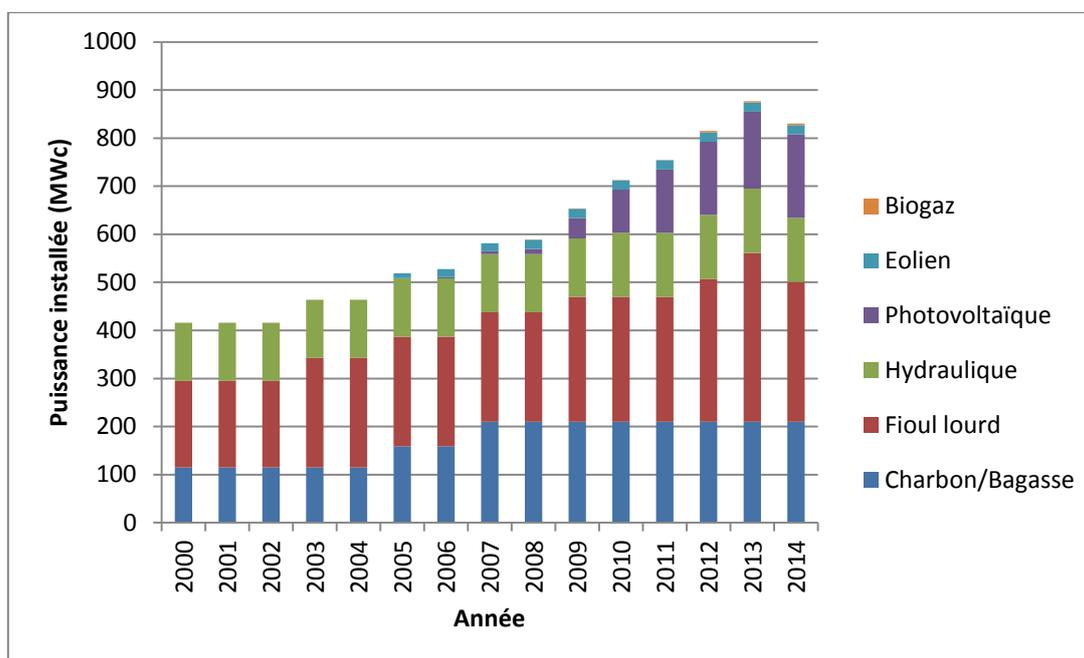


Figure 2: Evolution de la puissance électrique installée à La Réunion par type d’énergie primaire. Source : Bilan Energétique de La Réunion 2014, Oer, 2015.

Malgré l’importance des puissances installées, la part qu’occupent les énergies renouvelables hors hydraulique dans le mix électrique de La Réunion demeure assez faible. Les productions d’électricité photovoltaïque et éolienne représentent respectivement 8.3% et 0.6% de la production totale d’électricité, comme l’illustre la Figure 3, alors que l’électricité d’origine fossile demeure prépondérante à hauteur des deux tiers (67%⁶) de la production totale d’électricité en 2014. Dans le détail, légèrement moins de la moitié (42%) de la production est assurée par les centrales thermiques fonctionnant au charbon et un quart (24.7%) par les centrales thermiques fonctionnant au fioul lourd. Cet effet d’écrasement de la part des énergies renouvelables intermittentes que sont le photovoltaïque et l’éolien est dû à la nature fluctuante de la ressource. Les capacités intermittentes sont dépendantes de la présence du flux éolien ou solaire et de son intensité. Par voie de conséquence, les puissances

⁴ 826.7 MW de puissance électrique installée au 1 er janvier 2016. Source : EDF, Bilan prévisionnel 2015.

⁵ Source :EDF (2015).

⁶ Source : EDF (2015).

renouvelables photovoltaïques et éoliennes possèdent des taux d'utilisation⁷ plus faibles que les capacités thermiques et produisent moins d'électricité sur une année à puissance nominale installée équivalente.

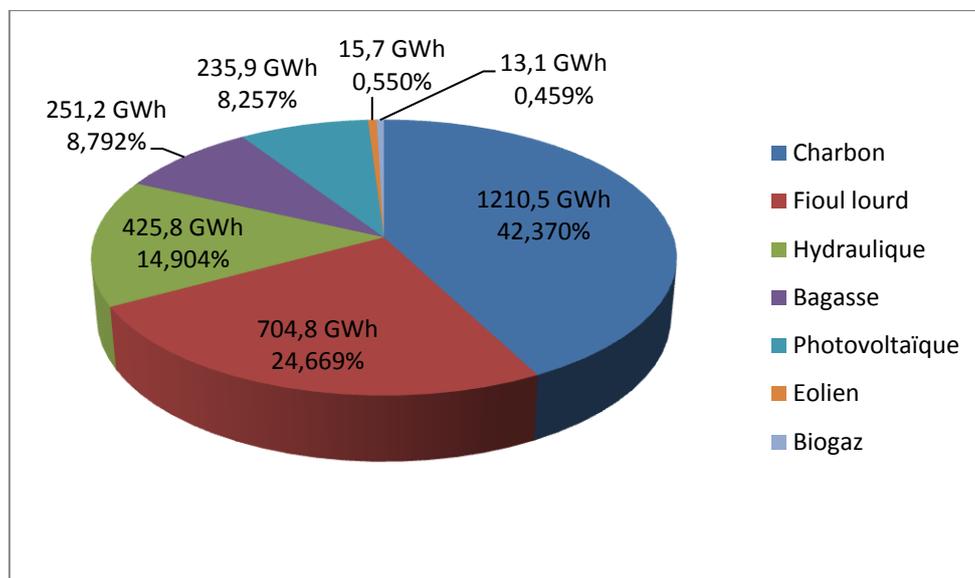


Figure 3: Mix électrique à La Réunion en 2014. Source : EDF, Bilan prévisionnel 2015.

Du fait de la nature coûteuse des carburants utilisés par les centrales thermiques de La Réunion, notamment le diesel lourd, le coût unitaire moyen de l'électricité produite à La Réunion est bien plus élevé qu'en métropole où l'électricité est majoritairement d'origine nucléaire. Le coût unitaire moyen de l'électricité produite à La Réunion est évalué à environ 26 c€ par kWh et à ce prix la technologie éolienne présente désormais l'avantage économique d'être compétitive puisqu'elle a atteint un niveau de parité de coût-réseau. L'Etat français a donc mis en place depuis 2000 une politique publique de soutien à la production d'électricité éolienne par le biais de tarifs de rachat (feed-in-tarif), plus avantageuse qu'en France métropolitaine. Pour La Réunion, les tarifs de rachat établis afin de promouvoir la production d'électricité éolienne s'élèvent actuellement à 11 c€ le kWh⁸, et les installations disposant d'un système de stockage et de lissage de la production bénéficient d'un tarif de 23 c€ le kWh⁹. Le dispositif de subventionnement est financé au moyen de la Contribution au Service Public de l'Electricité (CSPE), qui couvre également le surcoût des moyens de production de l'électricité dans les systèmes insulaires comme La Réunion. La politique publique de soutien

⁷ Egalement appelé facteur de charge, le taux d'utilisation est calculé en faisant le rapport entre la puissance produite moyenne et la puissance nominale de la centrale électrique. Cette notion est davantage explicitée au Chapitre 2 à la section 2.6.1. Pour les années 2007 à 2013, le facteur de charge était compris entre 4,1% et 9,9% pour le parc éolien de Sainte-Rose et entre 9 et 16,2% pour le parc éolien de Sainte Suzanne. Le facteur de charge moyen des installations éoliennes situées en métropole était de 22,9% selon le bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France 2015. A titre de comparaison, le facteur de charge des centrales thermiques à La Réunion était de l'ordre de 79.4% pour les centrales charbon/bagasse et de 27.6% pour les centrales au fioul lourd.

⁸ Arrêté du 17 juin 2014 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie mécanique du vent implantées à terre.

⁹ Arrêté du 8 mars 2013 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie mécanique du vent situées dans des zones particulièrement exposées au risque cyclonique et disposant d'un dispositif de prévision et de lissage de la production.

à la production d'électricité éolienne vise à atteindre des objectifs de limitation des rejets de gaz à effet de serre et de développement des énergies renouvelables dont les grands principes, que nous rappelons à la section suivante, ont été fixés au niveau supranational et national avant d'être traduits au niveau régional.

1.1 Objectifs des politiques publiques de développement de l'éolien

Les objectifs de développement de l'éolien pour l'île de La Réunion participent du processus de réflexion et de planification réalisé à une échelle plurielle depuis la conférence de Rio sur l'environnement.

1.1.1 Engagements internationaux

Le cadre général de toute politique environnementale est posé en 1992 avec la déclaration de Rio sur l'environnement et le principe de précaution qu'elle introduit¹⁰. A sa suite, la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), aujourd'hui ratifiée par 196 Parties, pose à son article 2 l'« *objectif ultime (...) de stabiliser (...) les concentrations de gaz à effets de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique* ». Le protocole de Kyoto, signé le 11 décembre 1997, est le premier engagement contraignant à avoir émergé des rounds de négociations qui ont suivi la ratification de la CCNUCC. Il prévoyait la fixation de quotas nationaux d'émissions pour la période dite « d'engagement » (2008-2012) pour chacune des Parties visées à son annexe I. Le respect des quotas fixés représente un objectif de réduction des émissions de l'ordre de 5,2% en moyenne par rapport au niveau de 1990. La communauté européenne s'est vue attribuer un objectif global de réduction de 8% des émissions de gaz à effets de serre redistribué entre ses 15 états (avant l'élargissement à 25 survenu en mai 2004) formant ce qui est appelé « bulle de l'Union Européenne ». Afin de ne pas rendre les objectifs plus aisés à atteindre, les 15 états membres ont choisi de s'auto-contraindre en n'incluant pas les états des élargissements à venir au sein de la bulle européenne. Les nouveaux états membres faisant partie des élargissements (2004¹¹, 2007¹²) demeurent liés par leurs engagements individuels. Dans le cadre de la phase d'engagement du protocole de Kyoto, la France, quant à elle, s'est vu fixer un objectif de 0%, soit de maintenir ses émissions de gaz à effets de serre au niveau de 1990. L'accord de Paris adopté le 12 décembre 2015 établit le cadre général des actions post-2020. Il fixe l'objectif de limiter le réchauffement climatique mondial entre 1,5° et 2°C d'ici à 2100 par la réorientation de l'économie mondiale vers un modèle à bas carbone. L'accord de Paris doit entrer en vigueur en 2020, après son adoption par les parlements nationaux.

1.1.2 Engagements européens

La politique européenne de promotion des énergies renouvelables et de lutte contre le changement climatique a été mise en place en trois temps pour des objectifs fixés à trois horizons successifs 2010, 2020 puis 2030.

La directive européenne « Energies Renouvelables » 2001/77/CE met en place un cadre communautaire avec pour finalité de promouvoir les énergies renouvelables et d'assurer le

¹⁰ « (...) pour protéger l'environnement des mesures de précaution doivent largement être appliquées par les Etats selon leurs capacités ». Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement, principe n°15 .

¹¹ Estonie, Hongrie, Lettonie, Lituanie, Malte, Pologne, République de Chypre, République Tchèque, Slovaquie , Slovénie.

¹² Bulgarie et Roumanie. L'adhésion de la Croatie, en 2013, s'est effectuée en dehors de la période d'engagement du protocole de Kyoto.

respect des engagements internationaux en matière environnementale. Elle fixe les objectifs de 12% de la consommation intérieure brute d'énergie à partir de sources d'énergie renouvelables à l'horizon 2010 et une part indicative de 22% d'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables dans la consommation totale d'électricité de la Communauté en 2010. La communauté européenne a choisi de réaliser ces objectifs par le biais d'un marché de quotas d'émissions appelé « EU-ETS » pour « European Union-Emission Trade Scheme » sur lequel sont échangés des quotas baptisés EUA (European Allowance).

A l'occasion de la communication du 10 janvier 2007, intitulée « Limiter le changement climatique à 2°C – Route à suivre à l'horizon 2020 et au-delà », la commission a proposé que l'Union européenne soutienne dans le cadre des négociations internationales l'objectif de réduire les émissions de gaz à effets de serre des pays développés de 30% par rapport aux niveaux de 1990. A défaut de la conclusion d'un accord international, l'Union européenne prendrait l'engagement ferme et indépendant de réduire ses émissions de gaz à effet de serre d'au moins 20% d'ici à 2020 par rapport aux niveaux de 1990. Le Conseil européen de mars 2007 a validé les objectifs de réductions des émissions de gaz à effet de serre présentés par la Commission. Il fixe les objectifs de porter à 20% la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie en 2020 et d'améliorer l'efficacité énergétique dans l'Union européenne afin d'économiser 20% de la consommation énergétique de l'Union européenne par rapport aux projections pour 2020. En décembre 2008, l'adoption du paquet « énergie-climat » entérine ce triple objectif dont il est désormais fait référence sous l'appellation objectif «3x20». Seuls les deux premiers objectifs sont, à l'heure actuelle, contraignants. Dans ce cadre, la part d'énergies renouvelables dans la consommation énergétique française doit passer de 10,3% en 2005 à 23% en 2020. Les textes prévoient également que les énergies renouvelables devront intervenir pour au moins 10% dans la consommation communautaire de carburant dans le secteur des transports.

La politique européenne de réduction des gaz à effet de serre et de développement des énergies renouvelables post 2020 a été exposée au sein de « la feuille de route vers une économie compétitive à faible intensité carbone à l'horizon 2050 ». Celle-ci fixe un objectif ambitieux de réduction des gaz à effet de serre de 80 à 95% en 2050 par rapport aux niveaux de 1990. La Commission évoque des réductions de 40 et 60% respectivement pour 2030 et 2040 comme étant « les temps de passages » correspondant à l'optimum économique. La Commission prévoit que le secteur électrique jouera un rôle central dans l'atteinte de ces objectifs. La part des énergies renouvelables doit atteindre 75 à 80% en 2030 puis 100% en 2050. La Commission européenne a ouvert, avec le livret vert du 27 mars 2013, les débats sur la définition d'« un cadre pour les politiques en matière de climat et d'énergie à l'horizon 2030 ». Une proposition de la Commission, résultante de ces débats a été formulée le 22 janvier 2014, sur des objectifs pour 2030 de réduction des émissions de GES de 40% par rapport au niveau de 1990 et d'un taux de pénétration de 27% des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie. Le conseil européen, le 23 octobre 2014, a entériné l'objectif de réduction d'au moins 40% de réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2030 seul objectif contraignant. Les objectifs de porter à 27% la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie et d'amélioration de 27% l'efficacité énergétique sont également adoptés sans pour autant être contraignants.

1.1.3 Engagements nationaux

Les engagements nationaux, en cohérence avec les engagements supra nationaux, se sont traduits par des objectifs ambitieux de développements des énergies renouvelables. Avec la loi POPE, loi Programme fixant les Orientations de la Politique Énergétique adoptée le 13 juillet 2005, La France a inscrit la lutte contre le changement climatique et l'indépendance

énergétique nationale au sein des axes prioritaires de sa politique énergétique. Elle fixe à cette occasion un objectif de division par 4 des émissions de gaz à effets de serre d'ici à 2050, baptisé « facteur 4 ». Les textes des lois Grenelle I (3 août 2009) et Grenelle II (12 juillet 2010) ont établi un objectif intermédiaire de réduction d'émissions de GES à 22% entre 2005 et 2020 et les dispositions sectorielles à mettre en œuvre afin de parvenir à sa réalisation. Dans un même mouvement de matérialisation d'objectifs plus généraux, la loi Grenelle II vient assurer la régionalisation des engagements nationaux de Grenelle I. Aujourd'hui le respect des engagements du Grenelle de l'environnement se traduit par le Plan Climat 2011.

La Programmation Pluriannuelle des Investissements (PPI) de production d'électricité qui traduit la politique énergétique nationale dans le domaine de l'électricité a établi des objectifs ambitieux en matière de développement de l'énergie éolienne. La France se fixe l'objectif d'atteindre d'ici à 2020 une puissance éolienne installée 25 GWc selon la répartition suivante: 19 GWc à terre et 6 GWc en mer. Au premier janvier 2015¹³, la capacité éolienne installée atteint 9,1 GWc. Concernant l'éolien en mer, deux appels d'offres ont déjà permis de lancer la planification de six parcs éoliens en mer, pour une puissance totale de près de 3 GWc. Les six sites concernés par ces nouveaux projets sont situés à Saint-Nazaire (480 MWc), Courseulles-sur-Mer (450 MWc), Fécamp (498 MWc), Saint-Brieuc (500 MWc), au Tréport (496 MWc) et Noirmoutier (496 MWc). Leur mise en service est prévue entre 2018 et 2023 selon les sites.

1.1.4 Engagements régionaux

La loi Grenelle I du 3 août 2009, a introduit des dispositions propres à l'Outre-mer (art 56 de la Loi n°2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement). Elle prévoit pour l'île de La Réunion l'objectif d'atteindre l'autonomie énergétique électrique à l'horizon 2030, notamment par le développement des technologies de stockage de l'énergie et de gestion du réseau. La loi Grenelle II du 12 juillet 2010, portant sur l'engagement national pour l'environnement introduit le Schéma Régional du Climat de l'Air et de l'Energie (SRCAE), qui a fixé les objectifs de développement de l'énergie éolienne pour La Réunion. Il est prévu d'atteindre 35 MWc de puissance installée en 2020 et 50 MWc en 2030.

¹³ EDF (2015).

1.2 Evaluation de la politique publique de soutien à la production d'électricité éolienne

Le faible développement des capacités éoliennes installées au regard des objectifs régionaux fixés et du développement parallèle exponentiel des capacités de production photovoltaïques appelait à la mise en place d'un outil de planification de l'investissement éolien à La Réunion qui fournisse une information sur la localisation des sites les plus favorables et leur coût de production unitaire. In fine, l'ambition du travail était d'identifier les principales contraintes au développement de l'éolien à La Réunion et de déterminer les mesures économiques ou réglementaires à mettre en place pour atteindre les objectifs de développement fixés par la feuille de route régionale.

Du point de vue de l'investisseur, les déterminants de la décision d'investissement dans des capacités éoliennes peuvent être résumés à trois facteurs principaux : la production espérée sur un site d'intérêt, l'accessibilité du gisement éolien et le niveau de la politique publique de subvention de l'électricité produite. La production espérée dépend du progrès technique et des phénomènes physiques régissant les mouvements des masses d'air. L'accessibilité du gisement éolien dépend de la géographie physique du territoire et de la politique réglementaire en vigueur. Enfin, la politique publique de subvention de l'électricité éolienne est entièrement fixée par l'Etat en prenant en compte, dans le principe, les coûts de production estimés de l'électricité éolienne. L'ensemble des facteurs identifiés précédemment sont considérés au sein de la thèse. La politique réglementaire encadre l'investissement éolien et est établie afin de préserver les espaces où les considérations environnementales et sociales rendent rédhibitoire l'installation et l'exploitation d'éoliennes. Le Chapitre 3 de la thèse est dédié à l'étude des enjeux environnementaux et sociaux liés à l'installation et l'exploitation d'éoliennes sur le territoire de La Réunion. Une approche en termes de scénarios réglementaires est établie afin de mettre l'accent alternativement sur la protection de la périphérie immédiate des zones urbaines, la conservation de l'environnement et de la biodiversité ou le développement volontariste des capacités éoliennes. L'impact de chacun des scénarios sur les capacités de production d'électricité éolienne est estimé à partir de systèmes d'information géographiques. Les résultats du Chapitre 3 permettent de fournir au décideur politique et au citoyen réunionnais une information précise sur la relation entre l'emprise au sol et l'investissement en capacité éoliennes à La Réunion. Le Chapitre 4 de la thèse est consacré à la quantification de la ressource éolienne à La Réunion. Il présente les résultats de la méthodologie d'extrapolation spatiale mise en place afin de prédire spatialement le gisement éolien à partir d'observations enregistrées au niveau de stations météorologiques. Le Chapitre 5 est dédié à la présentation des résultats empiriques de la méthodologie d'évaluation des politiques publiques de soutien à la production d'électricité éolienne. Les deux aspects de la politique publique, réglementaire et de subvention à la production, sont mis en relation. En premier lieu, les résultats du Chapitre 5 fournissent une information au décideur politique sur la répartition spatiale des coûts de production unitaire de l'électricité éolienne pour chacun des scénarios réglementaires identifiés au Chapitre 3. Ensuite, pour chacun des scénarios de politique réglementaire, les investissements en capacités éoliennes permis par la politique de subvention de l'électricité en vigueur sont identifiés et les résultats en termes de puissance cumulée installable sont comparés avec les objectifs de développement de l'éolien fixés au niveau régional. La démarche réciproque est également entreprise et pour chaque scénario, le niveau optimal de la politique de subvention à la

production d'électricité éolienne est évalué par le modèle.

La méthodologie générale d'évaluation de la politique publique de soutien à la production d'électricité éolienne, correspondance théorique des chapitres précédemment introduits est présentée au Chapitre 2. Le dernier chapitre conclut.

Chapitre 2 Méthodologie technico-économique d'évaluation du potentiel éolien d'un territoire

L'installation et l'exploitation d'éoliennes sur le territoire de l'île de La Réunion constitue un moyen d'assurer la transition énergétique de l'île vers des énergies renouvelables. L'électricité d'origine éolienne, au même titre que l'électricité solaire, présente le double avantage de contribuer à se doter d'un mix énergétique à l'empreinte carbone nulle et de remplacer la consommation de ressources énergétiques importée par des ressources énergétiques locales. Néanmoins, à l'image des gisements fossiles et en particulier du pétrole, le gisement éolien est associé à une grande variabilité spatiale des conditions et des coûts d'exploitation de la ressource. L'exploitation du gisement éolien dépend de son accessibilité à savoir de l'absence d'obstacles à l'exploitation de la ressource, de son abondance, et de sa rentabilité, c'est à dire de son coût d'extraction au regard de son prix de vente. Dans ce chapitre nous exposerons la méthodologie permettant de quantifier ces trois aspects pour une prise de décision en matière d'investissement dans l'exploitation des gisements éoliens.

2.1 Identification des gisements éoliens accessibles à l'aide de systèmes d'information géographiques (SIG)

L'île de La Réunion possède un gisement éolien terrestre et un gisement éolien en mer. Le gisement éolien en mer, compte tenu de la topographie sous marine, ne semble pas accessible au regard des technologies disponibles à l'heure actuelle. L'exploitation des gisements terrestres dépend d'une part des caractéristiques de la géographie physique de l'île et d'autre part de l'affectation actuelle des espaces du territoire. La géographie physique de l'île peut rendre un site inaccessible à l'exploitation, du fait du relief, de la présence de cours d'eau, de l'altitude ou d'une pente excessive. L'affectation actuelle des espaces peut limiter l'accessibilité du gisement du fait de la présence de zones d'habitations, de zones aéroportuaires, de la proximité de radars, ou d'espaces naturels à conserver tant pour leur valeur esthétique et de récréation que pour la préservation de l'habitat naturel des espèces animales et végétales menacées.

L'identification des contraintes d'accessibilité du gisement éolien résultant de l'affectation actuelle des espaces a été réalisée en prenant en compte, d'une part, les enjeux relatifs aux zones d'habitation et aux autres installations en place sur le territoire (aéroports, radars, etc) et, d'autre part, les enjeux relatifs à la préservation des espaces naturels. Concernant les premiers enjeux, les contraintes d'accessibilité ont été identifiées à partir de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) introduite par la loi Grenelle II, ainsi que par l'ensemble des dispositions législatives relatives aux servitudes techniques. Les propositions formulées au cours des débats parlementaires ont également été prises en compte. Pour les seconds enjeux, nous nous sommes basés sur une veille juridique regroupant l'ensemble de la réglementation mise en place afin d'assurer la préservation des espaces naturels et des espèces protégées. Ces dispositions réglementaires comprennent d'une part, les dispositions législatives encadrant les espaces naturels et les zones d'habitats des espèces animales et végétales protégées et d'autre part, les dispositions des plans d'urbanisme qui identifient les zones naturelles du territoire à préserver. Les résultats des travaux scientifiques concernant les zones d'habitat et de déplacement des espèces susceptibles d'être affectées par l'installation et le fonctionnement d'éoliennes de grande envergure ont permis de compléter l'identification des enjeux de conservation des espaces naturels de l'île.

La répartition spatiale des zones accessibles et non accessibles a été réalisée à partir de la construction de scénarios mettant l'accent alternativement sur la préservation des zones d'habitation, la conservation des milieux naturels et des espèces protégées ou sur un développement volontariste de la production d'électricité éolienne. Les espaces concernés ont été spatialisés par le biais de systèmes d'information géographiques et à l'aide du logiciel ArcGIS.

- Scénario BAU (Business As Usual)

Ce scénario correspond au cadre réglementaire actuel qui implique l'ensemble des dispositions réglementaires en vigueur s'appliquant à l'installation d'éoliennes de grande envergure.

- Scénario Habitat

Ce scénario se focalise sur la problématique liée à la protection des riverains en accroissant le périmètre de protection des zones d'habitation comme suggéré lors des débats parlementaires. La proposition de doublement des distances d'éloignement des zones d'habitation entraîne une diminution des zones d'accessibilité par rapport au scénario de référence BAU.

- Scénario Biodiversité

Le troisième scénario met l'accent sur la protection de l'avifaune endémique de l'île. Il reprend les hypothèses du scénario de référence BAU auquel sont ajoutées les zones d'inaccessibilité identifiées à partir des résultats des travaux scientifiques portant sur les sites de nidification et les principales zones de déplacement des oiseaux marins. Ces zones établies en vue d'assurer la conservation des espèces susceptibles d'être affectées par l'installation et le fonctionnement d'éoliennes de grande envergure entraînent une diminution des zones d'accessibilité par rapport au scénario de référence BAU.

- Scénarios Eoliens

Ces scénarios déclinés selon quatre variantes A, B, C et D correspondent à des hypothèses volontaristes de développement des puissances éoliennes installées sur le territoire de La Réunion.

1. Scénario Eolien A

Ce scénario reprend l'ensemble des hypothèses du scénario BAU à l'exception des zones d'inaccessibilité établies autour des zones d'habitation. Celles-ci sont réduites de 100 mètres (20%) au sein de ce scénario, entraînant une augmentation des zones d'accessibilité par rapport au scénario de référence BAU.

2. Scénario Eolien B

Ce scénario est basé sur un principe d'exception introduit par le Schéma d'Aménagement Régional, principal document d'urbanisme régional. Il prévoit que l'installation d'éoliennes serait autorisée sur des zones identifiées comme non accessibles dans le cas où « *aucun autre emplacement ou aucune autre solution technique n'étaient envisageables à un coût supportable pour la collectivité* »¹⁴. Le principe d'exception est appliqué au sein de ce scénario à l'ensemble des zones non accessibles identifiées par les dispositions des plans d'urbanisme entraînant une augmentation des zones d'accessibilité par rapport au scénario de référence BAU.

3. Scénario Eolien C

Ce scénario est un scénario hybride entre le scénario Biodiversité et le scénario Eolien B. Il reprend le principe d'exception introduit au sein du scénario Eolien B et en conserve la portée. L'ensemble des zones inaccessibles identifiées par les dispositions des plans d'urbanisme sont donc concernées entraînant une augmentation des zones d'accessibilité par rapport au scénario de référence BAU. Aux zones inaccessibles identifiées par le scénario B sont ajoutées les zones inaccessibles définies par le scénario Biodiversité, afin de garantir la conservation de l'avifaune endémique de l'île. Ce scénario permet ainsi d'évaluer si la prise en compte des enjeux de préservation exclusivement liés à l'installation et au fonctionnement d'éoliennes de grande envergure entraîne l'accroissement ou la réduction des zones d'accessibilité par rapport au

¹⁴ Région Réunion (2011) p.71

scénario de référence BAU.

4. Scénario Eolien D

Ce scénario correspond aux hypothèses les moins restrictives au développement de l'éolien. Il s'agit d'un scénario hybride entre le scénario Eolien A et le scénario Eolien B qui reprend d'une part, le principe d'exception introduit au sein du scénario Eolien B et d'autre part, la réduction de 100 mètres (20%) des périmètres d'éloignement autour des zones d'habitation introduite dans le cadre du scénario Eolien A. Ce scénario induit l'augmentation la plus importante des zones d'accessibilité par rapport au scénario de référence BAU.

Pour chaque scénario, l'exploitation du gisement éolien est techniquement envisageable sur les zones identifiées comme pouvant être équipées d'éoliennes. Un parc éolien est composé de plusieurs aérogénérateurs dont l'implantation devrait permettre de garantir que chaque unité fournit la même puissance de sortie au même moment. Néanmoins, dans le cas de l'évaluation de l'énergie éolienne récupérable par un ensemble d'éoliennes disposées selon une configuration spécifique, sommer directement l'énergie récupérable par chaque éolienne, comme s'il s'agissait d'éoliennes isolées, peut aboutir à négliger l'effet de sillage dû au passage du vent dans les éoliennes situées en amont. Dès lors, le calcul de la puissance récupérable d'un parc éolien peut conduire à surévaluer l'énergie récupérable par les éoliennes situées en aval, à moins d'envisager un espacement suffisant entre les rangées d'éoliennes et entre les éoliennes d'une même rangée. Les normes techniques utilisées pour le dimensionnement des parcs éoliens dans la zone des Mascareignes sont établies afin de permettre la reconstitution de l'écoulement du vent après son passage à travers le rotor des éoliennes situées en amont. Elles prévoient une distance de l'ordre de dix fois le diamètre du rotor entre deux rangées d'éoliennes et de l'ordre de trois fois le diamètre du rotor entre éoliennes d'une même rangée. Ces règles d'espacement ont été utilisées pour évaluer la puissance éolienne crête que l'on peut installer dans les zones accessibles de La Réunion, et les rangées d'éoliennes ont été positionnées de manière à être perpendiculaires à la direction du vent dominant sur l'île (Est Sud-est). Dans la suite du travail, il sera davantage fait mention de puissance éolienne crête afin de faire référence à la puissance maximale productible d'une éolienne. La puissance éolienne crête est atteinte en cas d'occurrence de vitesses de vent comprises au sein d'une classe de vents optimaux définie pour chaque technologie d'éolienne.

Les parcs éoliens actuellement en service sur le territoire de La Réunion correspondent à des rangées uniques d'éoliennes de type Vergnet GEV-MP possédant une puissance crête de 275 kW_c. Le remplacement de ces éoliennes par des éoliennes plus grandes et plus puissantes, appelé repowering, est présenté comme un moyen d'accroître les puissances éoliennes installées. Dans ce but, il est nécessaire de prendre en compte les distances d'éloignement entre éoliennes plus importantes exigées par le dimensionnement des parcs d'éoliennes de plus grande taille et l'emprise au sol qui en découle.

S'agissant d'optimiser la récupération de l'énergie éolienne disponible sur les zones accessibles de l'île, il convient de dimensionner les parcs éoliens de La Réunion en fonction de la configuration au sol des zones accessibles et des technologies éoliennes disponibles de façon à maximiser la puissance crête du parc. On étudiera ce problème sur la base de deux technologies d'éoliennes correspondant, d'une part, à une éolienne de taille modeste, le modèle Vergnet GEV-MP actuellement en service sur l'île et, d'autre part, à une éolienne plus grande et plus puissante, le modèle Gamesa G58 correspondant aux standards techniques des nouvelles éoliennes installées dans la région des Mascareignes. L'éolienne de type Vergnet GEV-MP, d'une puissance crête de 275 kW_c, est munie d'un rotor d'un diamètre de 30 m,

tandis que pour le modèle Gamesa G58 ce diamètre est de 58 m et permet de développer une puissance crête de 875 kW_c.

S'agissant de configurer un parc d'éoliennes sur une rangée unique, la puissance crête totale (en kW_c) que l'on peut installer est donnée par la formule suivante :

$$P = p \left(\left\lfloor \frac{L}{3D} \right\rfloor + 1 \right) \text{ kW}_c$$

où L désigne la longueur disponible (en m) pour configurer ce parc éolien en rangée, D le diamètre (en m) du rotor de l'éolienne retenue, 3 le multiple de D définissant l'espacement entre deux éoliennes contiguës, p la puissance crête (en kW_c) de l'éolienne, et $\lfloor x \rfloor$ la partie entière du nombre réel x . Ainsi, la puissance crête d'éoliennes Vergnet GEV MP que l'on peut installer sur un parc en rangée de longueur L s'écrit :

$$P_V = 275 \left(\left\lfloor \frac{L}{90} \right\rfloor + 1 \right) \text{ kW}_c$$

ou encore :

$$P_V = 275 \text{ kW}_c \text{ si } 0 \leq L < 90 \text{ m},$$

$$P_V = 550 \text{ kW}_c \text{ si } 90 \leq L < 180 \text{ m},$$

$$P_V = 825 \text{ kW}_c \text{ si } 180 \leq L < 270 \text{ m},$$

...

$$P_V = 275N \text{ kW}_c \text{ si } 90(N - 1) \leq L < 90N \text{ m},$$

où N désigne un entier quelconque. De même, pour des éoliennes Gamesa G58, la puissance totale que l'on peut installer s'écrit :

$$P_G = 875 \left(\left\lfloor \frac{L}{174} \right\rfloor + 1 \right) \text{ kW}_c$$

ou encore :

$$P_G = 875 \text{ kW}_c \text{ si } 0 \leq L < 174 \text{ m},$$

$$P_G = 1'750 \text{ kW}_c \text{ si } 174 \leq L < 348 \text{ m},$$

$$P_G = 2'625 \text{ kW}_c \text{ si } 348 \leq L < 522 \text{ m},$$

...

$$P_G = 875N \text{ kW}_c \text{ si } 174(N - 1) \leq L < 174N \text{ m}.$$

La figure 1 illustre, sous forme de graphe, l'évolution de la différence dans la puissance crête d'un parc d'éoliennes en rangée que l'on obtient en remplaçant des éoliennes de type Vergnet GEV MP par des éoliennes de type Gamesa G58, à savoir :

$$P_G - P_V = 875 \left(\left\lfloor \frac{L}{174} \right\rfloor + 1 \right) - 275 \left(\left\lfloor \frac{L}{90} \right\rfloor + 1 \right) \text{ kW}_c.$$

Cette différence est évaluée pour des longueurs de rangée allant jusqu'à 3,5 km, correspondant à la longueur du plus grand parc éolien de La Réunion situé à Sainte Suzanne, dont la configuration au sol est présentée dans la figure 2.

Dans le cas où plusieurs rangées d'éoliennes peuvent être installées, la configuration du parc éolien doit être effectuée sur les sites identifiés comme accessibles en prenant en compte leur configuration spatiale. Pour illustrer la procédure à suivre pour configurer un parc éolien sur une zone accessible de surface connexe, nous envisageons le cas de la zone accessible du

scenario BAU présentée dans la figure 2 sur laquelle est située une partie du parc éolien de Sainte Suzanne installé en 2011.

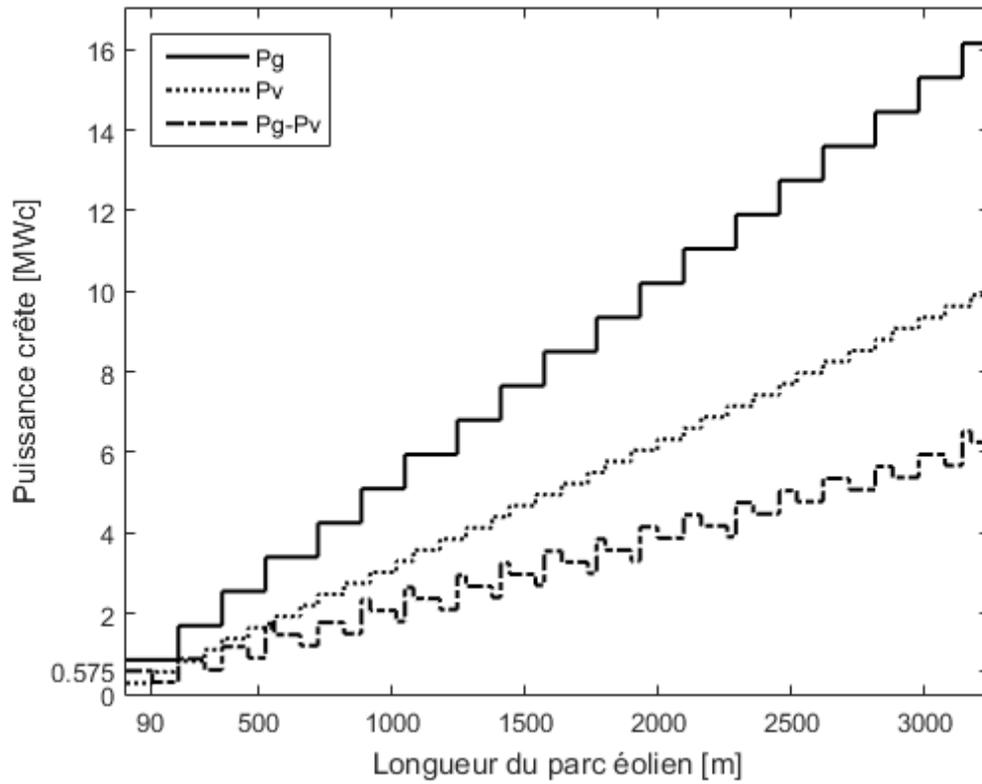


Figure 4: Evolution de la puissance crête P_v , P_g et $P_g - P_v$, en fonction de la longueur du parc éolien en rangée.

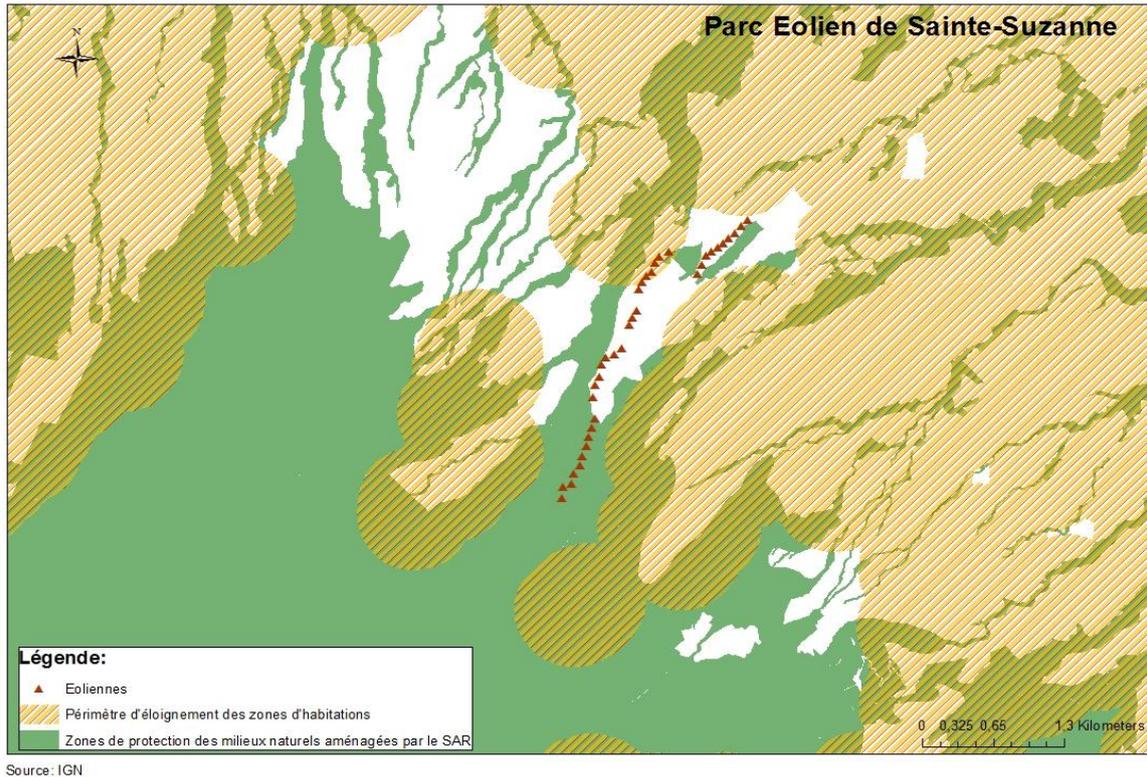


Figure 5: Cartographie des zones accessibles selon le scénario BAU et du parc éolien installé à Sainte-Suzanne en 2011.

Pour configurer un tel parc éolien, on délimitera d'abord la zone dans laquelle inscrire un réseau de rangées d'éoliennes par deux droites perpendiculaires à la direction du vent dominant, distantes d'une largeur l minimale pour contenir toute la zone accessible. Comme l'illustre la figure 3, pour la zone accessible du parc éolien de Sainte Suzanne cette largeur minimale est de 965 m. On tracera ensuite, à l'intérieur de cette zone, un réseau rectangulaire de rangées d'éoliennes perpendiculaires à la direction du vent dominant, disposées à une distance de l'ordre de dix fois le diamètre du rotor afin de permettre la reconstitution de l'écoulement du vent après son passage à travers le rotor des éoliennes situées dans la rangée située en amont. Dans un espace de largeur l on peut ainsi inscrire un réseau de $r = \lfloor l/10D \rfloor + 1$ rangées d'éoliennes, soit, pour le site de Sainte Suzanne, $\lfloor 965/300 \rfloor + 1 = 4$ rangées d'éoliennes de type Vergnet GEV MP et $\lfloor 965/580 \rfloor + 1 = 2$ rangées d'éoliennes Gamesa G58.



Figure 6 : Délimitation de la zone accessible à Sainte-Suzanne pour la détermination du réseau de rangées d'éoliennes à installer.

Dans la mesure où la zone accessible à équiper en éoliennes ne couvre qu'une partie de l'espace rectangulaire qui la délimite, il faudra éliminer du réseau rectangulaire de rangées d'éoliennes ainsi dimensionné toutes celles qui se situent à l'extérieur de la zone accessible. En vue d'optimiser la taille du parc, il conviendra également de rechercher graphiquement le positionnement du réseau rectangulaire de rangées d'éoliennes qui maximise le nombre d'éoliennes situées dans la zone accessible. Ainsi, pour des éoliennes de type Gamesa G58, la taille d'un parc éolien installé sur la zone accessible de Sainte Suzanne est maximisée par la disposition des éoliennes sur deux rangées, dont 12 sur la rangée en amont et 2 sur celle en aval, comme l'illustre la figure 4, totalisant une puissance crête installée de 11'900 kW_c. Avec des éoliennes Vergnet GEV MP, la taille du parc éolien est maximisée en disposant les éoliennes sur trois rangées au lieu de quatre, comme l'illustre la figure 5, avec 15 éoliennes sur la rangée en amont, 21 sur la rangée intermédiaire et 6 sur celle en aval, soit un parc de 42 éoliennes totalisant une puissance crête de 11'550 kW_c.



Figure 7 : Positionnement de deux rangées d'éoliennes dans la zone accessible à Sainte-Suzanne qui maximisent la taille d'un parc éolien Gamesa G58.

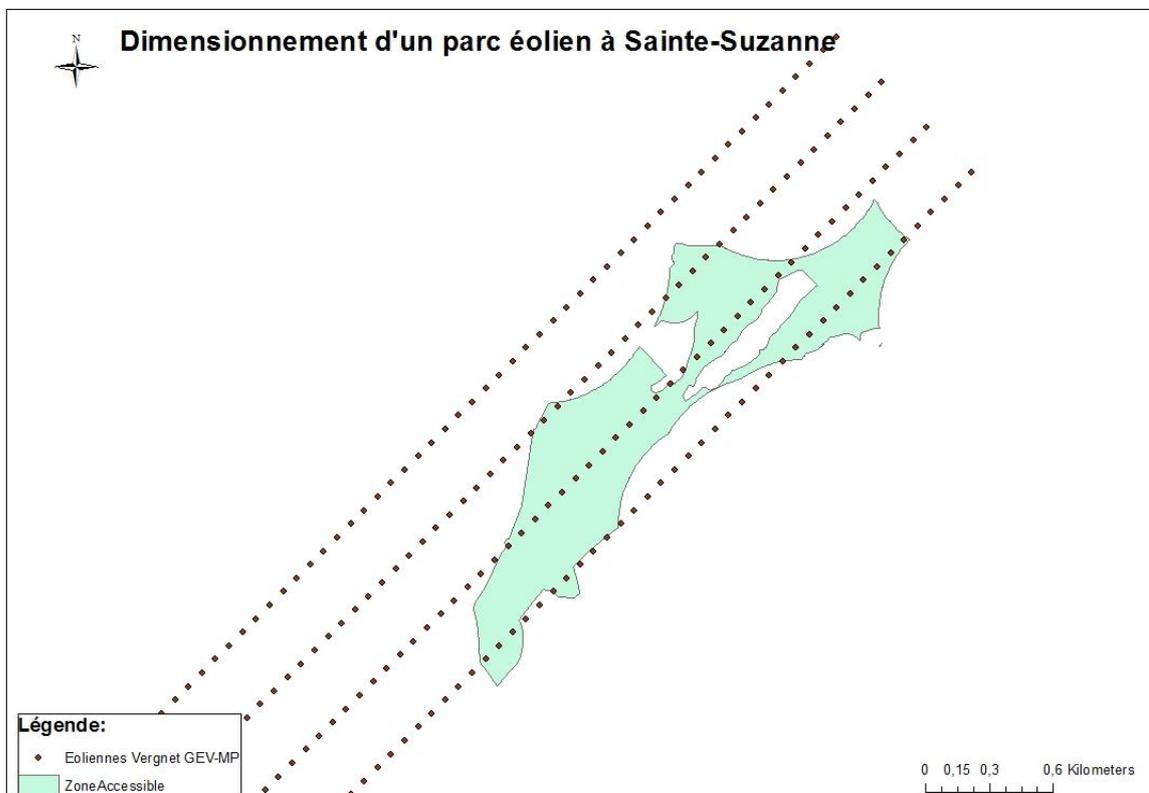


Figure 8: Positionnement de trois rangées d'éoliennes dans la zone accessible à Sainte-Suzanne qui maximisent la taille d'un parc éolien Vergnet GEV MP.

Une seconde zone a été sélectionnée dans l'immédiat nord-est de la première. De superficie plus importante, la configuration de la zone accessible permet l'implantation de davantage de rangées d'éoliennes, soit un maximum de 3 rangées d'éoliennes Gamesa G58 et de 6 rangées d'éoliennes Vergnet GEV-MP. La taille d'un parc éolien installé sur la zone accessible est néanmoins maximisée par la disposition des éoliennes sur 2 rangées. pour celles du type Gamesa G58, comme l'illustre la figure 6, et sur 5 rangées pour les éoliennes Vergnet GEV-MP, comme l'illustre la Figure 10.

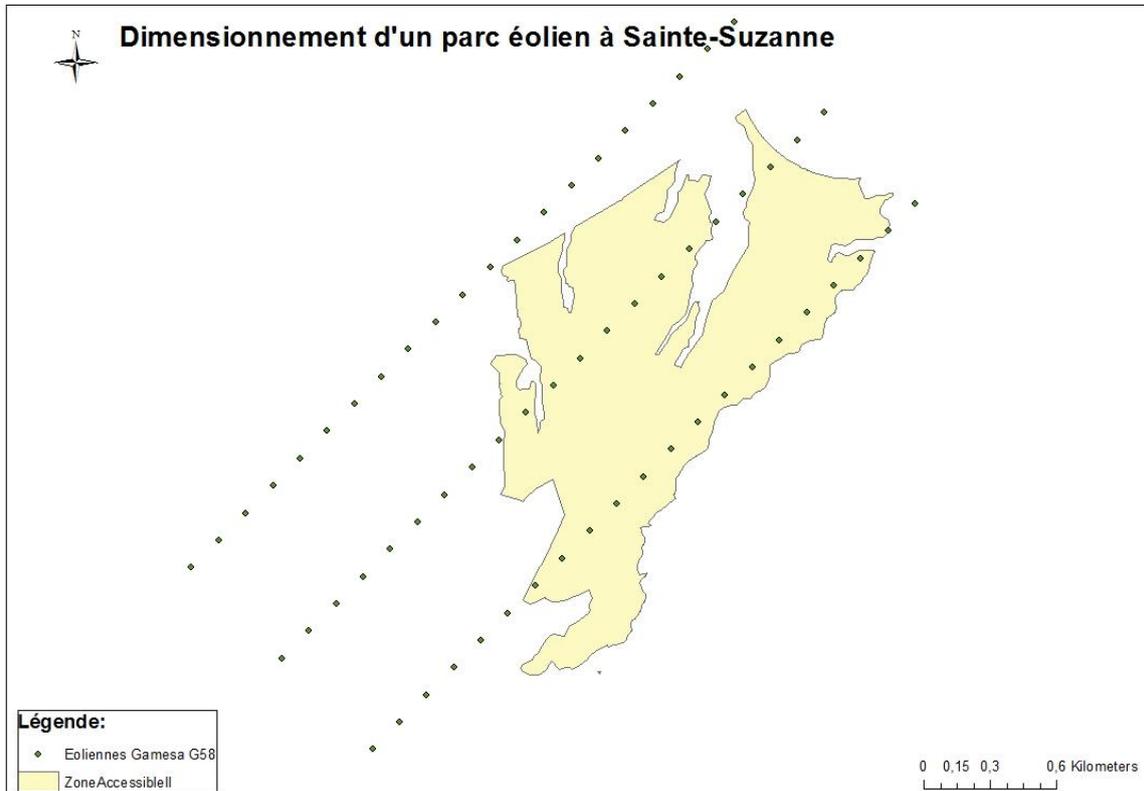


Figure 9 : Positionnement de deux rangées d'éoliennes dans la seconde zone accessible à Sainte-Suzanne qui maximisent la taille d'un parc éolien Gamesa G58.

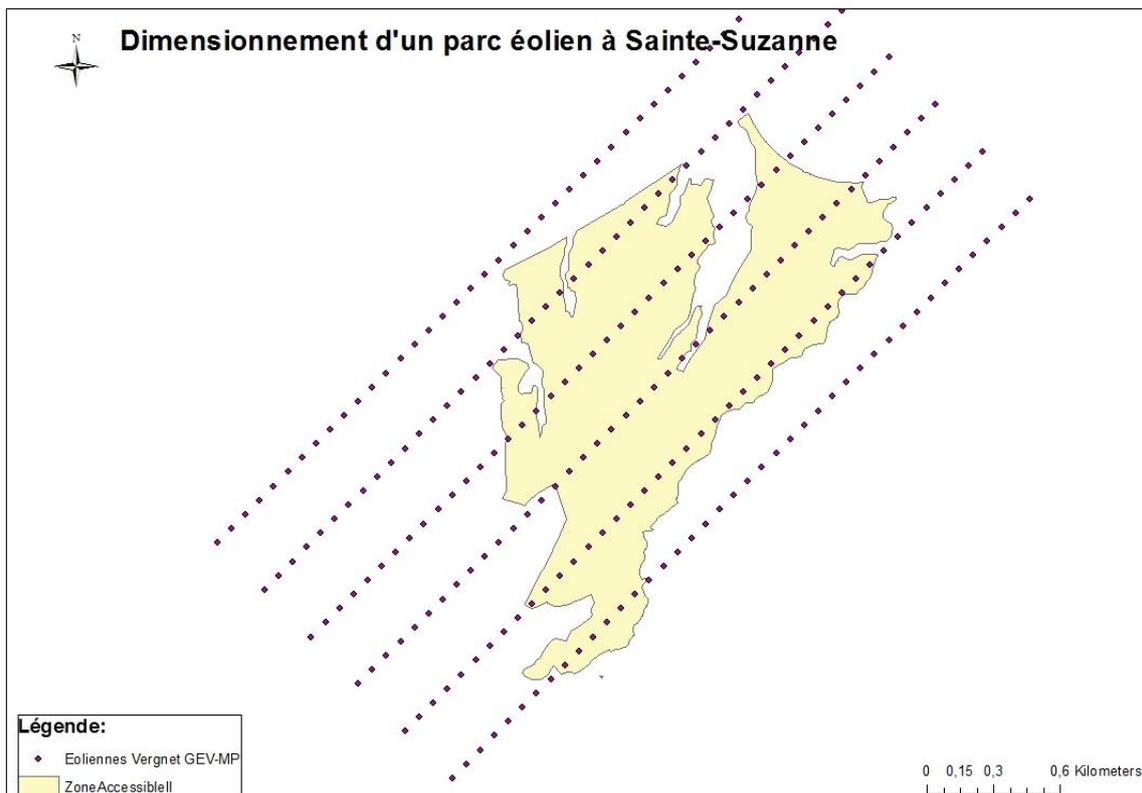


Figure 10: Positionnement de trois rangées d'éoliennes dans la zone seconde accessible à Sainte-Suzanne qui maximisent la taille d'un parc éolien Vergnet GEV MP.

Pour cette seconde zone accessible, la maximisation de la taille du parc éolien aboutit à l'installation de 24 éoliennes Gamesa G58 totalisant une puissance crête de 21'000 kW_c, dont 14 sur la rangée en amont et 10 sur celle en aval, après un léger déplacement de cette rangée dans la direction nord-est. Avec des éoliennes Vergnet GEV-MP la maximisation de la taille du parc éolien conduit à l'installation de 80 éoliennes totalisant une puissance crête de 22'000 kW_c, dont 6 sur la rangée en amont, 25 sur la première rangée en aval, 21 sur la deuxième rangée en aval, 17 sur la troisième rangée en aval et 11 sur la quatrième rangée en aval. Afin d'évaluer la puissance crête maximale que l'on peut installer sur un site accessible, il convient donc de prendre en compte la configuration spécifique du site car il n'est pas possible d'indiquer a priori quel type d'éolienne permet d'optimiser l'exploitation de son gisement éolien. Remarquons toutefois, qu'à l'aune de ces exemples, les écarts entre puissances que l'on peut installer par les deux types d'éoliennes envisagées restent faibles, de l'ordre de 5% de la puissance maximale installable. Le choix du type d'éolienne à utiliser pour équiper une zone accessible dépendra donc d'autres paramètres que la puissance crête totale que l'éolienne permet de mettre en place sur le site.

2.2 Mesure du vent

Le vent peut être représenté comme une grandeur vectorielle tridimensionnelle dont la longueur représente la vitesse du vent et sa direction celle dans laquelle souffle le vent. La position de ce vecteur dans l'espace tridimensionnel peut être définie à l'aide d'un système de coordonnées, dont les plus employés sont les systèmes cartésien rectangulaire, cylindrique et sphérique.

Dans le système cartésien rectangulaire, le vecteur-vent est décomposé selon trois axes perpendiculaires dirigés respectivement vers le nord, l'est et le zénith. Les coordonnées cartésiennes d'une mesure du vecteur-vent sont les projections orthogonales de ce vecteur sur ces trois axes. Les longueurs x , y , z de ces projections par rapport à l'intersection de ces trois axes, appelée origine des coordonnées, sont les coordonnées du système cartésien rectangulaire appelées abscisse, ordonnée et cote, respectivement. Ce système de coordonnées est illustré par la Figure 11.

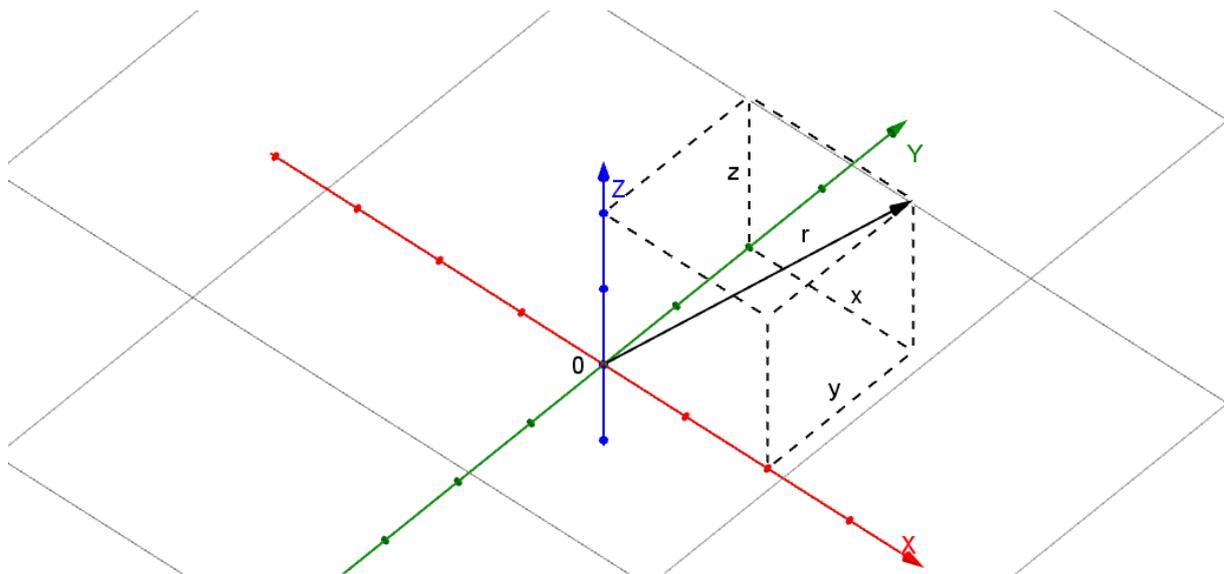


Figure 11 : Système de coordonnées cartésien rectangulaire.

En coordonnées cylindriques, la projection orthogonale du vecteur-vent dans le plan de coordonnées x , y est repérée par la longueur v de ce vecteur et par l'angle θ entre l'axe des valeurs positives de l'ordonnée y (désignant par convention le Nord) et ce vecteur. Quant à la distance verticale du sommet du vecteur-vent par rapport au plan de coordonnées x , y , elle est représentée par la cote z du système cartésien rectangulaire. Le système cylindrique, ainsi appelé parce que tous les sommets des vecteurs de coordonnée v constante sont situés sur un cylindre d'axe z et de rayon v , est illustré par la Figure 12.

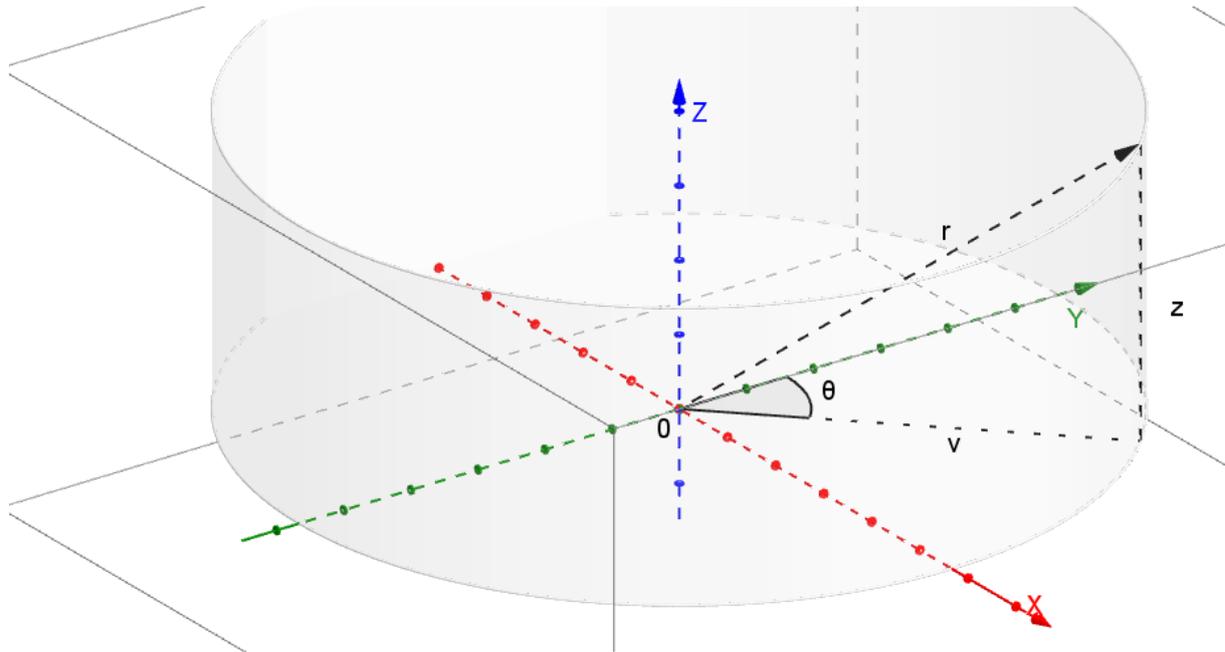


Figure 12: Système de coordonnées cylindrique.

En coordonnées sphériques le vecteur-vent est repéré par sa longueur r , sa latitude θ , identique à celle en coordonnées cylindriques, et sa distance polaire α , soit l'angle entre l'axe des valeurs positives de la cote z (désignant par convention le zénith) et le vecteur-vent. Le système sphérique, ainsi appelé parce que tous les vecteurs-vent de longueur r donnée sont situés sur une sphère de rayon r , est illustré par la Figure 13.

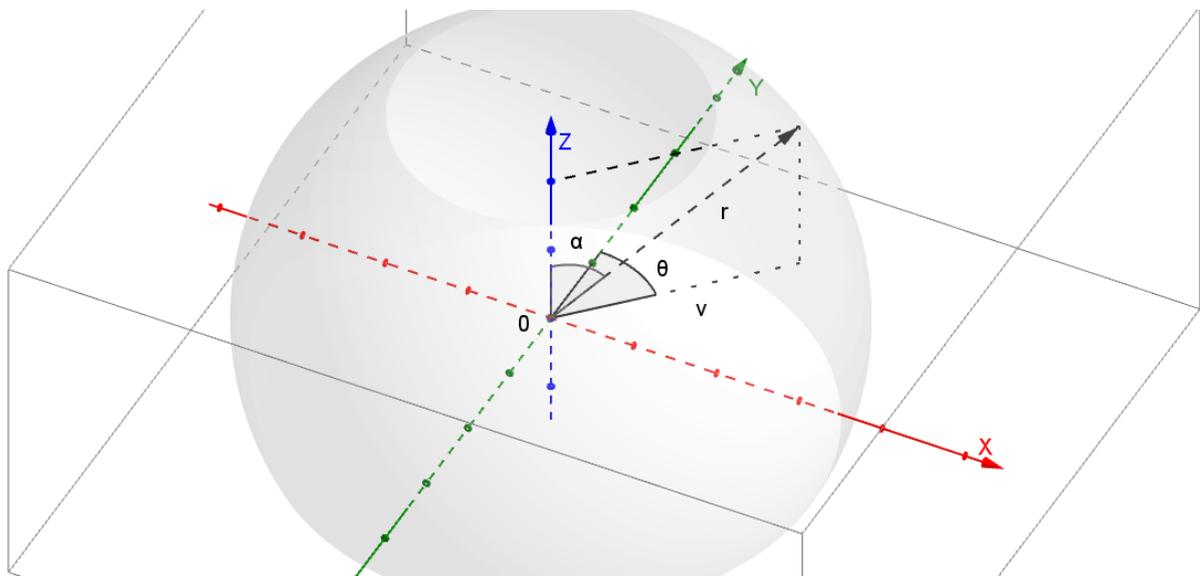


Figure 13: Système de coordonnées sphérique.

La mesure conjointe des composantes horizontale et verticale du vent nécessite le recours à des instruments rarement utilisés, comme les anémomètres à trois hélices ou les anémogirouettes à deux directions. Les modèles d'anémomètres à moulinet et les girouettes fixes dans le plan installés à l'île de La Réunion permettent exclusivement la mesure du vent dans

le plan horizontal. Dans ce cas le vecteur-vent est un vecteur bidimensionnel qui représente la composante horizontale du vecteur-vent tridimensionnel. La représentation en coordonnées cylindriques et sphériques de ce vecteur bidimensionnel est alors identique et appelée système de coordonnées polaires. La longueur v de ce vecteur dans le plan de coordonnées x, y représente la vitesse horizontale du vent tandis que l'angle θ entre la direction positive de l'ordonnée et ce vecteur représente la direction horizontale dans laquelle souffle le vent.

Les deux coordonnées polaires caractéristiques du vecteur-vent dans le plan, la vitesse horizontale et la direction horizontale sont pertinentes pour évaluer le gisement éolien disponible sur un site accessible. L'étude de la vitesse du vent permet le bon dimensionnement des éoliennes à installer alors que l'étude de la direction du vent permet d'optimiser la disposition en rangées des éoliennes du parc. Non étudiée dans le cadre de cette thèse, la composante verticale du vent permet d'analyser le stress supporté par les éoliennes durant leur cycle de vie et d'en déduire une évaluation de la durée de vie des éoliennes à installer.

La vitesse du vent est mesurée au sein de cette thèse en mètres par seconde (m/s). Il est également usuel de la mesurer en kilomètres par heure (km/h). La conversion d'une mesure en m/s en km/h se fait en multipliant les m/s par 3.6. Composé de deux parties, un moulinet et un transducteur, un anémomètre à moulinet assure la mesure de la vitesse horizontale du vent. L'anémomètre peut être de deux types selon l'axe de rotation du moulinet. Les modèles d'anémomètres dont l'axe de rotation est perpendiculaire au vecteur-vent mesuré possèdent un moulinet constitué par des coupelles, tandis que les modèles dont l'axe de rotation est parallèle au vecteur-vent possèdent un moulinet composé par des hélices. Le second composant, le transducteur, assure la conversion de la vitesse de rotation du moulinet en un signal de mesure exploitable. Dans le principe, et pour un anémomètre bien conçu, la vitesse angulaire du moulinet varie linéairement avec la vitesse du vent. Des cas de non linéarité existent néanmoins du fait du seuil de démarrage de l'anémomètre et de son seuil de destruction. Le seuil de démarrage des anémomètres correspond au seuil au dessous duquel l'appareil de mesure ne peut fournir d'information sur la vitesse du vent. Les vents dont la vitesse est inférieure au seuil de démarrage de l'anémomètre sont regroupés au sein d'une classe de vent appelé classe des vents calmes et à laquelle une vitesse nulle ($v = 0$) est attribuée par convention. Le seuil de démarrage varie en fonction du type de technologie, de même que le mode d'acquisition des données et le mode de calcul des vitesses moyennes du vent. Les caractéristiques techniques des instruments de mesure du vent installés à La Réunion sont présentées dans le Tableau 1. La fréquence de mesure, la période sur laquelle les vitesses moyennes sont établies, ainsi que le degré de précision de ces valeurs moyennes de la vitesse du vent varient selon les anémomètres des stations météorologiques installées à La Réunion.

Tableau 1 : Caractéristiques techniques des anémomètres à La Réunion.

Station	Caractéristiques de l'anémomètre			Moyenne	
	Technologie	Seuil de démarrage (en m/s)	Fréquence de mesure (en s)	Période de mesure (en min)	Précision de la mesure (en décimales)
Païndrey	NRG	0.4 (0.38)	2	10	5
IUT Station université	N/A	N/A	N/A	1	3
Bellevue Bras-Panon	Deolia	0.5	0.5	60	1
Pont-Mathurin	Deolia	0.5	0.5	60	0
Plaine-des-Palmistes	Deolia	0.5	0.5	60	0
Le Port	Deolia	0.5	0.5	60	0

St-Benoît	Deolia	0.5	0.5	60	0
Petite-France	Deolia	0.5	0.5	60	0
Pointe des Trois Bassins	Deolia	0.5	0.5	60	1
Pierrefonds-Aéroport	Deolia	0.5	0.5	60	0
Le Baril	Deolia	0.5	0.5	60	0
Gillot-Aéroport	Deolia	0.5	0.5	60	1
Gros Piton Ste-Rose	Deolia	0.5	0.5	60	0
Gîte de Bellecombe	Deolia	0.5	0.5	60	0
Plaine des Cafres	Deolia	0.5	0.5	60	1
Cilaos	Deolia	0.5	0.5	60	0
Le Baril 2	NRG	0.4	2	10	1
Bel Air	NRG	0.4	2	10	1
Dioré	NRG	0.4	2	10	1
Langevin	NRG	0.4	2	10	1
Sambly	NRG	0.4	2	10	1
Ste Marie la Paix	NRG	0.4	2	10	1
St Paul	NRG	0.4	2	10	1
IUT 2 (campagne 2003)	NRG	0.4	2	10	1
Ango	NRG	0.4	2	10	1
Bras Panon 2	NRG	0.4	2	10	1
Carosse St Joseph	NRG	0.4	2	10	1
Le Colosse St André	NRG	0.4	2	10	1
Bras Panon 3	NRG	0.4	2	10	1
Carosse St Joseph 2	NRG	0.4	2	10	1

La répartition spatiale des stations de mesure est cartographiée dans la Figure 14 . La couverture du territoire de La Réunion apparaît comme importante au premier abord. Ce constat est à nuancer au regard de la durée des campagnes de mesure effectuées. La durée de mesure excède l'année seulement pour 16 des stations météorologiques du Tableau 1. Pour la majorité des mats de mesure installés à La Réunion, la vitesse du vent est mesurée à une altitude unique. Sur 11 des stations, les mesures ont néanmoins été effectuées à de multiples altitudes. Mesurer la vitesse du vent à diverses altitudes permet de mettre en relation les régimes de vent à différentes altitudes afin d'évaluer le profil vertical du vent sur le site d'étude. Les coordonnées géographiques sont présentées dans le Tableau 2 de même que la durée des campagnes de mesure, l'altitude de la station et l'altitude de mesure.

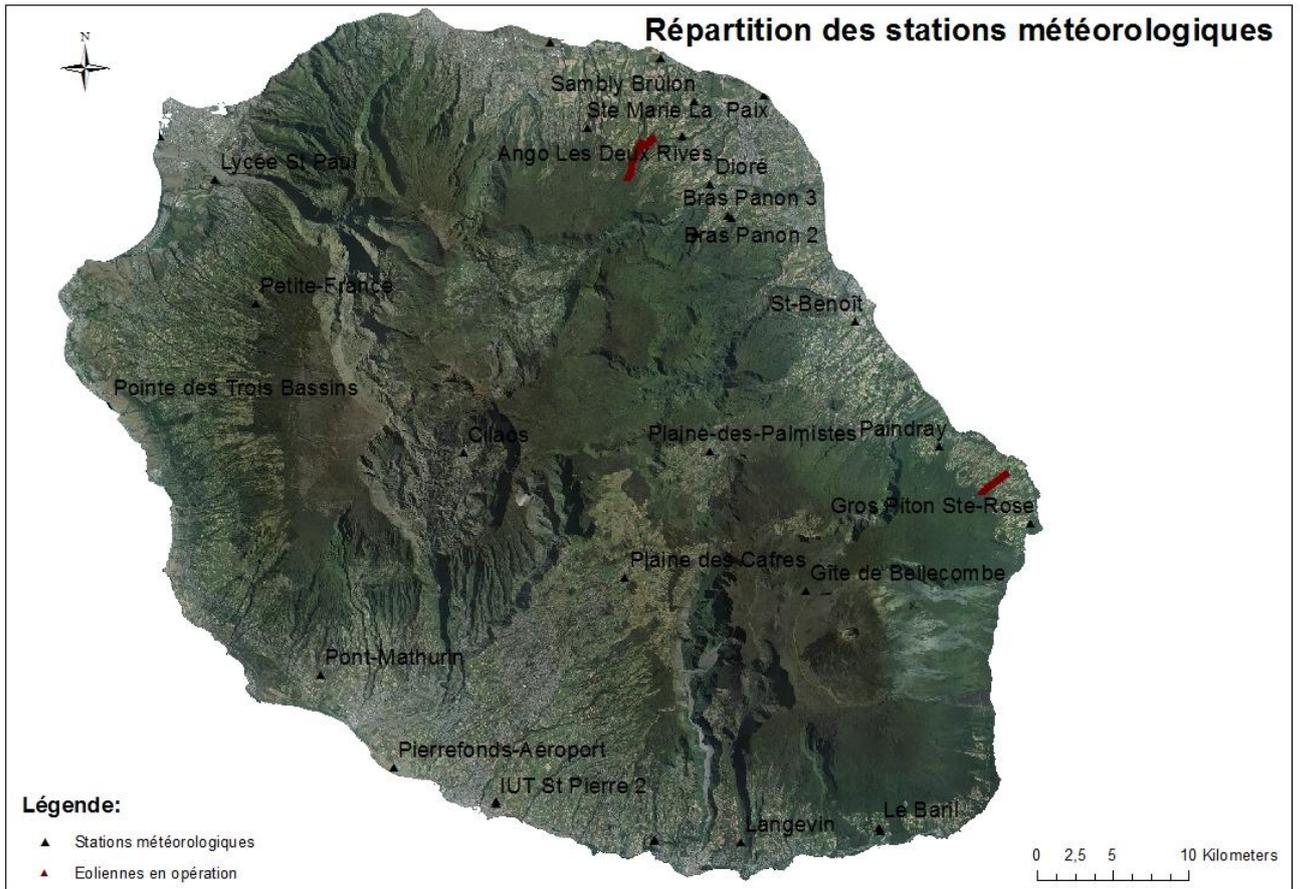


Figure 14 : Répartition des stations météorologiques à La Réunion.

Tableau 2 : Localisation géographique des stations météorologiques et durée des campagnes de mesure.

Station météorologique	Longitude (en coordonnées RGR92 UTM zone 40S)	Latitude (en coordonnées RGR92 UTM zone 40S)	Altitude station (en m)	Altitude de mesure (en m)	Durée des campagnes de mesure
Paindray	372430,3	7662565,0	212	50/40	04.2007-11.2009
IUT	343418,7	7639412,5	69	10	11.2006-04.2014
Bellevue Bras-Panon	356598,4	7676520,5	480	10	01.2001-31.2010
Pont-Mathurin	331915,5	7647635,5	20	10	01.2001-31.2010
Plaine-des-Palmistes	357415	7662288,5	1032	10	01.2001-31.2010
Le Port	321355,6	7682915,0	9	10	01.2001-31.2010
St-Benoît	366937,9	7670806,5	43	10	01.2001-31.2010
Petite-France	327660,7	7671959,5	1200	10	01.2001-31.2010
Pointe des Trois Bassins	318029,2	7665264,5	5	10	01.2001-31.2010
Pierrefonds-Aéroport	336699,6	7641626,5	21	10	01.2001-31.2010
Le Baril	368492,8	7637663,5	115	10	01.2001-31.2010
Gillot-Aéroport	346961,3	7689045,5	8	10	01.2001-31.2010
Gros Piton Ste-Rose	378455,7	7657563,0	181	10	01.2001-31.2010
Gîte de Bellecombe	363734,1	7653143,5	2245	10	01.2001-31.2010
Plaine des Cafres	351865,9	7654046,0	1560	10	01.2001-31.2010
Cilaos	341274,2	7662233,0	1197	10	01.2001-31.2010
Le Baril 2	368642,9	7637391,5	80	50/40/30	03.2004-07.2004
Bel Air	354170	7688033,5	64	30/20/10	02.2004-07.2004
Dioré	357406,5	7679784,0	212	50/40/30	05.2004- 07.2004
Langevin	359477,7	7636673,5	200	50/40/30	04.2004- 07.2004
Sambly	356399,9	7685163,0	150	50/40/30	02.2004- 07.2004
Ste Marie la Paix	349365,4	7683475,5	330	50/40/30	03.2004-07.2004
St Paul	325036	7680070,5	170	25/16/10	04.2004- 07.2004
IUT 2 (campagne 2003)	343385,6	7639263,5	65	30/20	03.2004- 07.2004
Ango	355620	7682894,5	205	40/30/20	11.2001- 07. 2002
Bras Panon 2	358854,3	7677563,0	251	40/30	11. 2001- 07. 2002
Carosse St Joseph	353836,5	7636816,5	255	40/30	11. 2001- 07. 2002
Le Colosse St André	360945,8	7685557,0	5	40/30	12. 2001-07. 2002
Bras Panon 3	358622,8	7677731,5	255	12	04. 2001-04. 2002
Carosse St Joseph 2	353801,7	7636843,5	260	12	03. 2001-07. 2002

La direction du vent est mesurée par une girouette et est exprimée en degrés. Elle est indiquée par la dizaine de degré la plus proche sur une échelle allant de 0 à 360 degrés, le zéro correspondant par convention à la classe des vents calmes pour lesquels la girouette n'est pas en mesure de fournir la direction de provenance du vent. Au sein du système météorologique traditionnel, la direction angulaire depuis laquelle le vent souffle est mesurée par rapport au Nord dans le sens de la marche normale des aiguilles d'une montre.

2.3 Loi de distribution du vent

2.3.1 Distribution empirique de la vitesse et de la direction horizontales du vent

La caractérisation du gisement éolien sur le site où l'appareil de mesure est installé est réalisée par la mesure conjointe de la vitesse et de la direction horizontales du vent. Le régime de vent, pendant une période de mesures donnée, est alors représenté par la distribution empirique de ces mesures conjointes. Pour un échantillon de n mesures $(v_1, \theta_1), \dots, (v_n, \theta_n)$, la fonction de répartition de cette distribution empirique bivariée s'écrit :

$$F(v, \theta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1(v_i \leq v) 1(\theta_i \leq \theta) \quad (1)$$

où $1(x_i \leq x)$ désigne une variable indicatrice binaire qui prend la valeur 1 si la mesure x_i prend une valeur $\leq x$ et 0 sinon.

Il convient de remarquer que lorsque la vitesse du vent est inférieure au seuil de sensibilité de l'anémomètre, le vent est considéré comme calme et aucune direction ne peut lui être associée. Ainsi, la distribution empirique bivariée du vent est une distribution discrète pour $v = 0$ et continue pour $v \geq c$, où $c > 0$ désigne le seuil de sensibilité de l'anémomètre (en général égal à 0.5 m/s).

Une autre expression analytique de la distribution empirique bivariée du vent, qui donne lieu à des représentations graphiques permettant de visualiser le profil de la répartition des fréquences d'observation des valeurs admissibles des couples de variables (v, θ) , est fournie par une discrétisation par intervalles du domaine continu des valeurs de v et θ . A cet effet, on partitionne l'intervalle $[c, \infty)$ des valeurs observables de v (en m/s) en une suite d'intervalles $V_h = [v_h, v_{h+1})$, $h = 1, \dots, H$, avec $v_1 = c$ et $v_{H+1} = \infty$, formant une partition disjointe et exhaustive du domaine $[c, \infty)$ des valeurs de v . On procède de même pour la direction horizontale du vent θ , mesurée en degrés d'angle comptés à partir de la direction Nord dans le sens des aiguilles d'une montre. L'intervalle $[0^\circ, 360^\circ]$ est ainsi partitionné en une suite d'intervalles $\Theta_k = [\theta_k, \theta_{k+1})$, $k = 1, \dots, K$, formant une partition disjointe et exhaustive du domaine $[0^\circ, 360^\circ]$ des valeurs de θ . Le produit cartésien de ces deux partitions constitue une partition disjointe et exhaustive du domaine $[c, \infty) \times [0^\circ, 360^\circ]$ du couple (v, θ) , à laquelle on affecte les fréquences d'occurrence des mesures (v_i, θ_i) , $i = 1, \dots, n$, de l'échantillon :

$$f_{hk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1(v_i \in V_h) 1(\theta_i \in \Theta_k), h = 1, \dots, H, k = 1, \dots, K. \quad (2)$$

Complétée par la classe des vents calmes, munie de la fréquence d'occurrence :

$$f_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1(v_i = 0) \quad (3)$$

cette formalisation représente l'histogramme de la distribution empirique jointe de la vitesse et direction horizontales du vent.

De cet histogramme bivarié, on déduit les histogrammes univariés des distributions empiriques marginales de v et θ , soit pour v les $H + 1$ classes de vitesse horizontale $\{0, V_1, \dots, V_h, \dots, V_H\}$ munies des fréquences $\{f_0, f_{1*}, \dots, f_{h*}, \dots, f_{H*}\}$, avec :

$$f_{h*} = \sum_{k=1}^K f_{hk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1(v_i \in V_h), h = 1, \dots, H \quad (4)$$

et pour θ les $K + 1$ classes de direction horizontale du vent $\{\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_k, \dots, \theta_K\}$, où θ_0 désigne la classe des vents calmes, munies des fréquences $\{f_0, f_{*1}, \dots, f_{*k}, \dots, f_{*K}\}$, avec :

$$f_{*k} = \sum_{h=1}^H f_{hk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1(\theta_i \in \theta_k), k = 1, \dots, K \quad (5)$$

A titre d'illustration, le Tableau 3 et la Figure 13 et suivantes présentent sous forme numérique et graphique les histogrammes des distributions empiriques jointe et marginales des mesures de vitesse et de direction horizontales du vent effectuées par la station météorologique de Pierrefonds pendant l'année 2010. Cette station météorologique a été sélectionnée du fait de sa localisation, à savoir au niveau des pistes d'atterrissage de l'aéroport de Pierrefonds. Les mesures ne sont perturbées ni par l'environnement immédiat, ni par le relief et permettent une analyse assez pure des phénomènes météorologiques en cours à La Réunion.

Tableau 3: Distribution des mesures de vitesse (en m/s) et direction (en degrés) horizontales du vent par classes de vitesse et direction à la station météorologique de Pierrefonds en 2010.

Classes de direction horizontale du vent (en degrés)	Classes de vitesse horizontale du vent (en m/s)										
	[0,5 , 1)	[1 , 3)	[3 , 5)	[5 , 7)	[7 , 9)	[9 , 11)	[11 , 13)	[13 , 15)	[15 , 25)	[25 , ∞)	[0,5,∞)
N=[345 , 15)	0,00	2,35	1,90	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,26
NNE=[15 , 45)	0,00	6,34	14,40	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,42
ENE[45 , 75)	0,00	4,50	5,38	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,08
E=[75 , 105)	0,00	2,67	4,48	2,10	0,58	0,12	0,01	0,00	0,00	0,00	9,95
ESE=[105 , 135)	0,00	1,09	2,24	4,09	6,15	7,00	3,90	1,23	0,32	0,00	26,03
SSE=[135 , 165)	0,00	0,99	2,29	1,63	1,35	0,71	0,08	0,03	0,01	0,00	7,10
S=[165 , 195)	0,00	1,24	2,18	0,29	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,75
SSO=[195 , 225)	0,00	1,16	1,93	0,18	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30
OSO=[225 , 255)	0,00	1,31	2,90	0,44	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	4,69
O=[255 , 285)	0,00	0,66	2,36	1,90	0,63	0,22	0,01	0,00	0,00	0,00	5,78
ONO=[285 , 315)	0,00	0,51	0,71	0,35	0,10	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	1,70
NNO=[315 , 345)	0,00	1,01	0,43	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,46
[0 , 360)	0,00	23,84	41,20	11,89	8,90	8,09	4,01	1,27	0,33	0,00	99,53
Vents Calmes											0,47

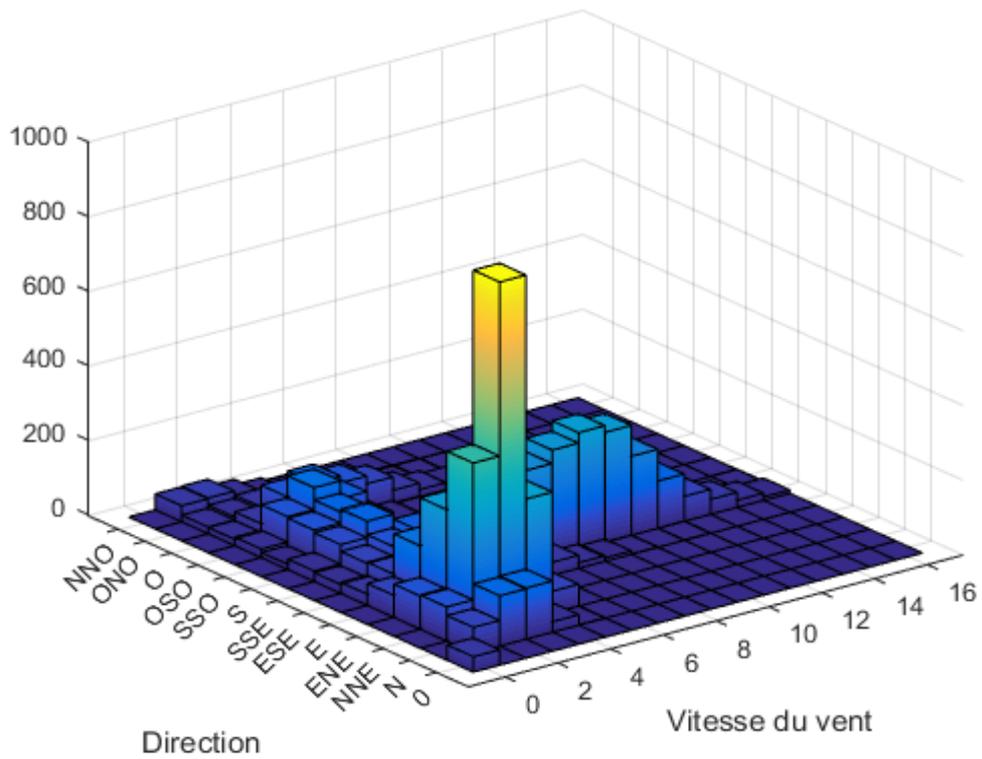


Figure 15: Histogramme des mesures de vitesse et direction horizontales du vent à la station météorologique de Pierrefonds en 2010.

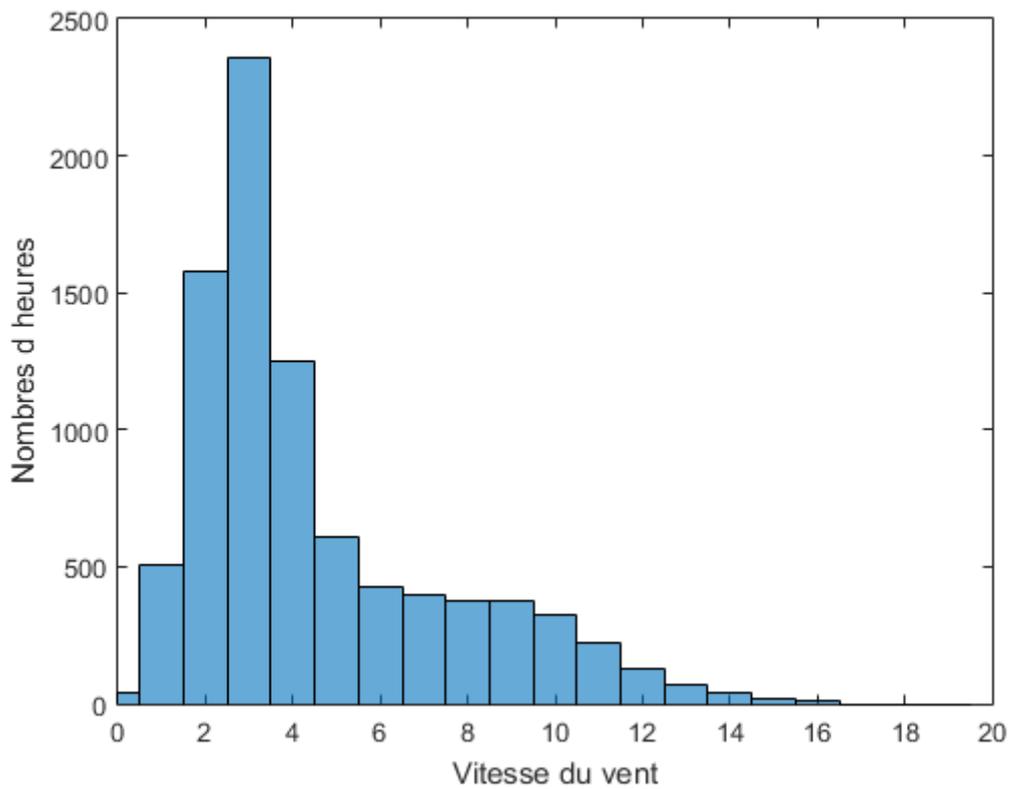


Figure 16: Histogramme des mesures de vitesse horizontale du vent à la station météorologique de Pierrefonds en

2010.

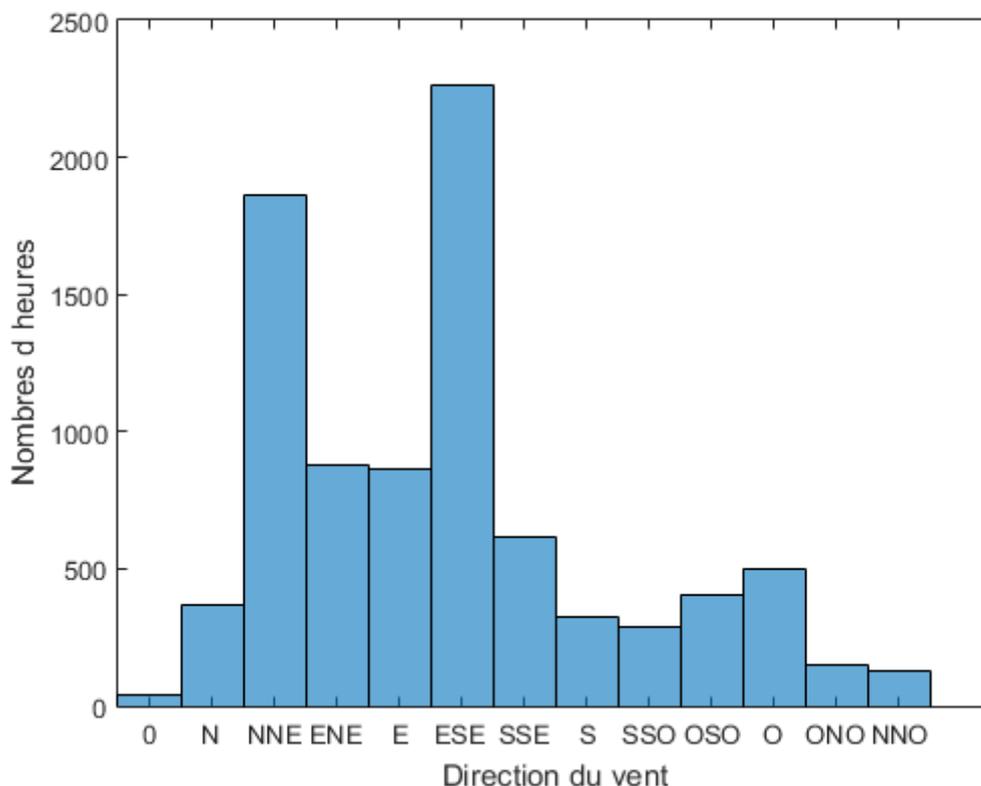


Figure 17: Histogramme des mesures de direction horizontale du vent à la station météorologique de Pierrefonds en 2010.

L'histogramme de la distribution bivariable de la vitesse et direction horizontales du vent fait aussi l'objet d'une représentation graphique suggestive appelée rose des vents. Dans le plan, le cercle unitaire dont le rayon donne la direction horizontale du vent est subdivisé en secteurs circulaires d'arc de cercle égal à la longueur des intervalles $\Theta_k, k = 1, \dots, K$. La longueur des deux rayons délimitant chaque secteur représente la fréquence d'occurrence des vents depuis cette direction. Au sein de chaque bâton de l'histogramme circulaire, les vents soufflant dans cette fourchette de directions sont décomposés par classe de vitesses selon une échelle traditionnellement codée en couleurs. Une grande unité de couleurs indique une fourchette de directions pour laquelle la vitesse moyenne des vents soufflant dans ces directions est très représentative alors qu'une multiplicité de couleurs indique une distribution très étalée de la vitesse des vents, signe d'une vitesse moyenne peu représentative.

La rose des vents illustrant la distribution jointe des mesures de vitesse et de direction horizontales du vent pour la station météorologique de Pierrefonds est présentée numériquement dans le Tableau 3. Elle est représentée graphiquement dans la Figure 18. Au sein de cette thèse les roses des vents sont présentées selon une subdivision en 12 secteurs circulaires de 30° chacun.

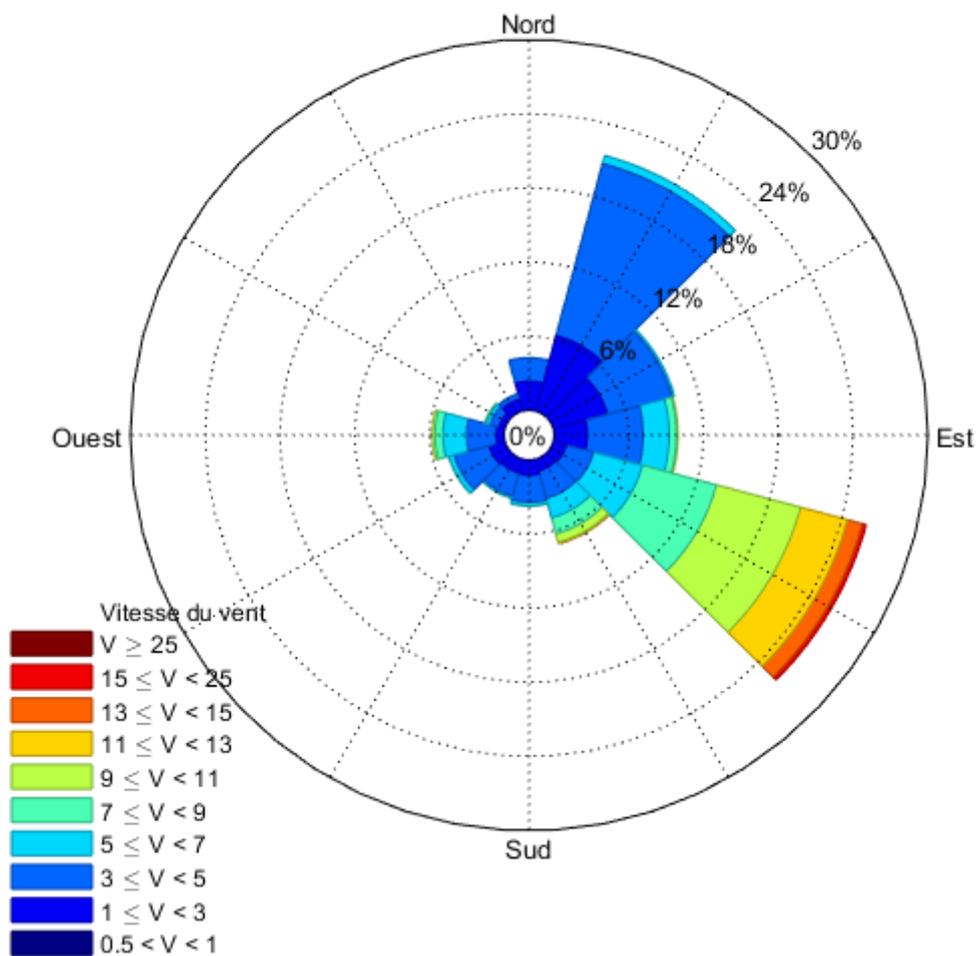


Figure 18: Rose des vents pour la station météorologique de Pierrefonds en 2010.

L'île de La Réunion, située à 21.5° de latitude sud est exposée au vent dominant correspondant au flux d'alizés d'est sud-est. Les alizés sont générés par l'ensoleillement inégal entre la zone équatoriale et la zone subtropicale située entre 23.5° et 40° de latitude sud. Le gradient de température produit une circulation des masses d'air entre les zones de haute pression et les zone de basse pression selon le principe d'une cellule de Hadley illustrée par la Figure 19.

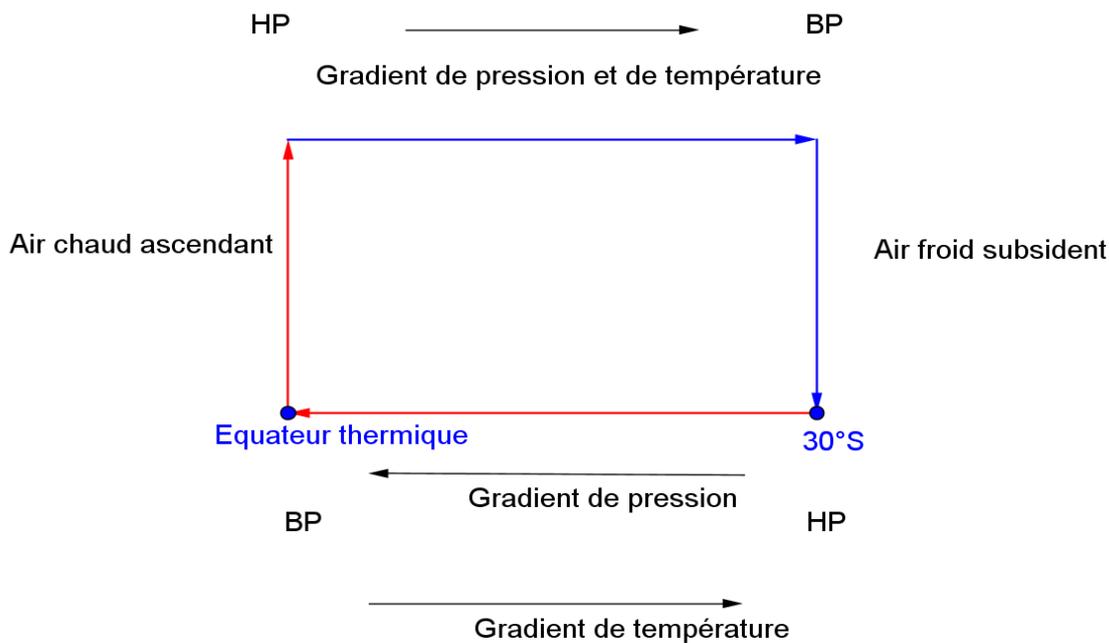


Figure 19: Circulation atmosphérique au sein d'une cellule de Hadley.

A l'équateur thermique, le fort ensoleillement donne lieu à un mouvement ascendant des masses d'air, accompagné d'une zone de basse pression permanente au niveau du sol vers laquelle se déplacent des masses d'air en provenance des zones subtropicales situées au sud. En altitude, l'air équatorial souffle dans une direction opposée à celle des alizés. Les masses d'air se refroidissent en se dirigeant vers le Pôle sud et le flux d'air, dit subsident¹⁵, commence à descendre.

La direction est-sud-est des alizés est la résultante de la rotation de la Terre autour de son axe. La vitesse de rotation uniforme de la Terre varie à sa surface en fonction de la distance à l'axe de rotation de celle-ci. Une masse d'air se dirigeant du sud vers le nord (respectivement du nord vers le sud) pour un observateur au repos dans l'espace, poursuivra pour un observateur situé à la surface de la Terre, une trajectoire curviligne vers la gauche (respectivement vers la droite) dans le sens du déplacement du fait de la rotation de la Terre d'est en ouest. L'action de la force de Coriolis, qui s'exerce perpendiculairement à la direction du vent, est illustrée par la Figure 20.

¹⁵ La subsidence en météorologie est le déplacement d'air vers le sol dans l'atmosphère.

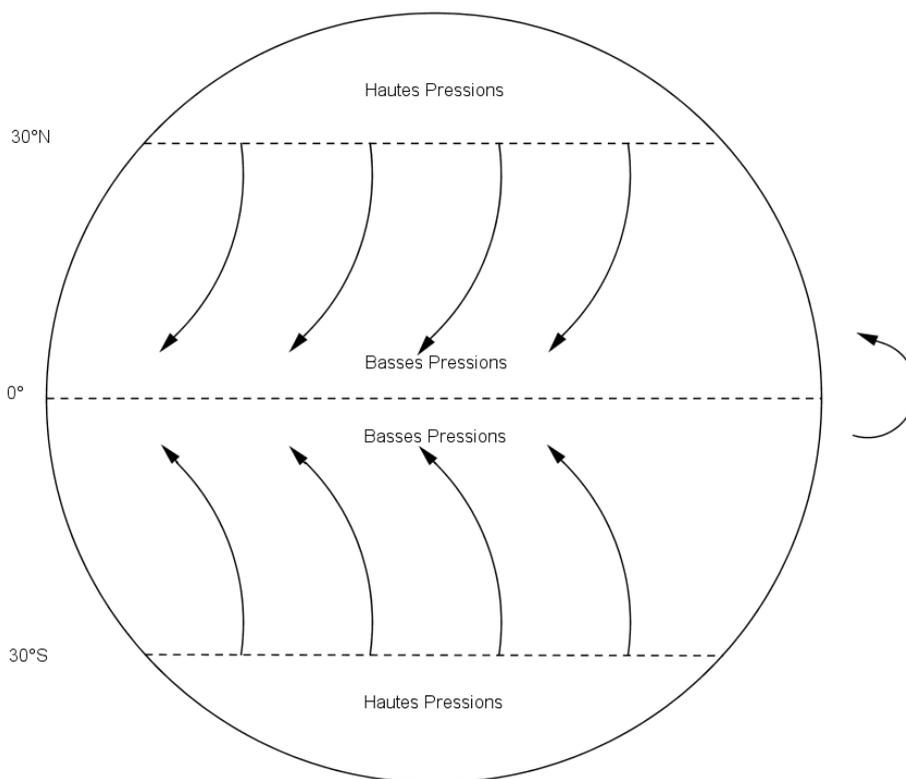


Figure 20: Force de Coriolis et trajectoires des alizés.

Le régime des alizés correspond à la classe de directions horizontales du vent $[105^{\circ}, 135^{\circ})$ du Tableau 3. La distribution de la vitesse des vents soufflant dans cette fourchette de directions présente les plus fortes occurrences de vents forts comme l'illustrent la Figure 15 ainsi que la Figure 18. En raison d'un plus fort gradient de température pendant l'hiver austral, la cellule de Hadley tropicale est plus intense durant cette période allant de mai à octobre. Les distributions saisonnières des vitesses et directions horizontales du vent pour l'été austral (de novembre à avril) et l'hiver austral (de mai à octobre) de l'année 2010 à la station météorologique de Pierrefonds sont présentées dans les Tableau 4 et Tableau 5, respectivement. On observe que la distribution de ces grandeurs dans la fourchette des directions où soufflent les alizés, l'intervalle $[105^{\circ}, 135^{\circ})$, comporte une fréquence de vents forts plus élevée en hiver qu'en été. Ce phénomène est illustré visuellement par les histogrammes de la Figure 21 ainsi que par les roses des vents de la Figure 22. En effet, la Figure 21 présente un histogramme de la vitesse des vents dans la fourchette de directions $[105^{\circ}, 135^{\circ})$ comportant une queue à droite sensiblement plus épaisse en hiver qu'en été. De même, les roses des vents présentées dans la Figure 22 comportent un secteur circulaire dans les directions est-sud-est plus long et aux couleurs plus vives en hiver qu'en été.

Tableau 4: Distribution estivale 2010 des vitesses et directions horizontales du vent à la station météorologique de Pierrefonds.

Classes de direction horizontale du vent (en degrés)	Classes de vitesse horizontale du vent (en m/s)										Total
	[0,5 , 1)	[1 , 3)	[3 , 5)	[5 , 7)	[7 , 9)	[9 , 11)	[11 , 13)	[13 , 15)	[15 , 25)	[25 , Inf)	
N=[345 , 15)	0,00	3,32	2,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,39
NNE=[15 , 45)	0,00	7,69	12,55	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,39
ENE[45 , 75)	0,00	5,37	3,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,34
E=[75 , 105)	0,00	3,11	3,74	1,12	0,19	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	8,18
ESE=[105 , 135)	0,00	1,14	2,46	4,42	6,69	6,58	2,25	0,30	0,07	0,00	23,92
SSE=[135 , 165)	0,00	1,21	2,63	1,60	1,39	0,56	0,07	0,00	0,00	0,00	7,46
S=[165 , 195)	0,00	1,12	2,32	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,60
SSO=[195 , 225)	0,00	1,39	2,42	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00
OSO=[225 , 255)	0,00	1,67	3,32	0,60	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	5,67
O=[255 , 285)	0,00	0,77	2,72	2,53	0,81	0,37	0,02	0,00	0,00	0,00	7,23
ONO=[285 , 315)	0,00	0,65	0,84	0,42	0,21	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	2,16
NNO=[315 , 345)	0,00	1,37	0,53	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,93
[0 , 360)	0,00	28,82	39,59	11,20	9,34	7,60	2,35	0,30	0,07	0,00	99,28
Vents Calmes											0,72

Tableau 5 : Distribution hivernale 2010 des vitesses et directions horizontales du vent à la station météorologique de Pierrefonds.

Classes de direction horizontale du vent (en degrés)	Classes de vitesse horizontale du vent (en m/s)										
	[0,5 , 1)	[1 , 3)	[3 , 5)	[5 , 7)	[7 , 9)	[9 , 11)	[11 , 13)	[13 , 15)	[15 , 25)	[25 , Inf)	Total
N=[345 , 15)	0,00	1,39	1,73	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,15
NNE=[15 , 45)	0,00	5,02	16,21	1,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,44
ENE=[45 , 75)	0,00	3,65	6,75	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,81
E=[75 , 105)	0,00	2,23	5,20	3,06	0,96	0,21	0,02	0,00	0,00	0,00	11,68
ESE=[105 , 135)	0,00	1,05	2,03	3,76	5,61	7,41	5,52	2,14	0,57	0,00	28,10
SSE=[135 , 165)	0,00	0,78	1,96	1,66	1,30	0,87	0,09	0,07	0,02	0,00	6,75
S=[165 , 195)	0,00	1,37	2,03	0,41	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,90
SSO=[195 , 225)	0,00	0,94	1,46	0,18	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,62
OSO=[225 , 255)	0,00	0,96	2,49	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,72
O=[255 , 285)	0,00	0,55	2,01	1,28	0,46	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	4,36
ONO=[285 , 315)	0,00	0,36	0,59	0,27	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	1,25
NNO=[315 , 345)	0,00	0,66	0,32	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
[0 , 360)	0,00	18,95	42,78	12,57	8,46	8,57	5,63	2,21	0,59	0,00	99,77
Vents Calmes											0,23

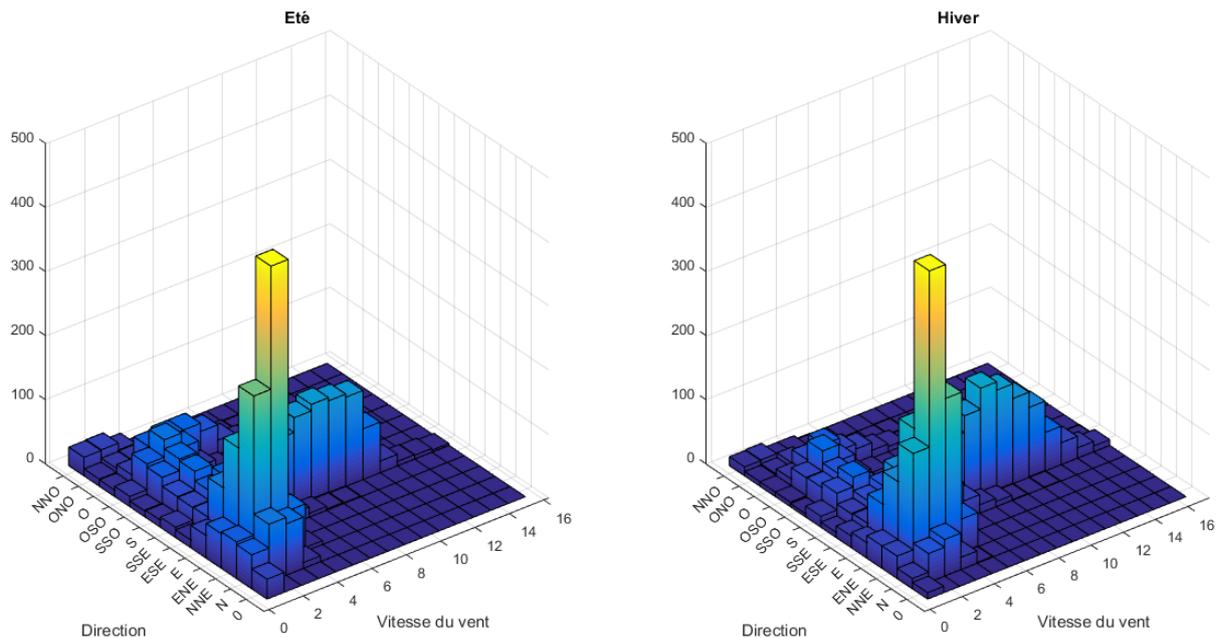


Figure 21: Histogrammes des distributions saisonnières 2010 des vitesses et directions du vent à la station météorologique de Pierrefonds.

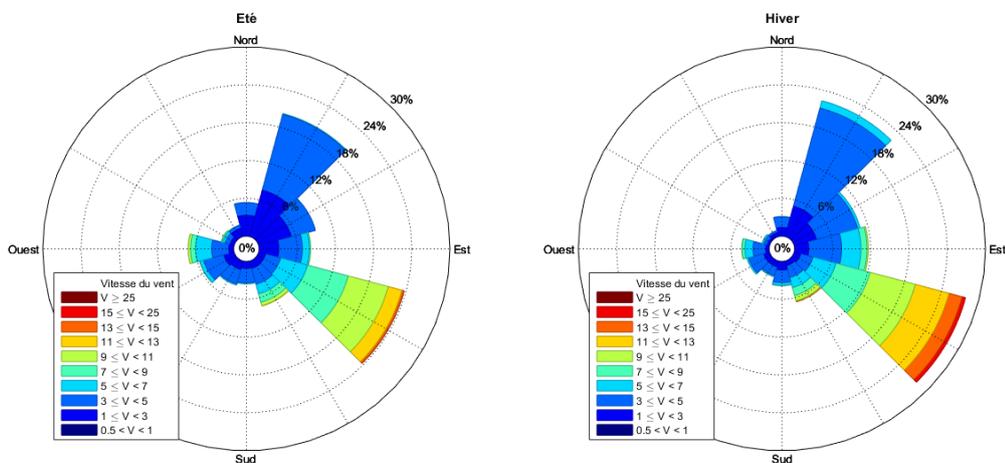


Figure 22 : Rose des vents saisonnières 2010 à la station météorologique de Pierrefonds.

Analysées à l'échelle saisonnière, les distributions bivariées des vitesses et directions horizontales du vent permettent de mettre en évidence le renforcement des alizés en hiver. Les profils des distributions saisonnières demeurent néanmoins similaires, comme l'illustrent la Figure 21 et la Figure 22. Cependant, la nature intermittente du vent exige, dans la perspective de son exploitation énergétique, d'examiner les régimes de vent qui sous-tendent son intermittence à une résolution temporelle plus fine que la saison, notamment la résolution infra-journalière.

Les Tableau 6 et Tableau 7 présentent la distribution journalière empirique des mesures de la vitesse et direction horizontales du vent enregistrées à la station météorologique de Pierrefonds pendant la saison estivale 2010, et les Tableau 8 et Tableau 9 celles pour la saison hivernale 2010. Deux périodes journalières sont envisagées, la période diurne de 9h à 19h, et la période nocturne de 20h à 8h. Pour la saison estivale, les histogrammes de ces deux distributions sont présentés dans la Figure 23 et la rose des vents dans la Figure 24, et pour la saison hivernale dans la Figure 25 et la Figure 26, respectivement. L'analyse de ces figures montre que 1/3 des vents diurnes soufflent dans la direction est-sud-est des alizés alors que ce régime de vent alizés ne représente plus que 1/6 des vents nocturnes, la direction prépondérante des vents nocturnes étant celle du segment $[15^{\circ}, 45^{\circ})$. Ce faisceau de directions correspond à l'orientation vers l'intérieur des terres de la station de Pierrefonds située sur le littoral sud-est, comme l'illustre la Figure 27. Ces vents soufflent majoritairement depuis la direction nord nord-est et sont peu énergétiques comme l'atteste également la rose des vents de droite de la Figure 24. Un troisième régime de vents se manifeste durant la journée et correspond aux faisceaux de directions comprises entre le sud-ouest et l'ouest, comme l'atteste l'histogramme de la distribution estivale diurne présenté dans la Figure 23. Ces vents sont nettement plus puissants que ceux soufflant entre les directions nord-est, comme le montre la rose des vents nocturne présentée dans la Figure 24.

Tableau 6: Distribution diurne estivale 2010 des vitesses et directions horizontales du vent à la station météorologique de Pierrefonds.

Classes de direction horizontale du vent (en degrés)	Classes de vitesse horizontale du vent (en m/s)										Total
	[0,5 , 1)	[1 , 3)	[3 , 5)	[5 , 7)	[7 , 9)	[9 , 11)	[11 , 13)	[13 , 15)	[15 , 25)	[25 , Inf)	
N=[345 , 15)	0,00	1,62	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72
NNE=[15 , 45)	0,00	0,76	0,56	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,42
ENE=[45 , 75)	0,00	0,76	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,11
E=[75 , 105)	0,00	0,91	0,76	0,20	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,92
ESE=[105 , 135)	0,00	0,71	2,38	5,22	8,41	11,70	4,66	0,66	0,15	0,00	33,87
SSE=[135 , 165)	0,00	1,67	4,91	3,29	2,58	1,16	0,15	0,00	0,00	0,00	13,77
S=[165 , 195)	0,00	1,87	4,86	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,99
SSO=[195 , 225)	0,00	2,68	5,06	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,15
OSO=[225 , 255)	0,00	2,78	7,14	1,27	0,10	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	11,34
O=[255 , 285)	0,00	1,22	5,27	5,52	1,77	0,81	0,05	0,00	0,00	0,00	14,63
ONO=[285 , 315)	0,00	0,96	0,96	0,76	0,35	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	3,14
NNO=[315 , 345)	0,00	1,22	0,15	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,42
[0 , 360)	0,00	17,16	32,51	17,06	13,27	13,82	4,86	0,66	0,15	0,00	99,49
Vents Calmes											0,51

Tableau 7 : Distribution nocturne estivale 2010 des vitesses et directions horizontales du vent à la station météorologique de Pierrefonds.

Classes de direction horizontale du vent (en degrés)	Classes de vitesse horizontale du vent (en m/s)										Total
	[0,5 , 1)	[1 , 3)	[3 , 5)	[5 , 7)	[7 , 9)	[9 , 11)	[11 , 13)	[13 , 15)	[15 , 25)	[25 , Inf)	
N=[345 , 15)	0,00	4,77	3,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,51
NNE=[15 , 45)	0,00	13,58	22,73	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	36,48
ENE=[45 , 75)	0,00	9,28	7,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,33
E=[75 , 105)	0,00	4,98	6,27	1,89	0,30	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	13,49
ESE=[105 , 135)	0,00	1,50	2,54	3,74	5,24	2,23	0,21	0,00	0,00	0,00	15,47
SSE=[135 , 165)	0,00	0,82	0,69	0,17	0,39	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	2,11
S=[165 , 195)	0,00	0,47	0,17	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,73
SSO=[195 , 225)	0,00	0,30	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47
OSO=[225 , 255)	0,00	0,73	0,09	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,86
O=[255 , 285)	0,00	0,39	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,95
ONO=[285 , 315)	0,00	0,39	0,73	0,13	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,33
NNO=[315 , 345)	0,00	1,50	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,36
[0 , 360)	0,00	38,72	45,60	6,23	6,02	2,32	0,21	0,00	0,00	0,00	99,10
Vents Calmes											0,90

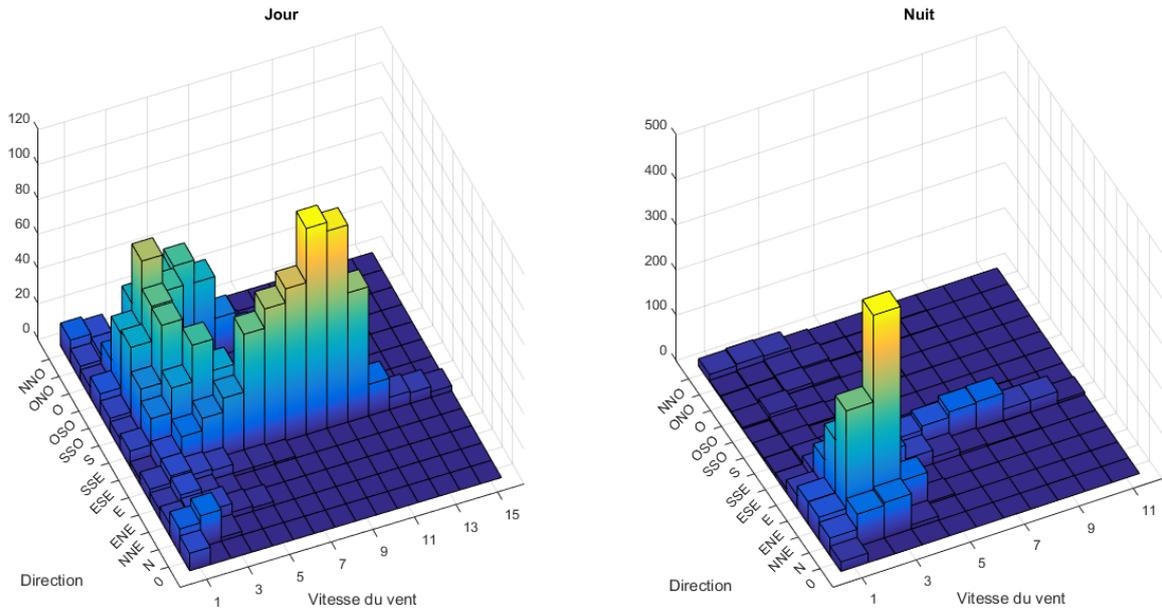


Figure 23: Histogrammes des distributions journalières estivales 2010 des vitesses et directions du vent à la station météorologique de Pierrefonds.

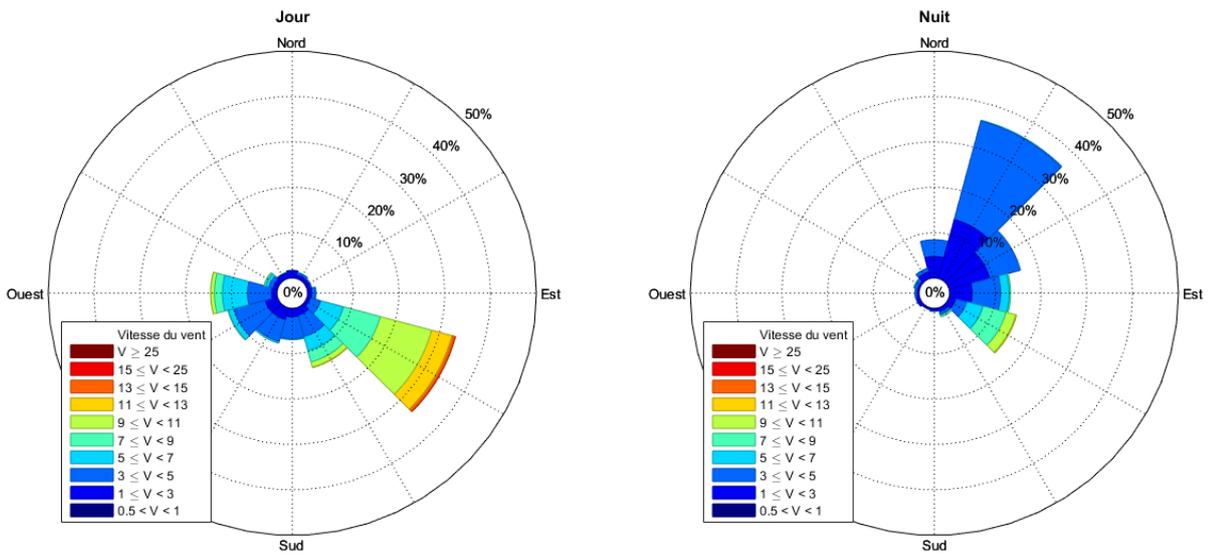


Figure 24: Roses des vents journalières estivales 2010 à la station météorologique de Pierrefonds.

Les mouvements de masse d'air observés sur les zones littorales alternativement en provenance de la mer en journée et en provenance du territoire durant la nuit sont le produit du cycle de l'ensoleillement. Durant la journée, la surface terrestre du littoral se réchauffe plus rapidement que la surface de l'océan. Les masses d'air au dessus de la terre s'élèvent en engendrant une zone de basse pression locale. Elles sont remplacées par les masses d'air en provenance de la mer donnant lieu aux vents observés précédemment depuis les directions sud-ouest et ouest sur les Figure 23 et Figure 24. Parallèlement l'air en altitude se refroidit et se dirige vers la mer pour remplacer les masses d'air parties en surface. Les vents ainsi générés sont appelés brises de mer et le mécanisme de formation de ces brises thermiques est illustré dans la Figure 25 à l'aide d'une cellule de Hadley.

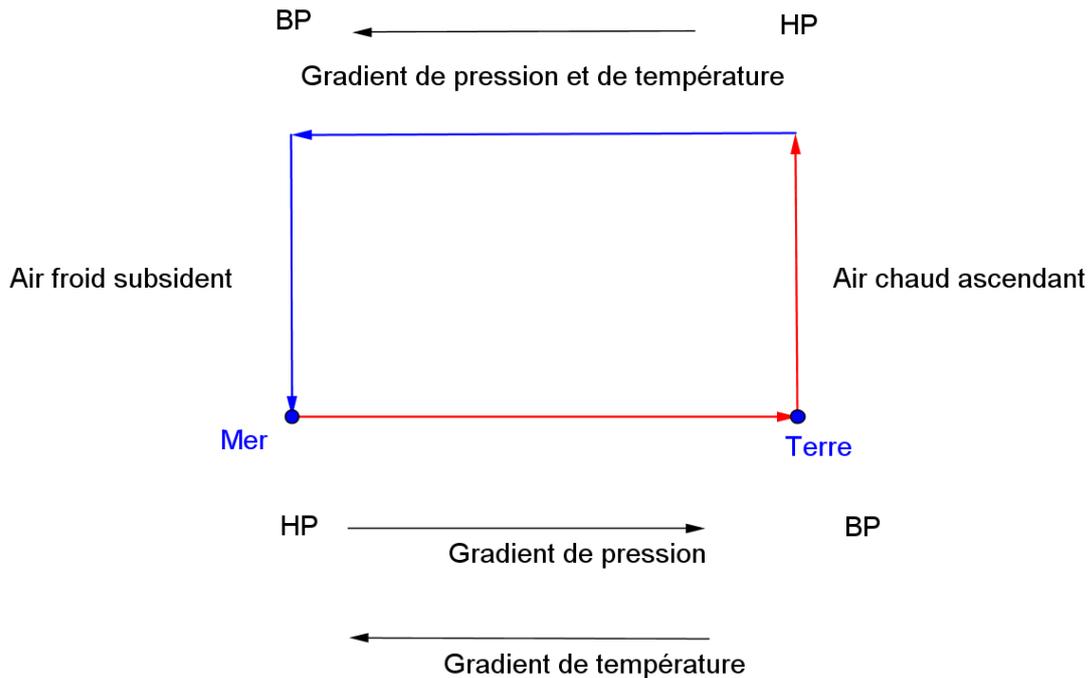


Figure 25: Cellule de Hadley d'une brise de mer.

A contrario, durant la nuit la terre se refroidit plus rapidement que la surface de l'océan. Les masses d'air s'élèvent au dessus de la surface de l'océan créant une zone de basse pression locale. Les masses d'air sont remplacées par des masses d'air en provenance de la terre donnant lieu aux vents observés précédemment depuis les directions nord et est sur les Figure 23 et Figure 24. Les vents ainsi générés sont appelés brises de terre et le mécanisme de formation de ces brises thermiques est illustré dans la Figure 26 à l'aide d'une cellule de Hadley. Les différents régimes de vent rencontrés à La Réunion sont illustrés par la Figure 27.

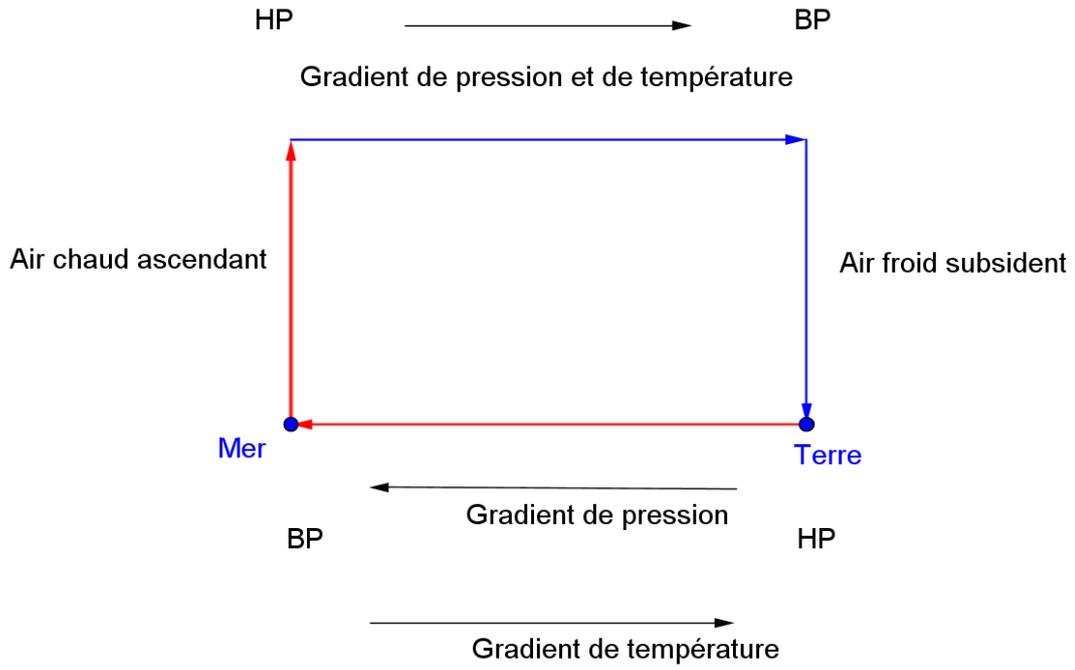
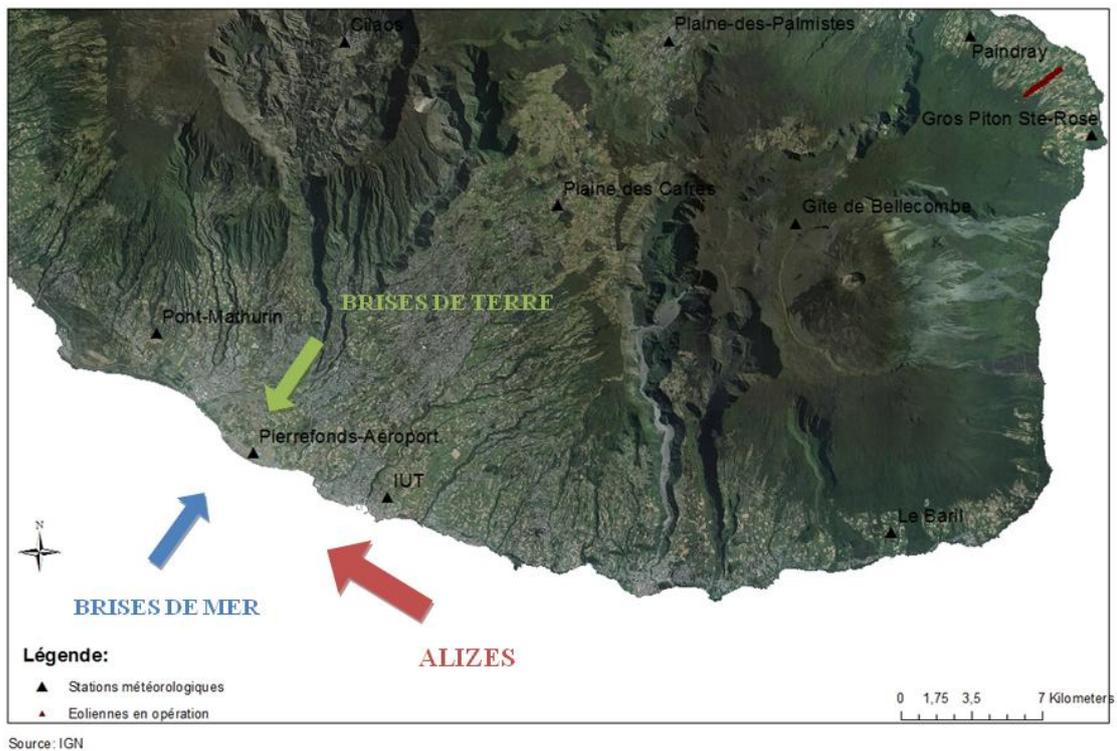


Figure 26: Cellule de Hadley d'une brise de terre.



Source: IGN

Figure 27: Régimes de vent à la station météorologique de Pierrefonds.

Les brises thermiques de mer et de terre générées par le cycle journalier de l'ensoleillement sont des composantes importantes des régimes de vent rencontrés à La Réunion avec les alizés. De par la nature insulaire du territoire réunionnais, la circulation des masses d'air de surface générée par les gradients de température entre la mer et la terre influe de manière significative sur les profils des vents. Les zones littorales sont les plus sujettes à l'influence des brises de mer. L'étude des distributions diurne et nocturne hivernale confirme cette analyse. Aux heures les plus chaudes de la journée, les vents forts des alizés soufflant sur le littoral sont portés sur le territoire par les brises de mer ascendantes comme l'illustrent les Figure 28 et Figure 29 pour la saison hivernale. Inversement, le régime de brises de terre descendante repousse les alizés au large durant la nuit, et on observe sur les Figure 28 et Figure 29 la quasi absence d'alizés durant la nuit hivernale. Ainsi, durant la nuit le vent provient de l'intérieur des terres et consiste en des brises de terre très peu énergétiques. A contrario, durant la journée, les brises de mer accompagnent les flux d'alizés puissants sur le territoire. On observe également sur ces figures le forçage des alizés durant l'hiver austral.

Tableau 8: Distribution diurne hivernale 2010 des vitesses et directions du vent à la station météorologique de Pierrefonds.

Classes de direction horizontale du vent (en degrés)	Classes de vitesse horizontale du vent (en m/s)										Total	
	[0,5 , 1)	[1 , 3)	[3 , 5)	[5 , 7)	[7 , 9)	[9 , 11)	[11 , 13)	[13 , 15)	[15 , 25)	[25 , Inf)		
N=[345 , 15)	0,00	0,64	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,84
NNE=[15 , 45)	0,00	1,44	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,33
ENE=[45 , 75)	0,00	0,99	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,83
E=[75 , 105)	0,00	0,94	1,68	1,44	0,35	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,56
ESE=[105 , 135)	0,00	1,09	2,48	4,46	8,07	11,69	10,40	4,41	1,24	0,00	0,00	43,83
SSE=[135 , 165)	0,00	1,34	3,76	3,52	2,67	1,63	0,20	0,15	0,05	0,00	0,00	13,32
S=[165 , 195)	0,00	2,28	4,06	0,79	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,28
SSO=[195 , 225)	0,00	1,58	2,97	0,40	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,05
OSO=[225 , 255)	0,00	1,83	5,35	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,78
O=[255 , 285)	0,00	1,09	4,36	2,77	0,99	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,36
ONO=[285 , 315)	0,00	0,69	0,99	0,59	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,33
NNO=[315 , 345)	0,00	0,94	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,34
[0 , 360)	0,00	14,86	27,98	14,56	12,33	13,67	10,60	4,56	1,29	0,00	0,00	99,85
Vents Calmes												0,15

Tableau 9 : Distribution nocturne hivernale 2010 des vitesses et directions du vent à la station météorologique de Pierrefonds.

Classes de direction horizontale du vent (en degrés)	Classes de vitesse horizontale du vent (en m/s)										Total
	[0,5 , 1)	[1 , 3)	[3 , 5)	[5 , 7)	[7 , 9)	[9 , 11)	[11 , 13)	[13 , 15)	[15 , 25)	[25 , Inf)	
N=[345 , 15)	0,00	2,03	3,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,11
NNE=[15 , 45)	0,00	8,07	29,29	2,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	39,60
ENE[45 , 75)	0,00	5,92	11,79	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,47
E=[75 , 105)	0,00	3,34	8,20	4,44	1,48	0,25	0,04	0,00	0,00	0,00	17,75
ESE=[105 , 135)	0,00	1,01	1,65	3,17	3,51	3,76	1,35	0,21	0,00	0,00	14,67
SSE=[135 , 165)	0,00	0,30	0,42	0,08	0,13	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	1,14
S=[165 , 195)	0,00	0,59	0,30	0,08	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,01
SSO=[195 , 225)	0,00	0,38	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55
OSO=[225 , 255)	0,00	0,21	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25
O=[255 , 285)	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
ONO=[285 , 315)	0,00	0,08	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34
NNO=[315 , 345)	0,00	0,42	0,25	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,72
[0 , 360)	0,00	22,44	55,41	10,8	5,16	4,23	1,39	0,21	0,00	0,00	99,70
Vents Calmes											0,30

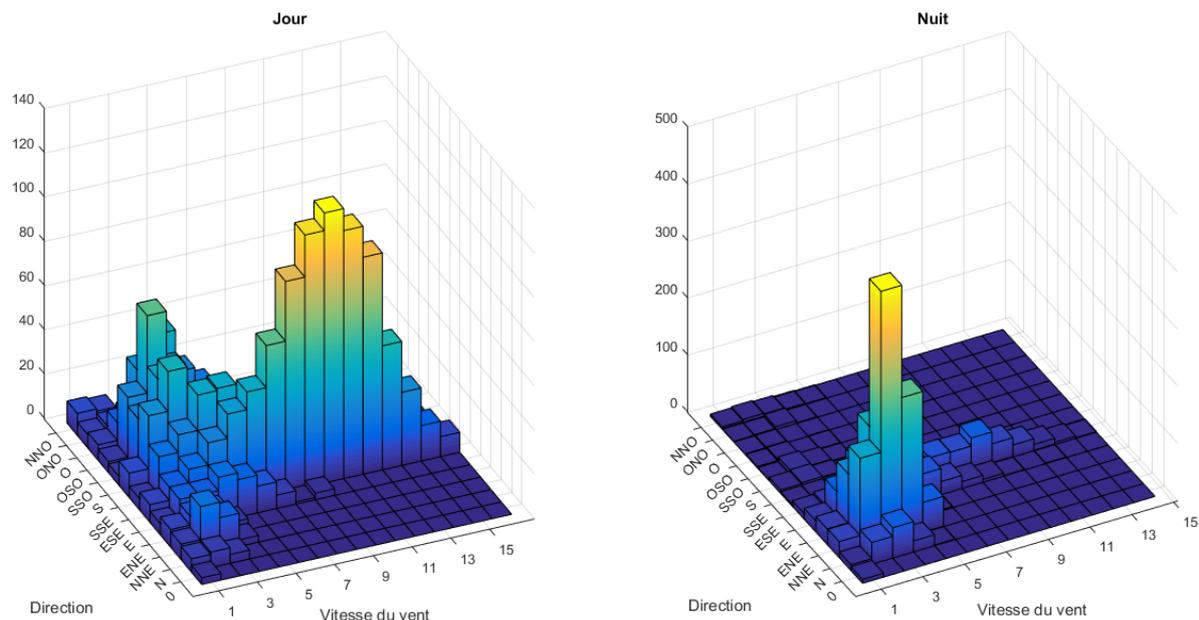


Figure 28: Histogrammes des distributions journalières hivernales 2010 des vitesses et directions du vent à la station météorologique de Pierrefonds.

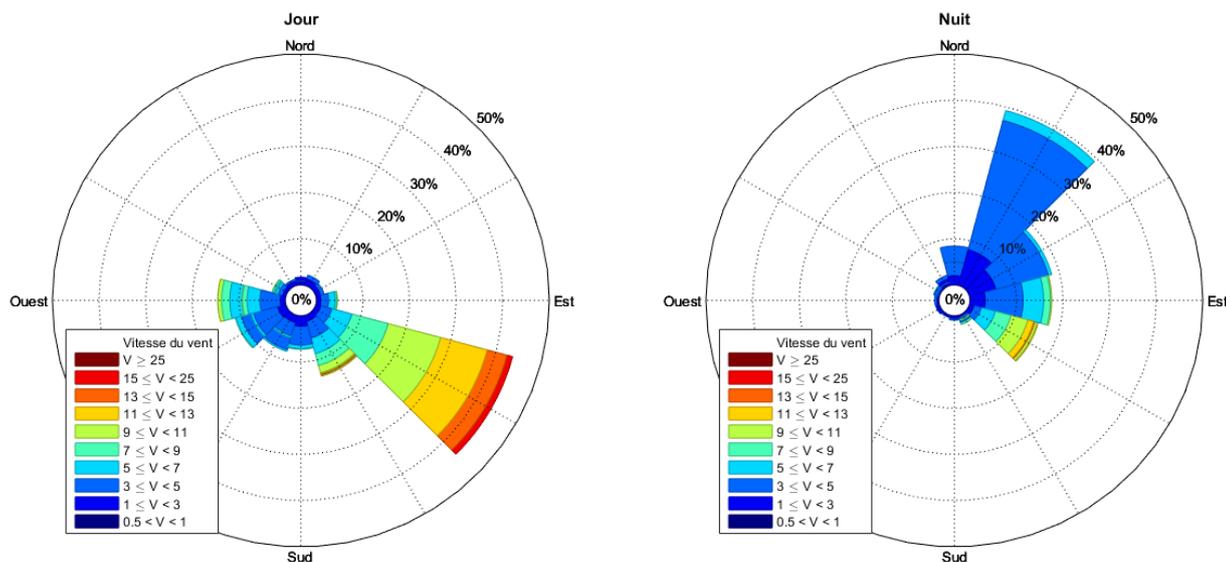


Figure 29: Rose des vents journalières hivernales 2010 à la station météorologique de Pierrefonds.

La prise en compte de ces différents régimes de vent amène à expliquer le profil de la distribution marginale de la vitesse horizontale du vent illustré par l'histogramme de la Figure 16 comme un mélange de distributions de la vitesse horizontale du vent dont chacune est conditionnelle à une direction dominante définie par une partition appropriée du domaine des directions horizontales du vent comportant les trois principaux régimes de vent identifiés précédemment, à savoir : le régime des alizés, le régime des brises de mer et le régime des

brises de terre.

En désignant par $\Theta_p = [\theta_p, \theta_{p+1})$, $p = 1, \dots, P$ une telle partition disjointe et exhaustive du domaine des directions horizontales du vent, l'intervalle $[0^\circ, 360^\circ]$ en coordonnées polaires, la distribution empirique de la vitesse horizontale du vent conditionnelle au faisceau de directions Θ_p est définie par le support $V_h = [v_h, v_{h+1})$, $h = 1, \dots, H$, avec $v_1 = c$ et $v_{H+1} = \infty$, muni des fréquences $f_{h|p} = f_{hp}/f_{*p}$, $h = 1, \dots, H$ avec :

$$f_{hp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1(v_i \in V_h)1(\theta_i \in \Theta_p) \quad \text{et} \quad f_{*p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1(\theta_i \in \Theta_p). \quad (6)$$

Finalement la distribution empirique marginale de la vitesse horizontale du vent définie sur le support $\{0, V_1, \dots, V_h, \dots, V_H\}$ muni des fréquences $\{f_0, f_{1*}, \dots, f_{h*}, \dots, f_{H*}\}$, où f_0 désigne la fréquence des vents calmes pour lesquels aucune direction ne peut être mesurée et auxquels est donc associée la vitesse $v = 0$, peut être reformulée comme la somme pondérée par les poids f_{*p} , $p = 1, \dots, P$ des P distributions conditionnelles par rapport aux classes de directions Θ_p , $p = 1, \dots, P$, complétée par la classe des vents calmes munie de la fréquence f_0 . On vérifie en effet, que les fréquences de la distribution empirique marginale de la vitesse horizontale du vent sont aussi la somme des fréquences $f_{h|p}$ des distributions conditionnelles, pondérées par les poids f_{*p} du mélange :

$$f_{h*} = \sum_{p=1}^P f_{*p} f_{h|p} = \sum_{p=1}^P f_{hp}, \quad h = 1, \dots, H. \quad (7)$$

Nous illustrons cette démarche par la décomposition de la distribution empirique marginale des vitesses horizontales du vent enregistrées à la station météorologique de Pierrefonds en 2010 selon le découpage en 12 secteurs de directions présenté dans le Tableau 3. La Figure 30 présente l'histogramme de ces distributions conditionnelles en indiquant le secteur 30° auquel chacune de ces distributions se rapporte, le poids f_{*p} de chaque distribution conditionnelle dans la distribution marginale issue du mélange de ces distributions conditionnelles, ainsi que la contribution c_p de chaque distribution conditionnelle au moment non centré d'ordre 3 de la distribution marginale de la vitesse horizontale du vent. Les poids f_{*p} permettent d'identifier les régimes de vents dominants, c'est-à-dire les faisceaux de directions 30° dans lesquelles soufflent le plus souvent les vents au cours de l'année à la station météorologique de Pierrefonds, tandis que c_p mesure la part de la contribution des vents soufflant dans le faisceau de directions Θ_p à l'énergie éolienne annuelle disponible à la station de Pierrefonds, l'énergie cinétique annuelle du vent sur un site donné étant proportionnelle à ce moment de la distribution marginale de la vitesse du vent (voir la section 2.6).

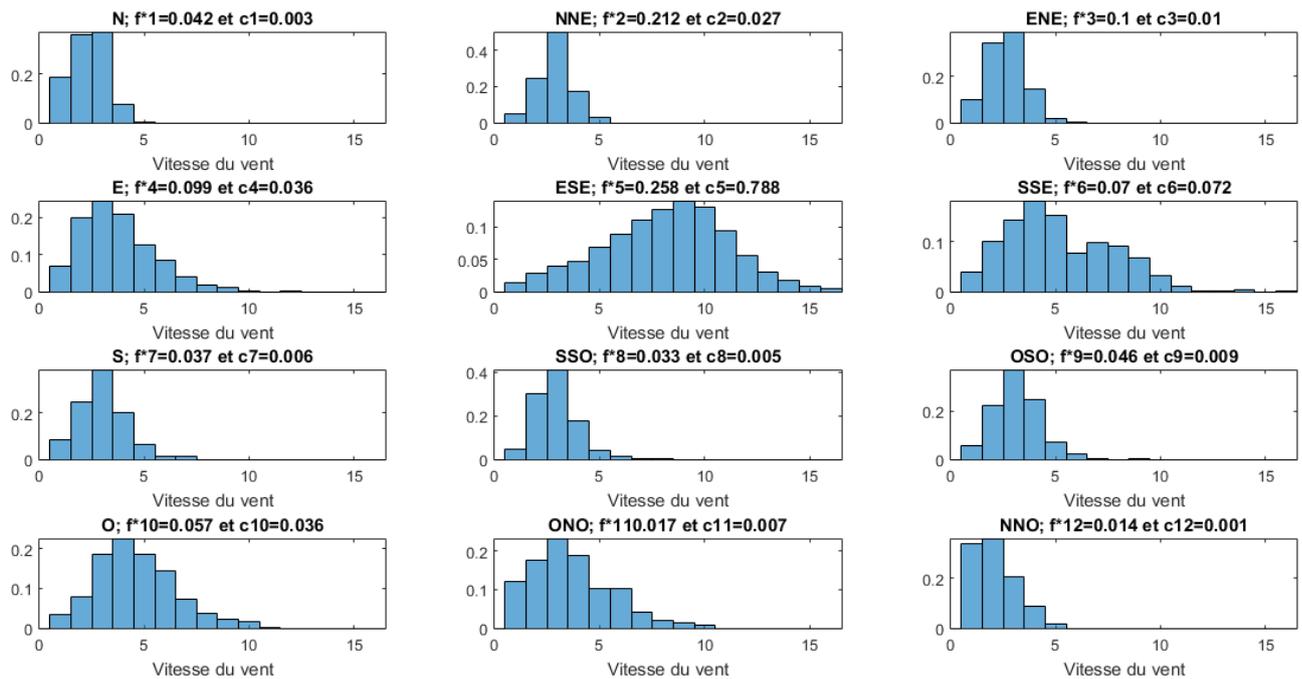


Figure 30 : Histogrammes des distributions de la vitesse horizontale du vent à la station météorologique de Pierrefonds en 2010, conditionnelles aux 12 secteurs 30° de la rose des vents.

Cette décomposition de la distribution marginale de la vitesse horizontale du vent fait apparaître des histogrammes au profil unimodal (à l'exception de la direction SSE), tantôt symétrique, tantôt asymétrique à droite, et elle permet d'identifier clairement les régimes de vents. Le régime de vents d'alizés soufflant dans les directions ESE représente un quart des mesures relevées à la station de Pierrefonds, mais surtout les alizés contribuent à hauteur de 80% à la quantité d'énergie cinétique produite par le vent à cette station. Le régime de brises de terre, soufflant dans la direction NNE représente aussi une part significative, de l'ordre de 20%, des vents soufflant à la station de Pierrefonds. Néanmoins, la force de ces brises est très faible, leur contribution à l'énergie éolienne annuelle à Pierrefonds étant inférieure à 3%. Quant au régime des brises de mer, il est plus difficilement identifiable du fait de l'influence des alizés durant les heures où les brises de mer soufflent. En fixant la direction des brises de mer perpendiculairement au rivage, celles-ci soufflent dans la direction SSO avec une faible fréquence (3.3% des mesures annuelles totales) et contribuent très marginalement, de l'ordre de 0.5%, à la quantité d'énergie éolienne déployée par le vent à la station de Pierrefonds.

2.3.2 Distributions analytiques de la vitesse et de la direction horizontales du vent

Pour les utilisations envisagées, la distribution empirique de la vitesse et de la direction horizontales du vent doit être interprétée comme un échantillon d'observations de ces variables générées par un procédé assimilable à un échantillonnage aléatoire réalisé dans le cadre d'une distribution théorique appartenant à une famille paramétrique de distributions spécifiées analytiquement sous la forme de distributions absolument continues. Cet ensemble d'hypothèses représente le modèle de super-population censé représenter le mécanisme aléatoire générateur des données de vitesse et direction horizontales du vent observées dans un site et une période de temps donnés. Un tel modèle est représenté par une densité de probabilité bivariable $f(v, \theta; \alpha)$ conditionnée par un vecteur de paramètres α dont la valeur peut

varier selon le lieu et la période de temps où les observations des variables météorologiques v et θ sont réalisées.

L'utilisation de cette approche de modélisation statistique du régime du vent facilite la portabilité des données observées dans un lieu et une période donnés à d'autres situations spatio-temporelles. Elle pose en revanche le problème du choix a priori de la forme fonctionnelle du modèle de super-population. En pratique, ce choix est effectué empiriquement en recherchant, dans une panoplie de formes fonctionnelles comportant un nombre limité de paramètres, celle qui réalise le meilleur ajustement aux données de l'échantillon disponible. Ainsi, la distribution de Weibull standard à deux paramètres (Johnson et al., 1994), que nous analyserons en détail par la suite, est la forme fonctionnelle la plus utilisée dans la littérature spécialisée pour modéliser la distribution marginale de la vitesse horizontale du vent, en raison de sa prétendue flexibilité à représenter la variété des profils de cette distribution que l'on rencontre dans les études de terrain. Cette démarche comporte toutefois les défauts de toute démarche purement inductive, à savoir l'absence d'un fondement théorique permettant d'accorder une confiance à la portée générale du modèle de distribution adopté.

Idéalement, un tel fondement théorique devrait nous être fourni par la théorie physique qui assoit l'explication des phénomènes météorologiques, comme la mécanique statistique des fluides. Malheureusement, un tel cadre théorique ne semble pas encore être une démarche opérationnelle pour établir la forme analytique de la distribution du régime du vent en un lieu et un temps donnés. Une démarche théorique alternative moins ambitieuse, mais néanmoins intéressante pas les résultats auxquels elle parvient, consiste à admettre que la position du vecteur vent dans un repère cartésien, en un lieu et instant donnés, est la résultante d'un grand nombre de causes indépendantes dont aucune n'est dominante, justifiant par là même l'application du théorème central limite de la théorie des probabilités, qui fonde la distribution normale de la position du vecteur vent dans un repère cartésien.

Pour illustrer cette démarche, considérons l'exemple d'une distribution normale bivariée centrée et de matrice de variances-covariances scalaire proposé par Davenport (1968). La densité de probabilité des coordonnées cartésiennes de la position du vecteur vent dans le plan s'écrit alors :

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (8)$$

Pour déduire de cette densité de probabilité celle de la position du vecteur vent dans le système de coordonnées polaires, utilisé pour mesurer le vecteur vent au niveau des stations météorologiques, on effectue le changement de variables :

$$\begin{aligned} x &= v \sin \theta \\ y &= v \cos \theta . \end{aligned} \quad (9)$$

Le Jacobien de ce changement de variable s'écrit :

$$abs \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial v} & \frac{\partial x}{\partial \theta} \\ \frac{\partial y}{\partial v} & \frac{\partial y}{\partial \theta} \end{vmatrix} = abs \begin{vmatrix} \sin \theta & v \cos \theta \\ \cos \theta & -v \sin \theta \end{vmatrix} = v . \quad (10)$$

Il en résulte l'expression suivante de la densité de probabilité de la position du vecteur vent en coordonnées polaires :

$$f(v, \theta) = \frac{v}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{v}{\sigma}\right)^2\right\}. \quad (11)$$

Les distributions marginales de la direction du vent et de la vitesse du vent s'obtiennent en intégrant la distribution bivariable (11) par rapport à v et à θ , respectivement. On obtient ainsi :

$$f(\theta) = \int_0^{\infty} f(v, \theta)dv = -\frac{1}{2\pi} \left[\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{v}{\sigma}\right)^2\right\} \right]_0^{+\infty} = \frac{1}{2\pi} \quad (12)$$

et

$$f(v) = \int_0^{2\pi} f(v, \theta)d\theta = \frac{v}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{v}{\sigma}\right)^2\right\} \int_0^{2\pi} d\theta = \frac{v}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{v}{\sigma}\right)^2\right\}. \quad (13)$$

La première est une distribution uniforme sur l'ensemble des directions possibles du vent, à savoir l'intervalle $[0^\circ, 360^\circ]$. La seconde est une distribution de Rayleigh, cas particulier de la distribution de Weibull à deux paramètres comme on le verra par la suite, dont le paramètre σ représente le mode de la distribution. Ce modèle de distribution est utilisé pour modéliser la distribution de la vitesse du vent lorsque la seule information disponible pour évaluer le paramètre σ est représentée par une valeur empirique de la vitesse moyenne du vent¹⁶. Il s'avère en effet, que l'espérance mathématique de cette distribution, égale à $E(v) = \sqrt{\pi/2}\sigma$, permet d'envisager l'estimation le paramètre σ en remplaçant dans cette formule le moment théorique $E(v)$ par une estimation empirique \bar{v} , ce qui permet d'en dériver l'estimation suivante de σ : $\sqrt{2/\pi} \bar{v}$.

Smith (1976) et Harris and Cook (2014) ont généralisé cette approche en envisageant une forme générale de la densité de probabilité normale bivariable des coordonnées cartésiennes de la position du vecteur vent, à savoir une fonction de densité de la forme suivante :

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left\{-\frac{Q(x, y)}{2(1-\rho^2)}\right\} \quad (14)$$

avec

$$Q(x, y) = \frac{(x - \mu_x)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2\rho(x - \mu_x)(y - \mu_y)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y - \mu_y)^2}{\sigma_y^2},$$

μ_x et μ_y étant les espérances mathématiques des coordonnées cartésiennes x et y du vecteur vent, σ_x^2 et σ_y^2 les variances correspondantes et ρ leur coefficient de corrélation.

La contribution de Smith (1976) a consisté à dériver la distribution marginale de la direction horizontale du vent en coordonnées polaires. Pour ce faire, on procède au changement de variables (9) permettant de déduire de la densité de probabilité de la position du vecteur vent en coordonnées cartésiennes celle en coordonnées polaires, qui s'écrit :

$$f(v, \theta) = \frac{v}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left\{-\frac{Q(v \sin \theta, v \cos \theta)}{2(1-\rho^2)}\right\}. \quad (15)$$

Or, $Q(v \sin \theta, v \cos \theta)$ peut s'écrire sous la forme suivante :

¹⁶ Da Rosa (2013), section 15.3.1.

$$Q(v \sin \theta, v \cos \theta) = v^2 a(\theta)^2 - 2vb(\theta) + c^2 \quad (16)$$

avec :

$$\begin{aligned} a(\theta)^2 &= \frac{\sin^2 \theta}{\sigma_x^2} - 2\rho \frac{\sin \theta \cos \theta}{\sigma_x \sigma_y} + \frac{\cos^2 \theta}{\sigma_y^2} \\ b(\theta) &= \frac{\sin \theta}{\delta_x \sigma_x} - \rho \left(\frac{\sin \theta}{\delta_y \sigma_x} + \frac{\cos \theta}{\delta_x \sigma_y} \right) + \frac{\cos \theta}{\delta_y \sigma_y} \\ c^2 &= \frac{\mu_x^2}{\sigma_x^2} - 2\rho \frac{\mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y} + \frac{\mu_y^2}{\sigma_y^2}, \end{aligned}$$

où $\delta_x = \sigma_x / \mu_x$ et $\delta_y = \sigma_y / \mu_y$ désignent les coefficients de variation des coordonnées cartésiennes x et y du vecteur vent. Dès lors, la densité de probabilité jointe $f(v, \theta)$ peut être reformulée comme suit :

$$\frac{v}{2\pi \sigma_x \sigma_y \sqrt{1-\rho^2}} \exp\left\{-\frac{c^2}{2(1-\rho^2)}\right\} \exp\left\{-\frac{\left(v a(\theta) - \frac{b(\theta)}{a(\theta)}\right)^2}{2(1-\rho^2)}\right\} \exp\left\{\frac{\frac{b(\theta)^2}{a(\theta)^2}}{2(1-\rho^2)}\right\}, \quad (17)$$

ce qui permet de dériver la densité de probabilité marginale de θ sous forme fermée en remarquant que par le changement de variable :

$$t = \frac{v a(\theta) - \frac{b(\theta)}{a(\theta)}}{\sqrt{1-\rho^2}} \leftrightarrow v = \frac{\sqrt{1-\rho^2}}{a(\theta)} t + \frac{b(\theta)}{a(\theta)^2} \rightarrow dv = \frac{\sqrt{1-\rho^2}}{a(\theta)} dt \quad (18)$$

on peut écrire :

$$\begin{aligned} &\int_0^\infty v \exp\left\{-\frac{\left(v a(\theta) - \frac{b(\theta)}{a(\theta)}\right)^2}{2(1-\rho^2)}\right\} dv \\ &= \frac{1-\rho^2}{a(\theta)^2} \int_{\frac{b(\theta)}{a(\theta)\sqrt{1-\rho^2}}}^\infty t \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} dt \\ &\quad + \frac{\sqrt{1-\rho^2} b(\theta)}{a(\theta)^3} \int_{\frac{b(\theta)}{a(\theta)\sqrt{1-\rho^2}}}^\infty \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} dt \\ &= \frac{1-\rho^2}{a(\theta)^2} \left[\exp\left\{-\frac{\frac{b(\theta)^2}{a(\theta)^2}}{2(1-\rho^2)}\right\} + \sqrt{2\pi} \frac{b(\theta)}{a(\theta)\sqrt{1-\rho^2}} \Phi\left(\frac{b(\theta)}{a(\theta)\sqrt{1-\rho^2}}\right) \right] \end{aligned}$$

avec $\phi(t)$ la densité de probabilité d'une variable aléatoire normale réduite et $\Phi(t)$ sa fonction de distribution cumulative. Finalement, en posant :

$$A(\theta) = \frac{a(\theta)}{\sqrt{1-\rho^2}}, \quad B(\theta) = \frac{b(\theta)}{a(\theta)\sqrt{1-\rho^2}}, \quad C = \frac{c}{\sqrt{1-\rho^2}},$$

la densité de probabilité marginale de la direction horizontale du vent se simplifie comme suit :

$$f(\theta) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}A(\theta)^2} \exp\left\{-\frac{C^2}{2}\right\} \left[1 + \sqrt{2\pi}B(\theta)\exp\left\{\frac{B(\theta)^2}{2}\right\}\Phi(B(\theta))\right]. \quad (19)$$

Harris and Cook (2014) se sont attachés à dériver la distribution marginale de la vitesse horizontale du vent en coordonnées polaires à partir de la distribution (14) appelée modèle Normal Elliptique Décalé (« Offset Elliptical Normal »), par rapport au modèle (8) de Davenport appelé modèle Normal Circulaire Central. Afin de simplifier la dérivation de la distribution marginale de la vitesse horizontale du vent v de la densité jointe (14) des coordonnées cartésiennes x et y du vecteur vent, Harris et Cook procèdent à une rotation du repère cartésien orthogonal (x,y) à un repère cartésien orthogonal (X,Y) dont les axes X et Y sont parallèles au grand et au petit axes des ellipses d'iso-densité de probabilité, respectivement, comme illustré par la Figure 31. Dans ce nouveau système d'axes cartésiens orthogonaux, les coordonnées X et Y ne sont plus corrélées, ce qui permet de reformuler la densité de probabilité (14) comme suit :

$$f(X,Y) = \frac{1}{2\pi\sigma_X\sigma_Y} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{X-\mu_X}{\sigma_X}\right)^2 + \left(\frac{Y-\mu_Y}{\sigma_Y}\right)^2\right]\right\} \quad (20)$$

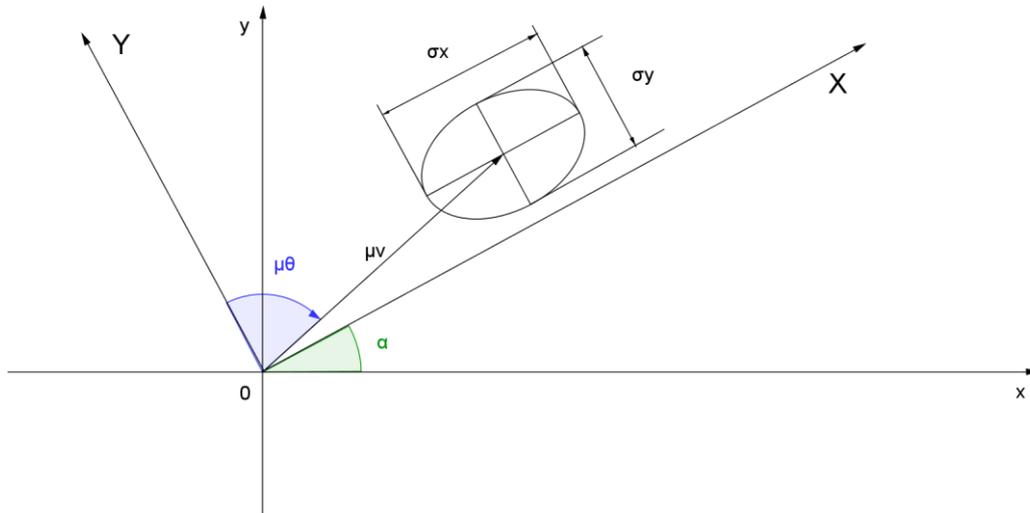


Figure 31: Transformation des axes du repère cartésien de la densité de probabilité du modèle Normal Elliptique Décalé.

Afin d'exprimer la densité de probabilité (20) d'après les coordonnées polaires v et θ , on envisage la transformation de variables :

$$\begin{aligned} X &= v \sin \vartheta \\ Y &= v \cos \vartheta \end{aligned} \quad (21)$$

avec $\vartheta = \theta + \alpha$, où α désigne l'angle de rotation des axes cartésiens X et Y par rapport aux axes x et y , représenté sur la Figure 28, et une vitesse v identique à celle du changement de variables (9), car la distance euclidienne dans le repère cartésien orthogonal (x,y) est conservée dans le repaire cartésien orthogonal (X,Y) :

$$x^2 + y^2 = v^2(\sin^2\theta + \cos^2\theta) = v^2 = v^2(\sin^2\vartheta + \cos^2\vartheta) = X^2 + Y^2 .$$

Notons que l'angle α est fonction du coefficient de corrélation ρ , avec $\alpha = 0$ lorsque $\rho = 0$ et $\alpha = \pm 90^\circ$ lorsque $\rho = \pm 1$, ce qui correspond aux situations où les axes X et Y sont parallèles au petit et au grand axes des ellipses d'iso-densité de probabilité, respectivement.

Il en découle l'expression suivante de la densité de probabilité jointe de v et ϑ :

$$f(v, \vartheta) = \frac{v}{2\pi\sigma_X\sigma_Y} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{v \sin \vartheta - \mu_v \sin \mu_\vartheta}{\sigma_X} \right)^2 + \left(\frac{v \cos \vartheta - \mu_v \cos \mu_\vartheta}{\sigma_Y} \right)^2 \right] \right\} \quad (22)$$

avec μ_v et μ_ϑ les coordonnées polaires du vecteur de coordonnées cartésiennes μ_X et μ_Y . Comme pour l'expression (17), l'intégration de cette densité par rapport à la direction horizontale du vent, fournissant la densité marginale de la vitesse horizontale du vent :

$$f(v) = \int_0^{2\pi} f(v, \vartheta) d\vartheta$$

ne comporte pas, sauf dans le cas particulier du modèle Normal Circulaire Central (8), d'expression analytique en forme fermée, mais s'agissant d'intégrer sur l'intervalle fini $[0, 2\pi]$, on peut l'évaluer numériquement en utilisant une méthode de quadrature numérique appropriée.

Au regard des difficultés pratiques que pose l'utilisation de la distribution marginale de la vitesse horizontale du vent issue du modèle Normal Elliptique Décalé, l'étude de Harris and Cook (2014) s'attache à la comparer à la distribution de Weibull, couramment utilisée dans les études empiriques, dont la densité de probabilité est définie par la forme fonctionnelle suivante :

$$f(v; c, k) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left\{ - \left(\frac{v}{c} \right)^k \right\}, \quad v \geq 0 \quad (23)$$

où $c > 0$ désigne un paramètre dimensionnel exprimé dans la même unité que la vitesse horizontale du vent v (m/s), appelé paramètre d'échelle de la vitesse du vent, et $k > 0$ un paramètre sans dimension dont la valeur détermine le profil de la densité de probabilité, appelé paramètre de forme de la distribution. En ajustant, par la méthode des moindres carrés, la fonction de distribution cumulative de Weibull :

$$F(v; c, k) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{v}{c} \right)^k \right\} \quad (24)$$

linéarisée sous la forme suivante :

$$\ln(-\ln[1 - F(v; c, k)]) = k \ln v - k \ln c \quad (25)$$

aux valeurs de $F(v)$ calculées numériquement d'après le modèle Normal Elliptique Décalé, pour une suite nombreuse de valeurs de v supérieures à sa valeur modale, l'étude de Harris et Cook montre que l'ajustement est si serré, que la distribution de Weibull peut être considéré comme une approximation analytique très précise de la distribution marginale de la vitesse du vent d'un modèle Normal Elliptique Décalé pour les valeurs de v supérieures à la valeur modale. Ces résultats laissent toutefois sans réponse la question de la qualité de l'approximation de la distribution marginale de la vitesse du vent d'un modèle Normal Elliptique Décalé par la distribution de Weibull pour les valeurs de v inférieures à la valeur modale.

Pour apprécier la portée pratique de la famille de distributions de Weibull à deux paramètres pour représenter la distribution marginale de la vitesse du vent, il convient d'analyser comment se modifie le profil de la fonction de densité de cette distribution ainsi que la valeur de ses principales caractéristiques de forme en fonction de la valeur de ses deux

paramètres.

Le Tableau 10 présente l'expression analytique des principales caractéristiques numériques de la distribution de Weibull à deux paramètres. Dans ce tableau, les moments autour de zéro ou moments non centrés d'ordre $r = 1, 2, \dots$ sont symbolisés par¹⁷ :

$$m_r = E[v^r] = c^r \Gamma(1 + rk^{-1}) \quad (26)$$

tandis que les moments autour de la moyenne ou moments centrés sont symbolisés par :

$$\mu_r = E[(v - m_1)^r] = \sum_{j=0}^r \binom{r}{j} m_1^j \mu_{r-j} \quad (27)$$

Par $\Gamma(x)$ on désigne la fonction gamma ou intégrale d'Euler de deuxième espèce :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt, x > 0 \quad (28)$$

Tableau 10: Principales caractéristiques numériques de la distribution de Weibull à deux paramètres.

Caractéristique numérique	Expression analytique
Moyenne	$m_1 = c\Gamma(1 + k^{-1})$
Médiane ¹⁸	$M = c(\ln 2)^{k^{-1}}$
Mode ¹⁹	$M_0 = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 < k < 1 \\ c(1 - k^{-1})^{k^{-1}} & \text{si } k \geq 1 \end{cases}$
Variance	$\mu_2 = c^2[\Gamma(1 + 2k^{-1}) - \Gamma(1 + k^{-1})^2]$
Coefficient d'asymétrie ²⁰	$\gamma_1 = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}} = \frac{\Gamma(1 + 3k^{-1}) - 3\Gamma(1 + k^{-1})\Gamma(1 + 2k^{-1}) + 2\Gamma(1 + k^{-1})^3}{[\Gamma(1 + 2k^{-1}) - \Gamma(1 + k^{-1})^2]^{3/2}}$
Coefficient d'aplatissement ²¹	$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3 = \frac{\Gamma(1 + 4k^{-1}) - 4\Gamma(1 + k^{-1})\Gamma(1 + 3k^{-1}) + 6\Gamma(1 + k^{-1})^2\Gamma(1 + 2k^{-1}) - 3\Gamma(1 + k^{-1})^4}{[\Gamma(1 + 2k^{-1}) - \Gamma(1 + k^{-1})^2]^2} - 3$

¹⁷ L'expression de m_r pour la distribution de Weibull est obtenue en effectuant le changement de variable :
 $x = (v/c)^k$.

¹⁸ L'expression de la médiane est obtenue en résolvant l'équation :

$$F(M) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{M}{c}\right)^k\right\} = \frac{1}{2}.$$

¹⁹ L'expression du mode est obtenue en résolvant l'équation :

$$\frac{d \ln f(M_0)}{dv} = \frac{k-1}{M_0} - \frac{k}{c} \left(\frac{M_0}{c}\right)^{k-1} = 0.$$

²⁰ Le coefficient d'asymétrie (en anglais « skewness ») est un indicateur sans dimension proposé par R.A. Fisher pour mesurer le degré d'asymétrie d'une distribution. Ce coefficient est nul lorsque la distribution est symétrique, mais à une valeur nulle de ce coefficient ne correspond pas nécessairement une distribution symétrique. Pour les distributions unimodales, ce coefficient est positif lorsque la distribution est dissymétrique et étalée vers la droite et il est négatif lorsque la distribution est dissymétrique et étalée vers la gauche.

²¹ Le coefficient d'aplatissement ou kurtosis est un indicateur sans dimension introduit par R.A. Fisher pour mesurer le degré d'aplatissement d'une distribution symétrique. Il est calibré pour prendre la valeur 0 lorsque la distribution est normale et, de ce fait, est positif si la distribution est moins aplatie que la distribution

Qualitativement, le profil de la fonction de densité de Weibull (23) dépend de la valeur du paramètre de forme k . D'après la valeur de ce paramètre on peut mettre en évidence trois types de profils qualitativement distincts.

Lorsque $0 < k < 1$ la fonction de densité de la distribution de Weibull possède un profil en J inversé comme illustré par la Figure 32. C'est une fonction strictement décroissante et convexe de v , depuis ∞ pour $v = 0$ jusqu'à 0 lorsque $v \rightarrow \infty$. Les axes qui délimitent le premier quadrant du plan cartésien constituent donc deux asymptotes pour cette fonction $y = f(v)$; l'une verticale ($v = 0$) et l'autre horizontale ($y = 0$). La convexité de cette fonction s'accroît lorsque la valeur de k diminue et tend, lorsque $k \rightarrow 0 +$, vers celle représentée par les asymptotes en angle droit $v = 0$ et $y = 0$.

À l'inverse, lorsque k s'accroît de 0 vers 1, la convexité de cette fonction s'affaiblit et tend vers celle de la distribution exponentielle :

$$f(v; c, 1) = \frac{1}{c} \exp\left\{-\frac{v}{c}\right\} \quad (29)$$

représentée sur la Figure 32. Cette fonction de densité possède un profil qualitativement différent de celles que l'on vient d'étudier, car elle possède une valeur finie pour sa valeur modale $M_0 = 0$. Quoi qu'il en soit, cette famille de profils de la fonction de densité de la distribution de Weibull en J inversé est peu appropriée pour représenter la distribution de la vitesse horizontale du vent à La Réunion, où les vents calmes sont peu fréquents. C'est pourquoi nous ne poursuivons pas ici l'analyse de ces distributions au niveau de leurs caractéristiques numériques, tout en renvoyant le lecteur intéressé au résumé de leurs propriétés présenté dans le Tableau 11.

normale et négatif dans le cas contraire. Dans le premier cas, on dit que la distribution est « leptokurtique » et, dans le second, qu'elle est « platikurtique », le cas où $\gamma_2 = 0$ étant qualifié de « mesokurtique ». Du fait de l'inégalité $\mu_4 \geq \mu_2^2$, on a $\gamma_2 \geq -2$, cette inégalité ne devenant une égalité que si $\mu_4 = \mu_2^2$, ce qui se produit dans le cas dégénéré où la variable aléatoire ne prend qu'une seule valeur (mais alors $\mu_4 = \mu_2 = 0$), ou dans le cas non dégénéré où la variable aléatoire peut prendre deux valeurs distinctes avec probabilités égales.

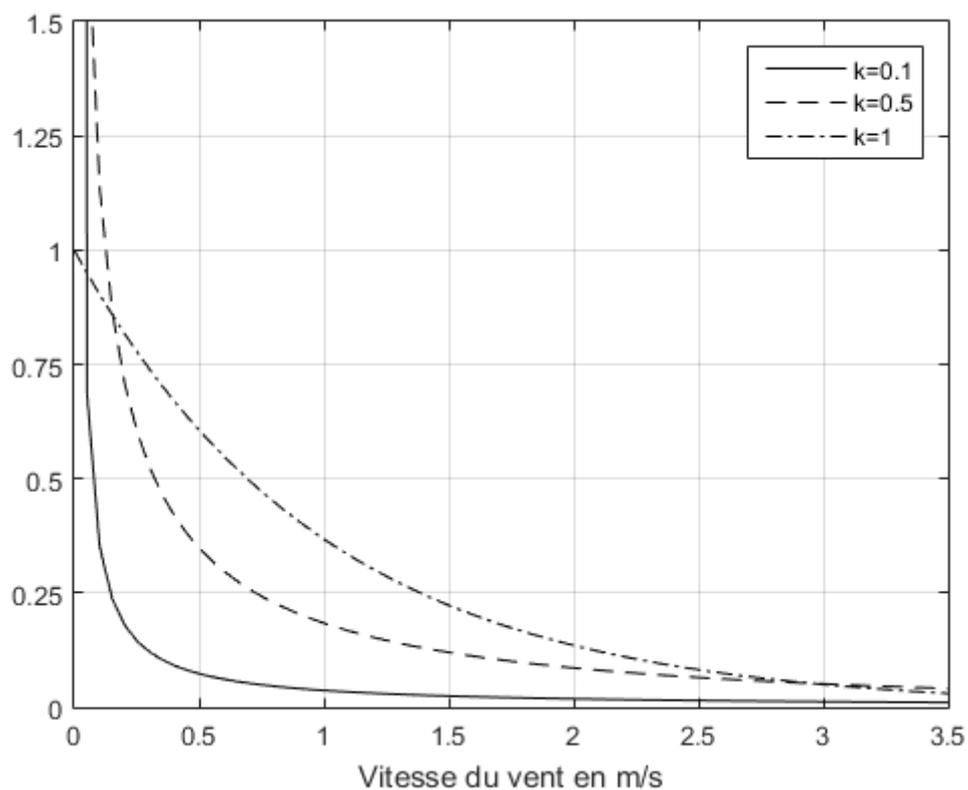


Figure 32: Profils de la fonction de densité de Weibull standardisée ($c=1$) pour $0 < k < 1$.

Lorsque $k > 1$ la fonction de densité de la distribution de Weibull est nulle à l'origine et possède un profil en forme de cloche dissymétrique comme illustré par la Figure 33. Pour des valeurs croissantes du paramètre k , de 1 jusqu'à ∞ , le mode de la distribution de Weibull s'accroît de 0 vers c , puisque le facteur $(1 - k^{-1})^{k-1}$ figurant dans son expression croît de 0 à 1 lorsque k croît de 1 à ∞ . Une augmentation de k produit aussi une concentration de la fonction de densité autour de son mode, qui engendre une modification de la répartition de la masse de probabilité de la distribution autour de cette caractéristique de tendance centrale. D'abord étalée majoritairement à droite de son mode, pour de faibles valeurs de $k > 1$, la masse de probabilité de la distribution est progressivement ramenée à la gauche du mode, jusqu'à atteindre une répartition égalitaire de la masse de probabilité autour du mode, puis produire un renversement du poids de cette répartition autour du mode. Cependant, sous l'effet de la concentration progressive de la densité autour du mode, la dissymétrie de la fonction de densité se réduit, et disparaît dans le cas limite où $k \rightarrow \infty$, toute la masse de probabilité étant alors concentrée sur la valeur du paramètre c .

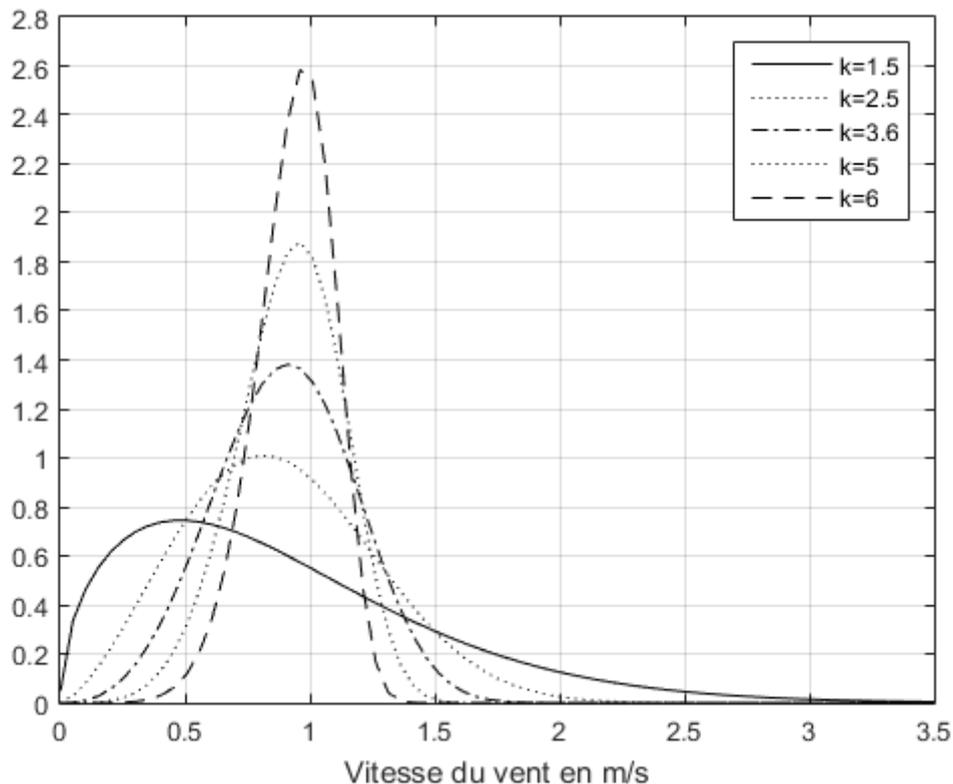


Figure 33: Profils de la fonction de densité de Weibull standardisée ($c=1$) pour $k > 1$.

L'étude de l'évolution des caractéristiques numériques de la distribution de Weibull en fonction du paramètre k permet d'approfondir la compréhension du rôle joué par ce paramètre dans la flexibilité de la distribution de Weibull en tant que modèle analytique de représentation des données empiriques disponibles. S'agissant des caractéristiques de tendance centrale de la distribution (moyenne, médiane, mode) leurs graphes en fonction de $k \geq 1$ sont représentés dans la Figure 34. Toutes ces grandeurs sont bornées supérieurement par la valeur du paramètre c . La moyenne $m_1 = c\Gamma(1 + k^{-1})$ prend la valeur c pour $k = 1$ et $k \rightarrow \infty$ car d'après les propriétés de la fonction $\Gamma(x)$ on sait que²² : $\Gamma(2) =$

²² Pour des valeurs entières de son argument, la fonction $\Gamma(x)$ peut être évaluée d'après son expression factorielle : $\Gamma(x) = (x - 1)!$.

$\Gamma(1) = 1$. Entre ces deux valeurs la fonction $\Gamma(x)$ passe par un minimum unique, approximativement égal à 0.886 pour $x \cong 1.46$ ou $k \cong 2.16$, d'où le profil en forme de courbe en cloche inversée de m_1 . Contrairement à la moyenne, la médiane et le mode sont des fonctions strictement croissantes et concaves de k , qui atteignent la valeur c seulement asymptotiquement lorsque $k \rightarrow \infty$. Pour $k = 1$, la médiane prend une valeur ($c \ln 2$) supérieure à celle du mode, égale à 0. Cependant, la fonction $(1 - k^{-1})^{k^{-1}}$, qui régit la croissance du mode, croît plus rapidement que la fonction $(\ln 2)^{k^{-1}}$, régissant la croissance de la médiane. Pour cette raison, ces deux courbes se croisent lorsque $1 - k^{-1} = \ln 2$, c'est-à-dire pour une valeur de $k = (1 - \ln 2)^{-1} \cong 3.26$. Chacune de ces fonctions croise également la fonction $\Gamma(1 + k^{-1})$, à savoir lorsque $k \cong 3.31$ pour $(1 - k^{-1})^{k^{-1}}$ et lorsque $k \cong 3.43$ pour $(\ln 2)^{k^{-1}}$. Ainsi, ces trois valeurs du paramètre k définissent des seuils d'inversion de la position relative des caractéristiques de tendance centrale de la distribution de Weibull. Plus précisément : $M_0 < M < m_1$, lorsque $1 \leq k < 3.26$; $M < M_0 < m_1$, lorsque $3.26 < k < 3.31$; $M < m_1 < M_0$, lorsque $3.31 < k < 3.43$; $m_1 < M < M_0$, lorsque $k > 3.43$. Ce résultat s'explique par l'inversion de l'étalement de la distribution de Weibull qui se produit au niveau de ces seuils, à savoir : un étalement plus prononcé à droite (respectivement à gauche) de son mode, lorsque le paramètre $k < 3.26$ (respectivement $k > 3.43$).

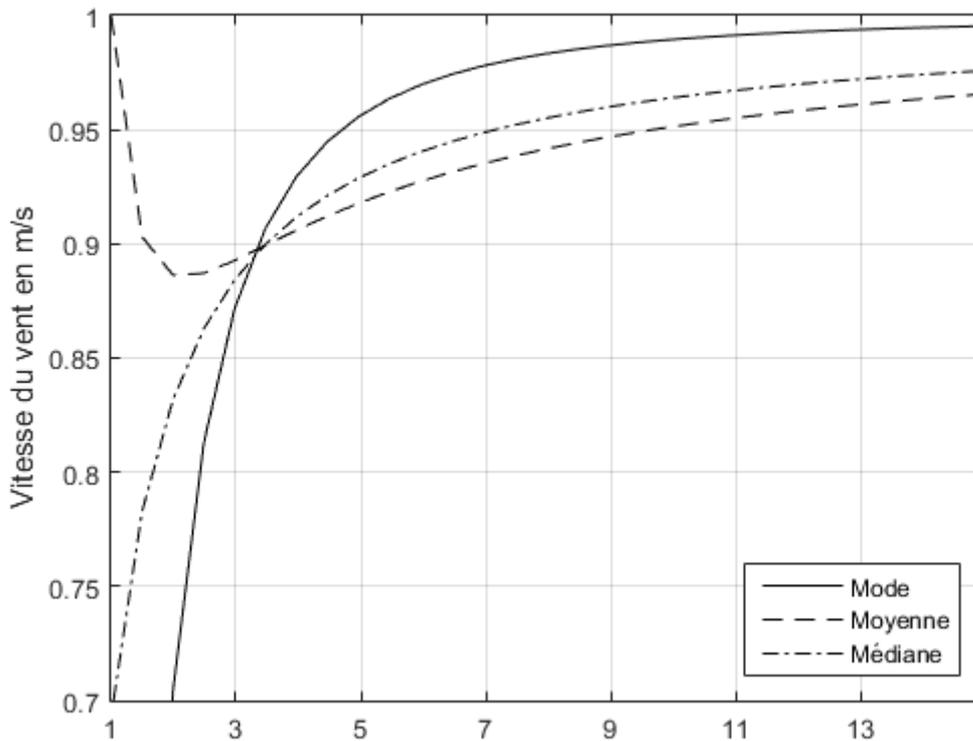


Figure 34: Graphes de la moyenne, de la médiane et du mode de la distribution de Weibull standardisée ($c=1$) en fonction du paramètre $k \geq 1$.

Le graphe de la variance, caractéristique numérique de dispersion, est représenté dans la Figure 35. Il s'agit d'une fonction strictement décroissante et convexe de k , qui prend la valeur c^2 pour $k = 1$ et la valeur 0 pour $k \rightarrow \infty$ ²³. Ce profil d'évolution de la variance traduit le phénomène de concentration progressive de la distribution autour de son mode, jusqu'à la

²³ Pour $k = 1$, on a $\mu_2 = c^2[\Gamma(3) - \Gamma(2)^2] = c^2$, et pour $k \rightarrow \infty$, $\mu_2 = c^2[\Gamma(1) - \Gamma(1)^2] = 0$.

concentration de toute la masse de probabilité de la distribution au point $v = c$ lorsque $k \rightarrow \infty$.

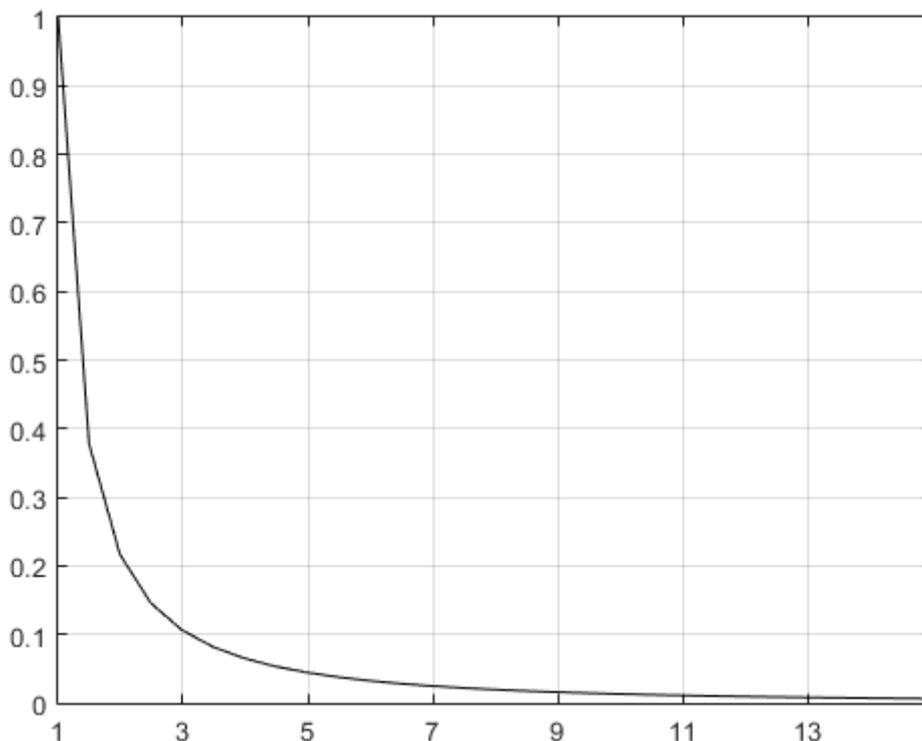


Figure 35: Graph de la variance de la distribution de Weibull standardisée ($c=1$) en fonction du paramètre $k \geq 1$.

Le graphe du coefficient d'asymétrie γ_1 , caractéristique numérique de forme, est représenté dans la Figure 36. D'abord égal à 2 pour $k = 1$,²⁴ ce coefficient décroît pour atteindre asymptotiquement lorsque $k \rightarrow \infty$ la valeur suivante : $\gamma_1 = -\sqrt{864} \zeta(3)/\pi^3 \cong -1.14$ avec $\zeta(3) = 1 + 1/2^3 + 1/3^3$, constante d'Apéry²⁵. Cette évolution traduit un renversement du profil de la distribution de Weibull, qui est d'abord étalée à droite puis à gauche, lorsque le paramètre k franchit la valeur pour laquelle γ_1 s'annule ($k \cong 3.6$). Ce renversement s'accompagne d'une concentration croissante de la masse de probabilité de la distribution autour de $v = c$, pour k élevé, conduisant à une distribution dégénérée en $v = c$ lorsque $k \rightarrow \infty$.

²⁴ Pour $k = 1$, on a $\mu_3 = c^3[\Gamma(4) - 3\Gamma(3)\Gamma(2) + 2\Gamma(2)^3] = 2c^3$ et $\mu_2^{3/2} = c^3[\Gamma(3) - \Gamma(2)^2]^{3/2} = c^3$.

²⁵ Tous les moments centrés de la distribution de Weibull étant nuls lorsque $k \rightarrow \infty$, le rapport $\mu_3/\mu_2^{3/2}$ définissant γ_1 est indéterminé de la forme $0/0$. Cette indétermination peut être levée par application de la règle de l'Hospital itérée jusqu'à l'obtention d'un quotient déterminé. Pour simplifier le calcul des dérivées du numérateur et du dénominateur de ce quotient indéterminé, on applique la règle de l'Hospital à $\gamma_1(x)^2 = \mu_3(x)^2/\mu_2(x)^3$, avec $x = 1/k$, itérée jusqu'à l'ordre 6. En utilisant la formule de Leibnitz pour le calcul de la dérivée n -ième d'un produit de deux fonctions $u(x)$ et $v(x)$, soit $D^n(u(x)v(x)) = \sum_{i=0}^n C_n^i D^i u(x) D^{n-i} v(x)$, avec $D^0 u(x) = u(x)$ et $D^0 v(x) = v(x)$, on obtient en effet : $D^i \mu_2(0)^3 = 0$, $i = 0, \dots, 5$, $D^6 \mu_2(0)^3 = (10/3) \pi^6$ et $D^i \mu_3(0)^2 = 0$, $i = 0, \dots, 5$, $D^6 \mu_3(0)^2 = 2880 \zeta(3)^2$.

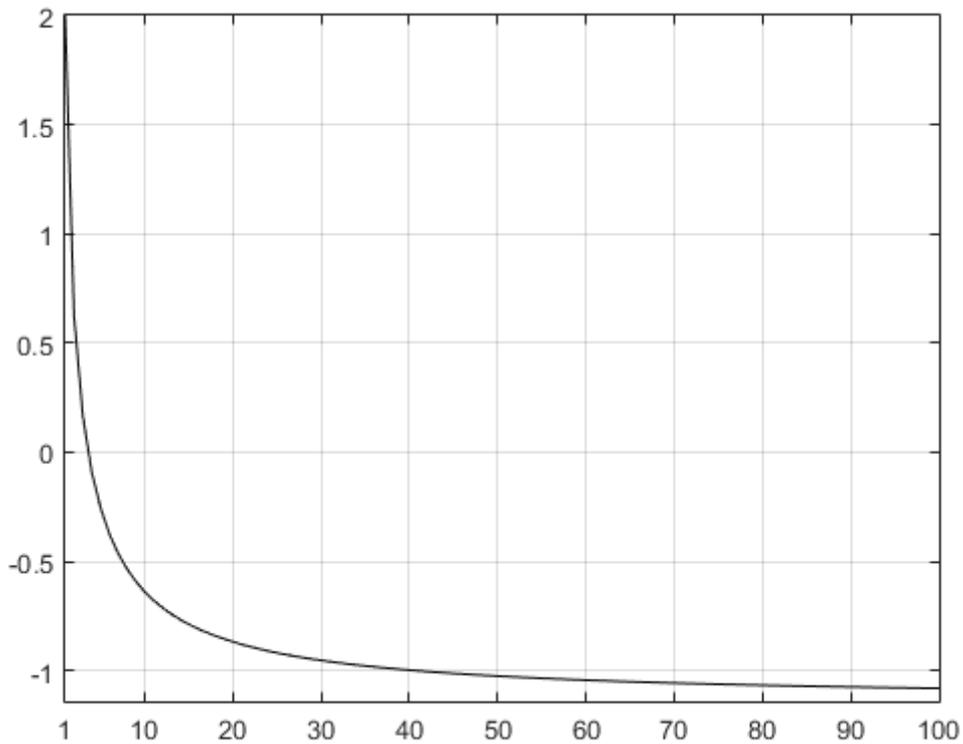


Figure 36: Graphe du coefficient d'asymétrie (skewness) de la distribution de Weibull standardisée (c=1) en fonction du paramètre $k \geq 1$.

Le graphe du coefficient d'aplatissement γ_2 , deuxième caractéristique de forme, est représenté dans la Figure 37. D'abord égal à 6 pour $k = 1$,²⁶ ce coefficient s'annule pour $k \cong 2.3$ et décroît jusqu'à une valeur minimum négative ($\cong -0.29$) atteinte pour $k \cong 3.3$. Le coefficient croît ensuite jusqu'à s'annuler pour $k \cong 5.8$ et redevient positif au delà de ce seuil vers la valeur asymptotique de 2.4 lorsque $k \rightarrow \infty$ ²⁷. Cette évolution s'explique par le passage d'un profil de distribution asymétrique comportant une queue de distribution épaisse et étalée à droite, vers une distribution plus symétrique, puis à nouveau vers une distribution asymétrique et étalée à gauche, convergeant vers une distribution dégénérée en $\nu = c$ lorsque $k \rightarrow \infty$.

²⁶ Pour $k = 1$, on a $\mu_4 = c^4[\Gamma(5) - 4\Gamma(4)\Gamma(2) + 6\Gamma(3)\Gamma(2)^2 - 3\Gamma(2)^4] = 9c^4$ et $\mu_2^2 = c^4[\Gamma(3) - \Gamma(2)]^2 = c^4$, d'où $\gamma_2 = \mu_4/\mu_2^2 - 3 = 6$.

²⁷ Tous les moments centrés de la distribution de Weibull étant nuls lorsque $k \rightarrow \infty$, le kurtosis non normalisé μ_4/μ_2^2 est un quotient indéterminé de la forme 0/0. Cette indétermination peut être levée par application de la règle de l'Hospital itérée jusqu'à l'obtention d'un quotient déterminé. En utilisant la formule de Leibnitz pour le calcul de la dérivée n -ième d'un produit de deux fonctions (voir la note de bas de page 25), on obtient en effet : $D^i \mu_2(0)^2 = 0$, $i = 0, \dots, 3$, $D^4 \mu_2(0)^2 = (2/3) \pi^4$ et $D^i \mu_4(0) = 0$, $i = 0, \dots, 3$, $D^4 \mu_4(0) = 3.6 \pi^4$.

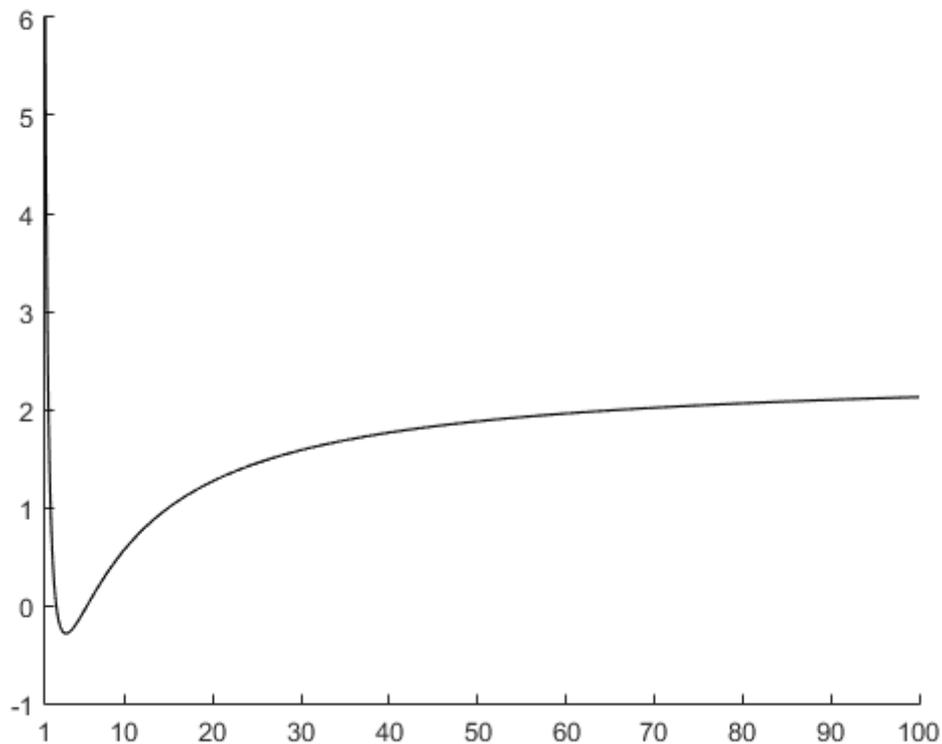


Figure 37: Graphe du coefficient d'aplatissement (kurtosis) de la distribution de Weibull standardisée ($c=1$) en fonction du paramètre $k \geq 1$.

La valeur du paramètre d'échelle c ne modifie pas le profil de la fonction de densité de la distribution de Weibull, ce profil étant déterminé uniquement par la valeur du paramètre de forme k . Tout accroissement du paramètre d'échelle a pour effet d'étaler la masse de probabilité de la distribution de Weibull vers la droite, en augmentant dans la même proportion la moyenne, la médiane, le mode et l'écart-type de la distribution. Inversement, toute diminution de la valeur de ce paramètre a pour effet de concentrer la masse de probabilité de la distribution vers la gauche, jusqu'à la concentration de cette masse de probabilité en $v = 0$ lorsque $c \rightarrow \infty$. Les Figure 38, Figure 39 et Figure 40 illustrent ce phénomène de concentration, lorsque $c \rightarrow 0$, et d'étalement, lorsque $c \rightarrow \infty$, pour les trois types de profils différents de la fonction de densité de Weibull, à savoir : le profil en J inversé avec une asymptote verticale à l'origine ($0 < k < 1$), le profil exponentiel négatif ($k = 1$), et le profil en forme de cloche ($k > 1$).

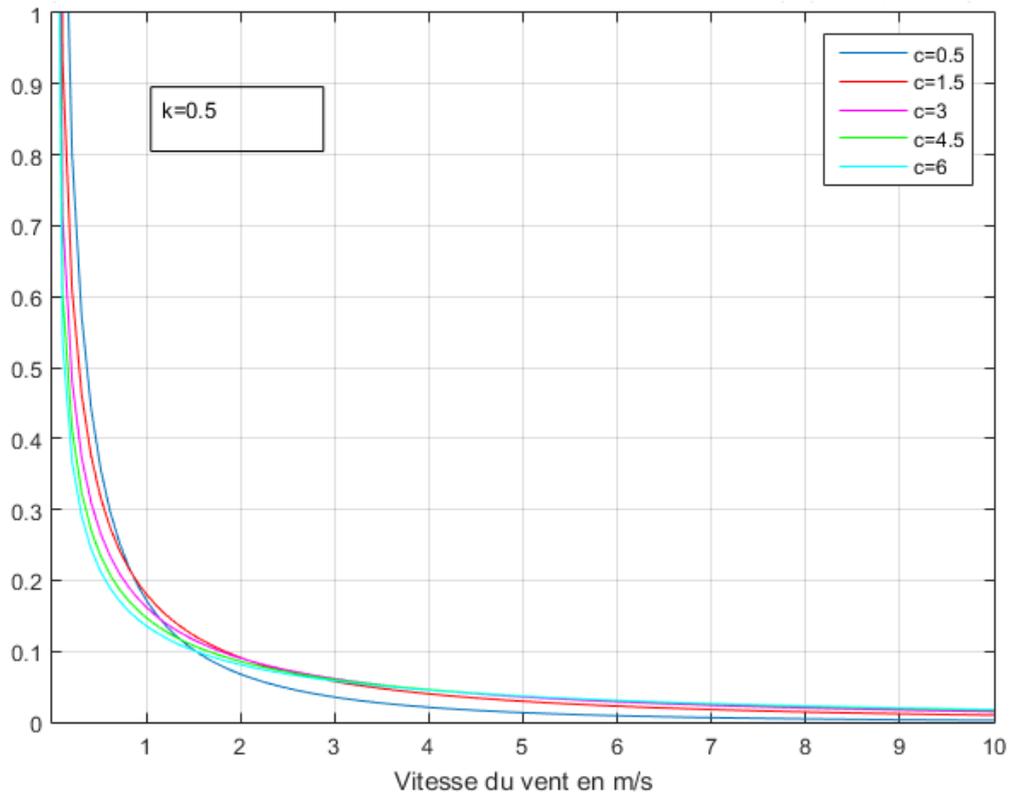


Figure 38: Profils de la fonction de densité de Weibull pour $k=0.5$ en fonction de la valeur du paramètre c .

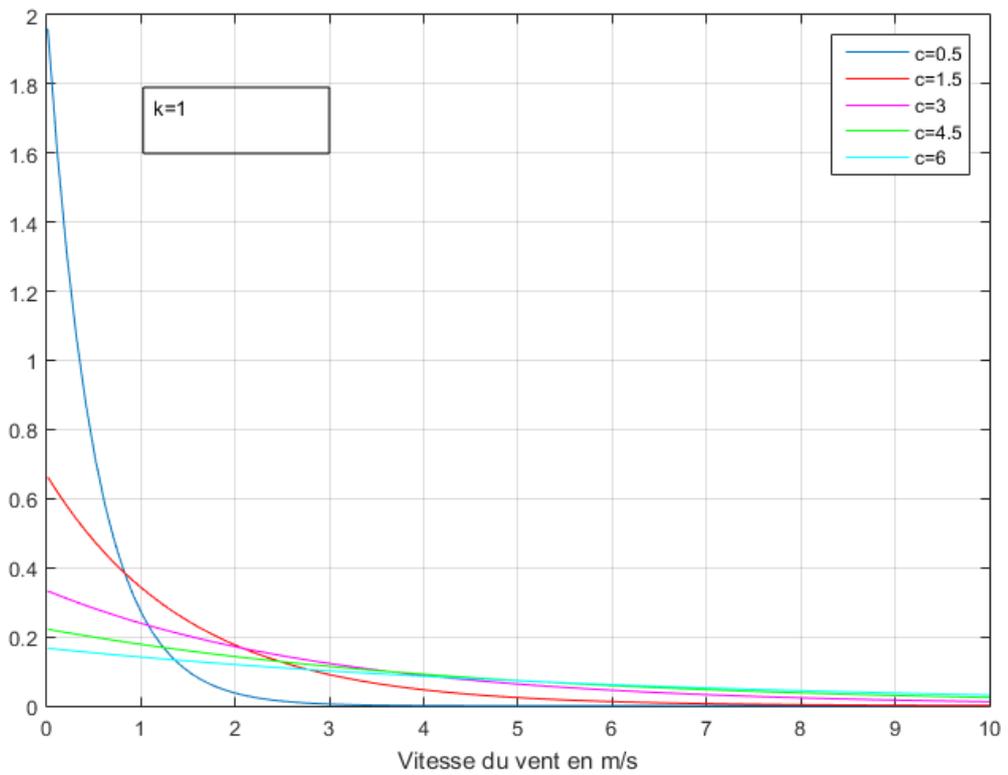


Figure 39: Profils de la fonction de densité de Weibull pour $k=1$ en fonction de la valeur du paramètre c .

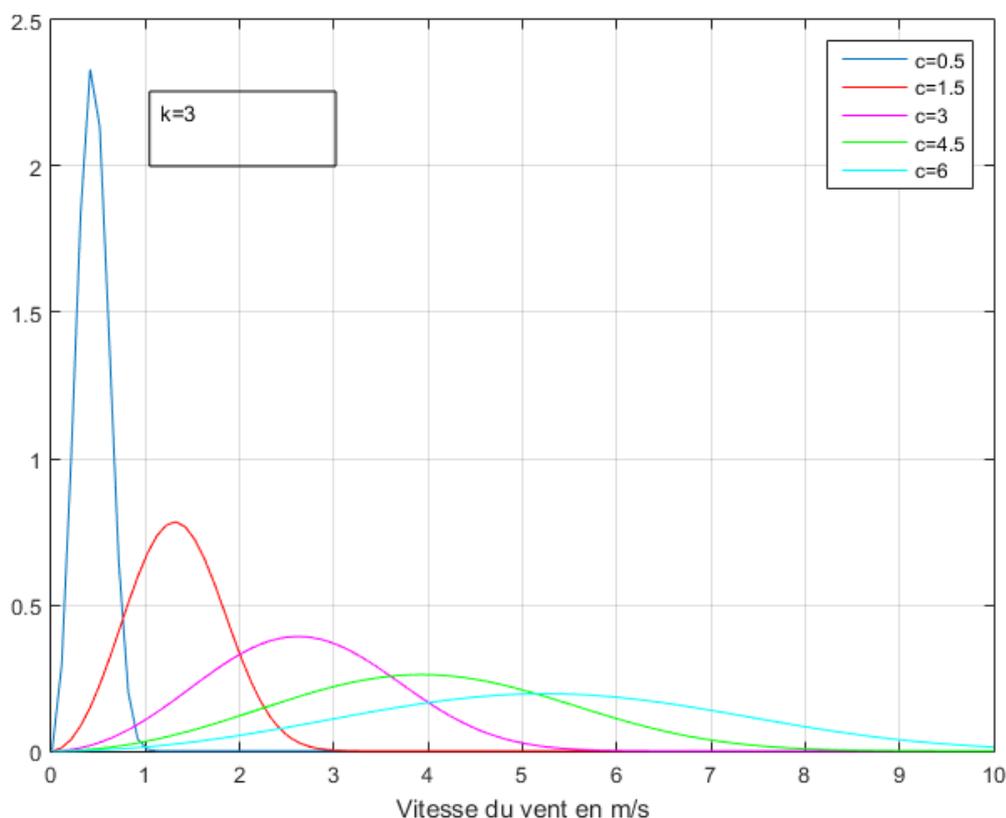


Figure 40: Profils de la fonction de densité de Weibull pour $k=3$ en fonction de la valeur du paramètre c .

Pour la gamme du paramètre de forme observable pour les régimes de vent rencontrés à La Réunion, soit des valeurs de $k > 1$, des valeurs croissantes du paramètre d'échelle reflètent donc des gisements éoliens plus riches, parce que dotés de vitesses de vent plus importantes et dont la variance est élevée. A paramètre d'échelle croissant, le choix de l'éolienne à installer se portera donc sur des technologies plus puissantes fonctionnant sur une gamme de vitesse plus large et pour des vitesses moyennes plus élevées.

A paramètre d'échelle constant et à paramètre de forme croissant, le mode et la médiane sont croissants. La moyenne décroît dans un premier temps puis augmente à partir de valeurs du paramètre d'échelle supérieures à 2.16. La variance diminue rapidement avec le paramètre de forme croissant comme l'illustre la Figure 33. A paramètre d'échelle croissant et au-delà de 2.16, la distribution du vent reflète la présence de vents en moyenne plus forts et davantage concentrée autour d'une valeur unique, celle du paramètre d'échelle c . En effet, avec le paramètre de forme croissant, la moyenne, le mode et la médiane tendent vers le paramètre d'échelle. Présentant un profil asymétrique à droite dans un premier temps, la queue de la distribution s'estompe avec le paramètre de forme croissant et la distribution devient symétrique lorsque le facteur de forme est égal à 3.6 comme l'illustre la Figure 33. La distribution présente une queue à gauche au delà de cette valeur du paramètre de forme. Un paramètre de forme croissant décrit alors la présence d'un gisement dont la concentration de vents forts est plus élevée que celle des vents faibles, sur une échelle déterminée par le paramètre c . D'une manière générale, pour de faibles valeurs du paramètre de forme, on observera un gisement dont les vitesses de vent sont davantage concentrées autour de faibles vitesses du vent. A paramètre d'échelle constant, le choix de l'éolienne à installer se portera donc vers des technologies dont la vitesse de démarrage sera plus faible.

Tableau 11: Caractéristiques de la densité de Weibull en fonction du paramètre de forme k.

Paramètre de forme	$0 < k < 1$	$k = 1$	$k > 1$
Profil	Profil en J inversé avec asymptote verticale à l'origine	Profil exponentiel négatif	Profil en forme de cloche
Variation par rapport à v	$\infty \downarrow 0$	$\frac{1}{c} \downarrow 0$	$0 \uparrow MAX \downarrow 0MAX$ $= c \left(\frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{k}}$
Mode	0	0	$0 \uparrow c$
Moyenne	$\infty \downarrow c$	c	$c \downarrow MIN \uparrow c$ $MIN \approx 2.16$
Médiane	$0 \uparrow c \ln 2$	$c \ln 2$	$c \ln 2 \uparrow c$
Variance	$\infty \downarrow c^2$	c^2	$c^2 \downarrow 0$
Asymétrie	Asymétrique à droite	Asymétrique à droite	Symétrique dans le voisinage de 3.6 Asymétrique: à droite pour $k < 3.6$ à gauche pour $k > 3.6$
Aplatissement	Leptokurtique	Leptokurtique	Platikurtique entre 2.3 et 5.8 Leptokurtique à l'extérieur de ces bornes

La distribution de Weibull s'est imposée comme un modèle référence pour représenter analytiquement la distribution marginale de la vitesse horizontale du vent. Il n'en demeure pas moins que le choix du modèle demeure à la discrétion du modélisateur. D'autres modèles se sont avérés être plus performants dans certains cas, notamment : la distribution gamma (Carta et al., 2009; Morgan et al., 2011; Ouarda et al., 2015); la distribution normale (Morgan et al., 2011; Ouarda et al., 2015)); la distribution log-normale (Carta et al., 2009; Garcia et al., 1998; Morgan et al., 2011; Ouarda et al., 2015); la distribution de Weibull à trois paramètres (Morgan et al., 2011; Ouarda et al., 2015); la distribution log-normale à trois paramètres (Morgan et al., 2011; Ouarda et al., 2015), la distribution gamma généralisée (Carta et al., 2009; Morgan et al., 2011); la distribution kappa (Morgan et al., 2011; Ouarda et al., 2015); la distribution de Wakeby (Morgan et al., 2011); la distribution de Pearson de type III (Morgan et al., 2011); la distribution de Pearson de type III logarithmique (Morgan et al., 2011; Ouarda

et al., 2015).

En particulier, la distribution de Weibull étant unimodale, elle n'est pas appropriée pour représenter la distribution de la vitesse du vent résultant du cumul de plusieurs régimes de vent distincts. L'histogramme de la vitesse du vent à la station météorologique de Pierrefonds présenté dans la Figure 16 est un exemple de régimes de vent multimodaux. En procédant à l'estimation par la méthode du maximum de vraisemblance d'une fonction de densité de Weibull à deux paramètres sur la base des données de cet histogramme, on obtient la fonction de densité présentée dans la Figure 41. On constate que l'adéquation de ce modèle analytique à l'histogramme de la distribution empirique de la vitesse du vent à Pierrefonds est insatisfaisante car elle laisse apparaître des écarts importants entre les fréquences observées de l'histogramme et les fréquences correspondantes que l'on peut déduire de la distribution de Weibull estimée.

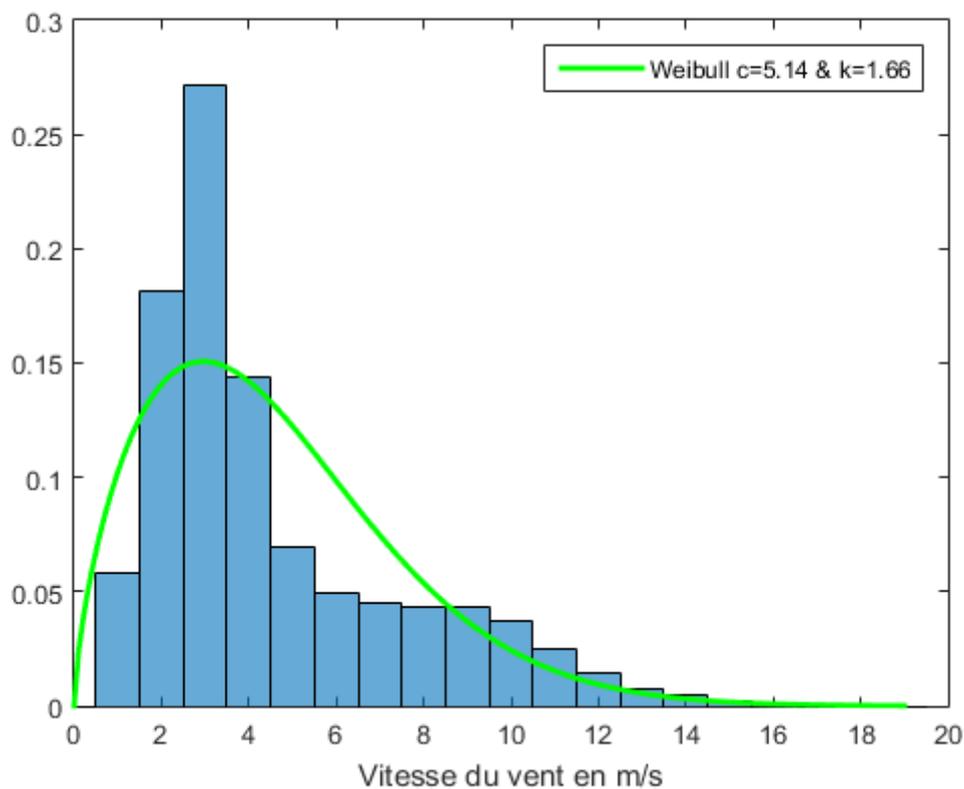


Figure 41: Fonction de densité de Weibull à deux paramètres ajustée à la distribution empirique marginale de la vitesse du vent observée à la station météorologique de Pierrefonds en 2010.

A contrario, l'estimation d'une densité de Weibull à deux paramètres par la méthode du maximum de vraisemblance pour chaque distribution de la vitesse du vent conditionnelle à l'une des 12 classes de direction du vent 30° du Tableau 3, fait apparaître une excellente adéquation du modèle de Weibull aux données empiriques (voir la Figure 42).

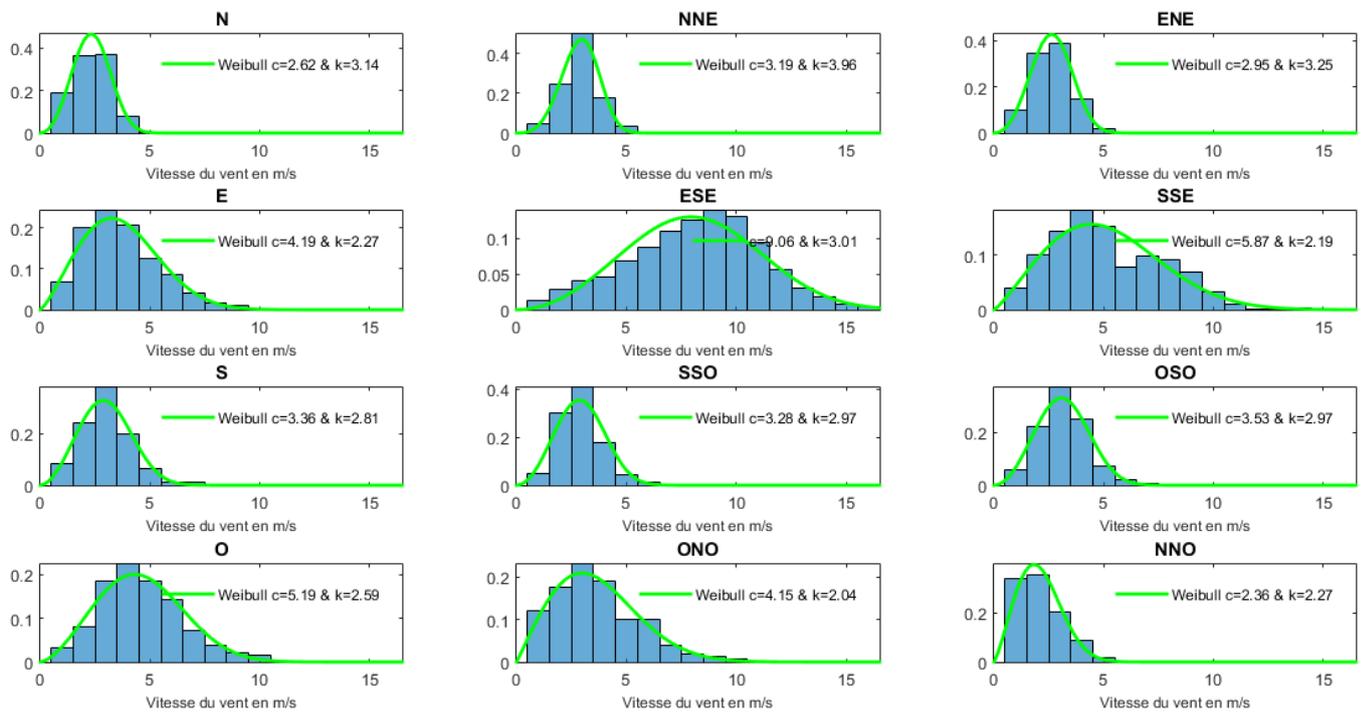


Figure 42: Fonctions de densité de Weibull à deux paramètres ajustées aux distributions empiriques de la vitesse du vent conditionnelles aux 12 classes de directions du vent 30° observées à la station météorologique de Pierrefonds en 2010.

En désignant par $f_p(v; \hat{c}_p, \hat{k}_p), p = 1, \dots, 12$ les fonctions de densité de Weibull à deux paramètres (c_p et k_p) conditionnelles aux classes de direction du vent ainsi estimées, on peut déduire une estimation de la distribution marginale de la vitesse du vent en utilisant la formule suivante introduite à la fin de la section 3.1 :

$$f(v) = \sum_{p=1}^{12} f_{*p} f_p(v; \hat{c}_p, \hat{k}_p) \quad (30)$$

La Figure 43 permet d'évaluer la qualité de l'adéquation de ce mélange de distributions conditionnelles de Weibull aux données de la distribution empirique marginale de la vitesse du vent à Pierrefonds en 2010. Cette adéquation est bien meilleure que celle du modèle de Weibull à deux paramètres présenté dans la Figure 41.

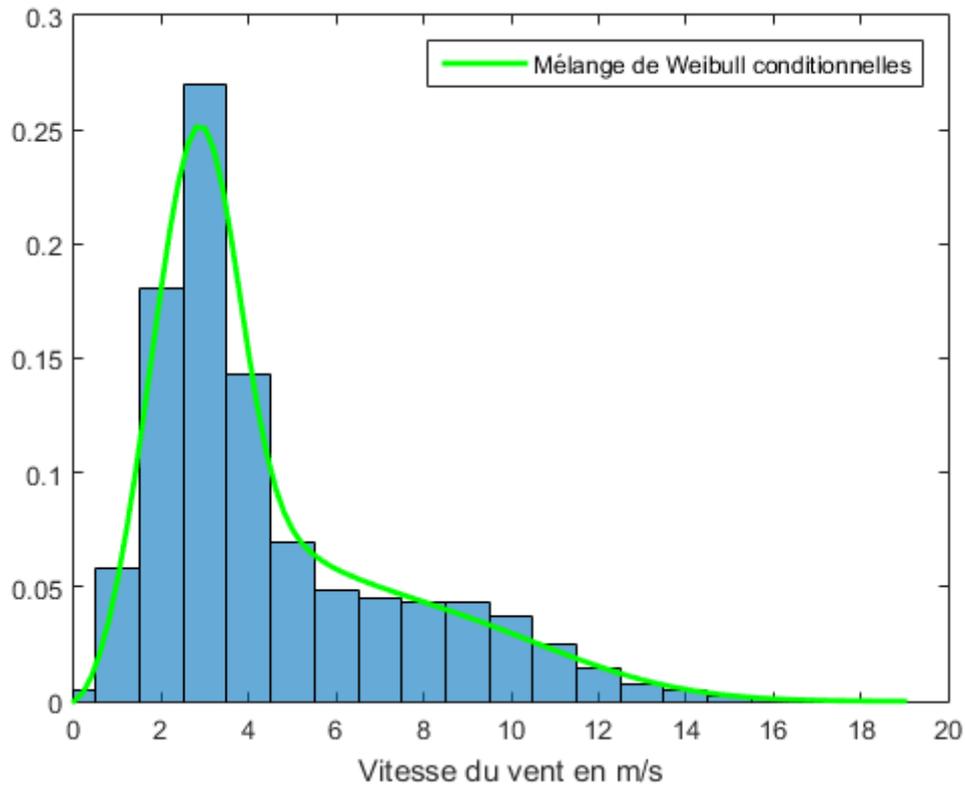


Figure 43: Mélange de distributions de Weibull à deux paramètres ajustées aux distributions empiriques de la vitesse du vent conditionnelles aux 12 classes de direction du vent 30° observées à la station météorologique de Pierrefonds en 2010.

Les mélanges de distributions de Weibull à deux paramètres ont été récemment utilisés dans la littérature pour spécifier des modèles analytiques de la vitesse du vent résultant de multiples régimes de vent qui ajustent avec précision les données empiriques (Aitchison, 1955; Akpinar and Akpinar, 2009; Carta et al., 2009; J.A. Carta and Ramírez, 2007; José Antonio Carta and Ramírez, 2007; Jaramillo and Borja, 2004; Morgan et al., 2011; Ouarda et al., 2015; Qin et al., 2012). D'autres modèles flexibles ont également été utilisés, notamment les mélanges de distributions gamma (Ouarda et al., 2015) et celles de distributions normales tronquées (Akpinar and Akpinar, 2009; José Antonio Carta and Ramírez, 2007).

2.4 Profil vertical de la vitesse du vent à l'Île de La Réunion

L'altitude à laquelle la mesure des caractéristiques du vent est réalisée ne correspond pas nécessairement avec la hauteur des éoliennes. Dans la plupart des cas, comme l'illustre le Tableau 2, les caractéristiques du vent ne sont pas mesurées à la hauteur des turbines que l'on peut installer à La Réunion, comprise entre 60 et 70 mètres selon les technologies. Il est donc nécessaire de modéliser la manière dont la vitesse du vent évolue verticalement avec l'altitude.

2.4.1 Eléments de météorologie

Les phénomènes atmosphériques en jeu correspondent aux mouvements d'air qui s'opèrent dans la couche limite atmosphérique²⁸ illustrée par la Figure 44 et dont l'épaisseur, assez variable suivant la nature de la surface sous-jacente, est de l'ordre de 1'500 mètres au dessus du sol. L'étude théorique de cette tranche d'atmosphère l'envisage comme la superposition de deux couches dont les épaisseurs sont très inégales.

Dans la couche supérieure, appelée couche d'Ekman ou couche limite dynamique, le vent est causé par un équilibre entre les forces de pression, la force de Coriolis, due à la rotation quotidienne de la terre autour de son axe, ainsi qu'aux effets de surface diminuant graduellement jusqu'à l'atmosphère libre. Les forces de pression, à l'origine du déplacement des masses d'air, sont dirigées des zones de haute pression vers les zones de basse pression. Elles sont engendrées par l'ensoleillement inégal suivant la latitude, la nature du sol et la répartition des océans et des continents. Les différences d'ensoleillement entre l'équateur thermique et la zone subtropicale située entre 23.5° et 40° de latitude Sud engendrent à l'Île de La Réunion le régime de vent des alizés selon le principe de la cellule de Hadley illustré par la Figure 19. Générée par la rotation de la Terre autour de son axe, la force de Coriolis donne sa direction est sud-est aux alizés. Elle s'exerce perpendiculairement à la direction du vent vers la gauche dans le sens du déplacement dans l'hémisphère nord et vers la droite dans le sens du déplacement dans l'hémisphère sud, comme illustré par la Figure 20. Les différences de pression entre les surfaces continentales réunionnaises et les surfaces océaniques engendrent elles aussi des mouvements d'air correspondant au cycle des brises thermiques qui suit le cycle diurne de l'ensoleillement, comme illustré par la Figure 25 et à la Figure 26. Au sommet de la couche d'Ekman, où les masses d'air sont uniquement soumises aux forces de pression et à la force de Coriolis, le mouvement du vent est approximativement celui dans l'atmosphère libre, appelé vent géostrophique, à savoir un vent de direction horizontale et de vitesse constante.

²⁸ En météorologie, on appelle couche limite atmosphérique ou planétaire la zone de l'atmosphère entre la surface terrestre, où les effets de surface modifient l'écoulement, et l'atmosphère libre, où les effets de surface deviennent négligeables.

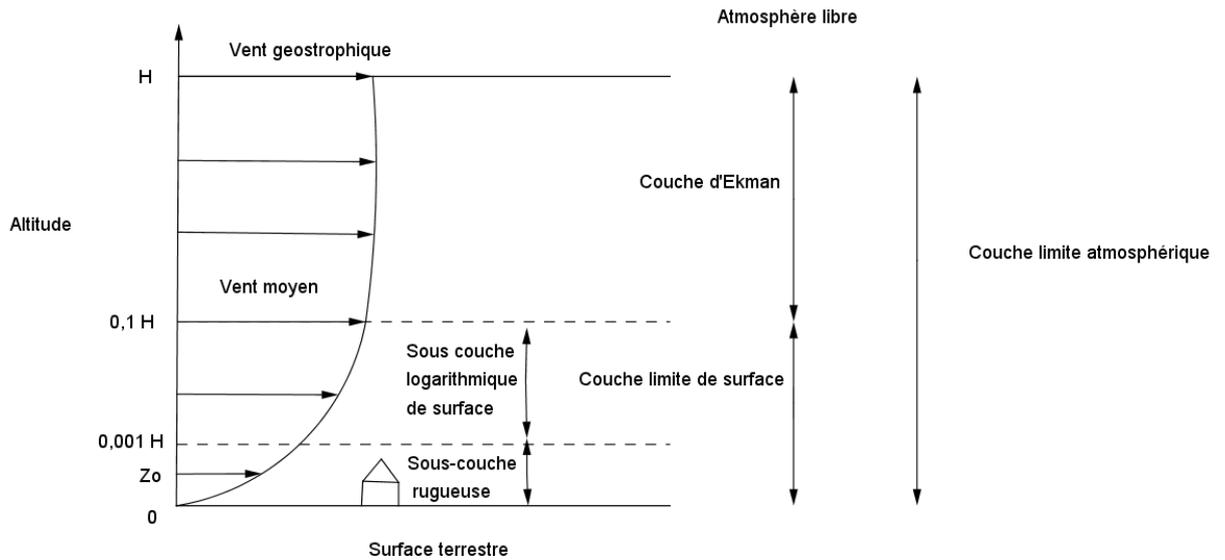


Figure 44: Sous-couches de la couche limite de l'atmosphère.

La couche inférieure, appelée couche de surface ou couche limite de surface, est située au voisinage immédiat du sol et ne dépasse pas le dixième de l'ensemble de la couche limite atmosphérique, comme l'illustre la Figure 44. Dans cette zone d'altitudes, les forces de frottement dues à la présence du sol et d'obstacles perturbent l'écoulement de l'air. Au sein de la couche limite de surface, le mouvement des masses d'air est turbulent et directement lié à la rugosité du sol. Dans cette couche atmosphérique inférieure on distingue aussi deux sous-couches. Une sous-couche rugueuse, d'épaisseur infime au-dessus de l'océan, mais pouvant atteindre plusieurs mètres en présence d'obstacles au sol, notamment dans les zones urbaines, caractérisée par une forte turbulence, tant dynamique que thermique. Une sous-couche de plus grande épaisseur, qui peut atteindre plusieurs dizaines de mètres, dans laquelle la turbulence dynamique et thermique devient négligeable. On l'appelle aussi sous-couche logarithmique de surface car le profil vertical du vent en fonction de la hauteur à partir de la surface peut être modélisé par une loi logarithmique, comme nous allons le voir par la suite.

2.4.2 Loi logarithmique

Les travaux préliminaires H. Tennekes (1973) sur la loi logarithmique ont permis d'établir la formule d'extrapolation suivante de la vitesse du vent entre deux altitudes z_1 et z_2 :

$$v(z_2) = v(z_1) \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right) - \Psi\left(\frac{z_2}{L}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right) - \Psi\left(\frac{z_1}{L}\right)} \quad [\text{m/s}] \quad (31)$$

où Ψ est la fonction universelle de la hauteur relative z par rapport à l'échelle de turbulence L , z_0 correspond au paramètre de rugosité. Dans des conditions atmosphériques neutres, on a $\Psi(0) = 0$ et l'expression se simplifie dans la formule d'extrapolation proposée par Wieringa (1993) pour représenter le profil vertical du vent en conditions atmosphériques neutres :

$$v(z_2) = v(z_1) \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} \quad [\text{m/s}] \quad (32)$$

Les valeurs du coefficient d'extrapolation z_0 utilisées pour l'application de cette loi logarithmique en conditions atmosphériques neutres au sein de cette thèse sont tirées de Manwell (2009) et sont présentées dans le Tableau 12.

Tableau 12: Coefficients d'extrapolation z_0 pour divers types de terrains. Source: Manwell (2009).

Type de terrain	Paramètre z_0
Eau : Océans, Mers, Lacs	0.00001 – 0.0005
Terrains avec surfaces nues : Béton, pistes d'atterrissage, gazon tondu, etc..	0.003
Terrains agricoles découverts, herbes courtes	0.008
Herbes hautes	0.01
Terrain en jachère	0.03
Cultures	0.05
Quelques arbres	0.1
Arbres nombreux, quelques bâtiments	0.25
Forêts	0.5
Zones urbaines périphériques	1.5
Centres urbains et hauts bâtiments	3

Les profils verticaux du vent décrits par la loi logarithmique pour les valeurs du paramètre de rugosité correspondant à quatre types de terrains du Tableau 12 (herbes courtes ; cultures hautes ; nombreux arbres ; zones urbaines) sont présentés dans la Figure 45. En ordonnée figure la hauteur d'extrapolation verticale relative à la hauteur de mesure $z_1 = 10$ m et en abscisse la vitesse du vent relative à la vitesse du vent à la hauteur de mesure $z_1 = 10$ m.

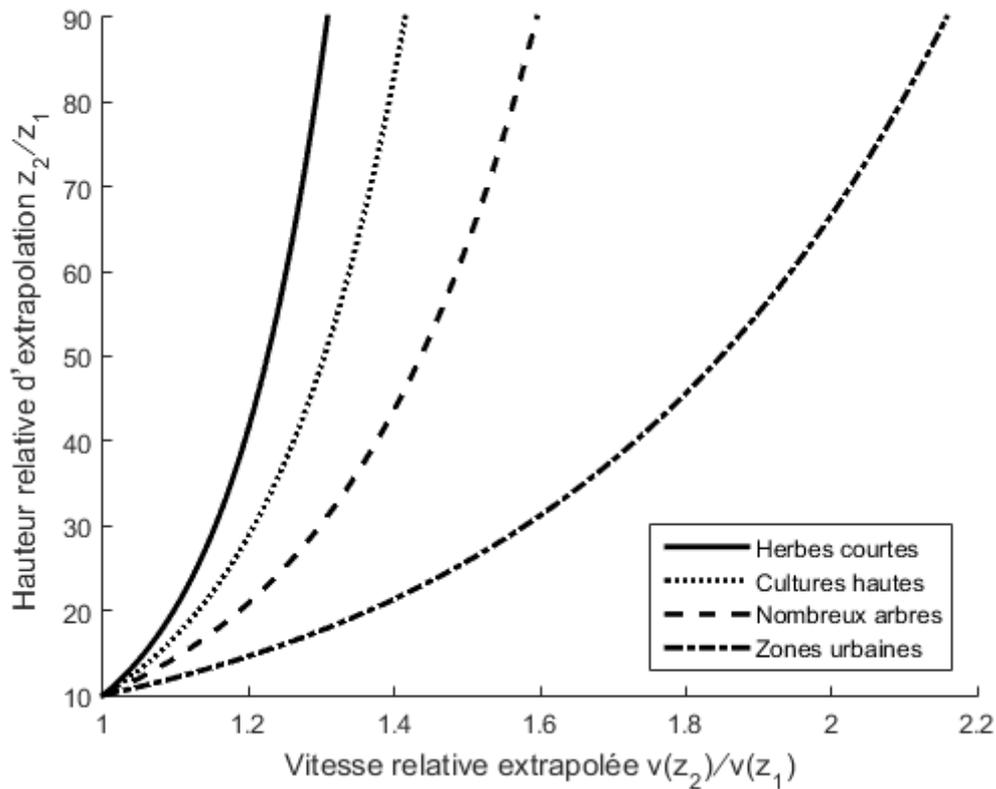


Figure 45: Profils de la loi logarithmique.

2.4.3 Loi de puissance

Dans sa formulation générale (31), la loi logarithmique d'extrapolation verticale de la vitesse du vent peut être approximée par une loi de puissance d'utilisation plus simple, qui s'écrit :

$$v(z_2) = v(z_1) \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad [\text{m/s}] \quad (33)$$

où l'exposant α de cette loi est défini par la relation suivante :

$$\alpha = \frac{\varphi \left(\frac{z_g}{L} \right)}{\ln \left(\frac{z_g}{z_o} \right) - \Psi \left(\frac{z_g}{L} \right)} \quad [\text{sans dimension}] \quad (34)$$

avec z_g la moyenne géométrique simple de z_1 et z_2 , soit $\sqrt{z_1 z_2}$, φ et Ψ les fonctions universelles de la hauteur relative z/L de la théorie de la similitude de Monin-Obukov, z_o le paramètre de rugosité du Tableau 12.

Une approximation de cette loi valable pour des conditions de turbulence atmosphérique neutres consiste à prendre une valeur de $\alpha = 1/7$. Cette approximation de la loi de puissance est appelée loi 1/7. La validité de la loi 1/7 implique néanmoins un effet de rugosité négligeable. En d'autres termes, l'effet d'atténuation de la force du vent dans les basses couches de l'atmosphère dû aux obstacles présents au sol doit être marginal, ceci n'étant vrai que lorsque la hauteur de l'obstacle est très faible par rapport à l'altitude d'extrapolation. Les

limites de la loi de puissance 1/7 pour estimer des moyennes de vitesses de vent à une altitude d'intérêt ont été mises en évidence par de nombreuses études empiriques. Ainsi, les études de Farrugia (2003), Rehman et Al-Abbadi (2005), Firtin et al. (2011) ont mis en évidence des valeurs moyennes de α pour les sites étudiés bien supérieures à 1/7. De multiples études empiriques ont permis d'établir la valeur de α pour une typologie de rugosité des terrains analogue à celle du Tableau 12. Les valeurs du paramètre α utilisées dans cette thèse sont tirées de Bechrakis et al. (2000) et sont présentées dans le Tableau 13.

Tableau 13: Coefficients d'extrapolation α pour divers types de terrains. Source: Bechrakis et al. (2000).

Type de terrain	Paramètre α
Eau : Océans, Mers, Lacs	0.1
Terrains découverts avec surfaces nues : Béton, pistes d'atterrissage, gazon tondu, etc..	
Terrains agricoles découverts, herbes courtes	0.14
Herbes hautes, arbre occasionnel	0.16
Cultures hautes et quelques arbres	0.20
Nombreux arbres et bâtiments occasionnels	0.22 – 0.24
Forêt, Villages et Zones urbaines périphériques	0.28 – 0.30
Zones urbaines et hauts bâtiments	0.4

Les profils verticaux du vent décrits par la loi de puissance pour les valeurs du paramètre α correspondant à quatre types de terrains du Tableau 13 (Herbes courtes; Cultures hautes; Nombreux arbres; Zones urbaines) sont présentés dans la Figure 46. En ordonnée figure la hauteur d'extrapolation verticale relative à la hauteur de mesure $z_1 = 10$ m et en abscisse la vitesse du vent relative à la vitesse du vent à la hauteur de mesure $z_1 = 10$ m.

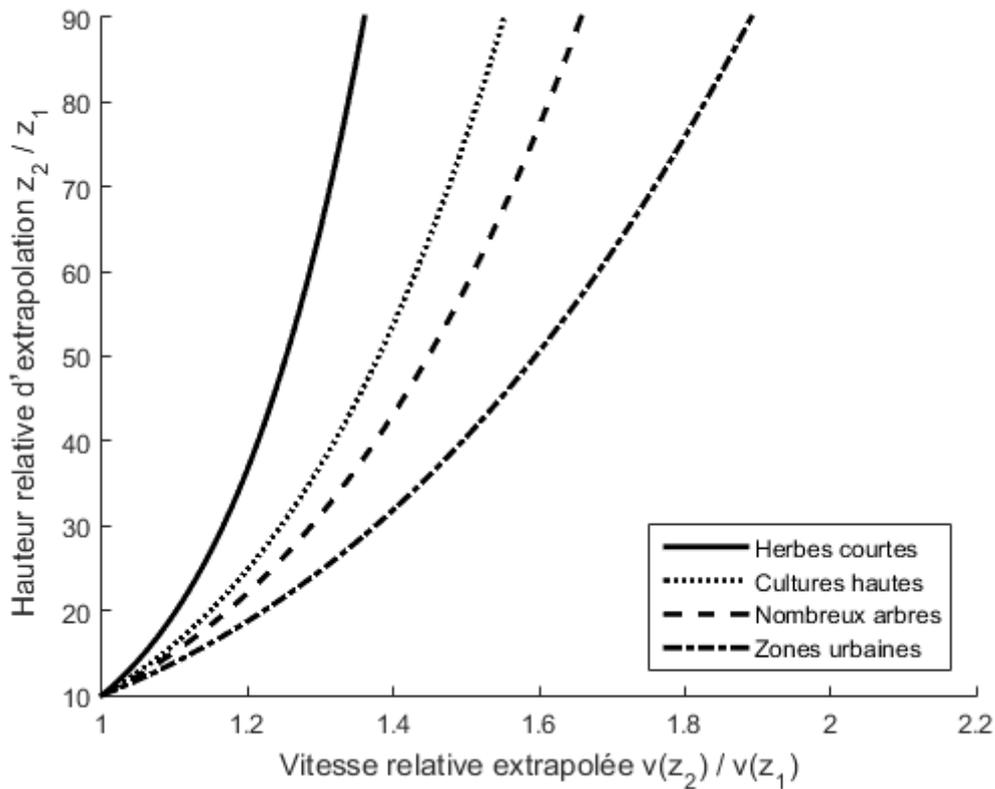


Figure 46: Profils de la loi de puissance.

2.4.4 Limitations

Certaines limitations portent néanmoins sur l'usage de la loi de puissance ou de la loi logarithmique. Le profil de vent varie fortement au cours de l'année et de la journée en fonction des conditions atmosphériques.

Les phénomènes atmosphériques engendrent en effet alternativement des périodes où les gradients de vitesses de vents sont importants entre les couches de différentes altitudes (période nocturne et hivernale) et inversement des périodes où ces gradients sont faibles (période de plus fortes températures notamment l'été). Durant les périodes de faibles températures, qui correspondent à une atmosphère stable, se forment des couches d'air stables à l'origine des turbulences que rencontrent les pales des éoliennes qui les traversent. Exposées à des vitesses différentes avec l'élévation, elles sont soumises à un stress qui peut en causer l'usure prématurée. A contrario, durant les heures chaudes de la journée, la chaleur absorbée par le sol provoque un réchauffement de l'air au-dessus de ce dernier et des courants d'air ascendants. Le brassage de l'air, correspondant à des conditions atmosphériques instables, est associé à une augmentation faible de la vitesse du vent avec l'altitude. Utiliser un coefficient moyen pour estimer la production durant les heures chaudes ou durant l'été, par exemple, au moment où les besoins en climatisation sont les plus élevés sur l'île peut aboutir, à une surestimation de la production éolienne estimée à l'altitude du rotor. Le brassage de l'air introduit par les conditions atmosphériques instables correspond à des périodes où les coefficients d'extrapolation sont plus faibles.

De nombreux travaux se sont attachés à démontrer la variabilité saisonnière et diurne des coefficients d'extrapolation. Farrugia (2003) a calculé les coefficients d'extrapolation sur un site proche de la côte sur l'île de Malte sur une base mensuelle et horaire à partir des mesures de vitesses de vent prises à deux altitudes différentes, respectivement 10 et 25m. Farrugia

(2003) observe une diminution du coefficient durant les mois chauds associés à des conditions atmosphériques dominantes instables. Le lien entre la valeur du coefficient d'extrapolation verticale et la température est corroboré par l'étude de la variabilité diurne du coefficient. Aux plus fortes températures de la journée soit entre 08h00 et 16h00, le coefficient α prend ses valeurs les plus faibles. Le phénomène est dû aux conditions atmosphériques instables qui apparaissent aux heures les plus chaudes quand la chaleur absorbée par le sol provoque un réchauffement de l'air et des courants d'air ascendants. Ce phénomène est particulièrement présent sur l'Île de La Réunion comme en témoigne l'importance des brises thermiques sur les stations de mesures situées proche du littoral. Rehman et al. (2005) confirme les résultats obtenus par Farrugia (2003) en calculant les valeurs des coefficients d'interpolation verticale pour le site d'Arar en Arabie Saoudite à partir de mesures réalisées à trois altitudes au-dessus du niveau du sol, respectivement 20, 30 et 40 m. Les résultats confirment l'hypothèse de Farrugia selon laquelle durant les mois chauds, les conditions atmosphériques instables conduisent à des valeurs du coefficient α plus faibles que durant les mois d'hiver. Les valeurs du coefficient α présentent également une importante variabilité diurne et sont minimales pour les heures les plus chaudes entre 09h00 et 18h00. Firtin et al. (2011), étudie à partir de mesures effectuées sur un site de la région du Balikesir en Turquie à trois altitudes au-dessus du niveau du sol, respectivement 10, 30 et 50 m, la variabilité de la valeur du coefficient α en fonction de la température et de la pression atmosphérique. Les conclusions des études précédemment citées sont confirmées et les coefficients α apparaissent à la fois plus faibles durant les mois les plus chauds de l'année et les heures les plus chaudes de la journée. A nouveau la variabilité diurne est expliquée par le cycle de réchauffement et refroidissement du sol et la stabilité des conditions atmosphériques.

Smith et al. (2002) ont étudié la variabilité des coefficients d'extrapolation calculés entre deux paires d'altitudes pour un même site respectivement 10 et 40 m et 40 et 80 m. Le coefficient moyen est bien identique et caractérise le site. Néanmoins, les distributions des coefficients, calculés sur la base d'un pas de 10 minutes, diffèrent fortement. La distribution des coefficients calculés entre les paires d'altitude élevées (40 et 80 m) est bien plus étalée, reflétant des valeurs davantage dispersées autour de la moyenne. Les cycles diurnes précédemment évoqués sont davantage prononcés lorsque le profil diurnal des moyennes horaires des coefficients α est établi. Ces phénomènes de variation diurnale et saisonnière des coefficients d'extrapolation sont donc de plus en plus présents avec l'altitude croissante.

Deux autres limitations ont été mises en évidence par Firtin et al. (2011) et Farrugia (2003). La topographie environnante impacte le profil vertical des vitesses du vent comme l'a illustré Firtin et al. (2011) en procédant à une étude directionnelle des coefficients d'extrapolation dans un environnement complexe. De même, la variabilité saisonnière de la rugosité des arbres ou des champs de culture selon les périodes de récolte, de coupe ou de la perte des feuillages modifie le profil vertical de la vitesse du vent comme l'a mis en évidence Farrugia (2003). Ce phénomène peut être particulièrement important sur l'île de La Réunion où les périodes de pousse et de coupe de la canne à sucre peuvent introduire une variabilité saisonnière importante des coefficients d'extrapolation.

2.4.5 Extrapolation verticale du paramètre d'échelle de la distribution de Weibull

Les lois d'extrapolation verticale de la vitesse du vent présentées dans la section 2.4.3 seront utilisées dans cette thèse pour extrapoler à la hauteur du mât des éoliennes à installer les paramètres de la distribution de Weibull estimés avec les données de vitesse du vent enregistrées au niveau des stations météorologiques.

Pour ce faire, on postule que seul le paramètre d'échelle de la distribution de Weibull, noté $c(z)$, varie en fonction de l'altitude z à laquelle la vitesse du vent est mesurée, alors que le paramètre de forme de la distribution, noté k , est indépendant de z . De ce postulat il découle que la valeur moyenne de la vitesse du vent de la distribution de Weibull varie en fonction de z selon la relation suivante :

$$m_1(z) = c(z) \Gamma(1 + k^{-1}) . \quad (35)$$

En supposant la valeur moyenne de la vitesse du vent mesurée à l'altitude z_1 , l'extrapolation verticale de cette mesure à l'altitude d'intérêt z_2 peut être réalisée en utilisant l'une ou l'autre des deux lois d'extrapolation présentées dans la section 1.4.3. En utilisant la loi logarithmique (32), respectivement la loi de puissance (33), on obtient :

$$m_1(z_2) = m_1(z_1) \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} \quad (36)$$

$$m_1(z_2) = m_1(z_1) \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^\alpha \quad (37)$$

Finalement, en substituant dans ces formules les moyennes $m_1(z_1)$ et $m_1(z_2)$ par leur expression analytique (35) de la distribution de Weibull, et après simplification du facteur $\Gamma(1 + k^{-1})$, on obtient la formule de l'extrapolation verticale du paramètre d'échelle $c(z_1)$ à l'altitude z_2 , Dérivée de la loi logarithmique, respectivement de la loi de puissance cette formule s'écrit :

$$c(z_2) = c(z_1) \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} \quad (38)$$

$$c(z_2) = c(z_1) \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^\alpha \quad (39)$$

2.4.6 Méthodologie de création des couches SIG des paramètres d'extrapolation

Les profils verticaux de la vitesse du vent sont fonction du type d'obstacle présent au sol, désigné par le terme de rugosité. La rugosité est exprimée au sein des lois d'extrapolation verticale envisagées par les paramètres α et z_0 . Afin de constituer des valeurs géolocalisées de

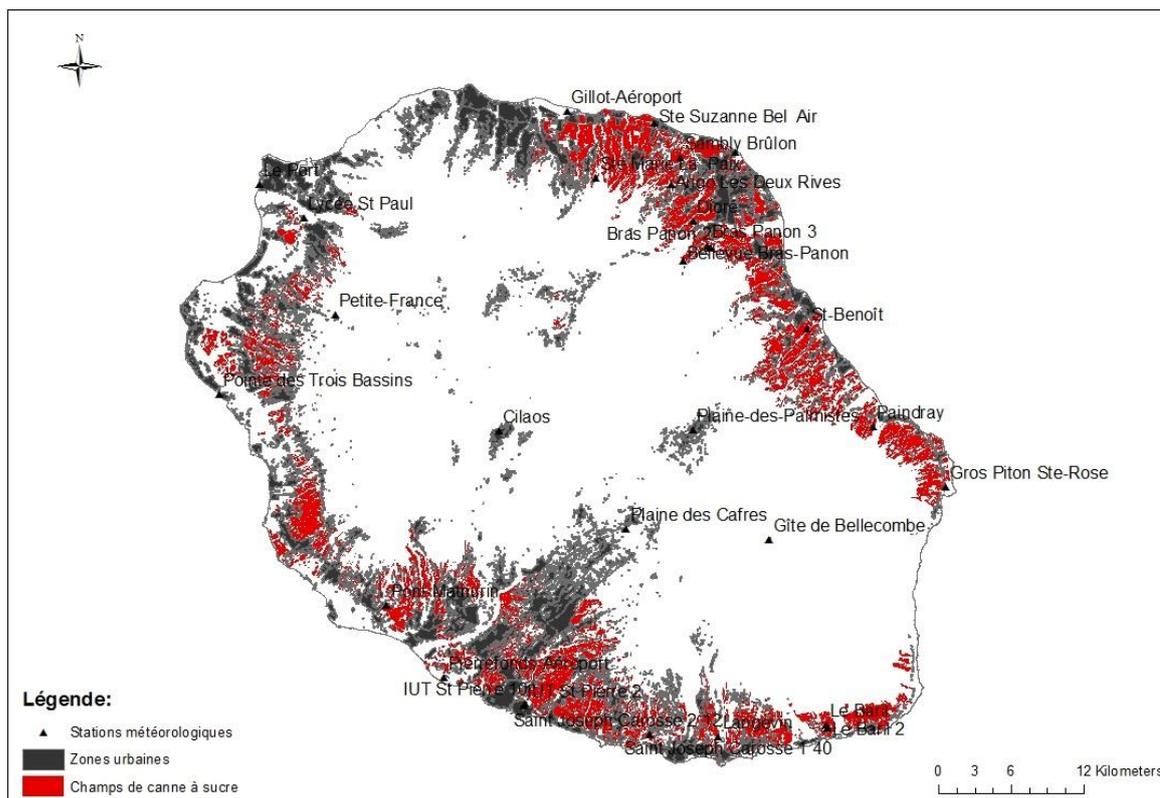
ces paramètres de rugosité pour l'île de La Réunion, différents types d'informations sur la rugosité de la surface du territoire de l'île ont été compilées. Ces informations géolocalisées ont été constituées sous la forme de grilles pixelisées (raster²⁹) par le biais du logiciel géographique ArcGis afin de synthétiser l'information sur la répartition spatiale des obstacles présents à la surface du territoire de La Réunion.

Une information sur la répartition géographique des zones urbaines a été fournie par la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL). La tâche urbaine de la DEAL renseigne la présence de bâtiments sur le territoire de l'île. Une information sur le type d'affectation des parcelles agricoles de La Réunion a été fournie par la direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DAAF). La Base d'Occupation des Sols (BOS) de la DAAF représente le type de culture (ananas, canne à sucre, légumes, etc.) affectée à chaque parcelle agricole de l'île. Enfin, une information sur la topographie (altimétrie) de La Réunion et l'altitude des obstacles présents au sol ont été fournies respectivement par le Modèle Numérique de Terrain (MNT) et le Modèle Numérique d'Élévation (MNE) de l'Institut Géographique National (IGN). Le raster décrivant la topographie de l'île est le fruit d'une fusion entre le MNTR_Coeur de l'île décrivant l'altimétrie du territoire à l'exception de la bande littorale et la Litto3D qui décrit la topographie de la zone littorale et permet de faire la liaison entre l'altimétrie et la bathymétrie³⁰. Le MNT ne prend pas en compte les objets présents à la surface du terrain tels que les plantes ou les bâtiments au contraire du MNE.

La description des obstacles présents au sol de La Réunion a été réalisée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, les valeurs du MNT ont été soustraites des valeurs du MNE afin d'isoler la hauteur des obstacles présents à la surface de La Réunion. Les valeurs incohérentes (supérieures à 30 m) ont été remplacées par la valeur la plus fréquente, égale à 0,5 m. Les valeurs obtenues ont été moyennées sur une surface carrée de 9 m² afin d'obtenir au sein d'un premier raster des surfaces de rugosité homogènes décrivant de manière adéquate l'environnement immédiat du pixel. L'information sur la rugosité a été croisée, lors de la création d'un second raster, avec l'information sur l'occupation des sols fournie par la tâche urbaine de la DEAL et la base de l'occupation du sol agricole 2012 de la DAAF. Le second raster a été créé afin d'évaluer dans quelle mesure l'information relative aux îlots urbains et à l'occupation des sols agricoles permet d'améliorer les résultats. La Figure 47 illustre les éléments de rugosité générés par l'habitat et l'infrastructure présente à l'île de La Réunion. Les champs de canne à sucre sont également présentés sur cette figure. Tous ces traitements d'information ont été réalisés à l'aide du logiciel géographique ArcGis.

²⁹ Terme anglais désignant une image matricielle représentant une grille rectangulaire de pixels, ou points en couleur.

³⁰ Science de la mesure des profondeurs et du relief de l'océan pour déterminer la topographie du sol de la mer.



Source: DEAL, DAAF

Figure 47: Rugosité: tâche urbaine et champs de canne à sucre à l'île de La Réunion.

Les couches géolocalisées d'information constituées sous la forme de grilles pixelisées (raster) fournissent une information sur la répartition spatiale des obstacles présents à la surface du territoire de La Réunion. L'information géolocalisée a été reliée aux résultats des études empiriques qui ont permis d'établir les valeurs des paramètres α et z_0 pour chaque typologie de terrains. Ces valeurs, tirées de Bechrakis et al. (2000) et Manwell (2009) sont présentées dans les Tableau 13 et Tableau 12. La constitution des couches géolocalisées de paramètres α et z_0 a été réalisée en plusieurs étapes. Dans une première étape, la rugosité identifiée par le biais de la soustraction du MNE du MNT a été quantifiée d'après les données empiriques de Bechrakis et al. (2000) et Manwell (2009) pour les plages d'altitude présentées dans les Tableau 14 et

Tableau 15. Les plages d'altitude des zones urbaines correspondent aux plages d'altitude des cases créoles présentes à La Réunion. La catégorie de zones urbaines et hauts bâtiments décrite dans la littérature ne correspond pas au type d'urbanisme présent à La Réunion et a donc été écarté pour privilégier une valeur unique du paramètre d'extrapolation verticale pour l'ensemble des zones urbaines identifiées sur le territoire de La Réunion. Sur cette base, deux couches géolocalisées de paramètres d'extrapolation verticale ont été élaborées pour décrire la répartition géographique du paramètre α et z_0 , respectivement. Elles sont associées à l'appellation raster 1.

Tableau 14: Plages d'altitudes pour les pour divers types de terrains et les coefficients d'extrapolation α . Source: Bechrakis et al. (2000).

Type de terrain	Paramètre α	Altitude z (en m)
-----------------	--------------------	-------------------

Chapitre 2- Méthodologie technico-économique d'évaluation du potentiel éolien d'un territoire

Eau : Océans, Mers, Lacs	0.1	<0.2
Terrains découverts avec surfaces nues : Béton, pistes d'atterrissage, gazon tondu, etc..		
Terrains agricoles découverts, herbes courtes	0.14	<0.35
Herbes hautes, arbre occasionnel	0.16	<0.60
Cultures hautes et quelques arbres	0.20	2
Nombreux arbres et bâtiments occasionnels	0.22 – 0.24	3.5
Forêt, Villages et Zones urbaines périphériques	0.28 – 0.30	>3.5
Zones urbaines et hauts bâtiments	0.4	Abs

Tableau 15: Plages d'altitudes pour les pour divers types de terrains et les coefficients d'extrapolation z_0 . Source: Manwell et al.(2003).

Type de terrain	Paramètre z_0	Altitude z (en m)
Eau : Océans, Mers, Lacs	0.00001 – 0.0005	Abs
Terrains avec surfaces nues : Béton, pistes d'atterrissage, gazon tondu, etc..	0.003	0.2
Terrains agricoles découverts, herbes courtes	0.008	0.35
Herbes hautes	0.01	0.60
Terrain en jachère	0.03	0.80
Cultures	0.05	1.25
Quelques arbres	0.1	2
Arbres nombreux, quelques bâtiments	0.25	3.5
Forêts	0.5	5.5
Zones urbaines périphériques	1.5	>5.5
Centres urbains et hauts bâtiments	3	Abs

Dans un second temps, l'information sur le type d'affectation (ananas, canne à sucre, pâturage, légumes...) des parcelles agricoles de La Réunion fournie la Base d'Occupation des Sols (BOS) de la DAAF a été appariée aux plages d'altitude des obstacles des Tableau 14 et

Tableau 15. La rugosité de chaque type de culture (ananas, canne à sucre, pâturage, légumes...) a ensuite été quantifiée, en termes de paramètres α et z_0 , d'après les données empiriques de Bechrakis et al. (2000) et Manwell (2009). Les résultats de cet appariement sont présentés dans le Tableau 16.

Tableau 16: Coefficients d'extrapolation α et z_0 pour chaque type de culture agricole à La Réunion.

Type de culture	Paramètre α	Paramètre z_0
Geranium, Prairie, Aromat, Fourrage , Fleur, Elevage, Ensilage, Curcuma	0.14 (Terrains agricoles découverts, herbes courtes)	0.008 (Terrains agricoles découverts, herbes courtes)
Légumes, Ananas, Piment, Gingembre, Vetiver, Vigne	0.16 (Herbes hautes, arbre occasionnel)	0.08 (Herbes hautes)
Verger , Fruit, Vanille, Palmiste, Maïs, Litchi, Coco, Mangue	0.20 (Cultures hautes et quelques arbres)	0.1 (Quelques arbres) Palmiste (0.05, Terrain en Cultures : H<0,8)
Canne à sucre, Banane	0.22 – 0.24 (Nombreux arbres et bâtiments occasionnels)	0.25 (Arbres nombreux, quelques bâtiments)

A l'étape suivante, l'information sur la répartition géographique des zones urbaines fournie par la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL) a été appariée aux valeurs des paramètres α et z_0 issues des travaux empiriques de Bechrakis et al. (2000) et Manwell (2009) présentés dans les Tableau 14 et

Tableau 15. Une valeur unique pour chaque couche de paramètres ($\alpha = 0.29$ et $z_0 = 1.5$) a été associée à tous les espaces identifiés par la tâche urbaine de la DEAL afin de caractériser le profil vertical du vent en milieu urbain à La Réunion. Les données issues de la base d'occupation des sols agricoles et de la tâche urbaine ont été privilégiées au sein de deux couches géolocalisées supplémentaires de paramètres α et z_0 associées à l'appellation raster 2. Pour les espaces non agricoles ou situés hors des zones urbaines, l'information sur les paramètres α et z_0 provenant du raster 1 a été reprise au sein du raster 2 afin de compléter la surface du territoire de La Réunion. La répartition spatiale du paramètre α pour le raster 2 est illustrée par la Figure 48. Les paramètres α et z_0 des rasters 1 et 2 évalués pour les sites des stations météorologiques de La Réunion sont présentés dans le Tableau 17.

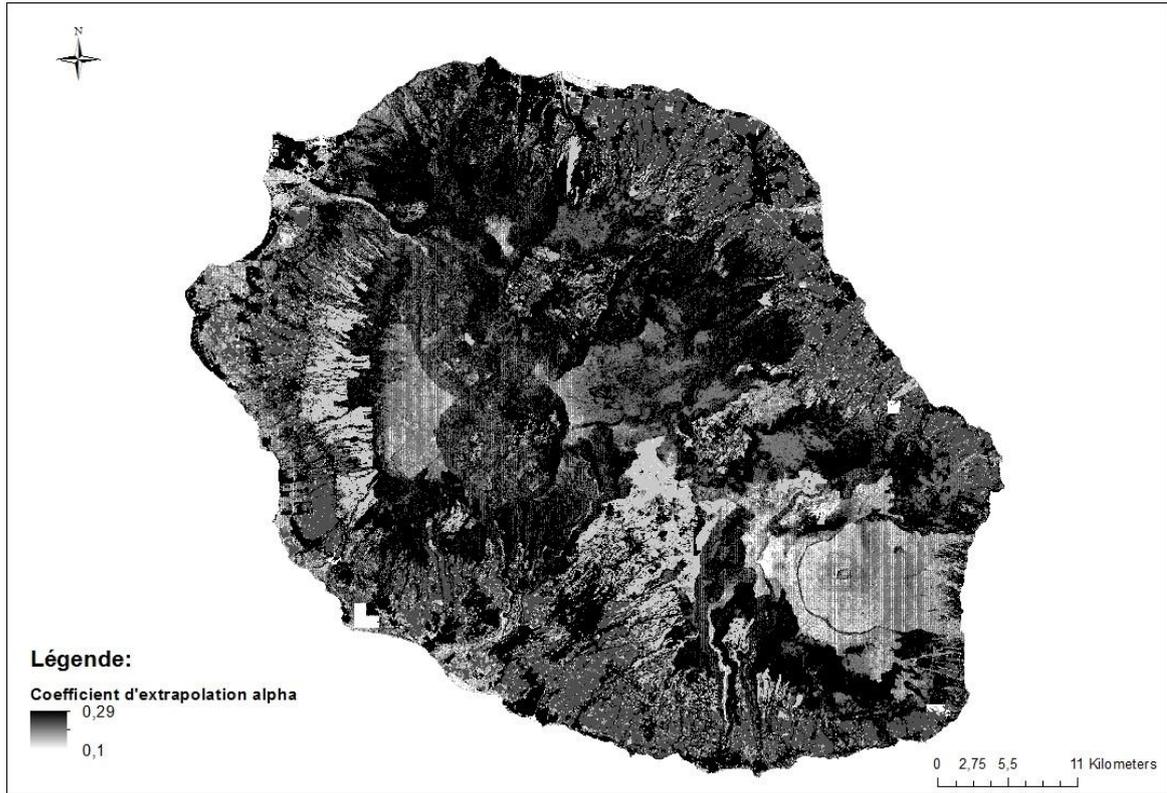


Figure 48: Répartition spatiale du coefficient d'extrapolation α de la loi de puissance pour le raster 2.

Tableau 17: Paramètres de rugosité pour les stations météorologiques de l'île de La Réunion.

Station météorologique	Paramètre α		Paramètre z_0	
	Raster 1	Raster 2	Raster 1	Raster 2
	Paindrey	.16	.23	.01
IUT Station université	.16	.16	.01	.01
Bellevue Bras-Panon	.1	.1	.003	.003
Pont-Mathurin	.2	.2	.03	.1
Plaine-des-Palmistes	.23	.29	.5	1.5
Le Port	.14	.2	.008	.05
St-Benoît	.1	.23	.003	.25
Petite-France	.16	.16	.01	.01
Pointe des Trois Bassins	.23	.29	.5	1.5
Pierrefonds-Aéroport	.1	.1	.003	.003
Le Baril	.23	.23	.5	.25
Gillot-Aéroport	.1	.1	.003	.003
Gros Piton Ste-Rose	.23	.23	.5	.5
Gîte de Bellecombe	.2	.2	.1	.1
Plaine des Cafres	.14	.2	.008	.05

Cilaos	.16	.29	.01	1.5
Le Baril 2	.2	.23	.1	.25
Bel Air	.2	.29	.03	1.5
Dioré	.2	.23	.05	.25
Langevin	.2	.2	.1	.05
Sambly	.1	.23	.003	.25
Ste Marie la Paix	.16	.2	.01	.03
St Paul	.16	.16	.01	.01
IUT 2 (campagne 2003)	.23	.23	.5	.25
Ango	.1	.1	.003	.003
Bras Panon 2	.14	.14	.008	.008
Carosse St Joseph	.23	.23	.5	.25
Le Colosse St André	.14	.23	.008	.25
Bras Panon 3	.14	.23	.008	.25
Carosse St Joseph 2	.1	.1	.003	.003

2.4.7 Comparaison des lois d'extrapolation verticale de la vitesse du vent

La loi de puissance et la loi logarithmique ont pour but de décrire le profil vertical de la vitesse du vent sur un site donné. Pour les altitudes d'intérêt, soit jusqu'à 70 mètres pour la hauteur de mât de la technologie Gamesa G58, les profils décrits par les deux lois sont similaires et les écarts entre la vitesse relative $v(z_2)/v(z_1)$ extrapolée par les deux lois demeurent faibles. Comme l'illustre la Figure 49, l'écart maximal est de l'ordre de 10% pour les catégories d'obstacles comparables, à l'exception des zones urbaines pour lesquelles la loi logarithmique surestime la vitesse du vent en altitude relativement à la loi de puissance.

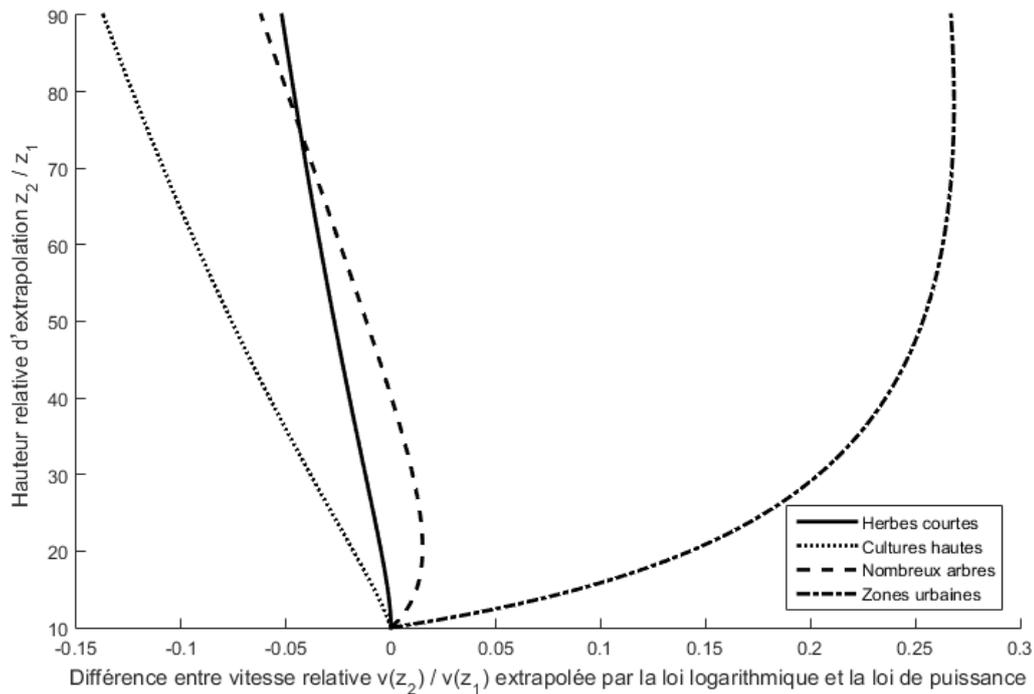


Figure 49: Différence entre la vitesse relative $v(z_2) / v(z_1)$ extrapolée par la loi logarithmique et la loi de puissance en fonction de la hauteur relative z_2/z_1 .

Pour les stations météorologiques présentant plusieurs altitudes de mesure, la moyenne des observations de la vitesse du vent pendant la période d'observation présentée dans le Tableau 17 ainsi que le paramètre d'échelle $c(z)$ de la distribution de Weibull estimé par la méthode du maximum de vraisemblance, ont fait l'objet d'une extrapolation verticale à partir des valeurs correspondantes observées à une altitude inférieure et des lois d'extrapolation logarithmique et de puissance calibrées par les paramètres d'extrapolation présentés dans le Tableau 17. Les résultats présentés dans les Tableau 18 et Tableau 19 font apparaître une sous-estimation systématique de la vitesse moyenne du vent et du paramètre d'échelle de la loi de Weibull $c(z)$ par les deux lois d'extrapolation. Cette sous-estimation est un peu plus importante pour la loi logarithmique que pour la loi de puissance. On observe également, pour les deux lois d'extrapolation, que la qualité de la prévision s'améliore lorsqu'on utilise les paramètres d'extrapolation du raster 2 plutôt que ceux du raster 1. On constate par ailleurs que l'hypothèse d'une valeur du paramètre de forme k de la loi de Weibull indépendant de l'altitude d'observation semble confirmée par les résultats de l'estimation de ce paramètre par la méthode du maximum de vraisemblance aux deux altitudes d'observation d'une même station météorologique présentées dans le Tableau 179.

Tableau 18 : Extrapolation à l'altitude z_2 de la vitesse moyenne du vent observée à l'altitude z_1 d'après les lois logarithmique et de puissance calibrées avec les paramètres des rasters 1 et 2.

	Altitude d'extrapolation z_2	Altitude d'observation z_1	Vitesse moyenne du vent observée à l'altitude z_1	Loi logarithmique		Loi de puissance	
				Raster 1	Raster 2	Raster 1	Raster 2
Ango Les Deux Rives	40,00	20,00	5,19	4,71	4,78	4,83	4,96
Paindray	50,00	40,00	4,49	4,32	4,39	4,36	4,43
Le Baril 2	50,00	30,00	5,93	4,90	5,11	4,96	5,19
Ste Suzanne Bel Air	30,00	10,00	5,55	4,63	6,15	4,85	5,35
Dior	50,00	30,00	5,92	5,72	6,00	5,70	6,09
Langevin	50,00	30,00	6,06	5,96	6,21	6,02	6,31
Sambly Brillon	50,00	30,00	7,07	7,05	7,16	7,16	7,27
Ste Marie La Paix	50,00	30,00	7,48	7,01	7,18	7,19	7,30
Lycée St Paul	30,00	10,00	3,43	3,28	3,28	3,23	3,23
IUT St Pierre 2	30,00	20,00	5,40	5,58	5,54	5,63	5,63
Bras Panon 3	12,00	11,50	4,15	4,06	4,06	4,06	4,06
Saint Joseph Carosse 2 12	12,00	11,50	3,75	3,79	3,78	3,78	3,78
Bras Panon 2	40,00	30,00	4,49	4,36	4,36	4,41	4,41
Saint Joseph Carosse 1 40	40,00	30,00	5,11	4,55	4,51	4,54	4,54
Saint André le Colosse	40,00	30,00	5,97	5,48	5,48	5,46	5,46
Moyenne des erreurs d'extrapolation				0,31	0,13	0,25	0,13
Ecart-type des erreurs d'extrapolation				0,35	0,35	0,32	0,30

Tableau 19 : Extrapolation à l'altitude z_2 du paramètre d'échelle de la loi de Weibull estimée avec les observations réalisées à l'altitude z_1 d'après les lois logarithmique et de puissance calibrées avec les paramètres des rasters 1 et 2.

	Estimation du paramètre d'échelle de la loi de Weibull $c(z_1)$	Loi logarithmique		Loi de puissance		Estimation du paramètre de forme de la loi de Weibull $k(z_1)$	Estimation du paramètre de forme de la loi de Weibull $k(z_2)$
		Raster 1	Raster 2	Raster 1	Raster 2		
Ango Les Deux Rives	5,83	5,28	5,36	5,41	5,56	1,76	1,73
Paindray	5,05	4,86	4,94	4,90	4,98	1,83	1,88
Le Baril 2	6,64	5,49	5,72	5,56	5,82	2,63	2,80
Ste Suzanne Bel Air	6,20	5,20	6,91	5,45	6,01	3,12	2,68
Dior	6,59	6,34	6,65	6,33	6,76	3,18	3,39
Langevin	6,86	6,75	7,03	6,82	7,14	2,05	2,01
Sambly Brillon	7,85	7,85	7,97	7,98	8,10	3,01	3,06
Ste Marie La Paix	8,34	7,81	8,01	8,01	8,14	2,77	2,94
Lycée St Paul	3,85	3,68	3,68	3,62	3,62	2,51	2,65
IUT St Pierre 2	6,11	6,33	6,28	6,37	6,37	1,96	2,04
Bras Panon 3	4,69	4,59	4,59	4,59	4,59	2,27	2,19
Saint Joseph Carosse 2 12	4,13	4,17	4,16	4,15	4,15	1,44	1,43
Bras Panon 2	5,00	4,85	4,85	4,90	4,90	1,55	1,55
Saint Joseph Carosse 1 40	5,53	4,91	4,87	4,90	4,90	1,29	1,28
Saint André le Colosse	6,72	6,17	6,17	6,15	6,15	1,84	1,87
Moyenne des erreurs d'extrapolation/écarts d'estimation		0,34	0,15	0,28	0,15		-0,02
Ecart-type des erreurs d'extrapolation/écarts d'estimation		0,38	0,40	0,36	0,33		0,15

2.5 Prédiction de l'évolution spatiale du vent

Les données météorologiques relatives au vecteur vent nécessaires à l'évaluation du potentiel éolien sur un site d'intérêt proviennent généralement de stations météorologiques mises en place, pour d'autres buts, sur des sites plus ou moins distants du site d'intérêt, comme on peut l'observer sur la Figure 14 pour l'île de la Réunion, du moins au stade de l'étude préliminaire du potentiel éolien du site d'intérêt. Pour réaliser de telles études il est donc indispensable de pouvoir s'appuyer sur des méthodes permettant d'extrapoler les observations des variables d'intérêt réalisées sur les sites des stations météorologiques existantes, aux sites d'intérêt de l'étude.

On considère, depuis Matheron (1969), qu'une variable Y est régionalisée sur un domaine D de l'espace géographique si les observations de cette variable sont appariées avec le lieu d'observation, repéré par un vecteur s de coordonnées spatiales du domaine d'observation D , de telle sorte que l'on puisse considérer Y comme une fonction $Y(s)$ pour tout $s \in D$. Les méthodes permettant de réaliser des profils des trends spatiaux d'une telle variable dans le domaine D , à partir d'un échantillon d'observations $Y(s_i), i = 1, \dots, n$, réalisées aux lieux de coordonnées $s_i \in D$, relèvent de la géostatistique. Elles diffèrent tant par l'objectif prévisionnel visé (interpolation locale ou extrapolation globale) que par les principes méthodologiques utilisés (méthodes déterministes ou modèles stochastiques). Nous esquissons dans cette section deux types de méthodes de prédiction spatiale utilisées dans cette thèse pour évaluer les caractéristiques de la distribution du vecteur vent sur les sites identifiés comme étant accessibles à l'installation d'éoliennes dans le cadre des scénarios présentés dans la section 2.1.

2.5.1 Méthodes d'interpolation par pondération par l'inverse de la distance aux observations

Cette méthode déterministe d'interpolation spatiale est conçue pour prévoir la valeur de la variable régionalisée Y , au lieu de coordonnées spatiales s_0 d'installation d'une éolienne, à l'aide d'un échantillon d'observations $Y(s_i), i = 1, \dots, n$, réalisées sur des sites de coordonnées spatiales $s_i, i = 1, \dots, n$, qui « entourent » le site de coordonnées spatiales s_0 , en ce sens que s_0 est contenu dans un simplexe convexe sous-tendu par une partie des coordonnées $s_i, i = 1, \dots, n$, et contenant les autres. La prédiction $\hat{Y}(s_0)$ pour $Y(s_0)$ est réalisée sous la forme d'une moyenne pondérée des observations $Y(s_i), i = 1, \dots, n$, soit d'après la formule suivante :

$$\hat{Y}(s_0) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i Y(s_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (40)$$

où w_i est une fonction non négative et décroissante d'une distance $d(s_i, s_0)$ entre les sites s_i et s_0 .

Cette méthode d'interpolation s'appuie donc sur le principe intuitif que les observations disponibles proches du site de prédiction doivent avoir plus d'influence sur la prédiction de $Y(s_0)$ que celles plus éloignées. Cette approche de décroissance de l'information prévisionnelle contenue dans les observations avec la distance au site de prédiction a été largement utilisé pour interpoler les données climatiques mais elle laisse sans réponse les

questions du choix tant de la mesure de distance à utiliser que de la forme fonctionnelle de la fonction de pondération définissant les poids $w_i = w(d_i)$ en fonction de leur distance au site de prévision $d_i = d(s_i, s_0)$.

S'agissant de la mesure de distance, il est habituel d'utiliser la distance euclidienne horizontale entre s_i et s_0 :

$$d(s_i, s_0) = \sqrt{(s_i - s_0)^T (s_i - s_0)} \quad (41)$$

où s désigne un vecteur colonne contenant les deux coordonnées horizontales (longitude et latitude) d'un site et l'exposant T le symbole de transposition du vecteur colonne en vecteur ligne. Mais d'autres mesures de distance ont été proposées, comme la différence d'altitude topographique proposée par Palomino and Martín (1995) pour l'interpolation spatiale dans des terrains complexes.

Quant à la forme fonctionnelle de la fonction de pondération, elle est souvent spécifiée sous la forme d'une fonction à puissance négative de la distance d , à savoir:

$$w(d) = d^{-a} \quad (42)$$

avec a un coefficient positif, souvent choisi égal à 1 ou 2. Mais ici aussi d'autres formes fonctionnelles sont envisageables, comme la fonction exponentielle $w(d) = \exp \{-ad\}$ avec $a > 0$. Cette méthode d'interpolation a été utilisée pour déterminer la valeur des paramètres de la distribution de Weibull de la vitesse du vent sur les sites d'implantation des éoliennes à partir des valeurs de ces paramètres fournies par le modèle de Météo-France « Arôme » pour les sites déterminés par un maillage de l'Île de la Réunion de 2,5 km de résolution, illustré par la Figure 64 du chapitre 4. Chaque site d'implantation d'une éolienne a été situé à l'intérieur d'une maille carrée de 2,5 km de côté et l'interpolation réalisée avec les valeurs des paramètres fournies par le modèle Arôme pour les quatre extrémités de la maille. Une autre démarche, proposée notamment par Palomino and Martín (1995), aurait consisté à utiliser toutes les valeurs du maillage qui se trouvent autour du site d'interpolation dans un rayon d'influence traduisant la distance au-delà de laquelle les conditions atmosphériques ont une influence négligeables sur celles du site d'interpolation.

2.5.2 Méthodes géostatistiques

Le défaut principal des méthodes précédentes c'est de ne pas exploiter la position relative des sites d'observation pour tirer profit de l'information fournie par la variabilité des observations dans le rayon d'influence du site d'interpolation. En procédant de la sorte, la prévision de la variable d'intérêt au site d'interpolation ne peut fournir qu'une valeur lissée des observations, comprise entre les valeurs extrêmes de l'échantillon disponible. Dès lors, si la valeur de la variable à prévoir se trouve à l'extérieur de l'intervalle de variation des observations disponibles, une moyenne pondérée des observations ne peut pas fournir une prévision correcte de cette variable. Les méthodes géostatistiques visent à corriger ce défaut en élaborant des méthodes de prévision spatiale basées sur une modélisation stochastique de l'évolution spatiale de la variable à prévoir.

Dans le cadre de ces modèles, la variable régionalisée $Y(s)$ est modélisée sous la forme de la somme d'un trend spatial déterministe $\mu(s)$ et d'une perturbation aléatoire $\varepsilon(s)$ d'espérance mathématique nulle et matrice de variances-covariances donnée, soit :

$$Y(s) = \mu(s) + \varepsilon(s) \quad (43)$$

avec $E[Y(s)] = \mu(s)$ et $E[\varepsilon(s)] = 0$.

Le trend spatial déterministe $\mu(s)$ peut être spécifié soit comme un trend régional purement géographique ou comme un trend régional dépendant aussi d'un vecteur $x(s)$ de K variables explicatives observables, auquel cas le modèle (43) s'écrit :

$$Y(s) = x(s)^T \beta + \varepsilon(x) \quad (44)$$

où β désigne le vecteur des K paramètres d'impact des variables explicatives $x(s)$ sur le trend $\mu(s)$.

Disposant d'un échantillon de n observations de la variable régionalisée $Y(s)$ et des variables explicatives régionalisées $x(s)$, on peut écrire le modèle explicatif de ces observations sous la forme du modèle de régression linéaire :

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (45)$$

où y est le vecteur colonne des n observations $Y(s_i)$, X la matrice $n \times K$ dont les lignes sont les vecteurs observation des variables explicatives $x(s_i)^T$ et ε le vecteur colonne des n perturbations aléatoires aux sites d'observation $\varepsilon(s_i)$. A ce modèle explicatif des observations on peut associer un modèle de prévision de la variable régionalisée Y sur le site de coordonnées s_0 où l'on projette d'installer une éolienne, qui s'écrit :

$$Y(s_0) = x(s_0)^T \beta + \varepsilon(s_0) \quad (46)$$

avec $x(s_0)$ et $\varepsilon(s_0)$ le vecteur des variables explicatives et la perturbation aléatoire sur le site de prévision. Pour une matrice de variances-covariances $E[\varepsilon\varepsilon^T] = V$ et un vecteur de covariances $E[\varepsilon\varepsilon_0] = V_0$ connus, Goldberger (1962) a établi la formule de prévision $\hat{Y}(s_0)$ pour $Y(s_0)$ qui minimise la variance de l'erreur de prévision $E[(\hat{Y}(s_0) - Y(s_0))^2]$ parmi toutes celles qui sont des fonctions linéaires du vecteur des observations y , appelée « meilleur prédicteur linéaire sans biais » ou « Best Linear Unbiased Predictor » en anglais. Ce prédicteur BLUP s'écrit :

$$\hat{Y}(s_0) = x(s_0)^T \hat{\beta} + V_0^T V^{-1} (y - X\hat{\beta}) \quad (47)$$

où $\hat{\beta}$ désigne l'estimateur des moindres carrés généralisé pour β :

$$\hat{\beta} = (X^T V^{-1} X)^{-1} X^T V^{-1} y \quad (48)$$

La prévision BLUP de $Y(s_0)$ est basée sur une prévision du trend spatial $x(s_0)^T \beta$ mais aussi de la réalisation de la perturbation aléatoire $\varepsilon(s_0)$ par le terme $V_0^T V^{-1} (y - X\hat{\beta})$ de la formule (47), qui est nulle lorsque $V_0 = 0$, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas de corrélation entre la perturbation aléatoire $\varepsilon(s_0)$ et celles du modèle des observations.

En l'absence d'une modélisation du corrélogramme spatial des perturbations, on s'est limité à modéliser le trend spatial de $Y(s)$ et à estimer les paramètres d'impact de ses variables explicatives par la méthode des moindres carrés ordinaires

2.6 Evaluation énergétique d'un gisement éolien

2.6.1 Principes physiques d'évaluation d'un gisement éolien

L'électricité produite par une éolienne installée dépend à la fois du gisement éolien sur le site d'intérêt et du type de technologie de l'aérogénérateur ou éolienne installée.

L'énergie éolienne disponible, exprimée en joules [J] ou en watts-seconde [W.s], provient de l'énergie cinétique contenue dans le déplacement des masses d'air. Elle est mesurée par le flux d'énergie cinétique contenue dans une masse d'air de masse volumique ³¹, en [kg.m⁻³], qui traverse une surface S , en [m²], perpendiculaire à l'écoulement d'un vent de vitesse v , en [m.s⁻¹], pendant une durée t , en [s], soit par la quantité :

$$E_c = \rho S v t \frac{v^2}{2} = \frac{1}{2} \rho v^3 t S \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} = \text{J}] . \quad (49)$$

De cette mesure on déduit celle de la puissance éolienne disponible exprimée en watts [W] :

$$P_c = \frac{E_c}{t} = \frac{1}{2} \rho v^3 S \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = \text{W}] , \quad (50)$$

ainsi que celle de la puissance éolienne disponible par unité de surface, également appelée densité de puissance disponible :

$$D_c = \frac{P_c}{S} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} = \text{W} \cdot \text{m}^{-2}] . \quad (51)$$

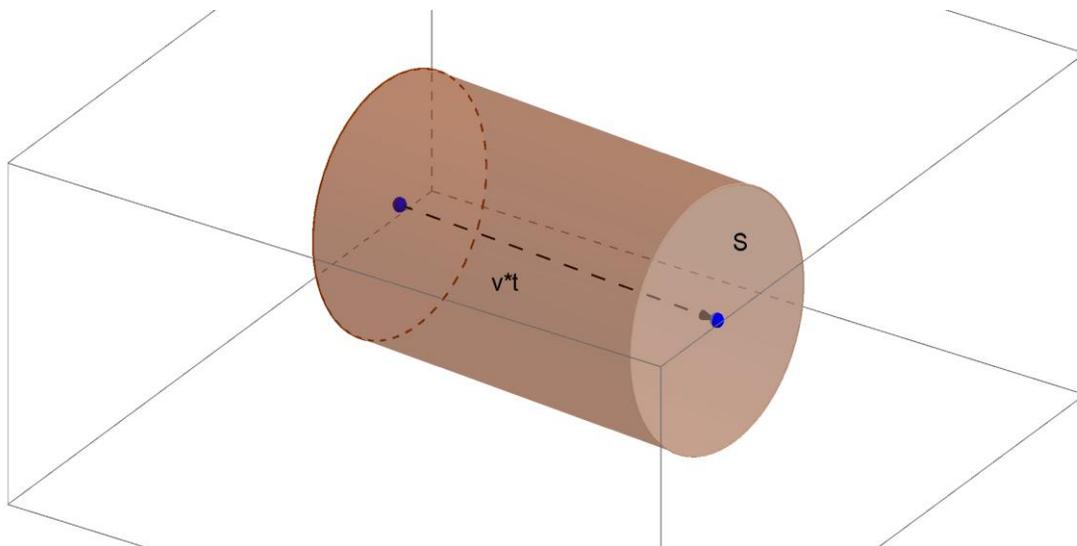


Figure 50: Volume d'une masse d'air traversant à la vitesse v pendant une durée t une surface S perpendiculairement.

La part de l'énergie éolienne disponible transformée en énergie électrique par une éolienne varie selon le type de technologie de l'éolienne. Chaque modèle d'éolienne est caractérisé par une courbe de puissance fournissant la puissance électrique générée par un vent de vitesse donnée. Le rendement de l'éolienne, appelé coefficient de puissance, noté $C_p(v)$, correspond au rapport entre la puissance électrique produite par l'éolienne et la puissance éolienne disponible dans l'air. Ce rapport connaît une limite théorique supérieure appelée limite de Betz égale à $16/27 \cong 0,593$. La puissance électrique maximale d'une éolienne de surface de

³¹ Au niveau de la mer, la masse volumique nominale de l'air vaut 1.225 [kg.m⁻³].

captation S exposée à un écoulement perpendiculaire de l'air de vitesse v correspond donc à :

$$P_{e,max} = \frac{16}{27} P_c = \frac{8}{27} S \rho v^3 \quad [W] . \quad (52)$$

Indépendamment du choix portant sur le type d'éolienne, la densité de puissance maximale est donc donnée par

$$D_{e,max} = \frac{16}{27} D_c = \frac{8}{27} \rho v^3 \quad [W.m^{-2}] . \quad (53)$$

Cette limite n'est jamais atteinte en pratique.

Finalement, la courbe de puissance d'une éolienne caractérisée par un coefficient de puissance $C_p(v)$ s'écrit :

$$P_e = C_p(v) \frac{1}{2} S \rho v^3 \quad [W] . \quad (54)$$

Les graphiques de la Figure 51 illustrent les courbes de puissance des modèles d'éolienne en compétition à La Réunion, présentées numériquement dans le Tableau 20 pour une masse volumique moyenne annuelle de l'air ρ de $1.193 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$. Les éoliennes en opération au sein des parcs éoliens à La Réunion possèdent la technologie Vergnet GEV MP d'une puissance crête de $275 \text{ [kW}_c\text{]}$. Les parcs éoliens récemment installés à l'île Maurice bénéficient d'une technologie plus puissante de type Gamesa G58 de $850 \text{ [kW}_c\text{]}$ et il est envisagé d'installer à l'avenir des éoliennes de $1 \text{ [MW}_c\text{]}$ dans la zone des Mascareignes. La technologie Vergnet GEV HP, dont la courbe de puissance est présentée dans la Figure 51 et le Tableau 20, fait partie de cette dernière gamme d'éoliennes.

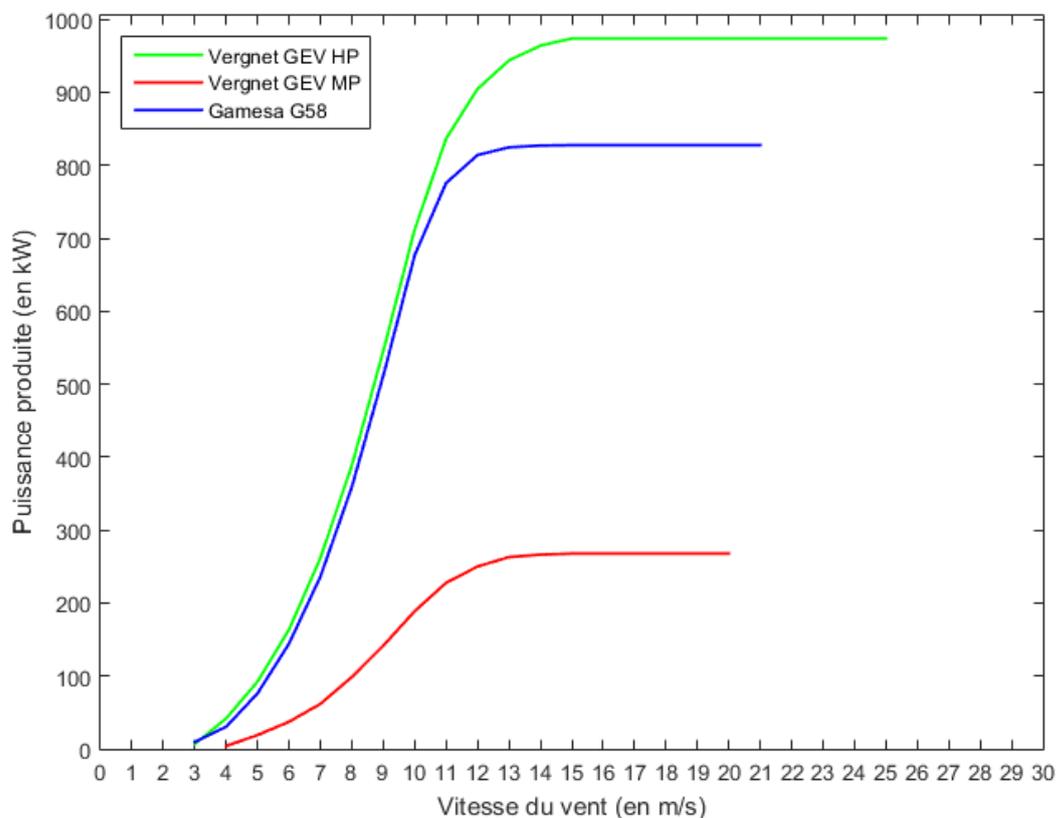


Figure 51: Courbes de puissance des modèles d'éoliennes en compétition à La Réunion pour une masse volumique moyenne annuelle de l'air de $1.193 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$.

Tableau 20 : Courbes de puissance des modèles d'éoliennes en compétition à La Réunion pour une masse volumique moyenne annuelle de l'air de 1.193 [kg.m⁻³].

v [m.s ⁻¹]	Vergnet GEV MP	Gamesa G58	Vergnet GEV HP
0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0
3	0,0	9,4	6,8
4	4,1	30,4	41,9
5	19,1	76,4	92,5
6	37,4	144,3	163,6
7	61,8	236,4	262,0
8	98,7	359,2	388,6
9	141,5	511,6	545,4
10	188,8	676,8	711,9
11	227,8	775,8	836,6
12	250,1	814,1	904,7
13	263,0	824,7	943,7
14	266,4	827,1	964,1
15	267,8	827,7	973,9
16	267,8	827,8	973,9
17	267,8	827,8	973,9
18	267,8	827,8	973,9
19	267,8	827,8	973,9
20	267,8	827,8	973,9
21	0,0	827,8	973,9
22	0,0	0,0	973,9
23	0,0	0,0	973,9
24	0,0	0,0	973,9
25	0,0	0,0	973,9

La puissance éolienne récupérable par une éolienne de courbe de puissance $C_p(v)$ sur un site dont le gisement éolien est caractérisé par une fonction de densité de la vitesse du vent $f(v)$ correspond à la puissance éolienne espérée obtenue en intégrant la puissance électrique produite sur le site par rapport à la gamme des vitesses comprises entre la vitesse de démarrage v_{min} et la vitesse d'arrêt v_{max} de l'éolienne :

$$\bar{P}_e = \frac{1}{2} \rho S \int_{v_{min}}^{v_{max}} C_p(v) \rho v^3 f(v) dv \quad [W] . \quad (55)$$

Le taux d'utilisation espéré de l'éolienne, également appelé facteur de charge, quantifie la productivité d'un modèle d'éolienne sur un site d'intérêt. Il est défini par le rapport de la puissance éolienne récupérable et de la puissance crête de l'éolienne, correspondant à la puissance nominale P_n produite par l'éolienne à sa vitesse crête v_{max} :

$$T_e = \frac{\bar{P}_e}{P_n} = \frac{\int_{v_{min}}^{v_{max}} C_p(v) v^3 f(v) dv}{C_p(v_{max}) v_{max}^3} \quad [1] . \quad (56)$$

La production d'électricité annuelle espérée d'une éolienne sur un site, appelée énergie éolienne récupérable, est obtenue en multipliant la puissance éolienne récupérable par le nombre d'heures d'une année, soit 8760 [h] :

$$\bar{E}_e = 8760 \bar{P}_e \quad [\text{Wh}] \quad (57)$$

Une autre mesure de la productivité annuelle d'un modèle d'éolienne est obtenue en multipliant le facteur de charge par le nombre d'heures de l'année. Cette grandeur, appelée nombre annuel d'heures d'équivalent pleine puissance, quantifie le nombre annuel d'heures de fonctionnement de l'éolienne à puissance maximale qui génère la production annuelle espérée d'une éolienne :

$$H_{app} = 8760 T_u \quad [\text{h}] . \quad (58)$$

A titre d'illustration, nous présentons dans le Tableau 21 les quatre grandeurs que l'on vient de présenter, calculées d'après les données observées à la station météorologique de Pierrefonds en 2010.

Tableau 21: Evaluation du productible électrique pour les éoliennes de technologie Gamesa G58 et Vergnet GEV HP d'après les observations météorologiques réalisées à la station de Pierrefonds en 2010.

Modèle d'éolienne	Puissance éolienne espérée \bar{P}_e [kW]	Taux d'utilisation espéré T_e [%]	Nombre annuel d'heures d'équivalent pleine puissance H_{app} [h]	Production d'électricité annuelle espérée \bar{E}_e [MWh]
Gamesa G58	203.08	0.245	2149.1	1779.1
Vergnet GEV MP	56.05	0.209	1833.5	491.0

2.6.2 Choix du modèle statistique de la distribution du vent

La section 2.3.2 a mis en lumière l'inadéquation de la distribution de Weibull à deux paramètres pour représenter la distribution de la vitesse du vent lorsque celle-ci est corrélée avec une direction horizontale du vent très variable. A contrario, nous avons montré que cette famille de distributions fournissait une représentation analytique adéquate de la distribution de la vitesse du vent pour une classe restreinte de directions horizontales du vent ce qui permet de modéliser la distribution marginale de la vitesse du vent comme un mélange discret de distributions de Weibull à deux paramètres chacune desquelles étant conditionnelle à une classe d'une partition disjointe et exhaustive des directions horizontales possibles du vent, soit l'intervalle $[0^\circ, 360^\circ)$.

Afin d'évaluer l'erreur de mesure engendré par l'utilisation de ces deux modèles analytiques de distribution de la vitesse du vent pour évaluer la production électrique espérée d'une éolienne, nous comparons dans le Tableau 22 l'évaluation de la production d'électricité annuelle espérée des éoliennes de technologie Gamesa G58 et Vergnet GEV MP réalisée d'après la distribution empirique de la vitesse du vent observée à la station de Pierrefonds en 2010, aux ajustements de la distribution de Weibull à deux paramètres (Figure 41), d'une part, et du mélange de distributions de Weibull conditionnelles à une partition en 12 classes 30° de la direction horizontale du vent (Figure 43), d'autre part. Au sein de cette analyse, la vitesse du vent n'est pas extrapolée à la hauteur des rotors des éoliennes afin de ne pas introduire de biais dans l'estimation de l'erreur de mesure. Les données présentées ci-dessous diffèrent donc de celles du Tableau 21.

Tableau 22: Evaluation de la production d'électricité annuelle espérée [MWh] d'une éolienne à la station de Pierrefonds en 2010 d'après des distributions analytiques de Weibull de la vitesse du vent et comparaison à l'évaluation basée sur la distribution empirique.

Technologie d'éolienne	Distribution empirique	Modèle de distribution de la vitesse du vent							
		Mélange de distributions de Weibull à 2 paramètres conditionnelles aux 12 classes 30° de la direction du vent		Distribution de Weibull à 2 paramètres		Distribution de Weibull conditionnelle à la classe 30° de direction dominante du vent ESE		Mélange de distributions de Weibull conditionnelles aux classes 30° de la direction du vent ESE et SSE	
Vergnet GEV MP	329.2	319.2	-3.04%	310.0	-5.82%	261.3	-20.62%	283.89	-13.78%
Gamesa G58	1204.0	1166.0	-3.15%	1147.7	-4.68%	912.19	-24.24%	997.2	-17.18%

On constate que l'utilisation d'un modèle de distribution de Weibull à deux paramètres de la vitesse du vent conduisent à sous-évaluer sensiblement (de 5 à 6 %) la production d'électricité annuelle espérée lorsque la distribution empirique est bimodale, car les fréquences d'observation de vitesses élevées du vent sont alors sous-estimées par la queue d'une distribution uni-modale, ce qui limite l'emploi de cette forme fonctionnelle pour l'évaluation de la production électrique de sites bénéficiant d'une direction horizontale du vent peu variable. Cette approche pourrait par contre conduire à surestimer la production d'électricité de sites équipés de rangées parallèles denses d'éoliennes et comportant une forte variabilité de la direction horizontale du vent en raison des pertes d'énergie cinétique des masses d'air soumises à l'effet de sillage produit par le passage du vent dans les éoliennes situées en amont. Dans de tels cas, il conviendrait de réaliser aussi une évaluation conservatrice de la production d'électricité basée sur une distribution de la vitesse du vent conditionnelle à la classe de directions horizontales du vent entourant la direction dominante pour lesquelles les pertes d'énergie cinétique du vent par effet de sillage sont jugées négligeables.

A titre d'illustration, nous présentons dans le Tableau 22 une telle évaluation basée sur la distribution de Weibull conditionnelle au faisceau de directions horizontales du vent 30° ESE contenant la direction dominante et sur le mélange de cette distribution de Weibull conditionnelle avec celle du faisceau de directions 30° adjacent SSE. Les résultats obtenus montrent qu'en présence d'une forte variabilité de la direction horizontale du vent les pertes de productivité dues à l'effet de sillage peuvent être importantes. Il convient donc d'être particulièrement attentif au dimensionnement d'un parc éolien dense sur des sites comportant une forte variabilité de la direction du vent.

2.7 Evaluation économique d'un gisement éolien

2.7.1 Calcul du coût unitaire espéré du kWh

Le coût de production de l'électricité éolienne varie en fonction de la production d'électricité annuelle espérée, des coûts d'investissement ainsi que des coûts d'exploitation, de maintenance et d'assurance en vigueur dans le contexte de La Réunion. Le coût unitaire annuel espéré c du kWh éolien est défini par le quotient du coût complet annualisé de l'installation éolienne en euros [€] et de sa production d'électricité annuelle espérée en [kWh], soit :

$$c = \frac{C_a}{\bar{E}_e} \quad [€.\text{kWh}^{-1}] \quad (59)$$

où C_a désigne le coût complet annualisé de l'éolienne et \bar{E}_e la production annuelle espérée de l'éolienne évaluée d'après la formule (57). Le coût complet annualisé représente l'annuité constante à payer pendant tout le cycle de vie de l'éolienne pour rembourser la valeur actuelle des coûts d'investissement, d'exploitation, de maintenance et d'assurance encourus pendant la durée de vie de l'installation avec une charge d'intérêts calculée au taux d'actualisation réel annuel adopté. Pour une éolienne dont la durée d'exploitation est de N années et un taux d'actualisation r , C_a est donc obtenu comme solution de l'équation :

$$\sum_{t=1}^N \frac{C_a}{(1+r)^t} = V = \sum_{t=1}^N \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

où V désigne la valeur actualisée au taux r de la suite $\{C_t, t = 1, \dots, N\}$ des coûts annuels complets de l'installation, ce qui conduit à :

$$C_a = \frac{r}{1 - (1+r)^{-N}} V. \quad (60)$$

Les coûts annualisés du kW de puissance crête installée pour chaque poste de coût d'une éolienne de type Gamesa G58 et Vergnet GEV MP, sont présentés dans le Tableau 23.

Tableau 23: Postes de coût unitaires annualisés en [€.kW⁻¹.an⁻¹] des éoliennes Gamesa G58 et Vergnet GEV HP.

Poste de coût	Gamesa G58	Vergnet GEV MP
Coûts d'investissement	1.7647e+03 ³²	1.8498e+03 ³³
Coûts d'exploitation et de maintenance	14.39 ³⁴	14.39 ³⁵
Coûts d'assurance	8.08 ³⁶	8.08 ³⁷
Loyer du terrain	8.06 ³⁸	8.06 ³⁹

³² Source : Région Réunion.

³³ Source : Quadrant.

³⁴ Source : Région Réunion.

³⁵ Source : Région Réunion.

³⁶ Source : Région Réunion.

³⁷ Source : Région Réunion.

Les coûts d'investissement ont été évalués à partir des coûts d'investissements du parc de 23 éoliennes de technologie Vergnet GEV MP situé à Sainte-Rose et à partir des coûts d'investissement du parc de 10 éoliennes de technologie Gamesa en projet à l'île Maurice. Les coûts d'exploitation et de maintenance, d'assurance et le loyer du terrain ont été évalués à partir des coûts des centrales éoliennes en exploitation à La Réunion. Les annualisations ont été basées sur une durée d'exploitation des éoliennes de 20 ans, conformément aux recommandations de la Commission de Régulation de l'Energie (2014), et en utilisant le taux d'actualisation annuel réel de 10% postulé par la Commission de Régulation de l'Energie (2014).

Le Tableau 24 présente le coût unitaire annuel espéré pour les éoliennes Gamesa G58 et Vergnet GEV MP évalué d'après la production d'électricité espérée qu'auraient fournies ces éoliennes installées sur le site de la station météorologique de Pierrefonds en 2010.

Tableau 24: Estimation du coût unitaire annuel espéré des éoliennes Gamesa G58 et Vergnet GEV MP d'après les observations de la station météorologique de Pierrefonds en 2010.

Gamesa G58	Vergnet GEV MP
0.1136	0.1262

2.7.2 Evaluation des politiques publiques de soutien à la production d'électricité éolienne

L'investissement dans des capacités éoliennes est favorisé à La Réunion par la politique de tarif de rachat de l'électricité éolienne en vigueur dans les départements d'outre-mer. Mis en place depuis 2000 par l'état français, les contrats d'obligation d'achats de long terme impliquent qu'EDF achète l'électricité produite par les éoliennes à un tarif fixé par arrêté. Deux tarifs d'achat sont fixés selon que l'installation bénéficie d'un « dispositif de prévision et de lissage de la production d'électricité éolienne »⁴⁰ ou qu'elle en soit dépourvue. L'arrêté du 17 juin 2014⁴¹ fixe les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations qui ne fournissent pas de service réseau. Les contrats sont souscrits pour 15 ans et le tarif est fixé à 11 c€/kWh pour les départements d'outre-mer. L'arrêté du 8 mars 2013⁴² fixe les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations disposant d'un dispositif de prévision et de lissage de la production. Les contrats sont souscrits pour 15 ans et le tarif est fixé à 23 c€/kWh pendant 10 ans, puis entre 5 et 23 c€/kWh pendant 5 ans selon le nombre annuel d'heures d'équivalent pleine puissance. A La Réunion le nombre annuel d'heures d'équivalent pleine puissance, défini par la relation (58), n'excède pas 2000 heures et on peut donc bénéficier d'un tarif de rachat de l'électricité de 23 c€/kWh sur 15 ans. La politique de subventionnement de l'électricité éolienne vise la réalisation de l'objectif d'autonomie

³⁸ Source : Région Réunion.

³⁹ Source : Région Réunion.

⁴⁰ L'usage de batteries permet à l'opérateur des éoliennes de lisser la production journalière et d'injecter sur le réseau le courant correspondant à un profil prédit et communiqué la veille au gestionnaire de réseau.

⁴¹ Arrêté du 17 juin 2014 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie mécanique du vent implantées à terre.

⁴² Arrêté du 8 mars 2013 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie mécanique du vent situées dans des zones particulièrement exposées au risque cyclonique et disposant d'un dispositif de prévision et de lissage de la production.

énergétique fixé, pour La Réunion, par la loi Grenelle I⁴³ ainsi que l'objectif d'installation en 2020 de 35 MW de puissance éolienne et de 50 MW en 2030, objectifs fixés par le Schéma Régional du Climat de l'Air et de l'Energie (SRCAE) introduit par la loi Grenelle II⁴⁴.

La méthodologie d'évaluation des politiques publiques de soutien à la production d'électricité éolienne s'appuie sur la politique réglementaire et la politique de subventionnement. Le critère économique conditionnant la décision d'investissement en capacité éolienne est caractérisé, au sein de cette thèse, par la rentabilité d'un parc éolien. La rentabilité est déterminée par la comparaison du coût unitaire annuel espéré de production de l'électricité éolienne, défini par la relation (58), avec le tarif de rachat *FIT* fixé par la politique publique de subventionnement de l'éolien. Chacune des éoliennes installables dans un cadre réglementaire est évaluée comme étant rentable si son coût unitaire espéré de production d'électricité est inférieur au montant du tarif de rachat en vigueur à La Réunion, soit :

$$c \leq FIT . \quad (61)$$

Alternativement, la condition de rentabilité d'une éolienne peut être reformulée en termes de niveau minimum de production annuelle espérée, définie par la relation ((57)), ou de taux d'utilisation espéré, défini par la relation (56), que doit atteindre l'éolienne sur le site d'implantation, soit :

$$\bar{E}_e \geq \frac{C_a}{FIT}, \text{ respectivement } T_e \geq \frac{C_a/P_n}{8760 \cdot FIT} . \quad (62)$$

La méthodologie d'évaluation des politiques publiques, illustrée par la Figure 52, fait appel alternativement à ces deux critères de rentabilité de l'investissement dans l'éolien. Dans un premier temps, nous évaluons le potentiel de développement de l'éolien que permet une politique de subventionnement qui fixe le prix de rachat du kWh éolien, en déterminant d'après la condition (62) le taux d'utilisation espéré minimal auquel sera réalisé un investissement dans l'éolien. Au niveau de subventionnement actuel, ce taux d'utilisation minimal pour qu'une éolienne soit rentable s'établit à 25.34% pour les éoliennes de type Vergnet GEV MP et à 26.41% pour les éoliennes de type Gamesa G58. Pour déterminer dans quelle mesure une politique de subventionnement de l'éolien par rachat de la production à un prix donné permet d'atteindre les objectifs de développement de l'éolien établis par le SRCAE, nous identifions pour chaque scénario de politique réglementaire les installations dont le taux d'utilisation espéré est supérieur au taux minimal assurant la rentabilité de l'investissement. La puissance cumulée de ces installations constitue le potentiel de développement économique espéré de l'éolien réalisable par la politique de subventionnement envisagée.

⁴³ Art. 56 de la Loi n°2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement.

⁴⁴ Loi n°2010-788 du 12 juillet 2010 portant sur l'engagement national pour l'environnement.

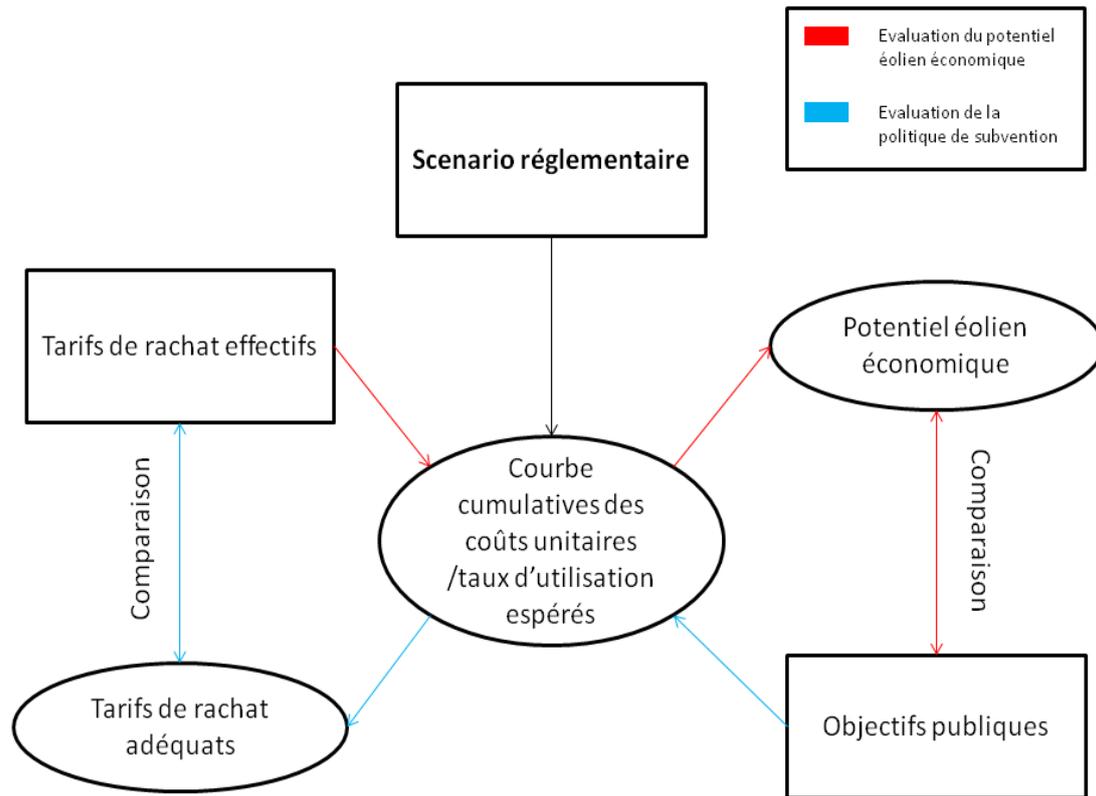


Figure 52: Méthodologie d'évaluation des politiques publiques de soutien à l'électricité éolienne.

Dans un second temps, pour chaque scénario de politique réglementaire, nous évaluons le niveau du prix de rachat du kWh éolien (FIT) permettant de réaliser des objectifs de développement de l'éolien préfixés. Autrement dit, le prix de rachat de l'électricité éolienne est envisagé comme un instrument de politique économique permettant de réaliser un objectif préfixé de développement de l'éolien. Ce niveau de subventionnement est celui qui égalise le potentiel de développement économique de l'éolien à l'objectif préfixé de développement de l'éolien. Le prix de rachat qui en résulte est égal au coût unitaire annuel espéré de l'éolienne dont la profitabilité espérée est nulle.

Chapitre 3 Evaluation du potentiel éolien installable à La Réunion dans le cadre de sa réglementation environnementale et sociale

L'installation et l'exploitation d'éoliennes peuvent engendrer de nombreuses aménités négatives pouvant compromettre ou altérer tant la tranquillité d'un îlot urbain, l'esthétique d'un paysage, le bon fonctionnement d'un radar, la sécurité d'un couloir aérien, que la pérennité des espaces naturels et des espèces qui les habitent. Sur un territoire où l'espace exploitable est précieux, comme c'est le cas à l'île de La Réunion, les conflits d'usage du sol sont nombreux. La nécessité d'aménager des espaces naturels protégés et de préserver les zones d'habitation et d'activité économique peut s'opposer à la volonté de promouvoir une énergie locale renouvelable. Ainsi, dans de nombreux cas où l'exploitation du gisement éolien est techniquement envisageable, elle ne peut être réalisée du fait de l'affectation présente des espaces (zones d'habitation, zones aéroportuaires, proximité de radars), des objectifs de développement du territoire (conservation des espaces naturels), ou de la présence d'espaces dédiés à la conservation de l'habitat naturel des espèces animales et végétales menacées.

La première section de ce chapitre présente les autorisations administratives qui encadrent l'investissement en capacité de production d'électricité éolienne afin de limiter les aménités négatives que peuvent engendrer l'installation et l'exploitation d'éoliennes. Les enjeux environnementaux sont présentés dans la seconde section et les enjeux sociaux dans la troisième section. Afin d'évaluer l'impact de modifications envisageables de la politique réglementaire en matière d'investissement éolien à La Réunion, nous présentons dans une quatrième section une quantification en scénarios des gains ou des pertes en termes de puissances éoliennes crête installables à La Réunion résultant de l'adoption de telles modifications par rapport au potentiel éolien installable dans le cadre réglementaire actuel. La cinquième section conclut.

3.1 Encadrement réglementaire de l'investissement en capacité de production d'électricité éolienne

La loi Grenelle II de juillet 2010 a fait entrer les éoliennes terrestres dans le champ des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). La nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement est détaillée à la rubrique 2980, créée par le décret n°2011-984 du 23 août 2011 et annexée à l'article R-511-9 du Code de l'Environnement. Les projets éoliens dont au moins un aérogénérateur possède un mât d'une hauteur supérieure à 50 mètres sont soumis à la procédure d'autorisation ICPE, plus exigeante que la procédure de déclaration ICPE. Elle implique la production d'une étude d'impact, d'une enquête publique et d'une étude de dangers. L'étude d'impact, pièce majeure du dossier ICPE, est soumise depuis juillet 2009 à l'avis de l'Autorité Environnementale et permet d'apprécier la prise en compte et le respect des enjeux environnementaux, paysagers et patrimoniaux. Elle assure le respect des dispositions législatives en vigueur sur les espaces concernés ainsi que la prise en compte de l'impact des projets éoliens sur la biodiversité et les écosystèmes locaux. Elle comprend également les éléments permettant d'apprécier la compatibilité du projet avec l'affectation des sols définie par le document d'urbanisme opposable. Les projets éoliens dont au moins une éolienne possède un mât dont la hauteur de mât dépasse 50 mètres nécessitent également l'obtention d'un permis de construire (PC). Comme l'autorisation ICPE, le permis de construire doit comprendre la production d'une étude d'impact (article R.431-16 et R.441-5 du Code de l'Urbanisme) et d'une enquête publique. La recevabilité de l'étude d'impact est toutefois effectuée au titre de la procédure d'autorisation ICPE à laquelle ces éoliennes sont soumises⁴⁵. Le permis de construire permet également de vérifier et de sanctionner la conformité du projet éolien aux documents d'urbanisme et aux règles générales d'occupation des sols.

Différents documents d'urbanisme participent à la planification et à l'aménagement du territoire réunionnais, ainsi qu'à la définition des orientations à suivre en matière de développement durable. Le Schéma d'Aménagement Régional (SAR), document stratégique de planification, fixe les grandes orientations en matière d'aménagement du territoire à l'échelle régionale. Le Schéma d'Aménagement Régional de La Réunion (Région Réunion, 2011), adopté en 2011 par le Conseil Régional de La Réunion, est établi selon les dispositions de l'article L.4433-7 du Code Général des Collectivités Territoriales de manière à fixer « *les orientations fondamentales à moyen terme en matière de développement durable, de mise en valeur du territoire et de protection de l'environnement.* »⁴⁶. Il détermine notamment « *la destination générale des différentes parties du territoire* »⁴⁷ et « *la localisation préférentielle (...) des activités relatives aux énergies renouvelables* »⁴⁸. Les prescriptions du SAR sont reprises au sein des documents locaux, seuls documents d'urbanisme opposables à un tiers, à

⁴⁵ La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte a par ailleurs étendu à toutes les régions l'expérimentation d'une autorisation unique regroupant notamment la procédure ICPE et le permis de construire.

⁴⁶ Article L.4433-7 du Code général des Collectivités territoriales.

⁴⁷ Article L.4433-7 du Code général des Collectivités territoriales.

⁴⁸ Article L.4433-7 du Code général des Collectivités territoriales.

savoir le Schéma de Cohérence Territorial (SCOT) à l'échelle intercommunale et communale et le Plan Local d'Urbanisme (PLU) à l'échelle du secteur d'une commune ou d'un quartier. A l'échelle de la commune et du regroupement de communes appartenant à la même aire urbaine, le SCOT permet de mettre en cohérence et de coordonner les politiques en matière d'urbanisme, d'habitat, de développement économique, de préservation des zones rurales et de développement durable, notamment. Le PLU, quant à lui, traduit concrètement le choix de développement retenu pour chaque quartier ou secteur d'une commune. Le SAR possède une influence indirecte sur les autorisations d'urbanisme auxquelles sont soumis les projets éoliens. L'autorisation ICPE et le PC assurent en effet la compatibilité du projet avec les documents locaux d'urbanisme, lesquels entretiennent un rapport de compatibilité avec le SAR. Le rapport de compatibilité est direct entre le SAR et le SCOT, auquel le PLU doit être compatible à son tour. En l'absence de SCOT, le PLU doit être compatible directement avec les orientations du SAR. Les documents locaux d'urbanisme que sont le SCOT et le PLU, du fait de leur rapport de compatibilité au SAR, précisent à leur échelle les zones définies par le SAR. Ils peuvent élargir l'étendue des zones protégées mais en aucun cas réduire leur superficie. Dans le cas où un projet éolien serait incompatible avec les documents locaux d'urbanisme, une modification de ceux-ci doit être entreprise pour permettre l'implantation des éoliennes.

L'étude d'impact joue un rôle majeur quant à l'appréciation de l'accessibilité du gisement éolien et elle permet, au-delà du respect des dispositions législatives encadrant le territoire de l'île, de prendre en compte localement les aménités négatives engendrées par l'installation et l'exploitation d'aérogénérateurs. L'autorisation des installations classées pour la protection de l'environnement et le permis de construire permettent ainsi, grâce à l'étude d'impact, d'assurer la compatibilité du projet éolien aux dispositions légales, aux enjeux de conservation de la biodiversité locale et aux dispositions des plans locaux d'urbanisme.

Les enjeux environnementaux et sociaux ont été étudiés à partir des dispositions légales et des prescriptions du SAR. Les résultats des études scientifiques portant sur les espèces concernées par l'exploitation d'éoliennes de grande envergure ont également été compilés afin de participer à l'identification des enjeux environnementaux présents à l'île de La Réunion. Les espaces concernés ont été spatialisés par le biais de systèmes d'information géographiques et le travail d'identification des zones accessibles a été réalisé par le biais du logiciel ArcGIS.

3.2 Identification des enjeux environnementaux

3.2.1 Protection du littoral de La Réunion

Afin d'encadrer l'aménagement de la côte, le législateur a introduit avec la Loi Littoral, correspondant aux articles L.146-1 et suivants du Code de l'Urbanisme, des dispositions fortement restrictives sur le littoral. Celles-ci poursuivent un double objectif : celui de préserver la bande littorale en reportant les constructions potentielles davantage à l'intérieur des terres et celui de contenir les zones urbanisées des communes littorales.

Afin de poursuivre l'objectif de préservation du littoral, une bande dite des 50 pas géométriques⁴⁹ et présentant une largeur de 81,20 mètres à compter de la limite haute du rivage a été aménagée par le législateur. Sur cet espace et en dehors des espaces déjà urbanisés, seule une liste restrictive d'aménagements liés à l'usage de la mer est autorisée. Les éoliennes n'en font pas partie. Le législateur a également prévu la protection des Espaces Remarquables du Littoral à Préserver (ERLAP) définis par l'article L.146-6 du Code de l'Urbanisme comme étant « *les espaces terrestres et marins, sites et paysages remarquables (...) et les milieux nécessaires au maintien des équilibres biologiques ou présentant un intérêt écologique* »⁵⁰. Seule la réalisation d'aménagements légers détaillés à l'article R146-2 du code de l'urbanisme est autorisée sur ces espaces et les éoliennes ne font pas partie de la liste des aménagements autorisés. Les ERLAP sont intégrés aux espaces naturels de protection forte, détaillés dans la section 3.2.2, et bénéficient au sein des documents locaux d'urbanisme du même classement que les espaces naturels de protection forte. L'inventaire des ERLAP est réalisé au sein du Schéma de Mise en Valeur de la Mer (SMVM), chapitre particulier du SAR opposable aux projets, qui précise les orientations en matière de développement, de protection et d'équipement sur les zones du littoral. Le SMVM énumère la liste des projets autorisables sur les espaces du littoral qu'il encadre. Il prévoit l'installation d'ouvrages de production d'électricité renouvelable marine ou solaire mais les éoliennes ne font pas partie des ouvrages autorisés sur ces espaces. Les propriétés foncières acquises par le conservatoire du littoral et des rivages lacustres, afin de les soustraire à tout aménagement susceptible de détériorer le littoral, sont comprises pour la plus grande partie d'entre-elles dans les ERLAP.

Le second objectif de la Loi Littoral, celui de contenir les zones urbanisées des communes littorales est réalisé via deux volets supplémentaires de la cette loi : les dispositions de l'article L.146-4 du Code de l'Urbanisme et l'aménagement de coupures d'urbanisation. Les dispositions de l'article L.146-4 du Code de l'Urbanisme prévoit que, pour les communes littorales, toute extension d'urbanisation doit être réalisée en continuité avec les agglomérations et les villages existants. Dix-neuf des vingt-quatre communes du territoire de La Réunion possèdent le statut de commune littorale et sont concernées par les dispositions de l'article L.146-4 du Code de l'Urbanisme. Ces dispositions concernent les éoliennes depuis l'arrêt du 26 juin 2010 du Conseil d'État selon lequel tout projet de parc éolien partage le statut d'extension d'urbanisation. Ces dispositions rendaient l'implantation d'éoliennes sur le territoire de La Réunion très complexe dans la mesure où elles relèvent en même temps du

⁴⁹ Egalement appelés 50 pas du Roi. Cette zone a été historiquement établie afin de faciliter la circulation sur les zones proches du rivage, récolter du bois et favoriser la défense des territoires insulaires.

⁵⁰ Loi Littoral.

classement ICPE qui impose de ne pas installer les éoliennes à proximité des zones habitées ou à destination d'habitation, comme cela est détaillé dans la section 3.3.1. Des aménagements ont été prévus par le législateur pour les communes des territoires d'outre-mer. Les dispositions de l'article L.156-2 prévoient que dans les espaces proches du rivage, définis par le SMVM, une extension d'urbanisation peut être réalisée sous une double condition. Elle doit être réalisée dans les secteurs déjà occupés par une urbanisation diffuse et les aménagements ne peuvent être autorisés que s'ils ont été prévus par le SMVM. Par voie de conséquence, à La Réunion aucune éolienne ne peut être installée au sein des espaces proches du rivage sauf modification préalable des prescriptions du SMVM qui excluent actuellement les éoliennes de la liste des projets autorisables. Les dispositions de l'article L.156-2 prévoient des conditions plus souples hors des espaces proches du rivage, sur lesquels l'implantation d'éoliennes peut être autorisée par arrêté du représentant de l'Etat dans la région, après avis de la commission départementale compétente. Le second outil mis en place par le législateur afin d'éviter une urbanisation diffuse sur le littoral consiste en la mise en place de coupures d'urbanisation, introduites par les dispositions de l'article L.156-2 du Code de l'Urbanisme. Ces zones dont la délimitation est réalisée au sein du SAR correspondent au « *espaces naturels ouverts sur le rivage (...) entre les zones urbanisables* »⁵¹. Elles sont établies afin de limiter les fronts urbains et structurer le littoral. Les prescriptions du SAR prévoient que ces zones, d'une superficie de 6398 ha à La Réunion, doivent permettre de contribuer à « *l'exploitation des énergies renouvelables* »⁵². Les dispositions de l'article L.156-2 du Code de l'Urbanisme impose néanmoins le classement des coupures d'urbanisation dans les zones naturelles et agricoles au sein des documents d'urbanisme. A ce titre, aucune construction nouvelle n'est possible, à l'exception d'une liste d'aménagements détaillés à la page 74 du SAR et dont les éoliennes ne font pas partie. L'ensemble des espaces relevant de la protection du littoral sont illustrés par la Figure 53.

3.2.2 Les espaces de protection forte : une zone naturelle sanctuarisée

Structurés à partir du cœur du Parc National situé sur les hauteurs de l'île, les espaces naturels de protection forte sont définis afin de garantir la protection des espaces naturels et des principaux réservoirs de biodiversité de La Réunion. Territoire d'une superficie d'environ 125'000 ha, les espaces naturels de protection forte comprennent plusieurs sous-espaces détaillés dans le Tableau 25 et cartographiés dans la Figure 53. La plupart de ces sous-espaces bénéficient d'une protection établie par voie légale. Une seconde garantie de conservation des espaces de protection forte est assurée via leur classement parmi les zones naturelles au sein des documents locaux d'urbanisme que sont le SCOT et le PLU, soumis à un rapport de compatibilité avec le SAR. Comme indiqué précédemment, la compatibilité d'un projet éolien avec l'affectation des sols définie par le document d'urbanisme opposable est appréciée par l'étude d'impact. Les zones naturelles qui composent des espaces de protection forte sont listées dans le Tableau 1 et leur vocation est discutée ci-après pour chacun des sous-espaces.

⁵¹ Loi Littoral.

⁵² Loi Littoral.

Tableau 25 : Espaces naturels de protection forte.

Type d'espace	Réglementation associée
Cœur du Parc National	Article L.331-4 du Code de l'Environnement Charte du Parc National - Décret n° 2014-49
Espaces naturels remarquables du littoral à protéger (ERLAP)	Articles L.146-1 et suivants du Code de l'Urbanisme (Loi Littoral)
Réserve Naturelle Nationale de l'Étang de St Paul	Article L.332-9 du Code de l'Environnement Décret n° 2008-4 du 2 janvier 2008
Sites inscrits	Article L.341-1 du Code de l'Environnement
Sites classés	Article L.341-1 du Code de l'Environnement Article L.341-10 du Code de l'Environnement
Espaces naturels sensibles (ENS)	Article L.142-1 du Code de l'Urbanisme Article L.142-10 du Code de l'Urbanisme
Zone naturelle d'intérêt écologique faunistique et floristique I (ZNIEFF I)	Article L.411-5 du Code de l'Environnement
Arrêtés de protection biotopes (APB)	Article L.411 du Code de l'Environnement

Composante principale des espaces naturels de protection forte, le Cœur du Parc National couvre 42% de La Réunion soit plus de 100'000 hectares. Ses paysages iconiques, la richesse de sa biodiversité, ainsi que l'histoire de son peuplement en ont fait le cœur de l'identité réunionnaise ainsi qu'un bien du patrimoine mondial après son classement en 2010 par l'UNESCO. L'espace du Cœur du Parc National, dont les limites sont fixées par le décret n°2007-296 du 5 mars 2007, bénéficie d'une protection au titre des dispositions législatives et réglementaires du chapitre I du titre III du livre III du Code de l'Environnement. Les possibilités d'aménagement dans le Cœur du Parc sont encadrées par l'article L.331-4 du Code de l'Environnement et toute construction ou installation y est interdite, sauf avec une autorisation spéciale de l'établissement public du parc délivrée après avis de son Conseil Scientifique. Des règles particulières applicables aux travaux, constructions et installations sont introduites par la réglementation du parc et par sa charte⁵³. La charte du Parc National, approuvée par le décret 2014-49 du 21 janvier 2014, reprend le classement comme espace de protection forte conféré par le SAR au Cœur du Parc National, interdisant toute construction incompatible avec sa vocation naturelle. La charte précise la vocation de préservation et de conservation du patrimoine naturel⁵⁴ rattachée aux espaces du Cœur du Parc National, qui rend l'affectation de ces espaces incompatible avec l'implantation d'éoliennes.

Plusieurs sites épars, en dehors du Cœur du Parc sont protégés et intégrés aux espaces naturels de protection forte. Les espaces naturels sensibles, correspondant aux bois, forêts et parcs préservés au titre de l'article L.142-10 du Code de l'Urbanisme, relèvent du domaine de la politique environnementale départementale. L'implantation d'éoliennes est incompatible

⁵³ En vertu des dispositions de l'alinéa 4 de L.331-4 du Code de l'Environnement.

⁵⁴ P. 63 de la charte du Parc National.

avec la destination affectée à ces espaces sur lesquels, selon les dispositions de l'article L.142-10 du Code de l'Urbanisme, « seuls des équipements légers d'accueil du public ou nécessaires à la gestion courante des terrains ou à leur mise en valeur à des fins culturelles ou scientifiques peuvent être admis »⁵⁵. Les sites inscrits et classés correspondent aux « sites et monuments naturels de caractère historique, artistique, scientifique, légendaire ou pittoresque »⁵⁶ dont la conservation et la préservation présentent un intérêt général. Le classement et l'inscription entraîne deux niveaux de protections distincts. Au titre de l'article L.341-1 du même code, l'inscription entraîne l'obligation pour les propriétaires de ne pas procéder à des travaux sans avoir avisé l'Administration de leur intention, quatre mois à l'avance. Ces dispositions concernent les travaux autres que ceux d'exploitation courante relatifs aux fonds ruraux et ceux d'entretien normal relatifs aux constructions. La protection des sites classés est plus contraignante et les dispositions de l'article L.341-10 du Code de l'Environnement interdisent toute destruction ou modification des sites « dans leur état ou leur aspect sauf autorisation spéciale »⁵⁷. Les espaces remarquables du littoral à protéger (ERLAP) ont déjà été évoqués dans la section 1.2.1 dédiée à la protection du littoral.

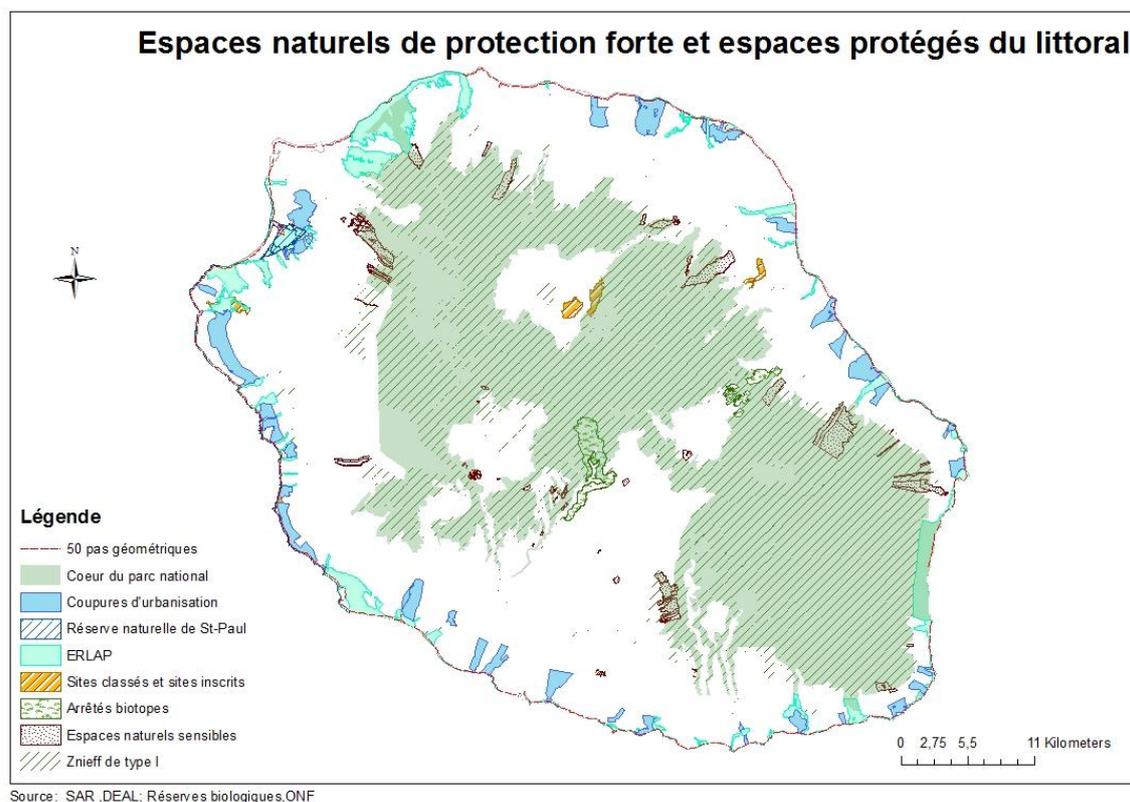


Figure 53: Cartographie des espaces naturels de protection forte et des espaces protégés du littoral.

La protection de la biodiversité, abordée en détail dans la section 3.2.3, est largement organisée au titre de la conservation des espaces naturels de protection forte. Ces espaces comprennent le territoire de la réserve naturelle nationale de l'Étang de St-Paul, les zones d'inventaire écologique ZNIEFF1, ainsi que les sites de nidification protégés par un arrêté biotopes. La réserve naturelle de l'Étang de St Paul, intégrée aux ERLAP et située sur la côte Ouest de l'île, a été créée par le décret n°2008-4 du 2 janvier 2008 afin d'y préserver les

⁵⁵ Article L.142-10 du Code de l'Urbanisme.

⁵⁶ Article L.341-1 du Code de l'Environnement.

⁵⁷ Article L.341-10 du Code de l'Environnement.

équilibres biologiques originaux. On y dénombre environ 40 espèces végétales patrimoniales, 230 espèces d'insectes, et 26 espèces d'oiseaux dont le Busard de Maillard évoqué dans la section 3.2.3. Dans la réserve, il est interdit d'effectuer des travaux publics ou privés modifiant l'aspect ou l'état de la réserve au titre des dispositions de l'article L.332-9 du Code de l'Environnement⁵⁸. Cette interdiction est rappelée à l'article 9 du décret de création de la réserve naturelle⁵⁹. Les ZNIEFF ou zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique correspondent aux zones d'inventaire des « richesses écologiques, faunistiques, floristiques, géologiques, minéralogiques et paléontologiques(...) institué pour l'ensemble du territoire national terrestre, fluvial et marin »⁶⁰. L'inventaire est principalement assuré par l'État, les régions pouvant y être associées dans le cadre de leurs compétences. Ces espaces couvrent à La Réunion une surface de 102'000 ha, dont une part importante (92%) est comprise dans le Cœur du Parc National. Les ZNIEFF sont distingués selon deux types, les ZNIEFF de type I qui correspondent à des espaces où sont présentes des espèces animales ou végétales rares et les ZNIEFF de type II qui correspondent à de grands ensembles naturels riches pouvant inclure des ZNIEFF I et dont les équilibres biologiques doivent être préservés. L'inventaire n'a pas de valeur juridique en lui-même mais doit être pris en compte par l'étude d'impact. Afin d'assurer la préservation des ZNIEFF de type I à La Réunion, le SAR a prévu leur classement parmi les espaces naturels de protection forte. Le SAR précise ainsi « qu'en regard à l'intérêt écologique spécifique du patrimoine existant dans les ZNIEFF de type I, il importe d'assurer une protection effective forte de ces espaces »⁶¹. Toute forme d'urbanisation y est interdite. Un principe d'exception est prévu pour les « installations (...) de production d'énergie et les infrastructures de transport (...) d'énergie ». Ce régime d'exception concerne l'implantation d'éoliennes sous réserve que la démonstration soit faite « qu'aucun autre emplacement ou aucune autre solution technique n'étaient envisageables à un coût supportable pour la collectivité »⁶². Les sites de nidification protégés par arrêté biotopes, dernières sous-entité des espaces de protection forte, sont présentés au sein de la section 3.2.3 au sein de laquelle les enjeux liés à la protection de la biodiversité à La Réunion sont détaillées.

3.2.3 Conservation de la biodiversité

La localisation de l'île, apparue en plein océan à une distance importante des continents, est à l'origine d'une biodiversité remarquable. La faune et la flore de La Réunion font de l'île un site unique sur le plan patrimonial et scientifique. Les espèces d'oiseaux, d'insectes et de reptiles de l'île présentent un fort taux d'endémisme et il en est de même des espèces végétales. Afin de garantir les équilibres écologiques, en dehors des espaces de protection forte des zones ont été aménagées à des fins spécifiques de conservation.

Parmi les espaces aménagés à des fins de conservation, les réserves biologiques correspondent aux espaces boisés de l'île protégés par arrêté conjoint des ministres en charge de l'environnement et de l'agriculture. Soumises au régime forestier, les réserves biologiques

⁵⁸ Article L.332-9 du Code de l'Environnement : « Les territoires classés en réserve naturelle ne peuvent, ni être détruits, ni modifiés dans leur état ou dans leur aspect, sauf autorisation spéciale (...) du représentant de l'Etat pour les réserves naturelles nationales ».

⁵⁹ Décret n°2008-4 du 2 janvier 2008, article 9 : « Les travaux publics ou privés modifiant l'état ou l'aspect de la réserve sont interdits ».

⁶⁰ Article L.411-5 du Code de l'Environnement.

⁶¹ Schéma d'Aménagement Régional de La Réunion, 2011, p.70.

⁶² Schéma d'Aménagement Régional de La Réunion, 2011, p.71.

sont gérées par l'Office National des Forêts (ONF). Les réserves biologiques domaniales sont instituées sur un fonds du domaine forestier de l'État. Les autres réserves biologiques (départementale, communale, etc.) appartiennent quant à elles aux départements, communes, régions et autres organismes publics. Ces espaces protégés sont aux nombres de douze sur l'île et sont répertoriés sur le site de l'ONF. Autres espaces affectés à des fins de conservation, les sites d'intérêt géologique, les habitats naturels d'espèces animales non domestiques ou végétales non cultivées sont protégés par les arrêtés de protection biotopes (APB) en vertu de l'article L.411 du Code de l'Environnement.

Les espaces sanctuarisés au sein des espaces de protection forte ainsi les espaces ménagés à des fins de conservation que sont les zones protégées par arrêté biotopes et les réserves naturelles, permettent d'organiser la sauvegarde de l'habitat naturel des espèces protégées mais ne prennent pas en compte l'ensemble du cycle de vie des espèces protégées.

L'approche en termes de continuité écologique, complémentaire de celle des aires protégées, vise à prendre en compte le déplacement des espèces au cours de leur cycle de vie. Les espaces de continuités écologiques ont ainsi pour vocation de former des « corridors écologiques » entre les réservoirs de biodiversité afin d'éviter la fragmentation des habitats naturels des espèces. Situés entre les espaces naturels de protection forte des Hauts et des Bas de l'île, les espaces de continuités écologiques regroupent les principales ravines et les abords du Cœur du Parc National. Ces espaces, d'une superficie de 41'383 ha, reçoivent, à l'instar des espaces naturels de protection forte, un classement au sein des documents locaux d'urbanisme afin d'assurer le maintien de leur vocation. Toute construction nouvelle est interdite sauf pour une liste d'exceptions détaillées à la page 72 du Volume 2A du SAR. Les aérogénérateurs ne sont pas compris dans cette liste. Les espaces dédiés à la protection de la biodiversité sont cartographiés dans la Figure 54.

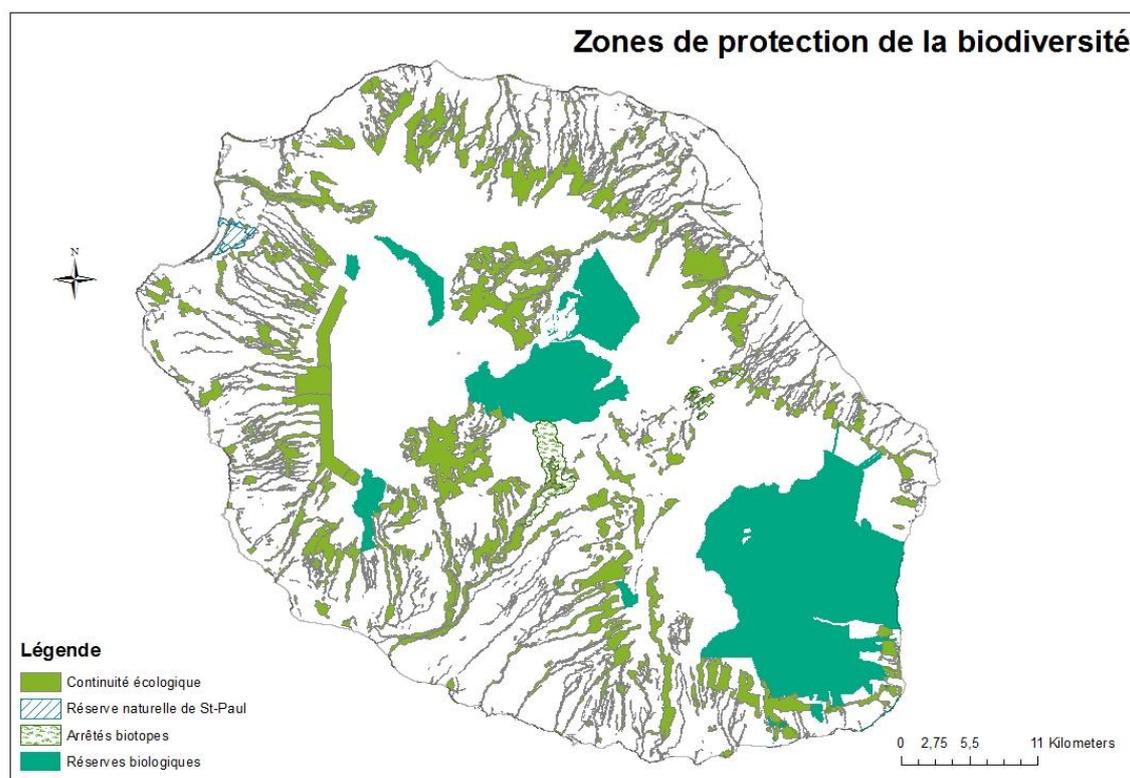


Figure 54: Cartographie des zones de protection de la biodiversité.

Les espaces de continuité écologique sont amenés à être révisés à l’horizon 2019, date à laquelle le Schéma Régional de Cohérence Ecologique (SRCE) devra être établi comme un volet du SAR. Le SRCE aura pour vocation de préciser les espaces de continuité écologique par l’établissement de trames vertes et bleues introduites par les lois Grenelle I et II. Les trames vertes correspondent aux zones niches de la biodiversité et les trames bleues aux couloirs permettant à la faune de se déplacer.

Afin d’identifier les impacts sur la biodiversité locale engendrés par l’installation et l’exploitation d’éoliennes, les résultats scientifiques portant sur les zones niches de la biodiversité et les couloirs de déplacement de la faune protégée ont été utilisés. Les résultats des plans nationaux d’action (PNA) (Riethmuller et al., 2012)⁶³ et des plans de conservation (PDC) (Caceres, 2011; Grondin and Philippe, 2011; Salamolard, 2008)⁶⁴ regroupés au sein de l’étude préalable d’identification et de cartographie des réseaux écologiques à La Réunion (Service eau et biodiversité de la DEAL, 2014) ont été repris. La liste des espèces protégées sur le territoire de La Réunion selon l’article L.411-1 du Code de l’Environnement est détaillée dans les arrêtés ministériels indiqués dans le Tableau 26.

Tableau 26: Listes des espèces protégées à l’île de La Réunion.

Typologie des espèces protégées	Arrêté ministériel
Espèces végétales	Arrêté du 06 février 1987 espèces végétales (liste régionale)
Espèces animales	Arrêté du 17 février 1989 espèces animales vertébrées (liste régionale)



Figure 55: Pétrel noir de Bourbon.

Les espèces prioritairement menacées par l’implantation et l’exploitation d’éoliennes sur le territoire de La Réunion sont les espèces d’oiseaux et les chiroptères vulnérables au mouvement des pales durant leur vol. Pour les espèces d’oiseaux de La Réunion, les risques les plus importants sont représentés par l’implantation d’éoliennes dans la proximité

⁶³ Consultable sur le site de la DEAL.

⁶⁴ Consultables sur le site de la DEAL.

immédiate de leurs sites de nidification et de leurs couloirs de déplacement. Quatre espèces menacées d'oiseaux marins nichent sur l'île : le pétrel noir de Bourbon, illustré par la Figure 55⁶⁵, le pétrel de Barau, le puffin du Pacifique et le puffin tropical. Le pétrel noir de Bourbon (*Pseudobulwerria aterrima*), espèce endémique de La Réunion, est un des oiseaux marins les plus rares au monde. Sa population est estimée à quelques couples d'individus et son statut de conservation est jugé critique. Le moindre accident est susceptible d'impacter de manière drastique la survie de l'espèce. Les sites de nidification et de passage du pétrel noir de Bourbon sont protégés par arrêté de protection biotopes (APB du Bras de la Plaine N06-4368/SG/DRCTCV du 8 décembre 2006). Le pétrel de Barau (*Pterodroma barau*), espèce également endémique de La Réunion, est classé en danger avec un risque d'extinction dans les prochaines décennies. L'ensemble des sites de nidification du pétrel de Barau, précédemment protégés par arrêté APB, sont désormais intégrés dans le Cœur du Parc National. Les pétrels noirs de Bourbon et les pétrels de Barau présentent un risque élevé de collision avec les éoliennes qui se situeraient dans leurs couloirs de déplacements. Ces oiseaux marins effectuent des allers retours entre leurs sites de nidification situés sur les hauts sommets de l'île et le littoral où se situe leur zone de pêche. Ce risque est d'autant plus élevé pour les individus juvéniles moins expérimentés, qui peuvent être attirés par les sources lumineuses lors de leur apprentissage du vol. Outre le risque de collision avec les pales ou les mâts d'une éolienne, les dépressions locales dues au mouvement des pales peuvent engendrer l'éclatement des organes creux des oiseaux passant à proximité. Ce phénomène de barotraumatisme provoqué par les éoliennes a été mis en lumière par divers travaux (Barclay et al., 2007; Hötcker et al., 2006). La zone du Dimitile et de la Rivière Saint-Etienne correspondent aux zones de survol les plus fréquentes des pétrels noirs de Bourbon. Les pétrels de Barau, quant à eux, regagnent les colonies de reproduction au crépuscule et les deux principales voies d'accès aux colonies passent par l'entrée des cirques de Mafate (au dessus de la rivière des Galets) et de Cilaos (au dessus de la rivière Saint-Etienne).

Le puffin du Pacifique (*Puffinus Pacificus*), oiseau indigène de La Réunion, niche davantage sur les côtes même si quelques colonies de puffins du Pacifique peuvent exister à l'intérieur des terres. Il est principalement installé autour de Petite-île, sur le site identifié par l'APB N446/DAGR/DAI du 17 février 1986. Le puffin de Baillon, autrement connu sous le nom de puffin tropical constitue une des sous-espèces du puffin du Pacifique.



Figure 56: Busard de Maillard.

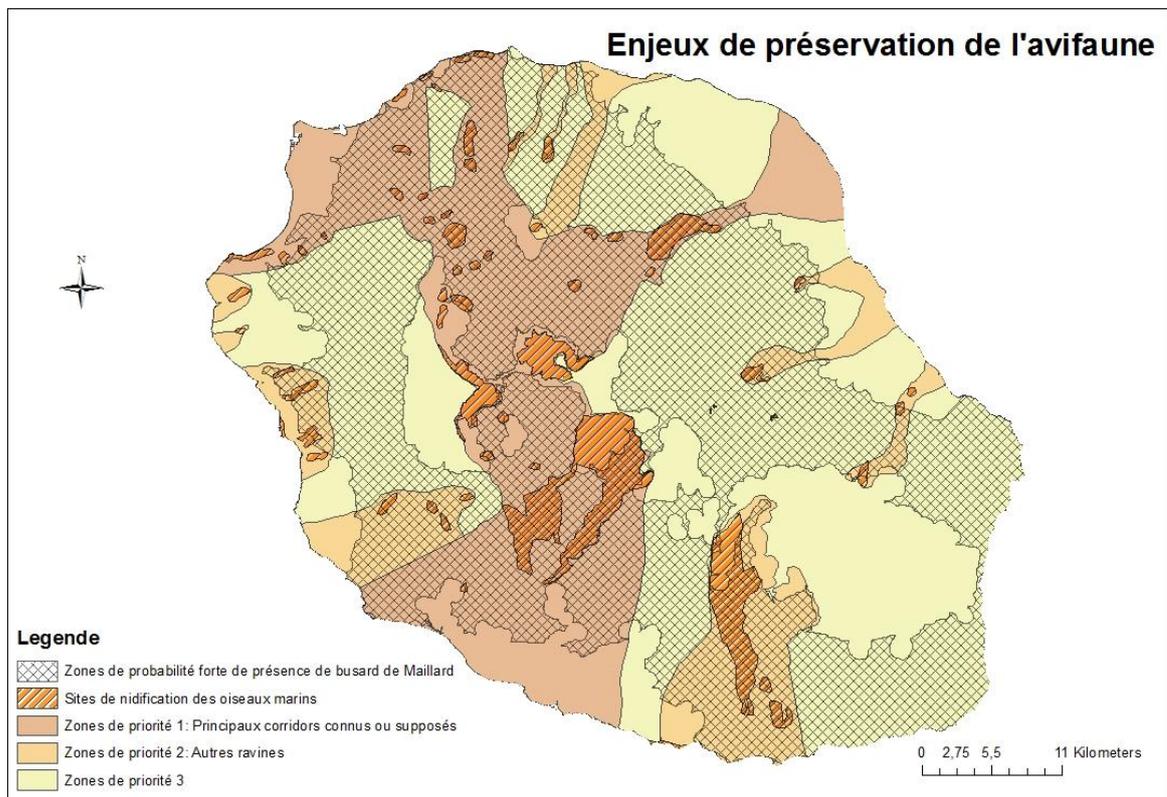
⁶⁵ UICN et Muséum National d'Histoire Naturelle, 2010.

Autre oiseau emblématique de La Réunion, le « paille en queue » (*Phaethon lepturus*) est un oiseau marin diurne qui profite des courants ascendants pour se déplacer. Il peut nicher à l'intérieur des terres et son mode de déplacement peut le rendre vulnérable aux obstacles. Il en est de même du busard de Maillard (*Circus maillardi*), localement appelé « papangue » et illustré par la Figure 56⁶⁶. Unique rapace nicheur de l'île de La Réunion, le papangue niche au sol au sein de fourrés ou à proximité des champs de canne à sucre. Le comportement de vol du papangue le rend vulnérable au risque de collision avec les lignes électriques et les éoliennes dans la mesure où il utilise les courants d'air chaud pour prendre de l'altitude. Les travaux de scientifiques (Roux D. et al., 2002) montrent le danger de collision que représentent les pales des éoliennes, en particulier pour les jeunes busards, lors de l'apprentissage du vol.

La trame aérienne de l'étude préalable d'identification et de cartographie des réseaux écologiques à La Réunion identifie les zones de nidification des oiseaux marins ainsi que les couloirs de déplacement des pétrels et puffins. Les zones de déplacements les plus fréquentes sont présentées dans la Figure 57 au titre de zones de priorité 1. Il s'agit des trois cirques, de la rivière Saint Etienne, de la rivière des Galets et de la rivière de l'Est. Les zones de priorité 2 correspondent aux autres ravines notamment celles abritant les colonies de puffins de Baillon. Les zones de priorité 3 correspondent au reste de l'île, l'ensemble du territoire étant « susceptible d'être survolée par les oiseaux marins selon les conditions météorologiques locales »⁶⁷. Si la cartographie des sites de nidification du busard de Maillard n'existe pas à l'heure actuelle, une carte des zones préférentielles de vol a été établie à partir des résultats du Plan de conservation de l'espèce. Indiquées dans la Figure 57, les zones de probabilité forte correspondent aux zones d'habitat préférentiel du busard de Maillard.

⁶⁶ (UICN-Muséum National d'Histoire Naturelle, 2010).

⁶⁷ Étude préalable d'identification et de cartographie des réseaux écologiques à La Réunion.



Source : DEAL, Etude préalable à l'identification et de cartographie des réseaux écologiques à la Réunion, Trame aérienne, Juin 2014

Figure 57: Cartographie des enjeux de préservation de l'avifaune.

Seuls mammifères indigènes de l'île de La Réunion, les chauves-souris sont également menacées par l'installation et l'exploitation d'éoliennes. L'installation d'éoliennes est susceptible d'engendrer la destruction de l'habitat et le dérangement des populations de chiroptères, protégés par l'arrêté ministériel du 17 février 1989. Alors que les ultrasons émis par les éoliennes peuvent désorienter les chauves-souris durant leur vol, l'exploitation d'éoliennes présente également un risque de collision ou de barotraumatisme (Barclay et al., 2007; Hötker et al., 2006). Aucune cartographie des zones de présence des chiroptères n'est actuellement disponible pour les trois espèces de chauve-souris protégées à La Réunion, à savoir la roussette noire (*Pteropus niger*), le petit molosse (*Mormopterus francoismoutoui*) et le taphien (*Taphozous mauritanus*). Leurs zones d'habitat et de déplacement doivent néanmoins, à l'instar de celles de l'avifaune protégée, être prises en compte par l'étude d'impact.

3.3 Identification des enjeux sociaux

3.3.1 Zones à destination d'habitation

L'installation et l'exploitation d'éoliennes peuvent engendrer dans le voisinage immédiat des zones habitées des aménités négatives liées à l'esthétique imposante des installations ou au bruit issu du mouvement des pales. L'urbanisation sur le territoire de La Réunion est largement concentrée sur le littoral du fait de la complexité de la topographie de l'île et de la superficie conséquente du patrimoine naturel à conserver. Les zones aménageables de l'île sont estimées à 40% de son territoire. L'urbanisation est également diffuse du fait d'une population dont la densité de peuplement est deux fois plus importante (322 hab./km²) qu'en métropole (122 hab./km²). Au titre du classement des éoliennes au régime ICPE, le corpus réglementaire prévoit des zones de restriction autour des zones à destination d'habitation. Les dispositions relatives au classement ICPE sont déclinées selon le type de régime ICPE auquel les éoliennes sont soumises. Les dispositions concernant les installations soumises au régime de déclaration sont détaillées en fonction de la hauteur de mât des éoliennes au sein de l'arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations soumises au régime de déclaration ICPE dans ses annexes I et II. Les éoliennes doivent être implantées à une distance minimale de toute construction à usage d'habitation, de tout immeuble habité et de toute zone destinée à l'habitation telle que définie dans les documents d'urbanisme. Les distances d'éloignement minimales de l'habitat qui s'appliquent aux éoliennes en fonction de la hauteur de leur mât sont présentées dans le Tableau 3.

Les dispositions s'appliquant aux installations soumises au régime d'autorisation dans le voisinage de zones d'habitation sont détaillées dans l'art. 3 de l'arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent soumises au régime d'autorisation. Une distance minimale de 500 mètres « *de toute construction à usage d'habitation, de tout immeuble habité ou de toute zone destinée à l'habitation* »⁶⁸ s'applique.

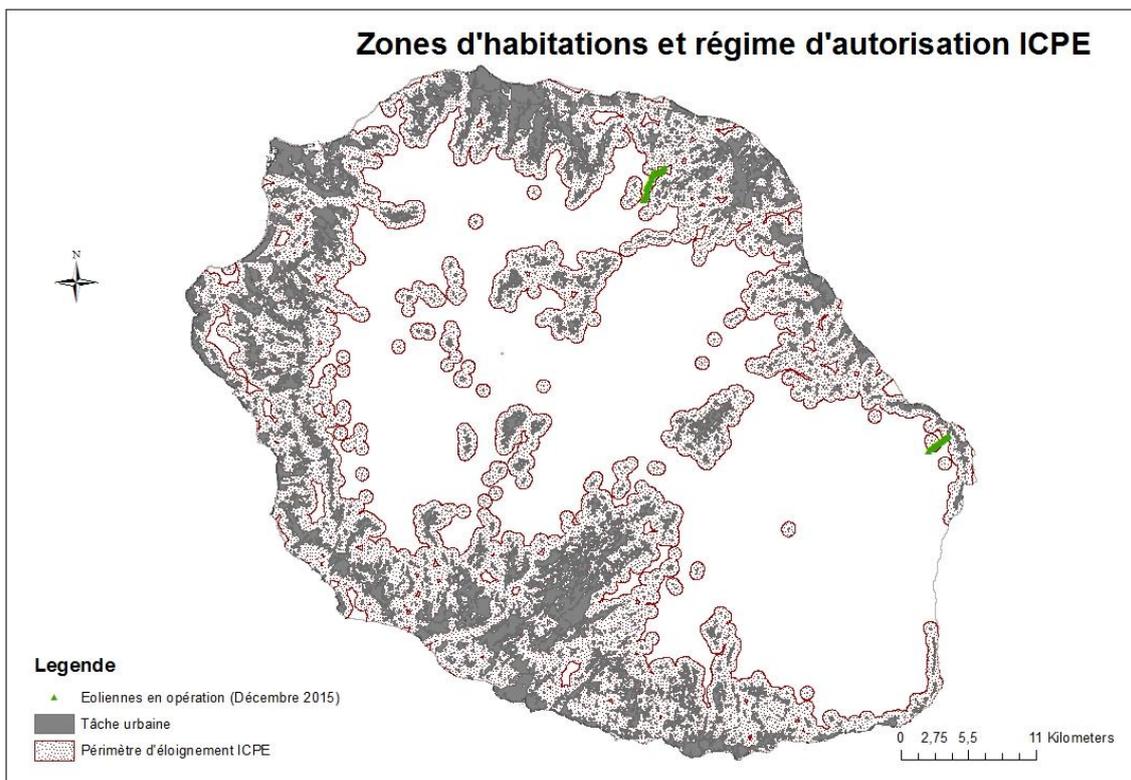
Tableau 27 : Distance d'éloignement minimale d'une éolienne par rapport à l'habitat.

Hauteur de mât (H en mètres)	Distance d'éloignement (en mètres)
$12 \leq H < 20$	40
$20 \leq H < 30$	$5 \times H$
$30 \leq H < 45$	$6 \times H$
$45 < H < 50$	$10 \times H$
$50 \leq H$	500

Lors des débats parlementaires préalables à l'adoption de la loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, un amendement avait été déposé par le

⁶⁸ Arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent soumises au régime d'autorisation.

sénateur Jean Germain afin de porter la distance d'éloignement pour les éoliennes de plus de 50 mètres de hauteur à 1000 mètres⁶⁹. L'amendement a été adopté par le Sénat le 3 mars 2015. En deuxième lecture, l'Assemblée Nationale a décidé de rétablir la distance d'éloignement à 500 mètres⁷⁰. Elle prévoit néanmoins que la distance d'éloignement devra désormais être fixée en tenant compte de l'étude d'impact. Le périmètre d'éloignement de 500 mètres, conforme au régime d'autorisation ICPE est illustré par la Figure 58.



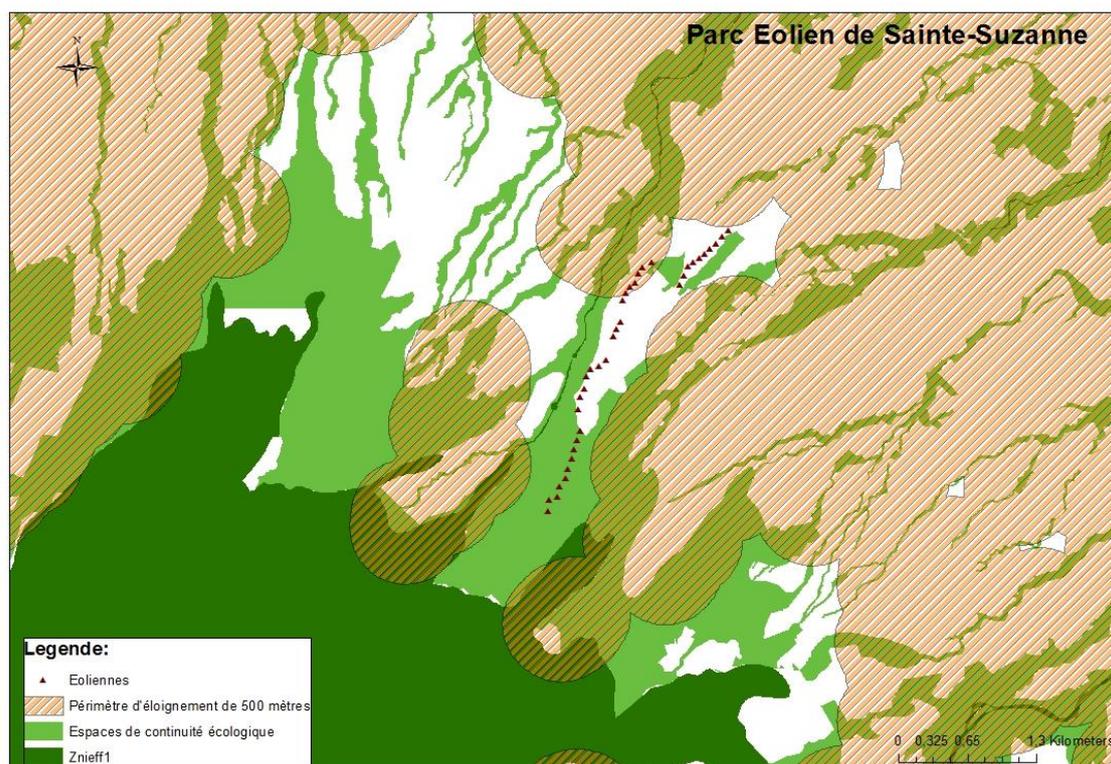
Source : DEAL Réunion, SAR 2011

Figure 58: Cartographie du périmètre d'éloignement défini par le régime d'autorisation ICPE.

Sous le cadre réglementaire actuel, seules 21 des 37 éoliennes de type Vergnet GEV-MP du parc de Sainte-Suzanne illustré à la Figure 59, et seulement 6 des 23 éoliennes du parc de Sainte-Rose illustré à la Figure 60 aurait pu être installée. L'entrée en vigueur du régime ICPE ainsi que l'adoption du SAR durant l'année 2011 ont donc réduit sensiblement l'étendue des zones accessibles à l'éolien à La Réunion, comme l'illustrent les cas des parcs éoliens mis en place à Sainte-Suzanne entre 2006 et 2008 et à Sainte-Rose en 2004.

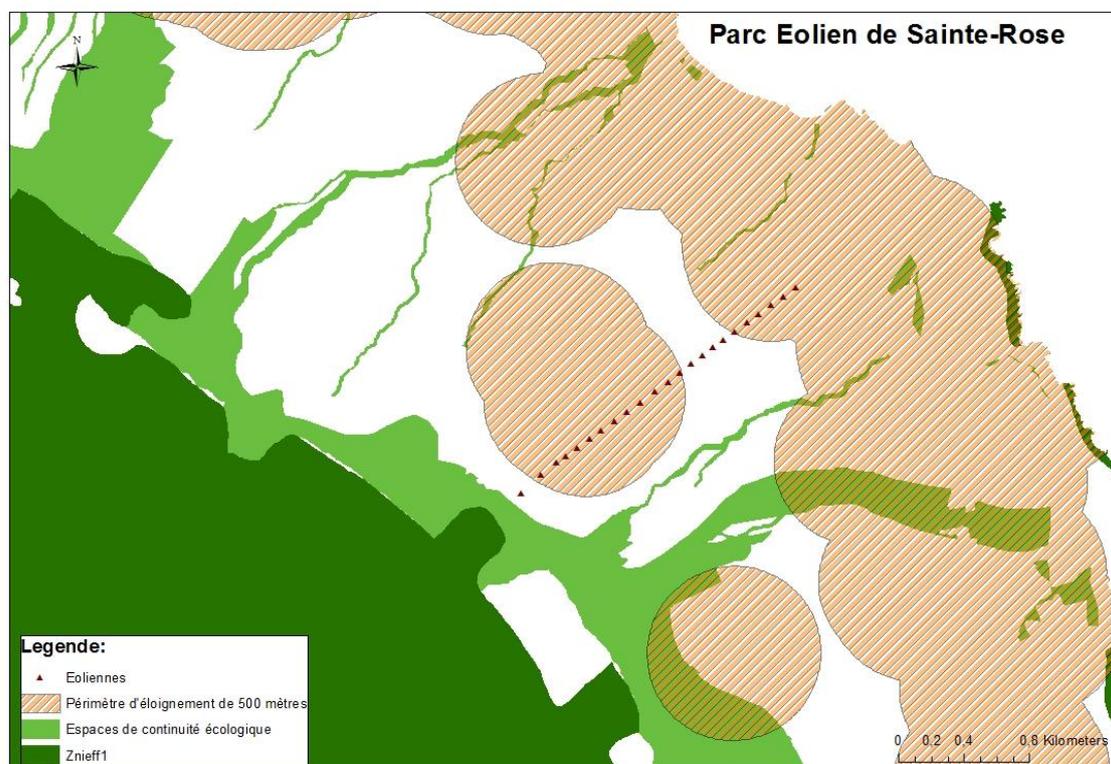
⁶⁹ Amendement 335 modifiant la deuxième phrase du cinquième alinéa de l'article L.553-1 du Code de l'Environnement.

⁷⁰ Article 139 de la loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte : « Elle est au minimum fixée à 500 mètres ».



Source: IGN

Figure 59: Cartographie des zones accessibles du scenario BAU et du parc éolien de Sainte-Suzanne.



Source: IGN

Figure 60: Cartographie des zones accessibles du scenario BAU et du parc éolien de Sainte-Rose.

3.3.2 Servitudes techniques

Afin de prévenir toute entrave à d'autres activités, les servitudes techniques prévoient également des périmètres de restriction autour des zones aéroportuaires, des radars et des forages d'eau potable. Les servitudes de dégagement de l'Aviation Civile assurent l'encadrement des espaces adjacents aux aéroports, tandis que les servitudes radioélectriques règlementent l'environnement immédiat des radars. Les périmètres entourant les forages d'eau potable font également l'objet de restrictions rendant les éoliennes potentiellement incompatibles.

Dans le périmètre immédiat des aérodromes, le Code de l'Aviation Civile introduit, à l'article D.242-7, des restrictions concernant « les constructions, les plantations et les obstacles de toute nature ». Les zones concernées sont définies par les dispositions particulières du Plan de Servitudes Aéronautiques, soumis à approbation ministérielle et annexé aux documents d'urbanisme des communes concernées. Il est opposable et ne peut faire l'objet d'aucune dérogation. Toute construction dont la hauteur est supérieure à 50 mètres au-dessus du niveau du sol est soumise à autorisation des ministres chargés de l'Aviation Civile et des Armées, quand celle-ci peut constituer un obstacle à la navigation aérienne. Autour des aéroports Roland Garros à Sainte Marie et Pierrefonds à St Pierre et au sein des périmètres définis par les servitudes de dégagement de l'Aviation Civile, l'installation d'éoliennes est exclue afin de garantir la sécurité du trafic aérien.

Les obligations d'éloignement aux radars, identiques pour les deux régimes ICPE sont détaillées respectivement au point 2.2 de l'annexe I de l'arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations soumises à déclaration et à l'art.4 de l'arrêté du 26 août 2011 relatifs aux installations soumises à autorisation. Deux radars météorologiques de Météo France sont concernés par ces servitudes, soit le radar à bande S du Colorado à St Denis et le radar de Piton Villiers sur la commune du Tampon. Les radars de l'Armée opérant sur le territoire de l'île sont également concernés par ces servitudes. Ces périmètres d'éloignement couvrent l'ensemble de la superficie de l'île et l'installation d'éoliennes est autorisée avec « *l'accord écrit du ministère en charge de l'aviation civile, de l'établissement public chargé des missions de l'Etat en matière de sécurité météorologique des personnes et des biens* »⁷¹. Les dispositions du Code des Postes et Communications Électroniques garantissent deux types de protection supplémentaires pour les radars : la protection contre les obstacles (servitudes PT1) et la protection contre les perturbations radioélectriques (servitudes PT2). Les articles L.54 à L.56-1 et articles R.21 à R.26 du Code des Postes et des Communications Électroniques imposent une limitation de la hauteur des obstacles dans des zones adjacentes aux centres radioélectriques d'émission ou de réception. Une zone primaire et une zone secondaire de dégagement sont créées au titre de l'article R.21 autour de chaque station émettrice ou réceptrice d'ondes radioélectriques. Entre deux centres assurant une liaison radioélectrique par ondes de fréquence supérieure à 30 mégahertz, une zone de servitudes dite "zone spéciale de dégagement" peut être mise en place.⁷². D'après l'article R.24 du Code des Postes et des

⁷¹ Arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations soumises au régime de déclaration ICPE et arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent soumises au régime d'autorisation.

⁷² Elle est décrite comme suit : « *La largeur d'une zone spéciale de dégagement protégeant une liaison radioélectrique entre deux points fixes comptée perpendiculairement à la projection horizontale du trajet des ondes radioélectriques ne peut excéder 50 mètres de part et d'autre de cette projection. Les constructions et obstacles situés dans la zone de dégagement définie au présent alinéa doivent se trouver à 10 mètres au-*

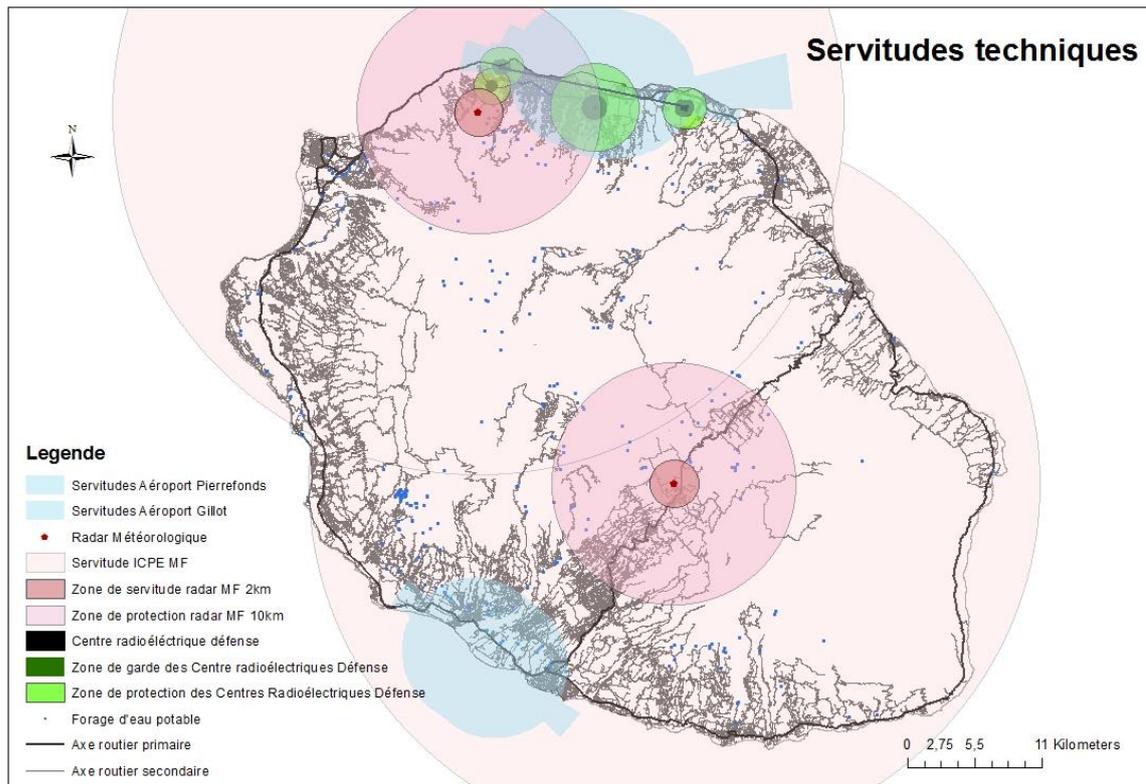
Télécommunications Radioélectriques, dans toute zone primaire, secondaire ou spéciale de dégagement, il est interdit de créer des obstacles fixes ou mobiles dont la partie la plus haute excède une cote fixée par décret. Afin d'éviter toute perturbation radioélectrique, le Code des Postes et Télécommunications Électroniques prévoit la création autour des centres de réceptions radioélectriques d'une zone de protection et d'une zone de garde radioélectrique à l'intérieur de celle-ci. Les dispositions relatives aux servitudes PT1 sont détaillées à l'article R.30 du Code des Postes et Communications Radioélectriques. Au sein d'une zone de protection, il est interdit de produire ou propager des perturbations se plaçant dans la gamme d'ondes radioélectriques reçues par le centre. Au sein de la zone de garde, il est interdit de mettre en service du matériel électrique susceptible de perturber les réceptions radioélectriques du centre. La circulaire du Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables et du Ministère de la Défense du 3 mars 2008, intitulée « Perturbations par les aérogénérateurs du fonctionnement des radars fixes de l'Aviation civile, de la Défense nationale, de Météo France et des ports et navigation maritime et fluviale (PNM) » précise les prescriptions s'appliquant à l'environnement des radars dans le cas d'installation d'éoliennes. La directive reprend les prescriptions de l'Agence Nationale des Fréquences (ANFR) relative au risque de perturbation du fonctionnement des radars fixes par les aérogénérateurs. Les recommandations de l'ANFR portent sur la définition de zones de servitudes, de zones de protection (5 km) et de zones de coordination variant avec le type de radar (5 à 30 km). Les projets éoliens sont exclus des zones de servitudes. Tout projet d'implantation qui serait en co-visibilité avec un radar fera l'objet d'un avis défavorable de la part des opérateurs. Les projets situés dans une zone de coordination font l'objet d'une étude particulière, d'une concertation et ne sont pas automatiquement exclus.

De nombreux projets éoliens étant susceptibles d'être compromis par les distances d'éloignement imposées, et ces zones n'étant pas « *clairement définies par les textes* »⁷³, le législateur a modifié l'article L.553-2 du Code de l'Environnement. Les zones d'éloignement des éoliennes des installations militaires et équipements météorologiques sont désormais fixées par un décret du Conseil d'Etat. Celui-ci n'étant pas encore paru à cette date, le présent travail reprend le plan des servitudes techniques fourni par la DEAL et cartographié dans la Figure 61. Les zones d'exclusion agrègent les zones de servitudes pour les radars à bande S de Météo-France ainsi que les zones de garde et de protection des radars de l'Armée.

Les forages d'alimentation en eau potable sont très sensibles aux pollutions superficielles. La loi du 16 décembre 1984 encadre les périmètres de protection des captages. Deux périmètres de protection sont introduits autour des forages, soit les périmètres de protection immédiate et les périmètres de protection rapprochée. Toute activité est interdite à l'intérieur des périmètres de protection immédiate. Les éoliennes sont donc interdites dans ces périmètres. Les activités dans le périmètre de protection rapprochée font l'objet de prescriptions individualisées pour chaque forage et définies par l'hydrogéologue agréé. Pour les éoliennes, le risque est évalué en fonction de l'épaisseur de la zone comprise entre les fondations et la nappe phréatique.

dessous de la ligne droite joignant les aériens d'émission et de réception, sans cependant que la limitation de hauteur imposée à une construction puisse être inférieure à 25 mètres. »

⁷³ Amendement N°1151, débats sur la loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte.



Source: BD Topo IGN de la Réunion, 2012, DEAL

Figure 61: Cartographie des servitudes techniques.

3.4 Quantification en scénarios des puissances éoliennes installables à La Réunion

La distribution spatiale des zones accessibles est établie conformément à la méthodologie détaillée à la section 2.1 du Chapitre 2 selon une approche en termes de scénarios. Ces scénarios sont établis de manière à identifier l'impact d'une évolution de la politique réglementaire encadrant les enjeux sociaux et les enjeux environnementaux.

Le premier questionnement relève de la prise en compte des enjeux environnementaux liés à l'installation et l'exploitation d'éoliennes à La Réunion. Les zones naturelles les plus sensibles de l'île, regroupées au sein des zones de protection forte, sont protégées par voie légale, à l'exception des ZNIEFF de type 1. Sur ces zones, l'installation d'éoliennes est illégale. Afin de garantir la conservation de la biodiversité locale, la Région a adopté via le SAR une politique de conservation de l'environnement qui implique l'exclusion des éoliennes des zones dites de coupures d'urbanisme, de continuité écologique ainsi que des ZNIEFF de type 1. Ces zones sont intégrées au scénario de référence BAU présenté dans le Tableau 28.

La politique régionale de protection de l'environnement est amenée à être redéfinie à l'horizon 2019, date à laquelle le Schéma Régional de Cohérence Ecologique (SRCE) devra être établi comme un volet du SAR. Les nouvelles zones seront aménagées de manière à protéger les zones niches de la biodiversité ainsi que les couloirs permettant à la faune de se déplacer. Dans ce cadre, le risque que comportent les éoliennes pour la biodiversité locale devra être pris en compte notamment sur la base des travaux scientifiques portant sur l'impact des éoliennes sur les espèces d'oiseaux menacées de La Réunion. Il convient de noter que l'étude d'impact, défini dans la section 3.1, devrait garantir la préservation de ces espèces. Le scénario Biodiversité a été établi de manière à prendre en compte la préservation des espèces de l'avifaune menacées de La Réunion. Il intègre donc aux zones non accessibles du scénario BAU, les sites de nidification des oiseaux marins ainsi que les couloirs de déplacement des pétrels et puffins (zones de priorité 1 et 2 définies dans la section 3.2.3). Les hypothèses du scénario Biodiversité sont présentées dans le Tableau 28.

Les scénarios Eolien B et Eolien C correspondent à une refonte de la politique régionale de protection de l'environnement vis-à-vis du risque éolien. Plusieurs interrogations portent sur l'exclusion des éoliennes des zones dont le SAR assure la préservation à savoir les coupures d'urbanisme, les ZNIEFF de type 1 ainsi que les zones de continuités écologiques. En premier lieu, des coupures d'urbanisme, définies dans la section 3.2.1 sont envisagées afin de limiter les fronts urbains et structurer le littoral. Elles doivent par ailleurs contribuer à « *l'exploitation des énergies renouvelables* »⁷⁴ bien que les éoliennes y soient interdites. Les scénarios Eolien B et C envisagent que ces zones destinées à limiter l'urbanisation soient rendues accessibles à l'exploitation du potentiel éolien. De même, le SAR prévoit un principe d'exception au sein des ZNIEFF de type 1 pour les « *installations (...) de production d'énergie et les infrastructures de transport (...) d'énergie* ». Ce régime d'exception concerne l'implantation d'éoliennes sous réserve que la démonstration soit faite « *qu'aucun autre emplacement ou aucune autre solution technique n'étaient envisageables à un coût supportable pour la*

⁷⁴ Loi Littoral.

collectivité »⁷⁵. Ce principe d'exception est repris au sein des scénarios Eolien B et C et étendu aux espaces de continuité écologique du SAR comme présenté dans le Tableau 28. Le scénario Eolien B permet donc d'évaluer l'impact de la politique régionale de protection de l'environnement mise en place par le SAR sur le potentiel éolien en termes de puissance installable à La Réunion. Le scénario Eolien C prévoit dans le cas de l'éolien, la modification de la politique régionale de protection de l'environnement par une politique visant à prévenir le risque que représente l'exploitation des éoliennes sur l'avifaune menacée de La Réunion. Les zones dites de coupures d'urbanisme, de continuité écologique, et les ZNIEFF de type 1 sont remplacées au sein des zones accessibles du scénario Eolien C par les sites de nidification et les couloirs de déplacement des pétrels et puffins identifiés par la littérature scientifique. Les hypothèses des scénarios Eolien B et Eolien C sont présentées dans le Tableau 28.

Le second questionnement concerne l'impact d'une modification des périmètres d'éloignement des zones d'habitation. Le scénario Habitat envisage une augmentation de ce périmètre tandis que les scénarios Eolien A et D proposent une diminution. L'ampleur de ces variations par rapport au périmètre d'éloignement du scénario BAU est indiquée dans la première ligne du Tableau 28.

Un scénario ultra volontariste rassemble les hypothèses les plus favorables au développement de l'éolien à La Réunion dans le cadre du scénario Eolien D. Par rapport au scénario de référence BAU, les distances d'éloignement des zones à destination d'habitation sont réduites de 100 mètres et les zones dites de coupures d'urbanisme, de continuité écologique ainsi que les ZNIEFF de type 1 sont rendues accessibles à l'exploitation du potentiel éolien.

Le Tableau 28 donne une vue d'ensemble des hypothèses retenues par chacun des sept scénarios retenus, définis sous 1.1.

Tableau 28: Présentation d'ensemble des scénarios réglementaires d'évaluation des zones accessibles à l'exploitation du gisement éolien.

	Scénario BAU	Scénario Biodiversité	Scénario Habitat	Scénario Eolien			
				A	B	C	D
Eloignement de l'habitat (en mètres)	500	500	1000	400	500	500	400
Coupures d'urbanisme	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	NON	NON
Continuité écologique	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	NON	NON
ZNIEFF 1 ⁷⁶	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	NON	NON
Sites de nidification oiseaux marins	NON	OUI	NON	NON	NON	OUI	NON
Zones de priorité 1 et 2	NON	OUI	NON	NON	NON	OUI	NON

⁷⁵ Schéma d'Aménagement Régional de La Réunion, 2011, p.71.

⁷⁶ Zones non comprises dans les autres espaces de protection forte.

Dans les zones de La Réunion rendues accessibles à l'exploitation du gisement éolien par la prise en compte des enjeux environnementaux et sociaux propres à chaque scénario, nous avons calculé la puissance éolienne crête totale que l'on peut installer en utilisant le modèle d'éolienne Vergnet GEV-MP et Gamesa G58, respectivement. Le Tableau 5 présente les résultats obtenus en utilisant la méthodologie de configuration d'un parc d'éoliennes présentée sous 1.1.

Tableau 29: Puissance éolienne crête totale installable à La Réunion selon différents scénarios réglementaires et deux technologies d'éoliennes.

		Puissance crête totale installable			
		Technologie Vergnet GEV-MP (en MW _c)	Variation par rapport au scénario BAU (en %)	Technologie Gamesa G58 (en MW _c)	Variation par rapport au scénario BAU (en %)
BAU		668		533	
Biodiversité		578	-13	454	-15
Habitat		157	-76	123	-77
Eolien	A	921	38	734	38
	B	2135	220	1673	214
	C	1713	156	1333	150
	D	2643	296	2106	295

Quel que soit le scénario réglementaire envisagé, le potentiel éolien crête installable sur les zones accessibles de l'île en utilisant la technologie Vergnet GEV-MP est toujours supérieur à celui que l'on peut installer avec la technologie Gamesa G58, dans une proportion de l'ordre de 20% de la puissance maximale installable. Ce résultat contredit la présomption selon laquelle l'installation d'éoliennes de plus grande envergure, dont la puissance crête et plus importante, permet de bénéficier d'une plus grande capacité de production d'électricité éolienne.

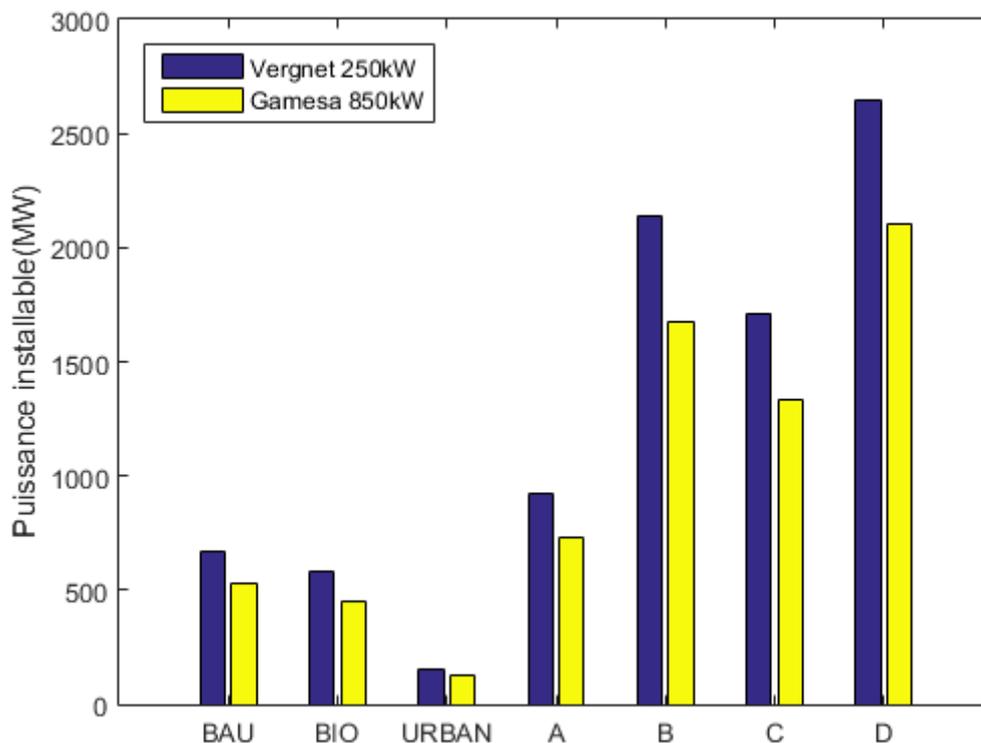


Figure 62: Puissance éolienne crête totale installable à La Réunion selon différents scénarios réglementaires et deux technologies d'éoliennes.

Ce résultat doit toutefois être nuancé pour deux raisons. D'une part, nos évaluations ont été réalisées sans optimiser la configuration du parc éolien à installer sur chaque zone accessible en fonction de la configuration du périmètre de la zone, comme indiqué sous 1.1. Or, les deux exemples de configuration optimisée du parc éolien sur des zones accessibles à Sainte-Suzanne, présentés sous 1.1, ont montré que l'avantage de l'éolienne Vergnet GEV-MO sur la Gamesa G58 n'est pas acquise d'avance, mais dépend de façon cruciale du profil du périmètre de la zone accessible. Ainsi, dans les deux exemples de configuration optimisée à Sainte-Suzanne, l'écart entre la puissance crête installable selon le type de technologie éolienne est de l'ordre de 5%, mais dans un cas en défaveur et dans l'autre en faveur de la technologie Vergnet GEV-MO. Dès lors, si l'on peut affirmer qu'un calcul optimisé de la puissance crête installable sur les zones accessibles de La Réunion conduirait à des résultats supérieurs à ceux présentés dans le Tableau 5, il serait inapproprié d'en conclure que l'exploitation optimale du gisement éolien de l'île est réalisable en utilisant un seul type d'éolienne parmi les deux envisagées.

Un second biais d'évaluation provient des données du système d'information géographique (SIG) et concerne les périmètres d'éloignement des zones d'habitation. Celles-ci sont identifiées à partir de la tâche urbaine de la DEAL au sein de laquelle les bâtiments à usage d'habitation ne sont pas identifiés en tant que tels. Actuellement, aucune couche SIG ne fournit une information exhaustive sur les bâtiments à usage d'habitation, qu'il s'agisse du cadastre ou des données provenant de l'Institut Géographique National (BD Topo de l'IGN). La tâche urbaine a été établie sans prendre en compte le bâti isolé dont l'usage n'est pas identifié. De ce fait, un biais d'évaluation des zones accessibles à l'éolien peut résulter de la

présence de bâtiments destinés à d'autres usages que l'habitat (bâtiments agricoles, industriels, etc.) présents sur la tâche urbaine. Ce biais conduit à surestimer l'étendue des périmètres d'éloignement des zones d'habitation et par là-même à sous-estimer le potentiel éolien crête installable. Inversement, les maisons d'habitation isolées dont l'affectation du bâtiment n'est pas connue, ne figurent pas au sein de la tâche urbaine. Dans la proximité immédiate de celles-ci, l'impossibilité de prendre en compte le périmètre d'éloignement par rapport à ces bâtiments conduit à surévaluer les puissances éoliennes crête installables.

Pour toutes ces raisons, nous considérons que les puissances crête installables par des éoliennes du type Vergnet GEV-MP présentées dans le Tableau 5, représentent une évaluation plutôt conservatrice du gisement éolien exploitable à La Réunion,

Le scénario BAU évalue ce potentiel éolien installable à environ 700 MW_c. En supposant un taux d'utilisation de 10% de cette puissance crête⁷⁷, ce qui correspond à une valeur médiane des taux d'utilisation observés sur les parcs éoliens de Sainte-Rose et Sainte Suzanne pour les années 2007 à 2013⁷⁸, ce potentiel éolien correspond à une production électrique annuelle de l'ordre de 600 GWh. Cette production permettrait de couvrir 20% des besoins d'électricité de l'île et de substituer 30% de l'électricité d'origine fossile produite à La Réunion. Il convient de noter que ces hypothèses ne prennent pas en compte les conditions d'équilibre du réseau de transport de l'électricité.

L'impact d'une modification de la politique réglementaire du scénario BAU sur le potentiel de production d'électricité éolienne est étudié selon deux volets, celui relatif aux enjeux environnementaux puis celui relatif aux enjeux sociaux.

L'impact d'une modification de la politique réglementaire portant sur les enjeux environnementaux du développement de l'éolien a été étudié à travers les scénarios Biodiversité, Eolien B et Eolien C. Afin d'envisager une politique volontariste de protection de l'environnement, les espaces aménagés par le SAR et les zones de nidification et de déplacement des oiseaux marins ont été regroupés au sein du scénario Biodiversité. La politique de préservation des oiseaux marins ne conduit pas à une diminution importante du potentiel éolien installable, les capacités installables dans ce scénario n'étant réduites que de 15% par rapport au scénario BAU. L'impact des zones aménagées par le SAR à des fins de conservation des espaces naturels et de protection des espèces menacées est d'un tout autre ordre. Evalué par le scénario Eolien B, l'impact d'une ouverture des zones de continuité écologique, des ZNIEFF 1 et des coupures d'urbanisation à l'exploitation du gisement éolien correspond à une multiplication par un facteur 3 du potentiel éolien installable par rapport au scénario BAU. La refonte de la politique régionale de l'environnement axée sur une limitation du risque lié à l'exploitation des éoliennes sur l'avifaune menacée de La Réunion est évaluée par le scénario Eolien C. Elle conduit à une augmentation significative des puissances installables semblable à celle obtenue dans le cadre du scénario Eolien B. En effet, avec le scénario Eolien C la puissance éolienne crête installable est multipliée par un facteur 2,5 par rapport à celui du scénario BAU.

L'impact d'une modification de la politique réglementaire portant sur les enjeux sociaux du développement de l'éolien a été étudié via les scénarios Habitat et Eolien A. L'introduction

⁷⁷ Le taux d'utilisation de la puissance crête d'une éolienne, appelé aussi facteur de charge de l'éolienne, représente le quotient de la production annuelle moyenne d'électricité de l'éolienne sur sa production annuelle maximale d'électricité, soit 8760 heures fois la puissance crête de l'installation.

⁷⁸ Pour les années 2007 à 2013 le taux d'utilisation de la puissance éolienne crête installée a varié entre 4,1% et 9,9%, pour le parc éolien de Sainte-Rose, et entre 9% et 16,2%, pour le parc éolien de Sainte Suzanne.

d'une disposition semblable à l'amendement Germain⁷⁹ dans le cadre du scénario Habitat, à savoir un doublement du périmètre d'éloignement des zones d'habitation, entraîne une réduction de 3/4 des puissances éoliennes installables par rapport au scénario BAU. Le doublement des distances d'éloignement des éoliennes des bâtiments à usage d'habitation revient, pour un territoire dont la densité de la population est élevée comme à La Réunion, à rendre quasi inaccessible son potentiel éolien. Le scénario Eolien A favorise en revanche l'installation des éoliennes en réduisant leur distance d'éloignement des habitations de 100 mètres par rapport à celle du scénario BAU de 500 mètres, conformément aux dispositions du régime d'autorisation ICPE⁸⁰ s'appliquant aux éoliennes de hauteur de mât supérieure à 50 mètres. Cette diminution de la distance d'éloignement des éoliennes de l'habitat induit une augmentation significative de l'accessibilité du gisement éolien réunionnais, soit une augmentation d'environ 40% par rapport au scénario BAU.

Le scénario Eolien D traduit la politique la plus volontariste de développement de l'éolien. Le périmètre d'éloignement des éoliennes des zones d'habitation est fixé à 400 mètres et les zones aménagées par le SAR à des fins de protection de l'environnement ne sont pas prises en compte. Les puissances installées sont alors de 3 fois plus importantes que dans le scénario BAU. On notera également que le scénario Eolien D s'apparente au scénario Eolien B pour ce qui concerne la prise en compte des enjeux environnementaux. De ce fait, l'accessibilité au gisement éolien s'accroît dans les mêmes proportions entre les scénarios Eolien D et B qu'entre les scénarios Eolien A et BAU.

⁷⁹ Amendement 335 5ème rectificatif modifiant la deuxième phrase du cinquième alinéa de l'article L.553-1 du Code de l'Environnement.

⁸⁰ Arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent soumises au régime d'autorisation.

3.5 Conclusion

Le législateur a aménagé une place importante à l'étude d'impact quant à l'appréciation des risques que fait porter l'exploitation d'éoliennes aussi bien sur l'environnement que sur la quiétude des zones d'habitation. Par le biais de l'étude d'impact, le législateur permet, en dehors des zones d'exclusions définies par voie légale, d'apprécier pour chaque projet éolien les enjeux environnementaux et sociaux associés. Ceci concerne aussi bien les enjeux de conservation des espaces naturels et des espèces menacées que les distances d'éloignement des zones d'habitation. L'étude d'impact rend par ailleurs effectives les prescriptions introduites par le document d'urbanisme régional, ou SAR, en matière de protection de l'environnement et de la biodiversité.

La politique réglementaire en vigueur décrite par le scénario BAU permet l'installation d'une capacité de production d'électricité éolienne pouvant couvrir 20% des besoins d'électricité de La Réunion. Dans la perspective d'une transition énergétique vers des sources renouvelables d'énergie, on peut ainsi envisager de remplacer 30% de l'électricité d'origine fossile par de l'électricité d'origine éolienne.

Un scénario de politique volontariste de protection de la biodiversité locale a été défini afin de limiter les risques que fait courir l'exploitation de l'énergie éolienne sur l'avifaune locale. Une évaluation de la production électrique sous ce scénario permet de conclure à une faible diminution de la production d'électricité éolienne par rapport au scénario BAU, de l'ordre de 15%.

A contrario, l'impact de la politique régionale mise en place afin de conserver l'environnement a un impact important sur le potentiel éolien exploitable. Sur les zones dites de coupures d'urbanisation, les zones de continuité écologique et les ZNIEFF de type 1, le SAR interdit l'implantation d'éoliennes. Un principe d'exception permettant d'exploiter l'éolien sur ces zones offrirait un potentiel de production d'électricité éolienne 3 fois plus important que sous le scénario BAU. De même, redéfinir la portée de la politique régionale de protection de l'environnement au regard du risque que font porter les éoliennes à l'avifaune locale permet de multiplier par un facteur 2.5 la production d'électricité d'origine éolienne envisageable à La Réunion. Sous ce scénario, la totalité des besoins actuels en électricité de l'île seraient alors couverts par l'utilisation de l'énergie éolienne.

Un doublement des distances d'éloignement des installations éoliennes des zones d'habitation, comme le propose l'amendement Germain, amène à une diminution très importante du potentiel exploitable de l'éolien par rapport au scénario BAU, de l'ordre des $\frac{3}{4}$. Une telle politique réglementaire, dans un contexte de forte densité démographique comme à La Réunion, reviendrait à rendre l'exploitation du gisement éolien de peu d'intérêt. En effet, dans un tel scénario, la production d'électricité éolienne ne pourrait couvrir que 5% des besoins actuels en électricité de l'île. A contrario, une diminution de 20% de la distance d'éloignement (400 mètres) amène à une augmentation de la capacité de production d'électricité éolienne, par rapport à celle du scénario BAU, de presque 40%. Sous cette hypothèse, 1/3 des besoins actuels en l'électricité de La Réunion pourraient être couverts par l'électricité éolienne grâce à la substitution de 40% de son électricité d'origine fossile.

Chapitre 4 Analyse spatiale du potentiel éolien à la Réunion

La surface d'un territoire, même la portion sur laquelle le plus grand intérêt se porte, est de fait échantillonnée par la présence de stations météorologiques éparses et opérationnelles pour une période de temps finie. Il est donc très fortement probable que l'information sur le comportement du vent vienne à manquer ou ne soit pas suffisante à de nombreux sites d'intérêt pour y caractériser le gisement éolien. Afin de pallier à ce déficit d'information, le champ de la géostatistique a mis en évidence après Matheron G. (1969), des techniques statistiques afin de réaliser la prédiction spatiale de variables d'intérêt. Dans notre cas, la prédiction du gisement éolien est nécessaire à la quantification de la production électrique espérée pour les sites identifiés au chapitre II.

En premier lieu, le gisement éolien est caractérisé d'un point de vue théorique, à partir de statistiques exhaustives à même de déterminer entièrement la distribution de la vitesse du vent sur un site. Les variations empiriques de ces statistiques dans l'espace sont étudiées dans la première section afin de mettre en évidence la répartition spatiale du gisement éolien. A partir des résultats de l'analyse descriptive, la forme des modèles est définie au sein de la deuxième section et les modèles sont comparés entre eux sur la base de statistiques de tests permettant de mesurer la qualité des prédictions. La troisième section conclut.

4.1 Analyse descriptive

Le travail est réalisé à partir de la base de données décrite au premier paragraphe. L'information sur le gisement éolien est ensuite réduite à deux statistiques exhaustives, la moyenne et le coefficient de variation empirique de la mesure du vent au point 4.1.2. L'analyse est ensuite menée sur les séries temporelles de vitesses de vent afin d'identifier dans quelle mesure les stations sont statistiquement dépendantes à mesure que les distances entre elles s'accroissent. On évalue également au sein de cette première partie de l'analyse descriptive dans quelle mesure il est possible de rapprocher des stations météorologiques dont les altitudes de mesure ou l'environnement diffèrent. La seconde partie de l'analyse descriptive consiste en l'étude de la relation qu'entretiennent les statistiques exhaustives avec les coordonnées du plan, l'altitude de mesure et la hauteur des obstacles environnants. L'analyse est menée au point 4.1.4 pour la moyenne et au point 4.1.5 pour le coefficient de variation.

4.1.1 Description des données

Les données des stations météorologiques utilisées pour la prédiction spatiale sont résumées au Tableau 30.

Tableau 30 : Localisation géographique des stations météorologiques et durée des campagnes de mesure.

Station météorologique	Longitude (en coordonnées RGR92 UTM zone 4oS)	Latitude (en coordonnées RGR92 UTM zone 4oS)	Altitude station (en m)	Altitude de mesure (en m)	Durée des campagnes de mesure
Paindray	372430,3	7662565,0	212	50/40	04.2007-11.2009
IUT	343418,7	7639412,5	69	10	11.2006-04.2014
Bellevue Bras-Panon	356598,4	7676520,5	480	10	01.2001-31.2010
Pont-Mathurin	331915,5	7647635,5	20	10	01.2001-31.2010
Plaine-des-Palmistes	357415	7662288,5	1032	10	01.2001-31.2010
Le Port	321355,6	7682915,0	9	10	01.2001-31.2010
St-Benoît	366937,9	7670806,5	43	10	01.2001-31.2010
Petite-France	327660,7	7671959,5	1200	10	01.2001-31.2010
Pointe des Trois Bassins	318029,2	7665264,5	5	10	01.2001-31.2010
Pierrefonds-Aéroport	336699,6	7641626,5	21	10	01.2001-31.2010
Le Baril	368492,8	7637663,5	115	10	01.2001-31.2010
Gillot-Aéroport	346961,3	7689045,5	8	10	01.2001-31.2010
Gros Piton Ste-Rose	378455,7	7657563,0	181	10	01.2001-31.2010
Gîte de Bellecombe	363734,1	7653143,5	2245	10	01.2001-31.2010
Plaine des Cafres	351865,9	7654046,0	1560	10	01.2001-31.2010
Cilaos	341274,2	7662233,0	1197	10	01.2001-31.2010
Le Baril 2	368642,9	7637391,5	80	50/40/30	03.2004-07.2004
Bel Air	354170	7688033,5	64	30/20/10	02.2004-07.2004
Dioré	357406,5	7679784,0	212	50/40/30	05.2004- 07.2004

Chapitre 4- Analyse spatiale du potentiel éolien à la Réunion

Langevin	359477,7	7636673,5	200	50/40/30	04.2004- 07.2004
Sambly	356399,9	7685163,0	150	50/40/30	02.2004- 07.2004
Ste Marie la Paix	349365,4	7683475,5	330	50/40/30	03.2004-07.2004
St Paul	325036	7680070,5	170	25/16/10	04.2004- 07.2004
IUT 2 (campagne 2003)	343385,6	7639263,5	65	30/20	03.2004- 07.2004

La période de mesure de 16 des 24 stations météorologiques est supérieure ou égale à l'année. Le seuil annuel constitue la période minimale requise pour que l'évaluation du gisement ne soit pas biaisée du fait des variations saisonnières, mises en évidence pour la station météorologique de Pierrefonds à la 2.3.1. La répartition géographique des stations météorologiques, illustrée à la Figure 63, est hétérogène et davantage de points de mesure sont situés à l'est qu'à l'ouest, zone sur laquelle la ressource est attendue plus faible. La distance moyenne entre chaque station est évaluée à 31 km alors que la distance maximale entre les points extrémités de l'île est évaluée à environ 80 km. Si l'échantillonnage couvre bien l'extension spatiale de l'île, la densité des points de mesure est assez faible. L'écart moyen entre chaque paire de stations reflète l'espacement important existant entre les points de mesure.

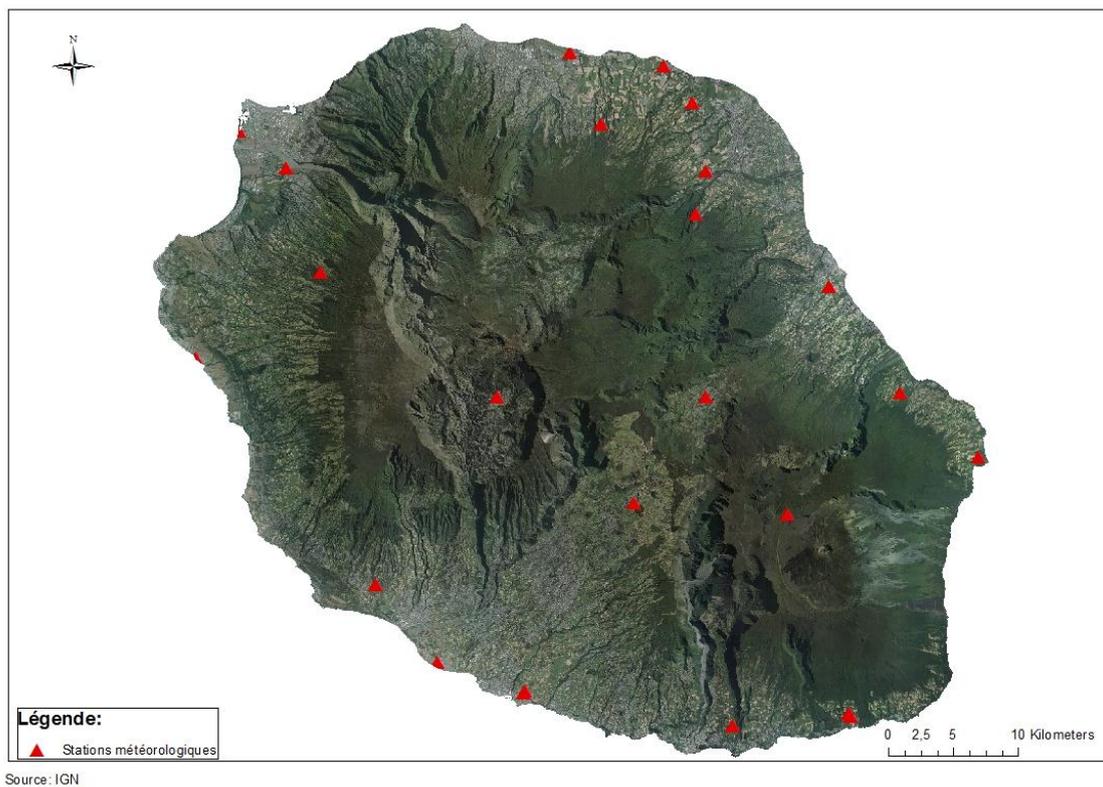


Figure 63: Répartition spatiale des stations météorologiques.

La base de données est complétée par les données de sorties du modèle Météo-France « Arôme ». Le modèle « Arôme » (Application de la recherche à l'opérationnel à méso-échelle) simule numériquement la circulation de l'atmosphère sur un domaine de 500 km de côté centré sur La Réunion par le modèle « Arôme » de Météo-France en résolvant les équations de conservation de masse, de moments et d'énergie pour chaque point d'un méso-maillage de l'île de 2.5 km. Pour chaque point du maillage, illustré à la Figure 64, une climatologie de vent modélisée sur 30 ans conforme aux fréquences climatologiques d'apparition des différents régimes de circulation est disponible auprès de Météo-France. Les

points de données sont en nombre beaucoup plus important, à savoir 368 pour la surface de La Réunion. Le maillage de 2.5 km de côté permet une étude plus fine des variations spatiales de la ressource éolienne que le jeu de données des stations météorologiques.

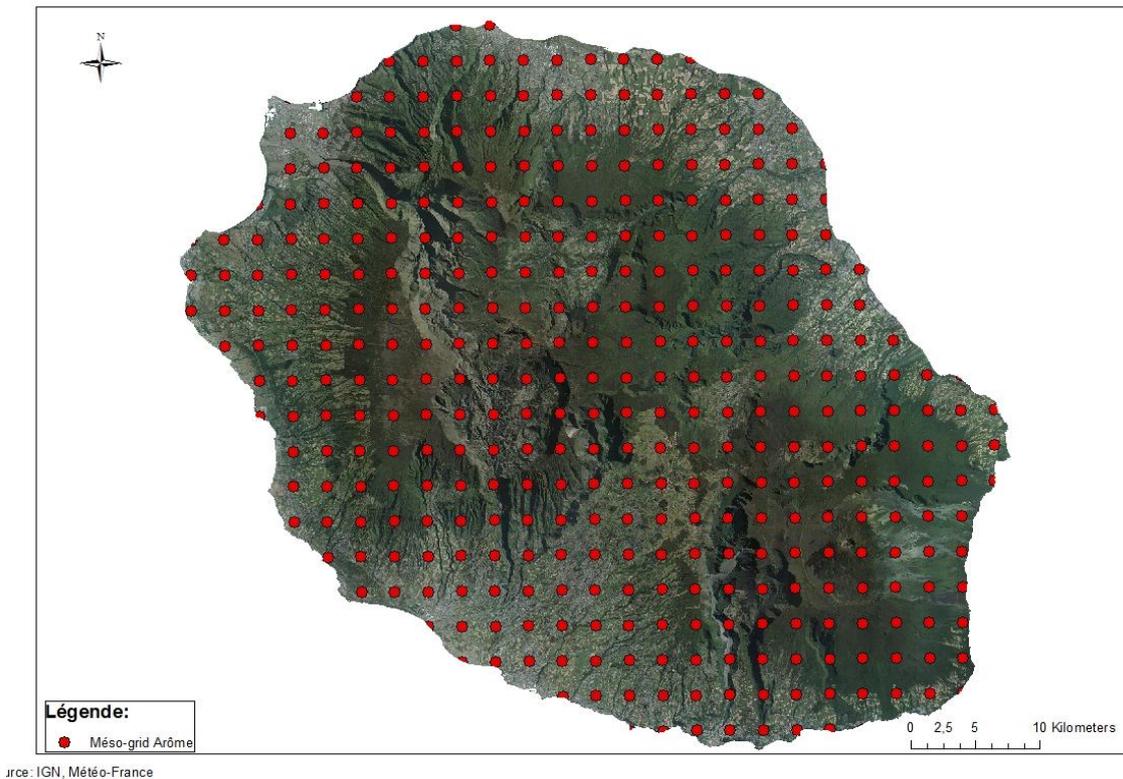


Figure 64: Mésomaillage des points de données du modèle Arôme.

4.1.2 Variables étudiées

La distribution à deux paramètres de Weibull, modèle couramment employé dans les études empiriques de la vitesse du vent, a été étudiée de manière extensive dans le chapitre I auquel nous renvoyons le lecteur intéressé par ces développements. Le modèle de Weibull présente le défaut d'un manque de flexibilité et la mixture de distributions de Weibull ajustées aux histogrammes conditionnels à la direction du vent permettait d'obtenir une qualité d'ajustement supérieure. La mixture présente néanmoins l'inconvénient d'être déterminée par un nombre de paramètres bien supérieur, en l'occurrence 36 ici et l'évolution spatiale des paramètres de la mixture peut être particulièrement complexe. Le déficit de flexibilité du modèle de Weibull observable dans les cas de distribution bimodale comme la distribution des vitesses de vent de la station météorologique de Pierrefonds semblent conduire à une sous-estimation de la production espérée, comme on a pu l'observer lors de l'évaluation effectuée à la section 2.6 du Chapitre 2, ce qui représente une évaluation prudentielle de cette production. Le modèle de Weibull à deux paramètres ajusté à l'histogramme de la distribution empirique marginale de la vitesse du vent a donc été retenu pour évaluer les productions électriques espérées.

La distribution de Weibull est entièrement déterminée par le paramètre d'échelle et le paramètre de forme dont l'influence a été discutée à la section 2.3.2 du Chapitre 2. Pour analyser l'évolution spatiale de cette distribution, il était nécessaire de trouver des statistiques de cette distribution contenant l'information nécessaire et suffisante à l'identification de ces

deux paramètres.

Le coefficient de variation de cette distribution étant entièrement déterminé par le paramètre de forme k , comme il ressort de son expression analytique :

$$c_v = \frac{\mu_2^{1/2}}{m_1} = \frac{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]^{1/2}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}, \quad (63)$$

il s'ensuit qu'il est possible d'estimer ce paramètre par la méthode des moments, consistant à égaliser l'expression analytique (63) au coefficient de variation de la distribution empirique de la vitesse du vent s/\bar{v} , où s désigne l'écart-type et \bar{v} la moyenne de la distribution empirique de la vitesse du vent. En effet, cette méthode fournit une équation par rapport au paramètre k dont la solution numérique représente l'estimation est \hat{k} par la méthode des moments du paramètre de forme de la distribution de Weibull.

Quant au paramètre d'échelle c , il peut être estimé par la même démarche en égalisant l'expression analytique de la moyenne de la distribution de Weibull $m_1 = c\Gamma(1 + k^{-1})$ évaluée d'après l'estimation précédente du paramètre de forme, soit $c\Gamma(1 + \hat{k}^{-1})$, à la moyenne de la distribution empirique de la vitesse du vent \bar{v} , ce qui fournit l'estimateur suivant pour le paramètre d'échelle :

$$\hat{c} = \bar{v}/\Gamma(1 + \hat{k}^{-1}). \quad (64)$$

En définitive, les paramètres de forme et d'échelle de la distribution de Weibull peuvent être estimés à partir des valeurs de la moyenne et du coefficient de variation de la distribution empirique de la vitesse du vent. Nous avons donc choisi d'analyser l'évolution spatiale de la valeur de ces deux statistiques de la distribution empirique de la vitesse du vent desquelles on peut dériver par la méthode des moments les estimations des paramètres de forme et d'échelle de la distribution de Weibull nécessaires à l'évaluation de la production espérée d'électricité. Cela permet de faire reposer l'analyse descriptive des variations spatiales sur deux paramètres, la moyenne et le coefficient de variation, dont l'interprétation est familière.

4.1.3 Analyse descriptive des corrélations entre les séries temporelles des stations météorologiques

Du fait de la topographie complexe de La Réunion, île volcanique jeune, il était a priori difficile de savoir dans quelle mesure les données observables pouvaient permettre de prédire le gisement éolien dans des zones où les mesures étaient absentes. Nous avons donc caractérisé les stations météorologiques selon leur localisation géographique afin d'évaluer si la distance euclidienne séparant les points de mesure était un bon indicateur du degré de proximité statistique de deux stations météorologiques. La distance entre les stations météorologiques constitue un facteur explicatif classique de la variation spatiale de la vitesse du vent et des surfaces dont le relief n'est pas accidenté, il est raisonnable d'observer un lien statistique plus important entre des stations situées dans un environnement immédiat. L'analyse est présentée au point 4.1.3.1. Dans le cas de topographie complexe, Palomino (1995) a mis en évidence l'importance des différences d'altimétrie pour rendre compte du degré de proximité statistique de deux stations météorologiques mesuré à partir du coefficient de corrélation entre les séries temporelles des vitesses de vent. Dans le cas de La Réunion, l'effet de l'altitude a été étudié au point 4.1.3.2. Nous avons également tenté de déterminer si deux stations météorologiques dont les caractéristiques de l'environnement immédiat, à savoir

la hauteur des obstacles les entourant, pouvaient être rapprochées. Le lien de la rugosité aux corrélations des vitesses de vent est étudié au point 4.1.3.3.

4.1.3.1 Distance

On peut isoler un groupe de corrélations élevées, supérieures à 0.65 qui permettent de rapprocher statistiquement les séries temporelles de la vitesse du vent des stations météorologiques. L'ensemble des stations concernées se situent à une distance d'éloignement inférieure à 20 km. Deux sous groupes de stations se distinguent par leur situation géographique, le premier correspond à des stations situées au nord-est de l'île à Sainte Marie, Sainte Suzanne et Bras Panon ; le second correspond à des stations situées au sud ouest de l'île à Saint Pierre et Etang Salé. Ces zones sont situées sur le littoral et dégagées de l'influence du relief. Une tendance décroissante se dégage et la valeur des corrélations diminuent avec la distance croissante. Au-delà de 20 km d'éloignement aucune tendance claire ne semble plus se manifester comme l'illustre la Figure 65.

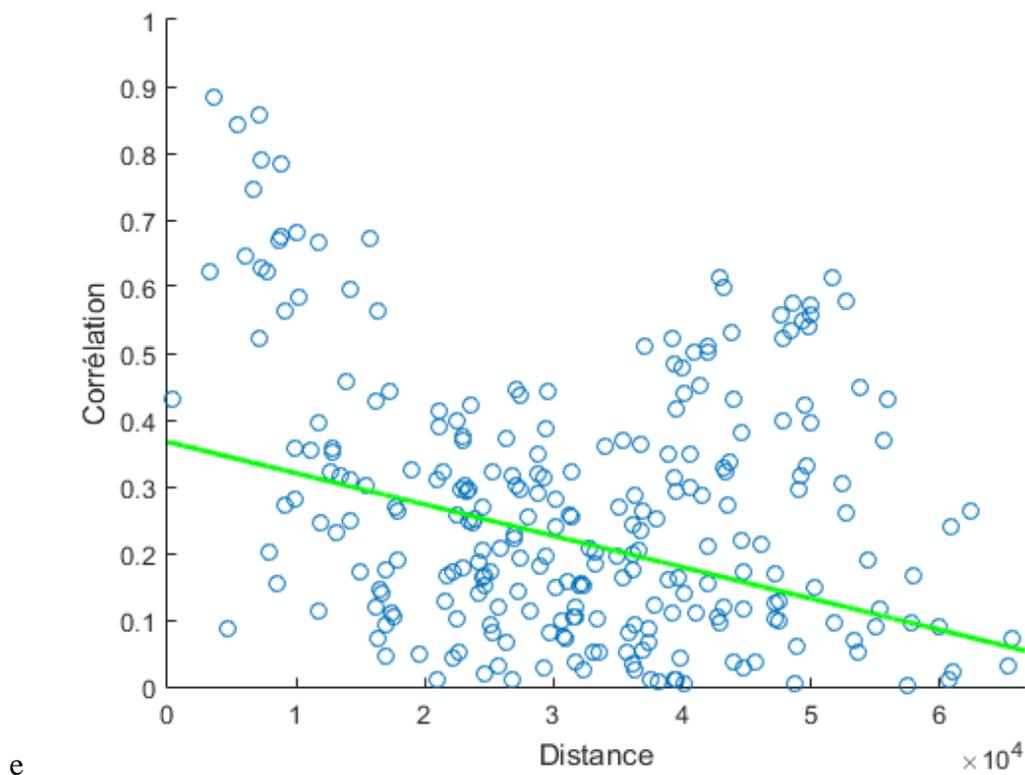


Figure 65: Corrélation des vitesses de vent en fonction de la distance séparant les stations de mesure.

Afin de rendre la lecture de cette tendance plus aisée, les stations météorologiques ont été distinguées selon leur situation géographique. Le premier sous-échantillon de stations appartient au domaine de la côte au vent, côte est de l'île ; et le second appartient au domaine sous le vent, situé sur la côte ouest de l'île. La répartition des stations selon les deux groupes est détaillée au Tableau 31.

Tableau 31: Répartition des stations météorologiques selon le découpage côte sous le vent/côte au vent.

Station météorologique	
Côte sous le vent	Côte au vent
IUT	Paindray
Pont-Mathurin	Bellevue Bras-Panon
Le Port	Plaine-des-Palmistes
Petite-France	St-Benoît
Pointe des Trois Bassins	
Pierrefonds-Aéroport	Gillot-Aéroport
Plaine des Cafres	Gros Piton Ste-Rose
Cilaos	Gîte de Bellecombe
Le Baril	Bel Air
Le Baril 2	Dioré
Langevin	Sambly
IUT 2 (campagne 2003)	Ste Marie la Paix
	St Paul

La partage de l'échantillon de stations en deux groupes par rapport à leur situation relative au relief des cirques de La Réunion a permis de mettre en évidence une relation plus claire entre les corrélations et la distance séparant les stations météorologiques. La corrélation entre stations situées sur la côte au vent présente une tendance décroissante en fonction de la distance jusqu'à 30 km d'éloignement, comme l'illustre la figure de droite de la Figure 66. Ce résultat confirme bien l'intuition a priori selon laquelle des stations situées dans un même voisinage sont exposées à des régimes de vents comparables, alors que des stations davantage éloignées sont sous l'influence de régimes de vents qu'il est plus difficile de rapprocher. Cette tendance est confirmée par la représentation graphique des corrélations entre les stations du second groupe situées sur la côte sous le vent. On observe pour les stations de ce groupe une tendance décroissante des corrélations sur l'ensemble du domaine la côte sous le vent, à savoir environ 65km.

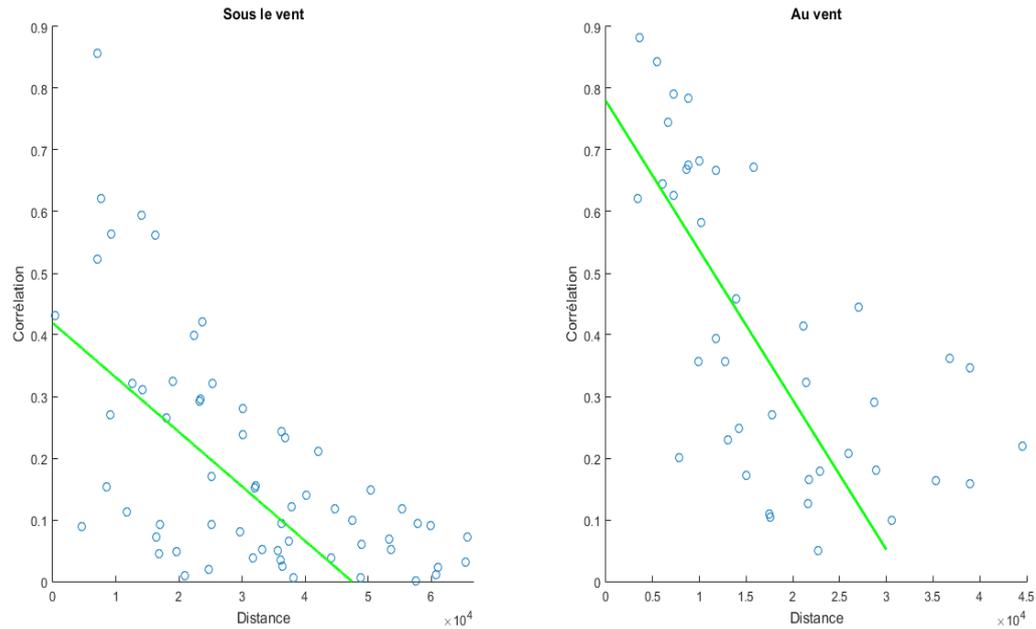


Figure 66 : Corrélation des vitesses de vent en fonction de la distance séparant les stations de mesure selon leur répartition spatiale.

4.1.3.2 Elévation

La différence d'élévation est calculée comme la différence d'altimétrie entre les points de mesures de chaque paire de stations. La différence d'élévation est donc indépendante de la hauteur des mâts de mesure et mesurée comme la différence des hauteurs de chaque station par rapport au niveau de la mer. Les corrélations des vitesses de vent sont représentées en fonction de la différence d'élévation des stations météorologiques à la Figure 67. La corrélation de la vitesse du vent ne semble pas être liée de façon significative avec la différence d'altitude au sein de l'échantillon de stations météorologiques complet. Une légère tendance décroissante apparaît mais l'ajustement est très mauvais.

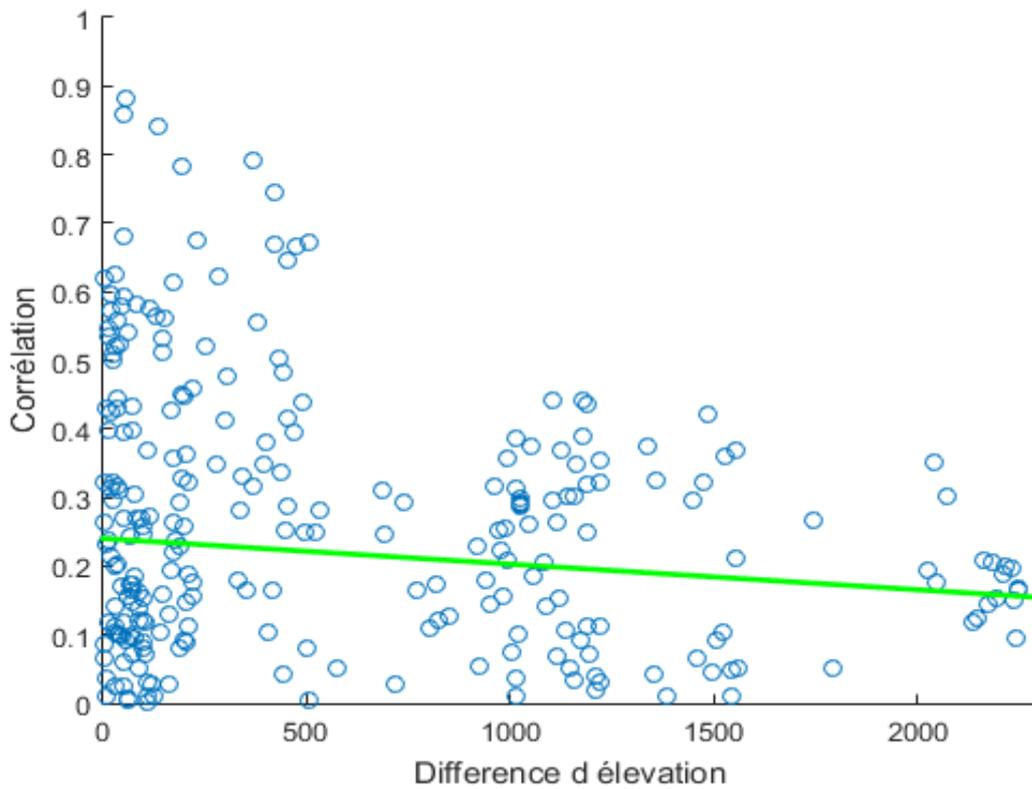


Figure 67 : Corrélation des vitesses de vent en fonction de la différence d'élévation entre les stations de mesure.

La distinction des stations météorologiques selon leur répartition au sein du domaine de la côte sous le vent et de la côte au vent ne permet pas de dégager de tendance plus évidente comme l'illustre la Figure 68. La différence d'altitude n'apparaît pas à ce niveau d'analyse comme un facteur explicatif majeur de la variation des corrélations des vitesses de vent. La tendance décroissante des corrélations avec l'altitude confirme néanmoins l'intuition a priori selon laquelle, pour un environnement à la topographie complexe comme La Réunion, les stations à des altitudes similaires sont sujettes à des régimes de vent davantage comparables que celles dont la situation topographique est très distincte.

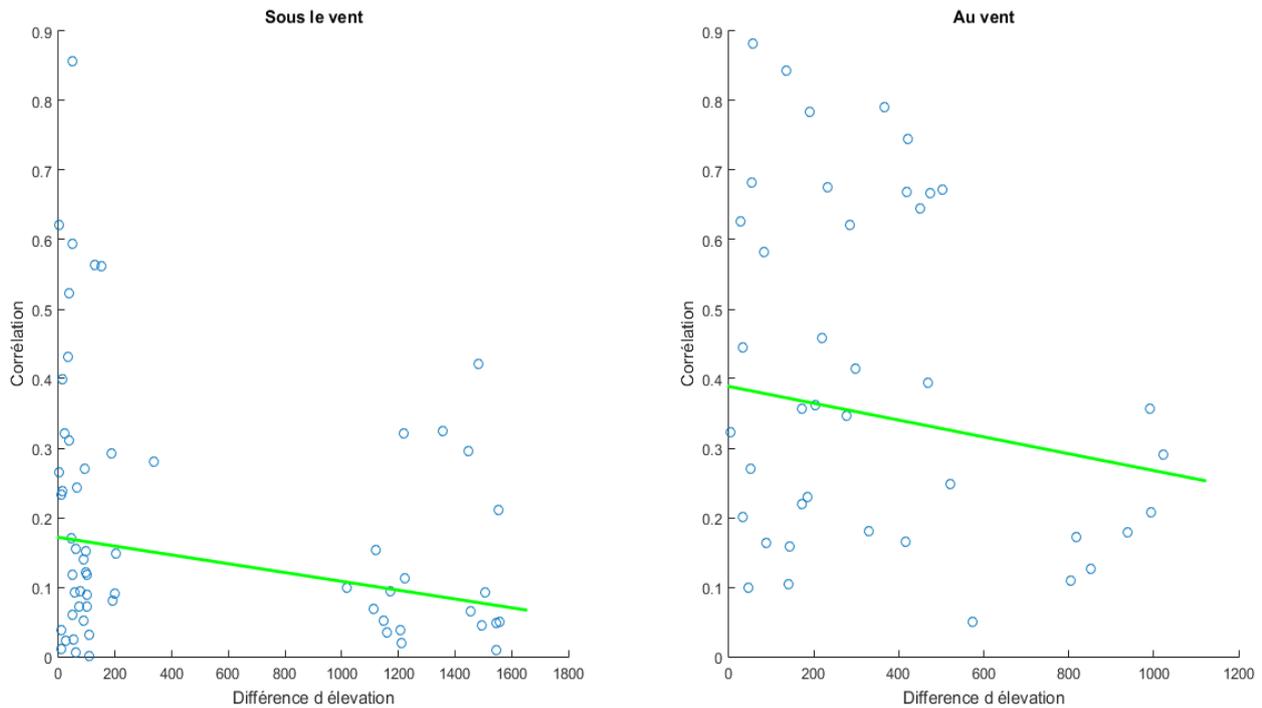


Figure 68: Corrélation des vitesses de vent en fonction de la différence d'élévation entre les stations de mesure selon leur répartition spatiale.

4.1.3.3 Rugosité

La rugosité représente la hauteur moyenne des obstacles entourant le mât de mesure sur une surface carrée de 5 mètres de côté centrée sur le point de mesure. La méthode de calcul de ce paramètre est détaillée à la section 2.4.6 du Chapitre 2 auquel le lecteur intéressé est renvoyé. L'étude du lien entre la corrélation de la vitesse du vent et la rugosité fait ressortir une tendance décroissante des corrélations de la vitesse du vent avec la différence de rugosité. La dispersion autour de cette tendance est toutefois très importante comme l'illustre la Figure 69.

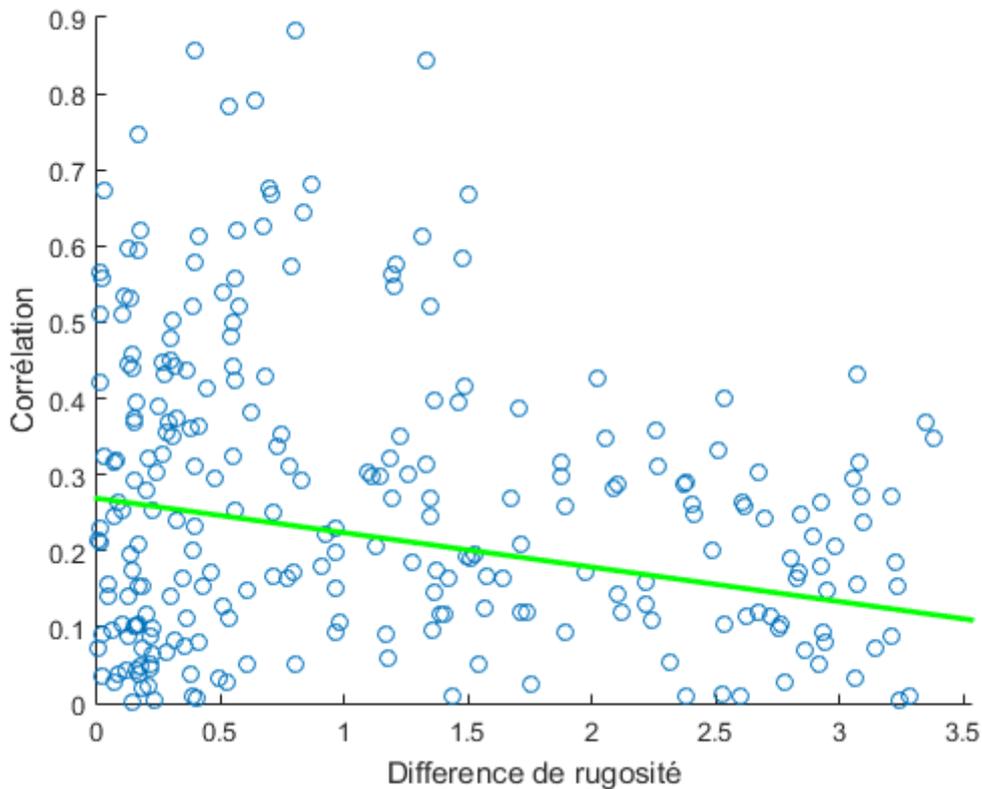


Figure 69: Corrélation des vitesses de vent en fonction de la différence de rugosité entre les stations de mesure.

Isoler les stations du groupe au vent permet de souligner la tendance décroissante observée au sein de l'échantillon complet comme l'illustre la Figure 70. Les stations de la côte au vent, dont l'exposition au régime de vent d'alizés est meilleure, semblent davantage influencées par la nature des obstacles au sol. Les stations situées dans des environnements similaires semblent comparables alors que les stations situées dans des environnements distincts semblent trop perturbées par les obstacles au sol pour pouvoir être rapprochées. La dispersion autour de la tendance demeure néanmoins importante. Au sein du domaine de la côte sous le vent, la nature des obstacles au sol n'apporte pas d'information pertinente sur la corrélation entre les vitesses de vent des stations météorologiques comme l'illustre la Figure 70.

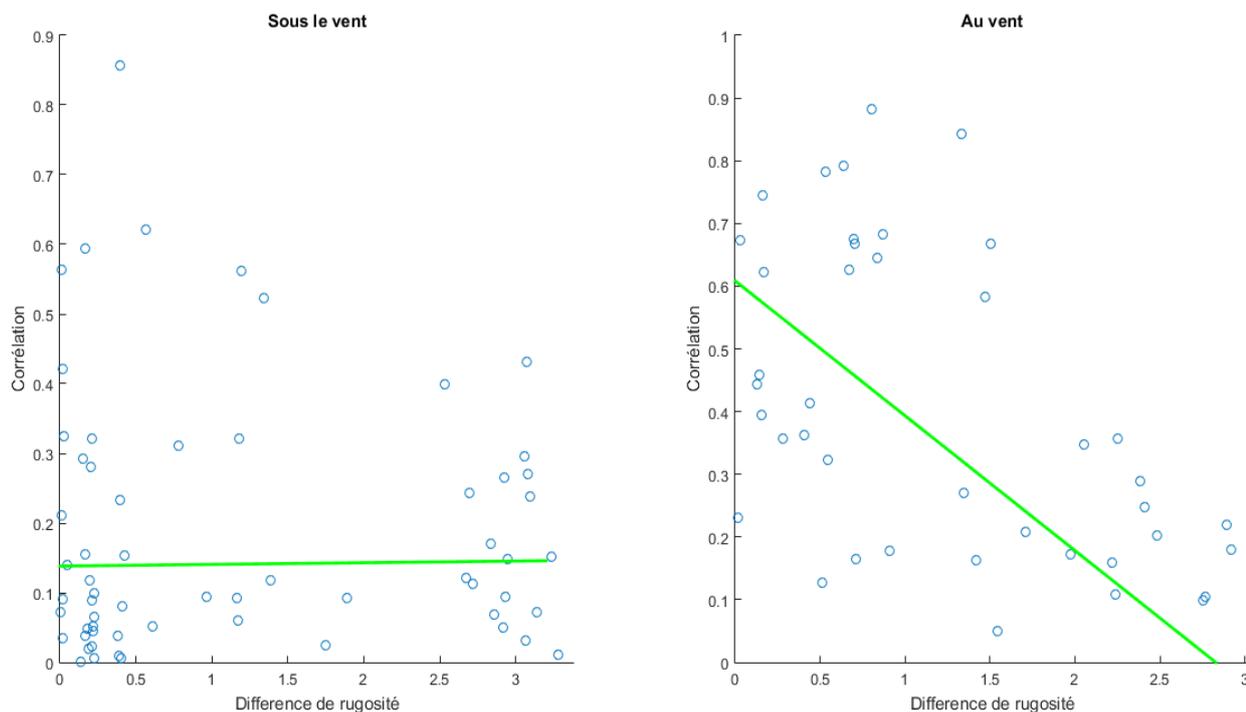


Figure 70: Corrélation des vitesses de vent en fonction de la différence de rugosité entre les stations de mesure selon leur répartition spatiale.

4.1.3.4 Conclusions de l'analyse des corrélations

L'analyse descriptive des corrélations entre les vitesses de vent des stations météorologiques a permis d'observer la présence d'un rayon d'influence à une distance inférieure à 15 km pour le domaine de la côte au vent. La distance apparaît également être un bon indicateur du degré de proximité statistique des mesures de vitesse de vent effectuées sur deux stations météorologiques. L'altitude apparaît être une variable moins évidente du lien statistique entre les mesures des vitesses de vent de deux stations météorologiques. Une tendance décroissante se dégage pour la côte au vent mais la variabilité est très importante. Au sein du domaine de la côte sous le vent, l'altitude ne permet pas de rapprocher deux stations météorologiques. Il en est de même de la rugosité pour le domaine de la côte sous le vent pour laquelle aucun lien clair ne se dégage entre l'évolution de la corrélation et de la différence de rugosité. Les résultats sont a contrario bien meilleurs pour la côte au vent et la rugosité est un bon indicateur du lien statistique entre deux stations météorologiques.

En définitive, sur l'ensemble du territoire seule la distance entre deux stations apparaît être un bon indicateur de la proximité statistique, mesurée à partir du coefficient de corrélation entre les vitesses de vent des stations météorologiques.

4.1.4 Analyse descriptive de la moyenne

L'étude des corrélations spatiales a permis de faire ressortir la distance séparant deux stations météorologiques comme un bon indicateur de la corrélation entre les vitesses de vent mesurées. L'analyse descriptive se poursuit dès lors par l'étude de la variation de la vitesse moyenne en fonction de l'axe ouest-est de La Réunion au point 4.1.4.1 puis en fonction de l'axe sud-nord au point 4.1.4.2. L'effet de l'altitude et l'effet de la rugosité sont étudiés

respectivement au point 4.1.4.3 et au point 4.1.4.4. Les données des stations météorologiques et les données du modèle Arôme sont utilisées au sein de cette section.

4.1.4.1 Longitude

Les données de longitude permettent de localiser les points de la surface du globe sur un axe ouest-est. La longitude peut également être traduite au sein d'un système de coordonnées cartésiennes par le biais d'une projection. Le système de coordonnées utilisé à La Réunion est le système de coordonnées RGR92-40S et les valeurs de longitude sont exprimées croissantes en tendant vers l'est au sein de ce référentiel.

Les vitesses moyennes du vent tendent à s'accroître dans la direction ouest-est. Cette tendance est confirmée pour l'échantillon des données des stations météorologiques et pour celui des données Arôme, comme l'illustre la Figure 71. Les moyennes des deux sous échantillons de la côte au vent et de la couche sous le vent reflètent cette tendance. La moyenne est plus élevée pour la côte au vent (4.86 m.s^{-1}) que pour la côte sous le vent (3.69 m.s^{-1}). La topographie de l'île induit ainsi globalement une meilleure circulation des vents dominants à l'est sur la côte au vent qu'à l'ouest sur la côte sous le vent. La dispersion est par ailleurs très importante autour des tendances identifiées indiquant l'influence d'autres facteurs.

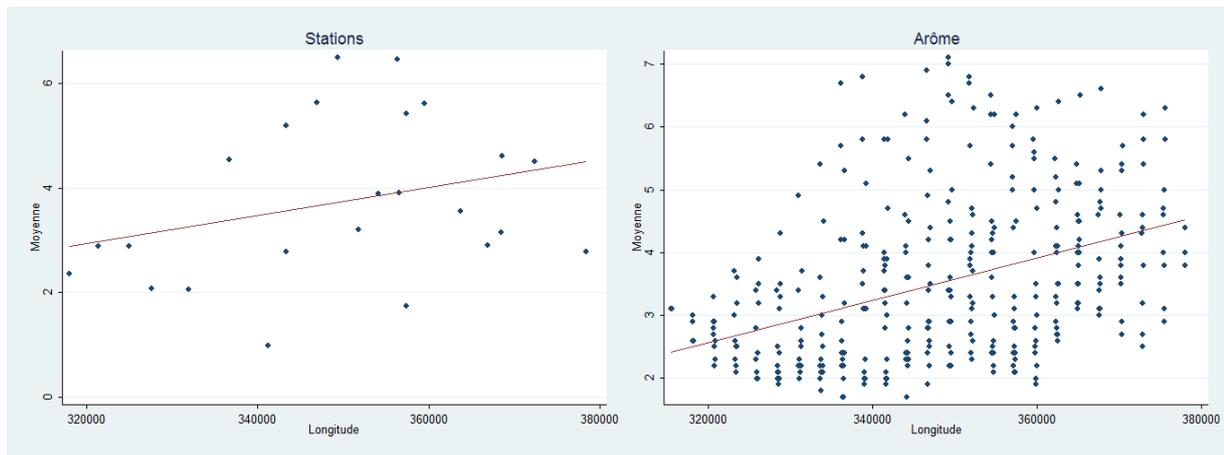


Figure 71: Relation entre la vitesse moyenne du vent et la longitude.

Le découpage de l'échantillon selon la répartition des points de données Arôme situés sur la côte au vent et la côte sous le vent ne correspond pas exactement à un découpage ouest/est de l'île. En effet, si l'île est approchée à partir d'une ellipse, son axe majeur traverse l'île du sud-est au nord-ouest et La Réunion apparaît orientée à l'oblique par rapport au nord. L'échelle des graphiques de la Figure 72 confirme bien que les points situés sur la côte au vent possèdent des moyennes de vents plus élevées que les stations situées sur la côte sous le vent. Par ailleurs, la tendance est à nouveau bien croissante de l'ouest vers l'est pour l'échantillon de la côte sous le vent. En revanche, la tendance est décroissante de l'ouest vers l'est pour le sous-échantillon de la côte au vent, ce qui contredit l'intuition a priori de moyennes de vent plus élevées à l'est. On observe également sur la Figure 72 que la dispersion autour de la tendance pour l'échantillon de la côte sous le vent augmente en allant vers l'est alors que les valeurs des moyennes sont bien plus concentrées autour de la tendance à l'extrémité ouest de l'île.

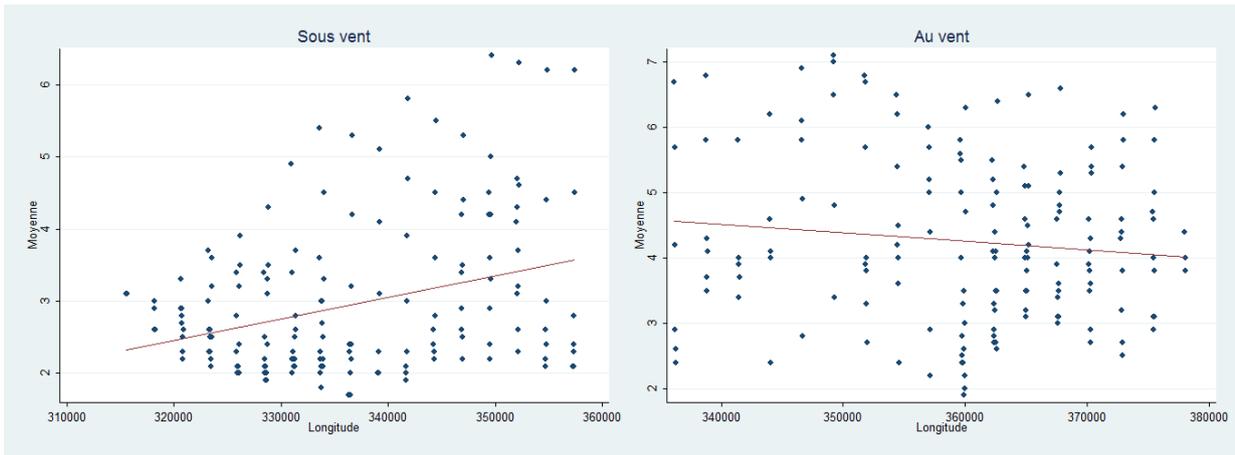


Figure 72: Relation entre la vitesse moyenne du vent et la longitude selon le découpage côte sous le vent et côte au vent.

4.1.4.2 Latitude

Les données de latitude exprimées au sein du système de coordonnées RGR92-40S sont croissantes en tendant vers le nord. On observe une relation quadratique entre la vitesse moyenne et la latitude, comme l'illustre la Figure 73. Les valeurs de vitesses moyennes les plus élevées correspondent à des stations situées aux extrémités nord et sud de l'île. Les valeurs des vitesses de vent décroissent à mesure que l'on tend vers le centre de l'île sur l'axe sud-nord. On constate également que la variabilité autour de la tendance suit une tendance quadratique identique et que la variabilité apparaît plus importante aux points centraux de l'axe sud-nord qu'aux extrémités.

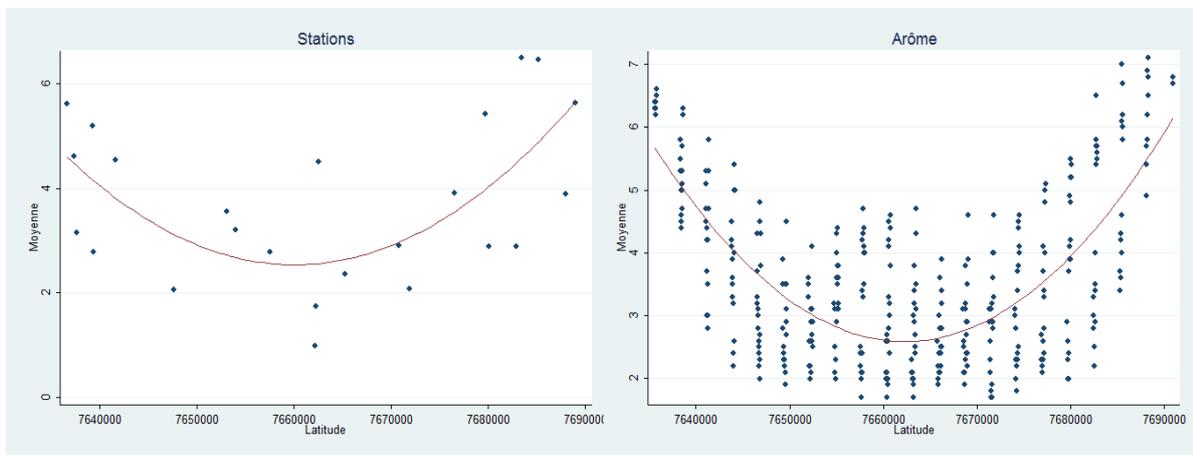


Figure 73: Relation entre la vitesse moyenne du vent et la latitude.

Le découpage géographique de l'échantillon selon la répartition des points entre la côte au vent et la côte sous le vent permet de réduire la variabilité de la moyenne autour de la tendance quadratique, notamment pour l'échantillon sous le vent comme l'illustre la Figure 74. Par ailleurs, on observe que les points de la côte sous le vent situés au sud l'île présentent des moyennes plus élevées que ceux situés au nord. Ceci s'explique par le fait que sur la côte sous le vent, les zones situées au nord sont faiblement exposées au régime de vents des alizées. A contrario, les moyennes de l'échantillon de la côte au vent possèdent des valeurs élevées à la fois au sud et au nord de l'île, comme l'illustre la Figure 74.

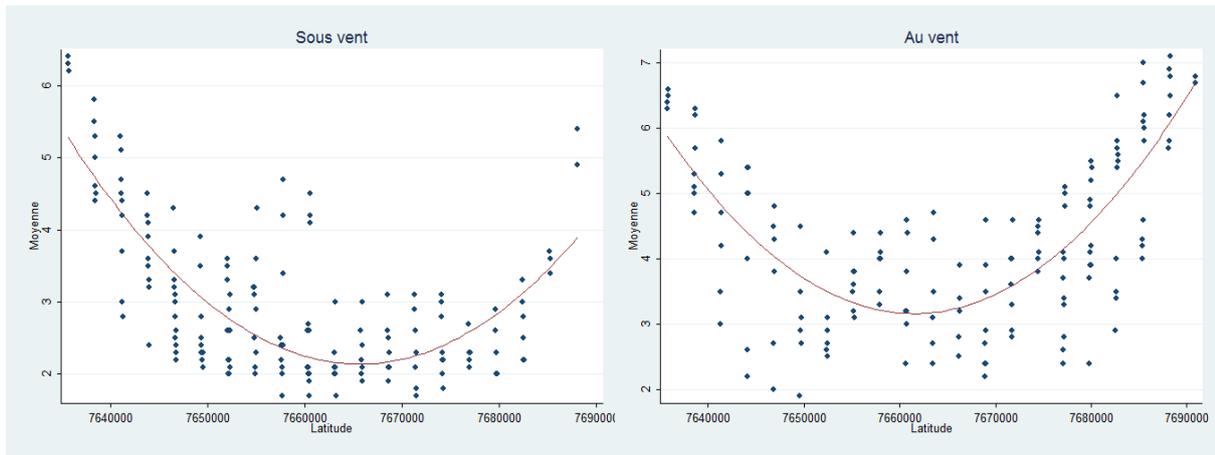


Figure 74: Relation entre la vitesse moyenne du vent et la latitude selon le découpage côte sous le vent et côte au vent.

La relation entre la vitesse moyenne et la latitude étant clairement identifiée comme quadratique, nous avons ensuite examiné si elle permettait de réduire la variabilité présente autour des tendances identifiées pour la longitude à la Figure 72. Nous avons donc procédé à une régression de la moyenne de la vitesse du vent sur un polynôme quadratique de la latitude. La relation entre les résidus de cette régression et la longitude est illustrée à la Figure 75.

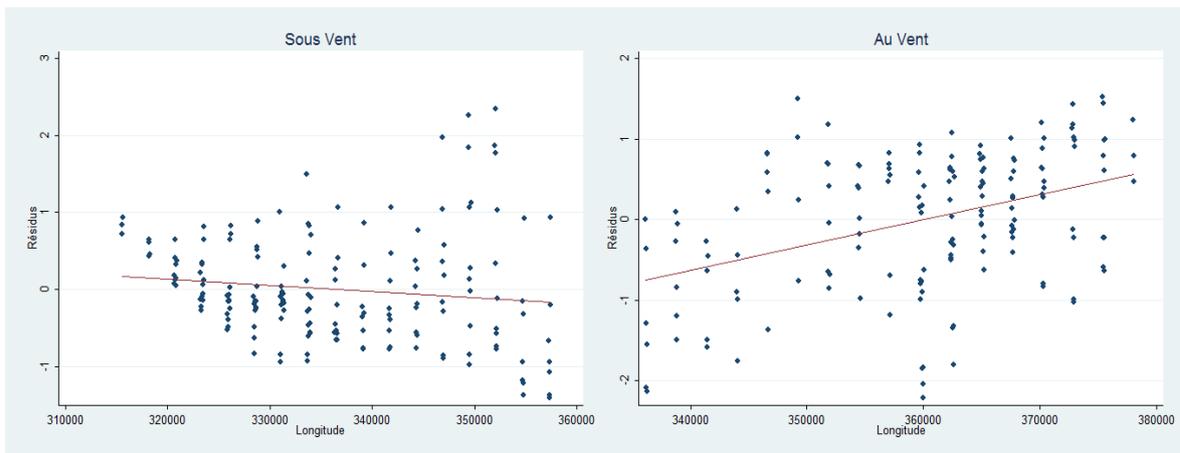


Figure 75 : Relation entre la moyenne de la vitesse du vent (résidus) et la longitude.

La variabilité autour de la tendance a significativement diminué pour l'échantillon au vent. Le signe de la tendance s'est inversé par rapport à la Figure 72 et la tendance est désormais croissante traduisant une croissante des moyennes vers l'est. En revanche la variabilité n'a pas significativement décré pour l'échantillon sous le vent et la tendance est désormais décroissante ce qu'il conviendra d'étudier au moment de la modélisation.

4.1.4.3 Elévation

Les données d'élévation correspondent aux mesures d'altimétrie réalisée par l'IGN à La Réunion. On observe une tendance décroissante des vitesses moyennes du vent avec l'altitude. Intuitivement nous nous attendions à ce que les zones situées dans les hauteurs de l'île soient davantage sujettes à l'effet du relief. Par conséquent, elles devraient être moins exposées aux vents dominants que les zones situées sur le littoral. Une grande variabilité est

toutefois présente sur les zones situées proche du littoral à faible altitude.

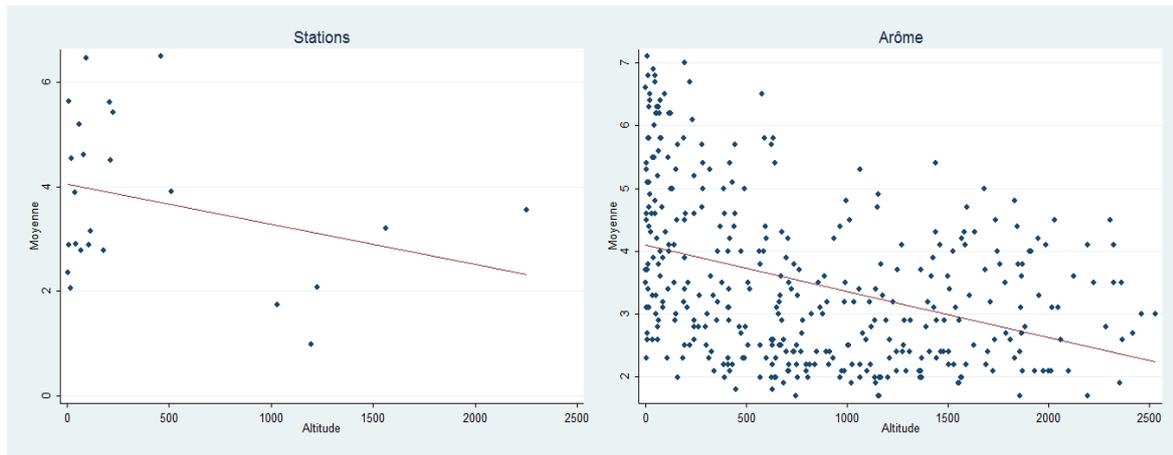


Figure 76 Relation entre la vitesse moyenne du vent et l'altitude.

Cette variabilité des moyennes de la vitesse du vent se retrouve pour les points de la côte sous le vent situées à basse altitude. Pour la côte au vent, la variabilité est importante quelles que soient les classes de vitesses.

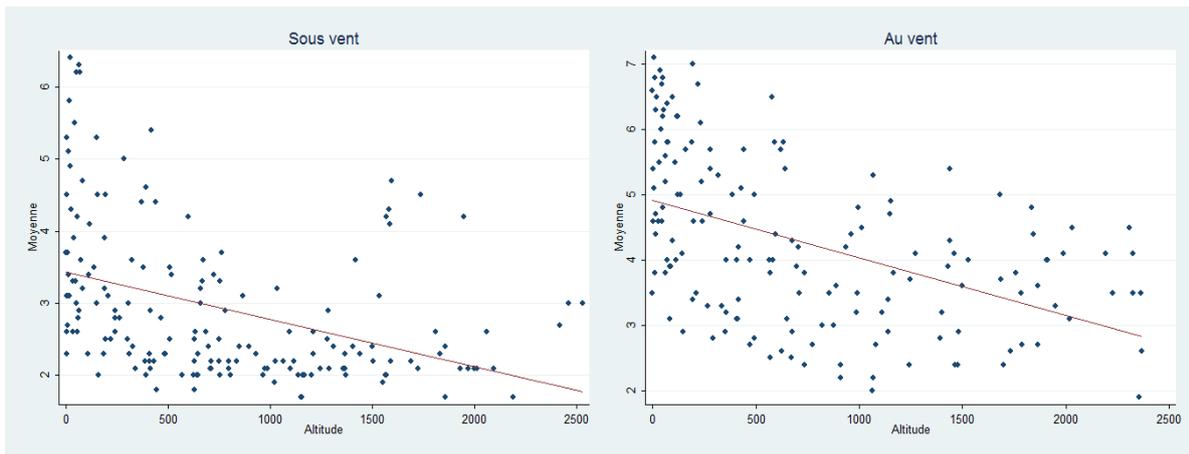


Figure 77 : Relation entre la vitesse moyenne du vent et l'altitude selon le découpage côte sous le vent et côte au vent.

Nous avons procédé à nouveau à une analyse des résidus de la régression de la moyenne des vitesses de vent sur le polynôme quadratique de la latitude afin de tenter d'identifier si cette variabilité pouvait être expliquée par la répartition spatiale des points de données. La tendance croissante à la longitude observée à la Figure 75 pour le domaine de la côte au vent, nous a amenés à intégrer la longitude comme facteur explicatif pour la côte est. La relation entre les résidus de ces régressions et l'altitude est illustrée à la Figure 75.

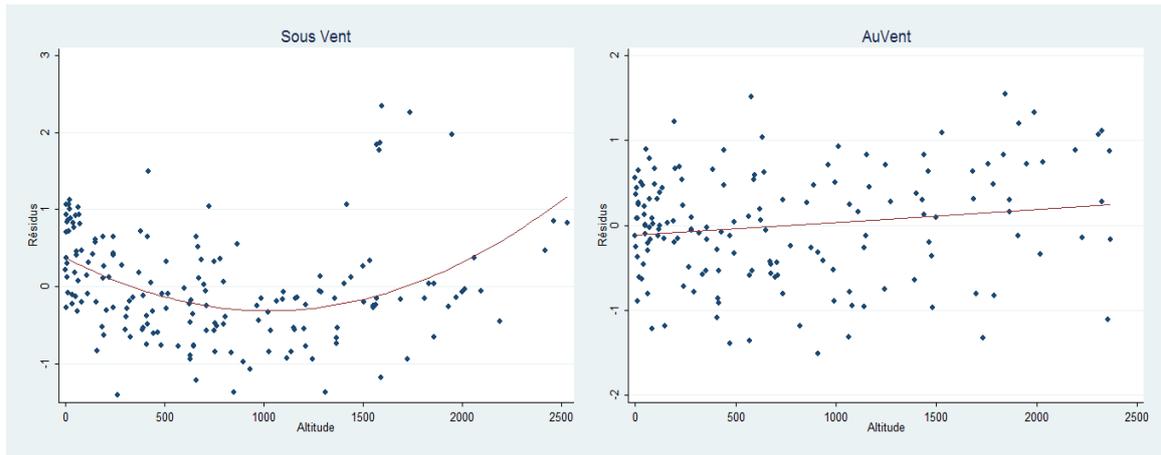


Figure 78 : Relation entre la moyenne de la vitesse du vent (résidus) et l'altitude.

La prise en compte de la répartition spatiale des points a permis de réduire considérablement la variabilité de la moyenne des vitesses de vent pour les points situés à basse altitude. Concernant les tendances, on constate qu'une forme quadratique convexe se dégage pour l'échantillon de la côte sous le vent alors qu'une tendance légèrement croissante se dégage pour la côte au vent.

4.1.4.4 Rugosité

La rugosité correspond à la hauteur des obstacles présents au sol mesurée par l'IGN. La rugosité a été calculée au sein du présent travail de manière à refléter la hauteur des obstacles dans l'environnement immédiat du point de mesure, à savoir un carré de 5 mètres de côté centré sur le point de mesure. La relation de la vitesse moyenne à la hauteur des obstacles au sol apparaît décroissante comme attendu. La variabilité est néanmoins très importante autour de la tendance et le découpage selon la répartition spatiale ne permet pas d'améliorer les résultats comme l'illustre la Figure 80.

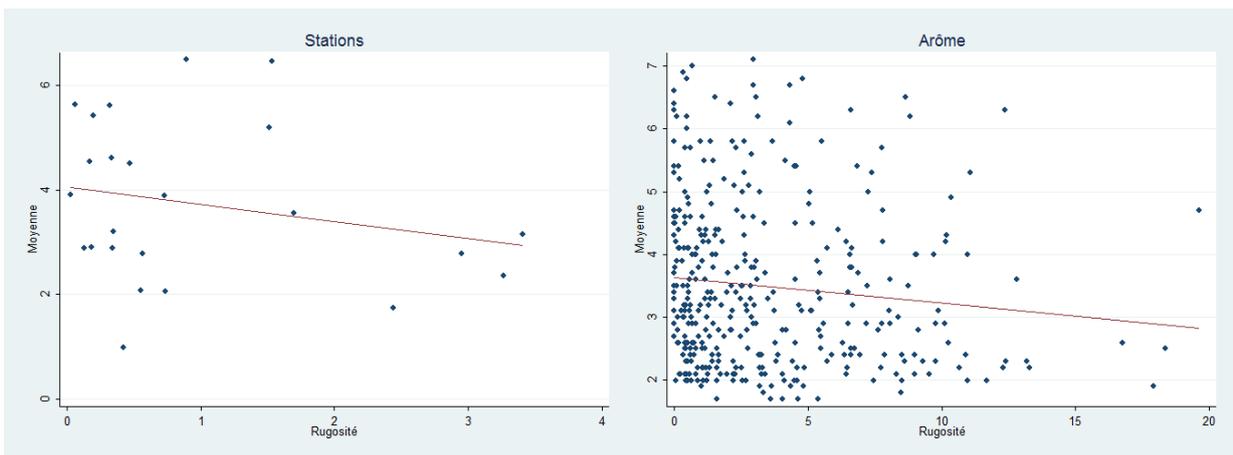


Figure 79 : Relation entre la vitesse moyenne du vent et l'altitude.

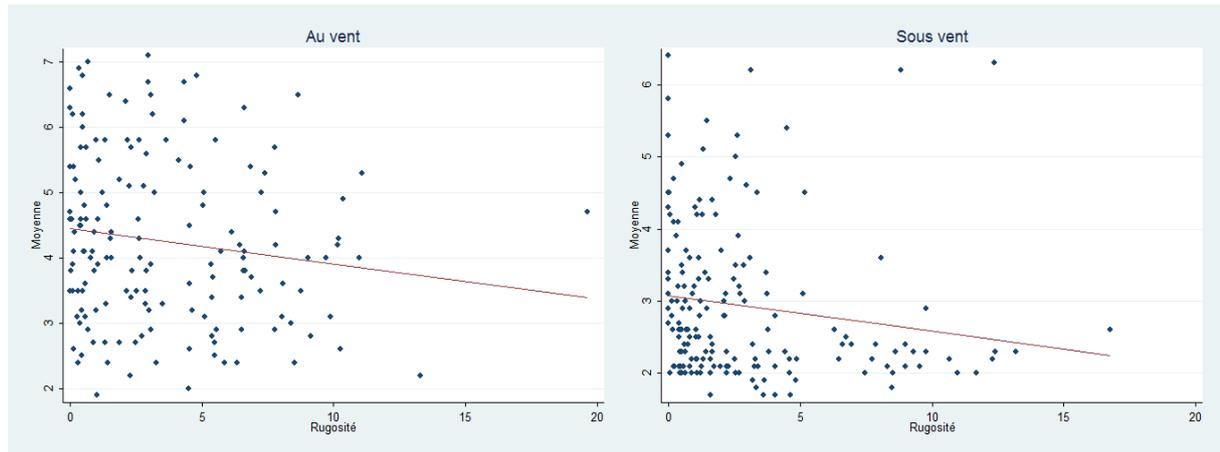


Figure 80 : Relation entre la vitesse moyenne du vent et l'altitude selon le découpage côte sous le vent et côte au vent.

4.1.4.5 Conclusions de l'analyse descriptive pour la moyenne de la vitesse du vent

L'analyse descriptive a mis en lumière une relation linéaire à la longitude ainsi qu'une relation quadratique de la vitesse moyenne à la latitude. La relation à l'altitude apparaît linéaire excepté pour l'échantillon de la côte sous le vent pour lequel la tendance est quadratique. Enfin, la relation à la rugosité est observée comme linéaire.

4.1.5 Analyse descriptive du coefficient de variation de la vitesse du vent

L'étude des variations de la moyenne de la vitesse de vent a permis d'identifier le type de relation entretenue aux coordonnées spatiales dans le plan, ainsi qu'à l'altitude et la rugosité. L'analyse descriptive se poursuit selon la même structure pour le coefficient de variation dont les variations sur l'axe ouest-est de La Réunion sont étudiées au point 4.1.5.1, puis sur l'axe sud-nord au point 4.1.5.2. L'effet de l'altitude et l'effet de la rugosité sont étudiés respectivement au point 4.1.5.2.1 et au point 4.1.5.3.

4.1.5.1 Longitude

La dispersion autour de la moyenne, mesurée à partir du coefficient de variation des vitesses de vent, apparaît comme décroissante à mesure que l'on tend vers l'est pour l'échantillon des données météorologiques ainsi que pour les données Arôme. La variabilité autour de la tendance décroissante est cependant importante pour l'échantillon des données Arôme, comme l'illustre la Figure 81. La dispersion mesurée par le coefficient de détermination tend donc à diminuer à l'est sur les zones où les vitesses moyennes les plus élevées ont été identifiées au point 4.1.4.1. Le découpage selon la répartition spatiale, illustré à la Figure 82, fait néanmoins ressortir pour chaque sous-échantillon un profil différent. La tendance pour l'échantillon sous le vent est faiblement croissante alors qu'une forme quadratique semble se dessiner pour l'échantillon au vent.

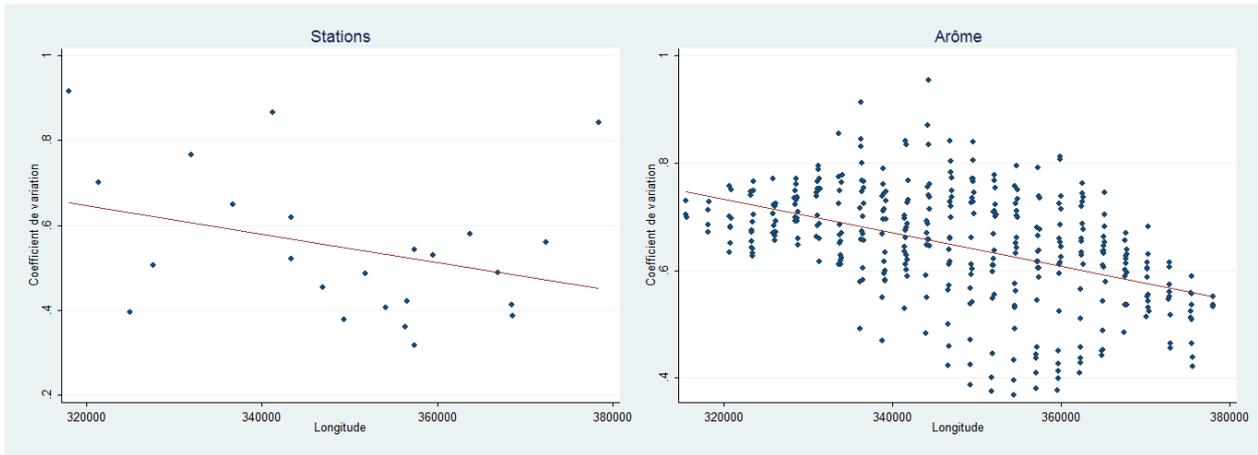


Figure 81 : Relation entre le coefficient de variation et la longitude selon le découpage côte sous le vent et côte au vent.

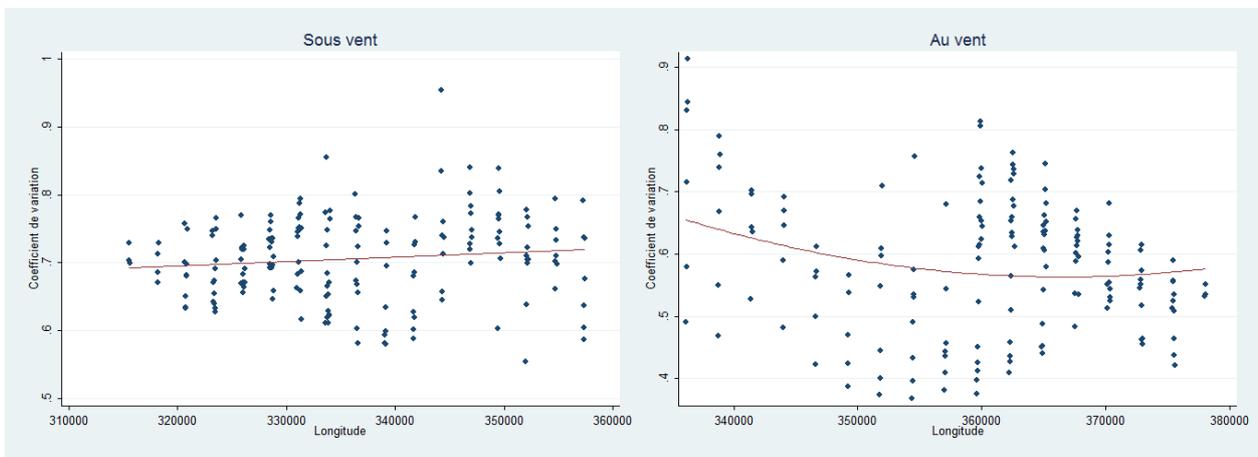


Figure 82 : Relation entre le coefficient de variation et la longitude selon le découpage côte sous le vent et côte au vent.

4.1.5.2 Latitude

Le coefficient de variation entretient un lien de type quadratique avec la latitude pour l'échantillon des données de stations météorologiques, comme l'illustre la Figure 83. Le coefficient de variation apparaît plus faible aux extrémités nord et sud de l'île. Cette tendance semble se confirmer pour l'échantillon Arôme. A nouveau à l'échelle de l'échantillon complet, la dispersion semble être plus importante sur les zones où les moyennes les plus fortes ont été identifiées au point 4.1.4.2 à savoir aux extrémités nord et sud de l'île.

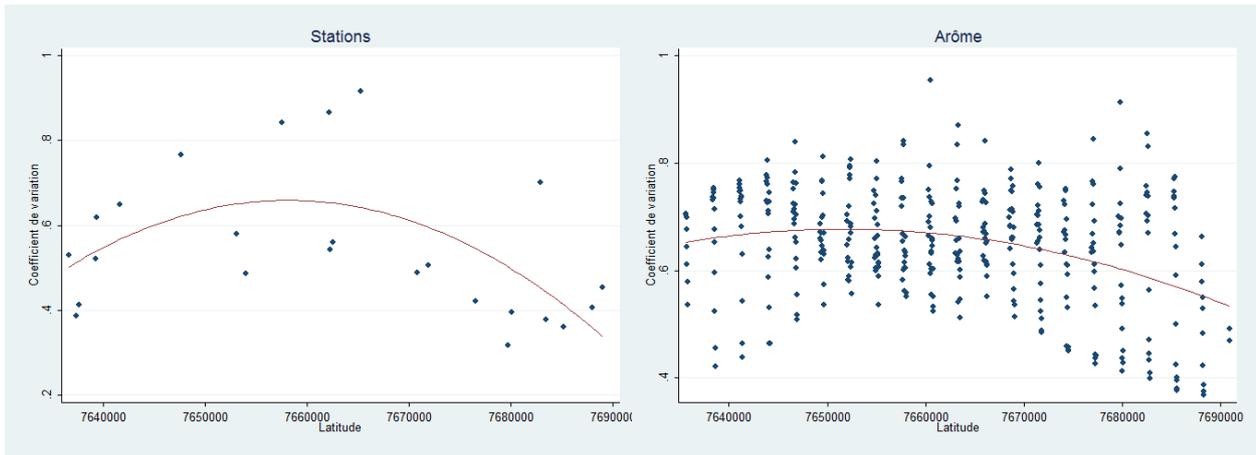


Figure 83 : Relation entre le coefficient de variation et la latitude.

La répartition géographique des points de données Arôme permet d’identifier une tendance quadratique similaire pour la côte au vent. En revanche, une courbe convexe apparait pour la côte sous le vent.

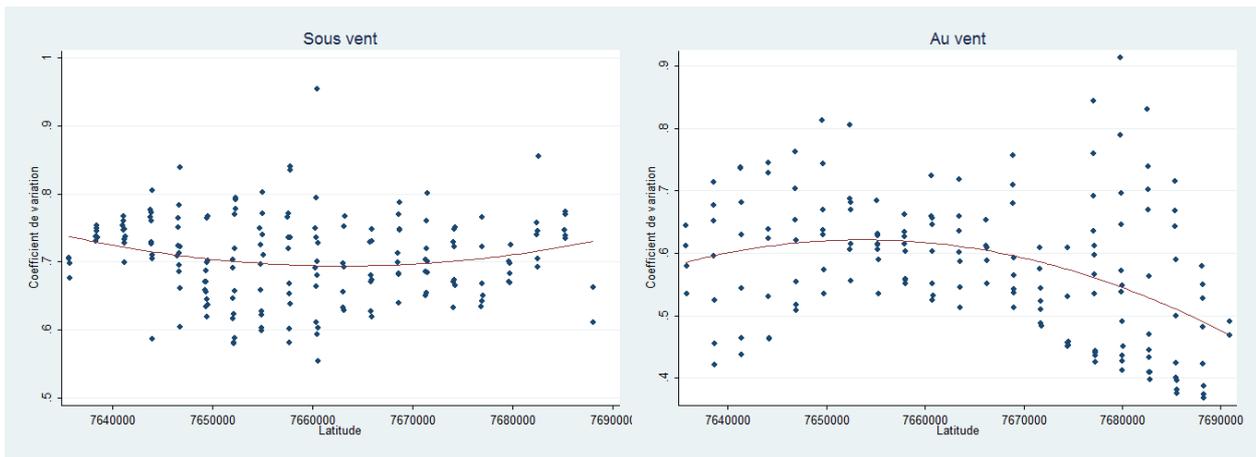


Figure 84 : Relation entre le coefficient de variation et la latitude selon le découpage côte sous le vent et côte au vent.

4.1.5.2.1 Elévation

Aucune tendance ne se dégage clairement pour les coefficients de variation des stations météorologiques. Une tendance croissante se dégage en revanche pour l’échantillon des données Arôme et le coefficient de variation semble croître avec l’altitude. La répartition géographique des points de données Arôme selon leur localisation au sein du domaine au vent et sous le vent permet d’identifier une tendance croissante plus évidente pour la côte au vent. En revanche, aucune tendance claire n’apparait plus pour la côte sous le vent.

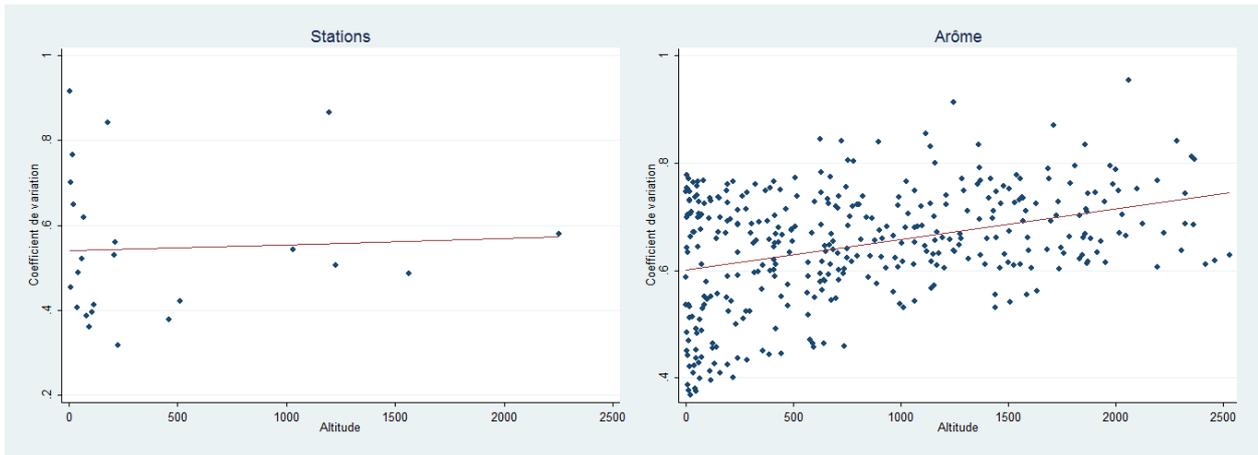


Figure 85: Relation entre le coefficient de variation et l'altitude.

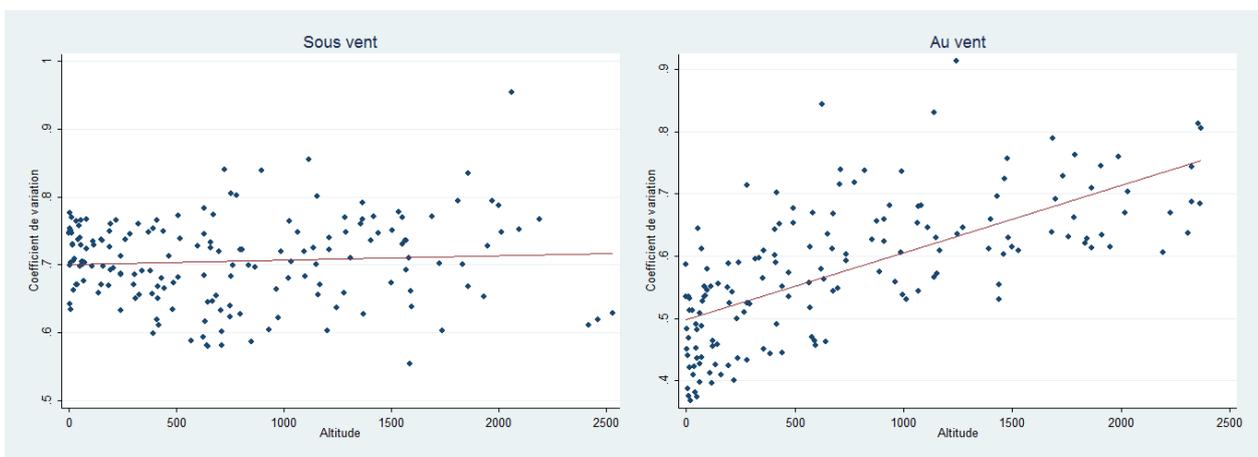


Figure 86: Relation entre le coefficient de variation et l'altitude selon le découpage côte sous le vent et côte au vent.

4.1.5.3 Rugosité

L'échantillon des données provenant des stations météorologiques fait ressortir une tendance croissante du coefficient de variation avec l'altitude. A contrario, la tendance est quasi nulle pour l'échantillon des données Arôme et la dispersion est importante. De la même manière que pour l'altitude, le découpage spatial de l'échantillon permet de dégager une tendance croissante dans le cas de la côte au vent mais aucune tendance ne se détache plus pour la côte sous le vent.

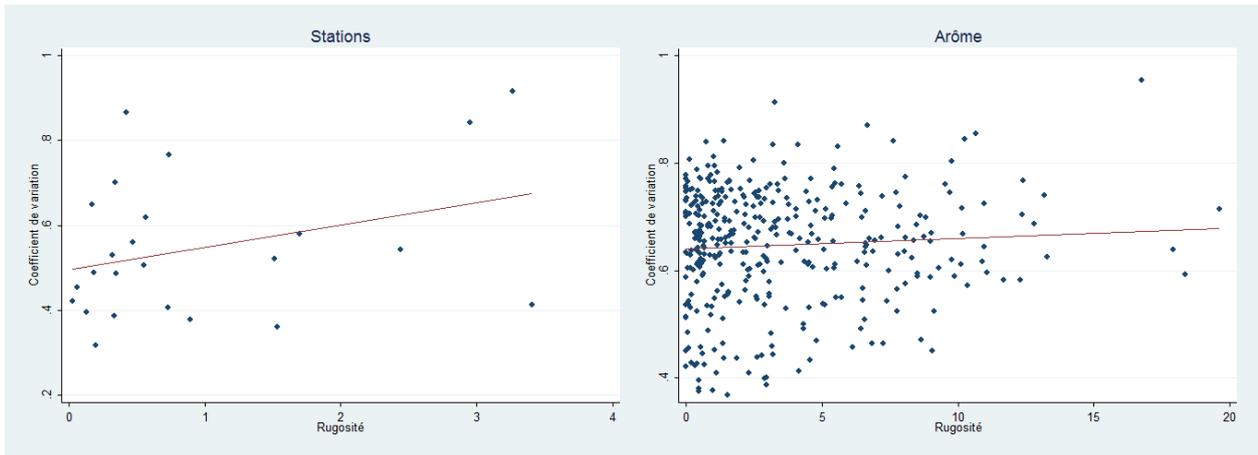


Figure 87: Relation entre le coefficient de variation et la rugosité.

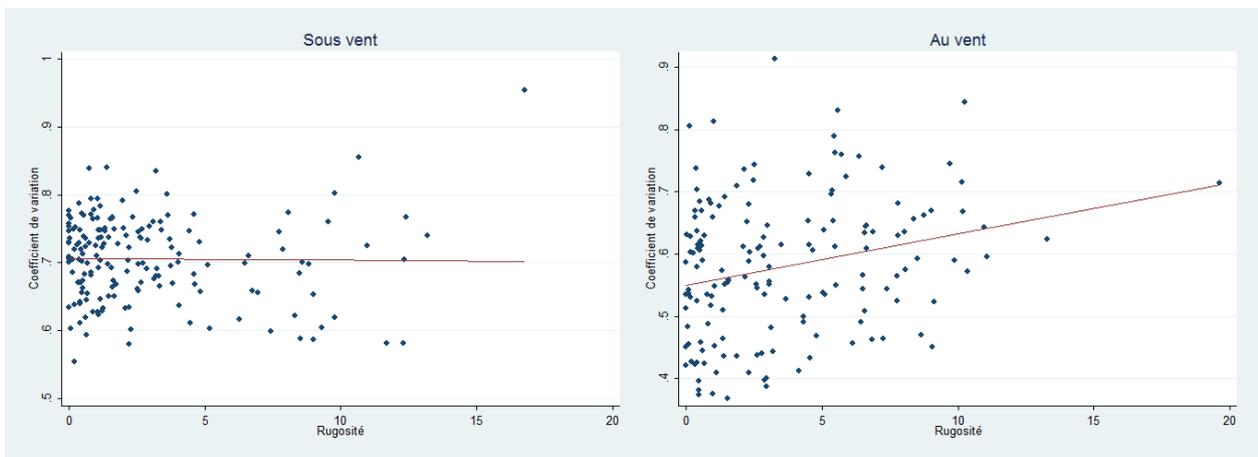


Figure 88: Relation entre le coefficient de variation et la rugosité selon le découpage côte sous le vent et côte au vent.

4.1.5.4 Conclusions de l'analyse descriptive pour coefficient de variation de la vitesse du vent

L'analyse descriptive a mis en lumière une relation linéaire à la longitude excepté pour l'échantillon des données au vent pour lequel la tendance est quadratique. La relation de la vitesse moyenne à la latitude apparaît comme quadratique alors que celle à l'altitude et à la rugosité sont observées comme linéaires.

4.2 Modélisation

L'analyse descriptive a permis de mettre en lumière des relations qui vont pouvoir être évaluées lors de la phase de modélisation. Les conclusions de la section précédente sont donc reprises pour construire les modèles de prédiction de base. Les modèles de prédictions sont utilisés pour les deux échantillons de données disponibles ; les mesures de la vitesse de vent des stations météorologiques et les données du modèle Arôme. Pour chaque échantillon, deux modèles sont évalués et comparés. Le premier modèle fait recours au prédicteur de la moyenne pondérée et le second au prédicteur de la tendance. La section 1.5 du chapitre I aborde la partie théorique de la méthodologie de la prédiction spatiale et le lecteur intéressé est renvoyé à ces développements pour plus de détails. Dans la continuité, la section 4.2.1 de cette partie présente l'application empirique de ces méthodes et les statistiques de test utilisées pour évaluer la qualité des prédictions. La section 4.2.2 procède à la modélisation de la moyenne de la vitesse du vent et la section 4.2.3 à celle du coefficient de variation.

4.2.1 Méthodologie

4.2.1.1 Prédicteurs des moyennes pondérées

L'analyse descriptive des corrélations des vitesses de vent entre les stations météorologiques effectuée à la section 4.1.3 a permis de mettre en évidence le lien entre la corrélation des vitesses du vent et la distance. A l'intérieur d'un rayon d'influence de 15 km, les corrélations entre stations météorologiques demeurent élevées et l'estimateur des moyennes pondérées a été construit de manière à prendre en compte les distances séparant le point de prédiction et les stations sélectionnées pour effectuer la prédiction. Les données Arôme sont disponibles aux points du méso-maillage de 2.5 km de côté illustré à la Figure 64. Les points de prédictions sont donc nécessairement inscrits dans un carré de 2.5 km de côté et la distance séparant les quatre points de données les plus proches est donc nécessairement inférieure à 2.5 km. Le prédicteur est donc construit de manière à pondérer les observations des quatre points les plus proches par l'inverse de la distance les séparant du point de prédiction. Les données des stations ont été utilisées afin de produire une prédiction selon la même méthodologie soit en utilisant une pondération par l'inverse de la distance (PID)^o et en ayant recours aux quatre points de données les plus proches du point de prédiction.

4.2.1.2 Prédicteurs de la tendance

L'analyse descriptive de la vitesse moyenne à la section 4.1.4 et du coefficient de variation à la section 4.1.5 a permis d'identifier la relation entretenue par les variables expliquées avec chacune des variables explicatives une à une. Ces résultats ont été utilisés afin de construire un premier modèle duquel les variables non explicatives ont été soustraites une par une. Les modèles d'explication de la tendance retenus in fine ne comportent que des variables explicatives significatives.

4.2.1.3 Méthode de comparaison des modèles

La méthode de prédiction par la moyenne pondérée produit un prédicteur exact. La valeur prédite aux points où les données sont présentes est donc égale à la valeur observée. Afin d'évaluer le modèle, nous avons donc procédé à une validation croisée (« cross validation ») consistant à exclure momentanément de l'échantillon des points à prédire. Cette procédure appelée « Leave-one-out » dans le cas où les observations sont retirées de l'échantillon une à une permet de produire une estimation des erreurs de prédictions du modèle. Le même procédé a été appliqué pour le prédicteur de la tendance. Les pseudo-erreurs de prédiction ainsi construites ont été utilisées afin de construire trois statistiques d'évaluation de la qualité de la prédiction.

La première statistique appelée racine carrée de la moyenne du carré des erreurs (ou Root Mean Squared Error) est détaillée à l'Eq.(65).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} \hat{\varepsilon}_i^2} \quad (65)$$

où n_p représentent le nombre de points de l'échantillon et $\hat{\varepsilon}_i$ correspond à l'erreur de prédiction définie par :

$$\hat{\varepsilon}_i = \hat{z}(x_i) - z(x_i)$$

où $\hat{z}(x_i)$ et $z(x_i)$ représentent respectivement la valeur prédite et la valeur observée au point i . La seconde statistique correspond à la moyenne de la valeur absolue des erreurs de prédictions (ou Mean Absolute Error) et son expression est détaillée à l'Eq.(66).

$$MAE = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} |\hat{\varepsilon}_i| \quad (66)$$

La dernière statistique, intitulée $PseudoR^2$ correspond au carré du coefficient de corrélation entre les prédictions et les observations. Il permet de mesurer la qualité de l'ajustement des prédictions aux observations par une droite. La distance de la droite d'ajustement à la droite $y=x$ permet de quantifier l'écart systématique alors que le $PseudoR^2$ mesure la part de la variabilité non expliquée par le modèle.

$$PseudoR^2 = \frac{Cov^2(\hat{z}(x_i), z(x_i))}{Var(\hat{z}(x_i))Var(z(x_i))} = \rho^2(\hat{z}(x_i), z(x_i)) \quad (67)$$

où $\rho(x, y)$ représente le coefficient de corrélation entre x et y .

4.2.2 Modélisation de la moyenne de la vitesse du vent

La moyenne de la vitesse du vent est modélisée au préalable à partir du prédicteur de la pondération inverse de la distance (PID) pour les données du modèle Arôme et pour les données des stations météorologiques. La modélisation se poursuit par la définition du modèle de tendance (TENDANCE) établi pour les données Arôme. La même démarche est effectuée à partir des données des stations météorologiques afin de contrôler la valeur des paramètres estimés. Enfin, les prédictions obtenues pour les données Arôme de la vitesse du vent sont comparées avec les observations des stations météorologiques en fin de section.

4.2.2.1 Modèle de la pondération inverse de la distance (PID)

La méthode de la moyenne pondérée obtient pour l'échantillon des données Arôme de bons

résultats comme l'illustre la Figure 89.

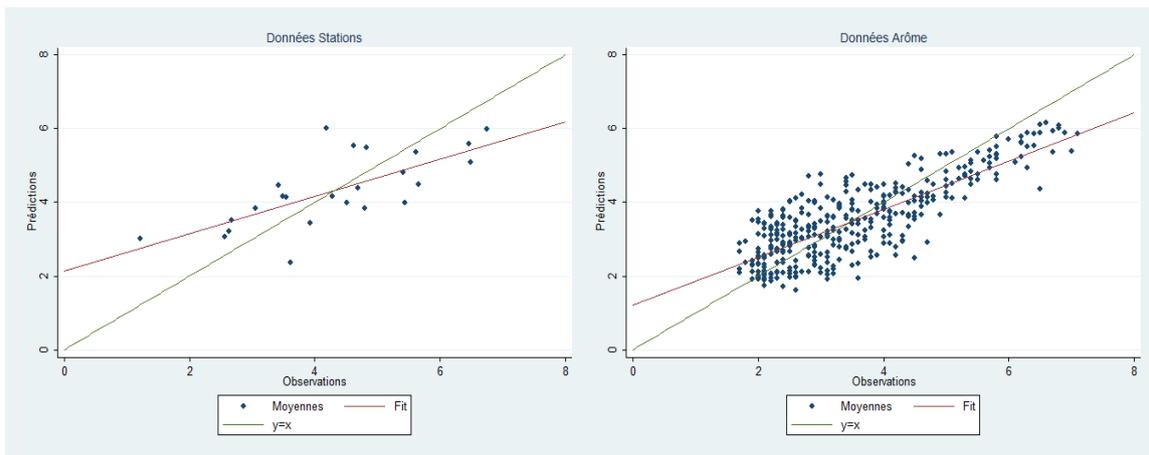


Figure 89: Evaluation des prédictions de la vitesse moyenne par le modèle de la moyenne pondérée.

La ligne verte symbolise une prédiction idéale et on observe que le modèle a des difficultés à prédire les valeurs extrêmes : les valeurs les plus faibles sont surestimées et les valeurs les plus fortes sont sous-estimées et un biais systématique est observé. Ce biais est également observé pour l'échantillon des données des stations météorologiques. Les droites d'ajustement tracées pour les deux échantillons en rouge indiquent que les modèles surestiment les valeurs situées à gauche de la moyenne et sous-estiment les valeurs situées à droite. Le biais systématique relève du fait que le prédicteur de la moyenne pondérée est incapable de prédire des valeurs situées en dehors des valeurs extrêmes de l'échantillon. L'impact des valeurs extrêmes sur le biais systématique est d'autant plus important que l'échantillon comporte un nombre faible de données comme dans le cas de l'échantillon des stations météorologiques. La qualité des prédictions pour l'échantillon des stations météorologiques est par conséquent bien plus faible que pour l'échantillon des données Arôme comme l'illustre le Tableau 32. La valeur moyenne des valeurs absolues des erreurs de prédictions (MAE) et de la racine carrée de la moyenne du carré des erreurs de prédictions (RMSE) sont quatre fois plus importantes que dans le cas de l'échantillon des données Arôme.

Tableau 32: Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions de la moyenne de la vitesse.

Modèle	Données	RMSE	MAE	PSEUDO-R ²
PID	Stations	1.2012	1.0044	0.26578
	Arôme	0.3149	0.236	0.94946
TENDANCE	Stations	1.1606	1.0265	0.3124
	Arôme	0.7736	0.6362	0.6436
	Arôme au Vent	0.6475	0.5245	0.7386
	Arôme Sous le Vent	0.6468	0.4811	0.6211

Ceci s'explique aussi par la dispersion spatiale des stations météorologiques sur l'île qui ne permet pas que les points utilisés pour la prédiction se situent chacun à une distance du point de prédiction inférieure à 15 km. Le pseudo coefficient de détermination R² mesure la qualité de l'ajustement du nuage de points par la droite d'ajustement tracée sur la Figure 89 en rouge. Le pseudo R² est très élevé pour le modèle de moyenne pondéré pour les données Arôme

(0.95) et la variabilité des observations est bien captée par le modèle. Il est en revanche bien plus faible pour l'échantillon des données des stations (0.27).

4.2.2.2 Modèle de tendance (TENDANCE)

Les résultats de la section 4.1.4 indiquent que la vitesse moyenne entretient pour l'échantillon des données des stations météorologiques et pour l'échantillon des données Arôme une relation linéaire à la longitude, l'altitude, et la rugosité ainsi qu'une relation quadratique à la latitude. Le modèle de base est estimé sur la base de ces observations et toutes les variables sont significatives pour l'échantillon des données Arôme, comme l'indique le Tableau 33. Les signes des coefficients valident l'analyse effectuée en 4.1.4. Les moyennes des vitesses de vent décroissent avec l'altitude et la rugosité. De même, les moyennes des vitesses de vent croissent en allant vers l'est et sont supérieures aux extrémités nord et sud de l'île.

Tableau 33: Régressions de la moyenne pour les données Arôme.

average	Coef.	Robust Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
lon	.0000354	2.38e-06	14.85	0.000	.0000307	.0000401
lat	-.0609904	.0032223	-18.93	0.000	-.0673271	-.0546537
alt	-.0001415	.0000666	-2.12	0.034	-.0002725	-.0000104
rug	-.0553017	.0111553	-4.96	0.000	-.0772389	-.0333644
lat2	3.98e-09	2.10e-10	18.93	0.000	3.57e-09	4.39e-09
_cons	233606.7	12344.64	18.92	0.000	209330.5	257883

Number of obs = 368
 F(4, 362) = .
 Prob > F = .
 R-squared = 0.6548
 Root MSE = .76768

La tendance est à sous estimer les valeurs situées à droite de la moyenne ce qui explique la pente de la droite d'ajustement entre les prédictions et les observations. La dispersion autour de la tendance est plus importante que pour le modèle de la moyenne pondérée et le pseudo R^2 est plus faible (0.64). Davantage, le RMSE et le MAE sont 2.5 fois plus élevés que pour le modèle de prédiction par la moyenne pondérée par l'inverse de la distance (PID).

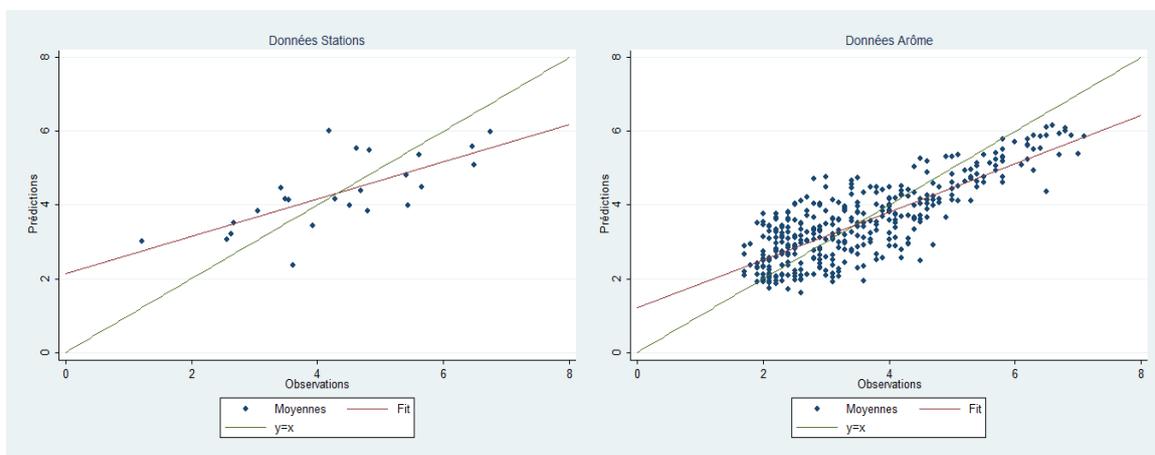


Figure 90 : Evaluation des prédictions de la vitesse moyenne par le modèle de tendance.

Afin d'évaluer le modèle, nous avons eu recours à la même approche pour les données des stations météorologiques. Un modèle de base (modèle 1) est construit sur la base des observations de la section 4.1.4 dédiée à l'analyse descriptive de la vitesse moyenne du vent. Les coefficients de rugosité et d'élévation de ce modèle, dont la forme est identique au modèle précédemment estimé pour les données Arôme, sont non significatifs comme l'illustre le Tableau 34.

Tableau 34: Régressions de la moyenne pour les données Stations, modèle 1.

Linear regression	Number of obs =	24
	F(3, 18) =	.
	Prob > F =	.
	R-squared =	0.5142
	Root MSE =	1.0964

mean50	Robust					
	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
lon	.0000295	.0000116	2.55	0.020	5.18e-06	.0000539
lat	-.0537498	.0163455	-3.29	0.004	-.0880904	-.0194092
alt	.0000616	.0003734	0.16	0.871	-.000723	.0008462
rug	.1353982	.2202436	0.61	0.546	-.3273163	.5981128
lat2	3.51e-09	1.07e-09	3.29	0.004	1.27e-09	5.75e-09
_cons	205849.5	62591.16	3.29	0.004	74350.32	337348.6

Les variables explicatives associées à des coefficients non significatifs ont été soustraites et un nouveau modèle a été estimé (modèle 2). Les résultats d'estimation des coefficients du nouveau modèle (modèle 2) sont illustrés au Tableau 35.

Tableau 35: Régressions de la moyenne pour les données Stations, modèle 2.

Linear regression	Number of obs =	24
	F(2, 20) =	.
	Prob > F =	.
	R-squared =	0.5049
	Root MSE =	1.0501

mean50	Robust					
	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
lon	.0000308	.0000121	2.55	0.019	5.62e-06	.0000559
lat	-.0508103	.0141509	-3.59	0.002	-.0803285	-.021292
lat2	3.32e-09	9.24e-10	3.59	0.002	1.39e-09	5.24e-09
_cons	194594.5	54196.45	3.59	0.002	81542.66	307646.3

Les trois statistiques d'évaluation de la qualité de prédiction sont meilleures pour le nouveau modèle (modèle 2), comme l'illustre le Tableau 36. La forme définitive acceptée pour la modélisation de la vitesse du vent pour les données des stations météorologiques correspond au modèle 2.

Tableau 36: Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions de la moyenne pour le modèle de tendance Stations.

Modèle	RMSE	MAE	PSEUDO-R ²
1	1.29607	1.14957	0.23479911
2	1.1606	1.0265	0.3124

Les signes des coefficients demeurent identiques et les valeurs estimées sont relativement proches permettant de valider le modèle de régression établi à partir des données Arôme. On constate que les nouvelles valeurs estimées pour les coefficients induisent une moins bonne prédiction. Les valeurs extrêmes sont moins bien prédites ce qui est notamment dû au faible nombre de données présentes au sein de l'échantillon (24 observations). La droite d'ajustement est davantage inclinée par rapport à la droite de prédiction idéale. Le pseudo R^2 est plus faible que pour le modèle de tendance établie à partir des données Arôme. On note néanmoins que la valeur du pseudo R^2 est plus élevée que pour le prédicteur de la moyenne pondérée établi à partir des données des stations. Le RMSE est également plus faible et on est amené à préférer un modèle de tendance dans le cas d'un faible échantillon de données. C'est d'autant plus vrai que les stations météorologiques utilisées pour la prédiction par la moyenne pondérée doivent être situées à l'intérieur d'un rayon pour lequel la dépendance entre stations demeure identifiée.

Afin d'améliorer la qualité des prédictions, deux modèles ont été établis pour les sous-échantillons de la côte au vent et de la côte sous le vent. Le modèle de régression de base (modèle 1) pour le sous échantillon de la côte au vent construit à partir des conclusions de la section 4.1.4 implique une relation quadratique à la latitude ainsi qu'une relation linéaire à la longitude, à l'altitude et la rugosité. La valeur estimée des paramètres est reportée au Tableau 37.

Tableau 37: Régressions de la moyenne pour les données Arôme au vent, modèle 1.

Linear regression	Number of obs =	158
	F(3, 152) =	.
	Prob > F =	.
	R-squared =	0.7581
	Root MSE =	.63489

average	Coef.	Robust Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
lon	.0001017	.0000129	7.88	0.000	.0000762	.0001272
lat	-.0946486	.0050296	-18.82	0.000	-.1045857	-.0847116
alt	.0003158	.000123	2.57	0.011	.0000728	.0005588
rug	-.0195378	.0174069	-1.12	0.263	-.0539284	.0148529
lat2	6.18e-09	3.29e-10	18.81	0.000	5.53e-09	6.83e-09
_cons	362364.6	19244	18.83	0.000	324344.4	400384.9

Le coefficient de rugosité étant non significatif, il a été soustrait au sein du modèle 2 et les résultats d'estimation des paramètres sont reportés au Tableau 38. La qualité de la prédiction est légèrement améliorée comme l'illustre le Tableau 39.

Tableau 38: Régressions de la moyenne pour les données Arôme au vent, modèle 2.

Linear regression	Number of obs =	158
	F(3, 153) =	.
	Prob > F =	.
	R-squared =	0.7560
	Root MSE =	.63559

average	Coef.	Robust Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
lon	.0001079	.0000113	9.52	0.000	.0000855	.0001304
lat	-.0962461	.004868	-19.77	0.000	-.1058634	-.0866289
alt	.0003556	.0001191	2.99	0.003	.0001203	.0005909
lat2	6.28e-09	3.18e-10	19.77	0.000	5.66e-09	6.91e-09
_cons	368469.6	18630.16	19.78	0.000	331664.1	405275.2

Tableau 39: Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions de la moyenne pour le modèle de tendance Arôme au vent.

Modèle	RMSE	MAE	PSEUDO-R ²
1	0.6491	0.5241	0.7373
2	0.6475	0.5245	0.7386

Le découpage de l'échantillon permet d'observer une meilleure prédiction des points situés sur la côte au vent. Le RMSE et le MAE ont diminué de 17% et le pseudo R^2 est significativement amélioré. Le biais de prédiction est donc moindre et les données sont également davantage concentrées autour de l'ajustement illustré en rouge. Les valeurs des coefficients sont largement modifiées et le signe du paramètre associé à l'altitude est devenu positif. Sur la côte au vent, les vitesses moyennes semblent croître avec l'altitude. Ces résultats confirment l'analyse effectuée en 4.1.4.3.

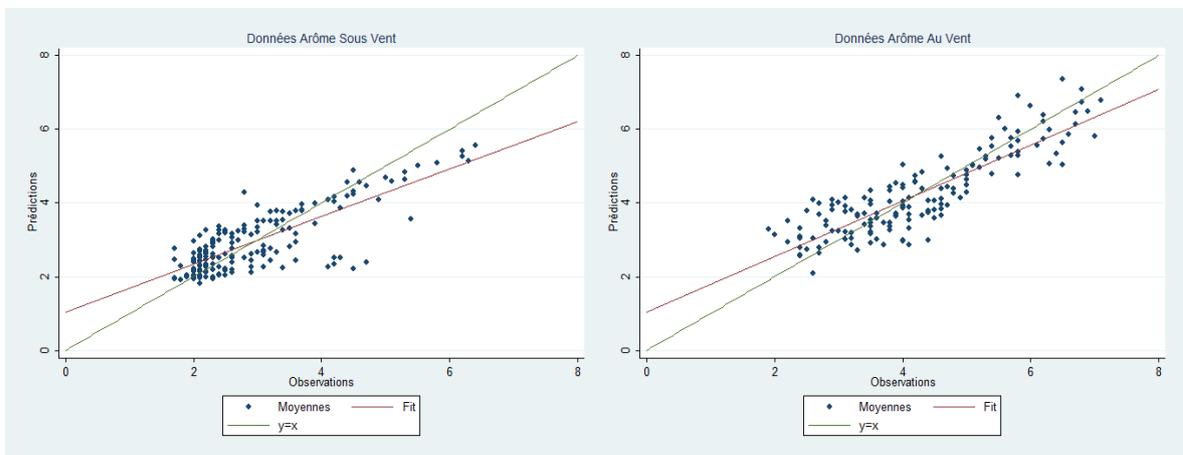


Figure 91: Evaluation pour chacun des sous-échantillons des prédictions de la vitesse moyenne par le modèle de tendance.

Le modèle de base (modèle 1) du sous-échantillon des données Arôme sous le vent construit à partir des observations de la section 4.1.4 implique une relation quadratique à la latitude ainsi qu'à l'altitude et une relation linéaire à la longitude et à la rugosité. Les coefficients estimés sont reportés au Tableau 40 et on observe que le coefficient associé à la longitude est non significatif. Sur la côte sous le vent, la localisation selon l'axe ouest-est n'est donc pas un facteur explicatif de la variation de la moyenne de la vitesse du vent.

Tableau 40: Régressions de la moyenne pour les données Arôme sous le vent, modèle 1.

Linear regression Number of obs = 172
F(5, 165) = .
Prob > F = .
R-squared = 0.6482
Root MSE = .63618

average	Coef.	Robust Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
lon	1.06e-06	.0000133	0.08	0.937	-.0000252	.0000274
lat	-.047217	.0086394	-5.47	0.000	-.064275	-.0301589
rug	-.0306822	.0155995	-1.97	0.051	-.0614826	.0001182
alt	-.0013488	.0002999	-4.50	0.000	-.0019409	-.0007567
lat2	3.08e-09	5.64e-10	5.46	0.000	1.97e-09	4.19e-09
alt2	6.36e-07	1.19e-07	5.33	0.000	4.00e-07	8.72e-07
_cons	180991.9	33120.85	5.46	0.000	115596.6	246387.2

Le nouveau modèle (modèle 2), dont la longitude est soustraite, est estimé et les résultats sont illustrés au Tableau 41. Les résultats sont meilleurs comme l’atteste le Tableau 42.

Tableau 41: Régressions de la moyenne pour les données Arôme sous le vent, modèle 2.

Linear regression Number of obs = 172
F(4, 166) = .
Prob > F = .
R-squared = 0.6482
Root MSE = .63428

average	Coef.	Robust Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
lat	-.0477349	.0051833	-9.21	0.000	-.0579686	-.0375011
rug	-.0305295	.0147563	-2.07	0.040	-.0596636	-.0013953
alt	-.0013256	.0002253	-5.88	0.000	-.0017705	-.0008807
lat2	3.11e-09	3.38e-10	9.20	0.000	2.45e-09	3.78e-09
alt2	6.30e-07	9.99e-08	6.30	0.000	4.32e-07	8.27e-07
_cons	182978.3	19853.2	9.22	0.000	143781	222175.6

Tableau 42: Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions de la moyenne pour le modèle de tendance Arôme sous le vent.

Modèle	RMSE	MAE	PSEUDO-R ²
1	0.6554	0.4865	0.6112
2	0.6468	0.4811	0.6211

Par rapport au modèle constitué à partir de l'échantillon complet de données Arôme, on constate que la relation quadratique convexe est maintenue, ainsi que la tendance décroissante à la rugosité et l'altitude. Les coefficients diffèrent même si les variations sont moindres que dans le cas du sous-échantillon au vent. Le changement réside principalement dans la disparition de la relation à la longitude et l'introduction de la relation quadratique convexe à l'altitude. Les données de vitesse moyenne de la côte sous le vent semblent plus élevées à basse altitude, elles décroissent avec l'altitude avant de croître à nouveau conformément à l'analyse du point 4.1.4.3. La donnée d'altitude est donc un facteur explicatif important des vitesses moyennes de la côte sous le vent.

La performance du modèle sous le vent comme celle du modèle au vent sont bien

meilleures que celle du modèle constitué à partir de l'ensemble de l'échantillon Arôme. Le biais de prédiction, mesuré par le RMSE et le MAE, est même plus faible que celui du modèle de tendance au vent. La variabilité est néanmoins plus importante comme en atteste le pseudo R^2 plus élevé. Les résultats pour les deux sous-échantillons sont illustrés à la Figure 91.

4.2.2.3 Evaluation de la qualité des prédictions des modèles en dehors de l'échantillon

Les prédictions issues des modèles établis à partir des données Arôme sont comparées aux observations des stations météorologiques. Les prédictions de trois modèles sont évaluées : le modèle de la moyenne pondérée par l'inverse de la distance (IDW), le modèle de tendance établi à partir des données Arôme (REG) et un modèle de tendance local permettant de prédire les données à partir d'un polynôme distinct selon la situation géographique (au vent ou sous le vent) du point de prédiction (REGCOTE). Les prédictions du modèle REGCOTE proviennent des formes des modèles estimés à la section précédente pour la côte au vent et pour la côte sous le vent. Dans le cas où le point à prédire est situé sur la côte au vent (resp. sous le vent), il est prédit à partir du modèle final de la côte au vent (resp. sous le vent).

Les prédictions de la moyenne de la vitesse du vent apparaissent meilleures à partir du modèle de la moyenne pondérée. Les deux statistiques de mesure du biais de prédiction, le RMSE et le ASE, présentées au

Tableau 43, font ressortir le modèle de moyenne pondérée comme étant le plus performant. On constate que la droite d'ajustement est plus proche de la droite de prédiction idéale sur le graphique de gauche de la Figure 92. La variabilité est relativement faible et la valeur du pseudo R^2 est élevée (0.7). A contrario, la droite d'ajustement pour le modèle de tendance (REG) est assez largement dissociée de la droite de prédiction idéale à la Figure 92. Le biais est quantifié comme étant de 25% à 50% plus important selon la statistique de test employé ainsi que l'atteste le

Tableau 43. La variabilité est également supérieure, et le pseudo R^2 tombe sous 0.5. Le biais est réduit en introduisant le polynôme local (REGCOTE). Le MAE est plus faible et la droite d'ajustement du modèle REGCOTE, illustrée à la Figure 92, est à nouveau bien plus proche de la droite des prédictions idéales. La variabilité est également réduite et le pseudo R^2 est légèrement supérieur (0.55).

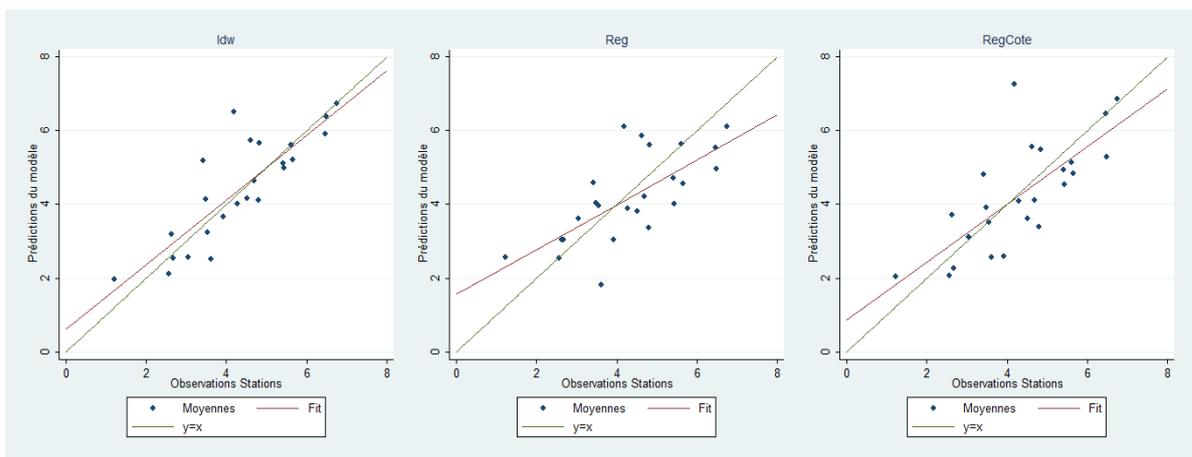


Figure 92: Evaluation des prédictions de la moyenne à partir des données des stations météorologiques.

Tableau 43: Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions des moyennes des stations météorologiques.

Modèle	RMSE	MAE	PSEUDO-R ²
IDW	0.7934	0.5833	0.7060
REG	1.0080	0.8670	0.4906
REGCOTE	1.0122	0.7847	0.5498

4.2.3 Modélisation du coefficient de variation de la vitesse du vent

Le prédicteur de la pondération inverse de la distance (PID) a obtenu les meilleurs résultats concernant la modélisation de la vitesse moyenne du vent. Selon la même méthodologie, le coefficient de variation est désormais modélisé au préalable à partir du prédicteur de la pondération inverse de la distance (PID) pour les données du modèle Arôme et pour les données des stations météorologiques. La modélisation se poursuit par la définition du modèle de tendance (TENDANCE) établi pour les données Arôme puis pour les données des stations météorologiques afin de contrôler la valeur des paramètres estimés. Enfin, les prédictions obtenues pour les données Arôme du coefficient de variation sont comparés avec les observations des stations météorologiques en fin de section.

4.2.3.1 Modèle de la pondération inverse de la distance (PID)

La méthode de la moyenne pondérée par la distance obtient à nouveau de bons résultats. Un biais subsiste parmi les valeurs extrêmes mais principalement pour celles situées à droite de la moyenne. Les valeurs élevées du coefficient de variation sont clairement sous-évaluées pour l'échantillon Arôme et pour celui de l'échantillon Stations. La qualité de la prédiction est bien meilleure dans le cas de l'échantillon Arôme dont le RMSE et le MAE sont environ quatre fois moins importants que dans le cas de l'échantillon des stations, comme l'atteste le Tableau 44. L'ajustement des valeurs prédites aux valeurs observées, illustré en rouge sur la Figure 93 fait ressortir une tendance proche de la droite de prédiction idéale qui figure en vert. En revanche, pour l'échantillon des stations météorologiques, le départ de la droite d'erreur de prédiction nulle est assez important. Ensuite, la variabilité des erreurs autour de l'ajustement apparaît faible pour l'échantillon Arôme et le pseudo R^2 est élevé (0.87). Il est en revanche bien moins élevé pour l'échantillon Stations (0.26) et une variabilité significative demeure après la prédiction par le modèle de la moyenne pondérée par la distance comme on l'observe sur la Figure 93.

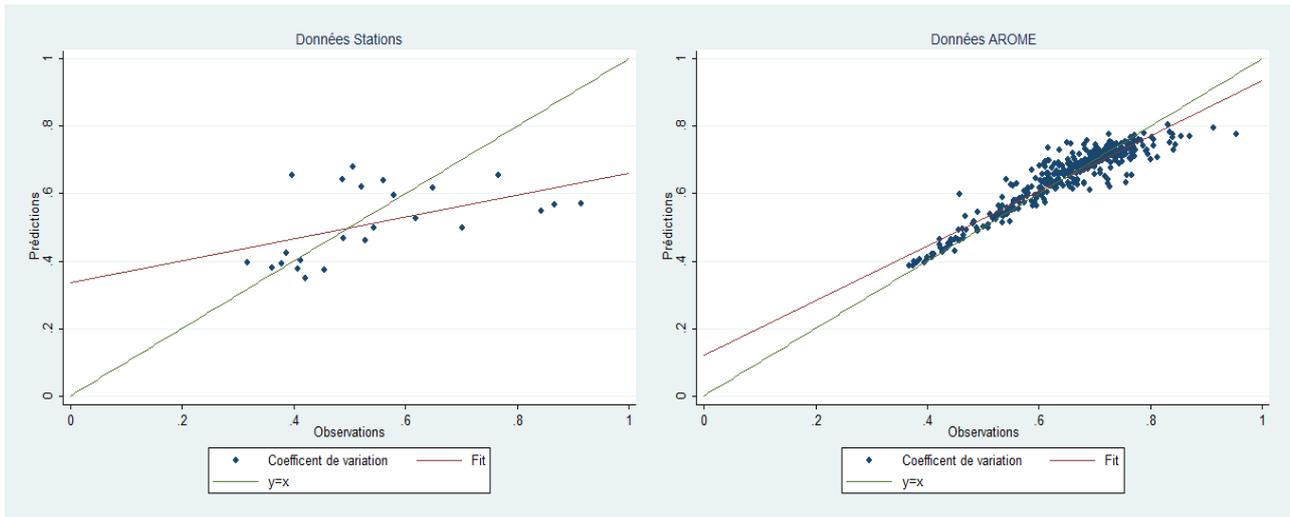


Figure 93: Evaluation des prédictions du coefficient de variation de la vitesse par le modèle de la moyenne pondérée.

Tableau 44: Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions du coefficient de variation de la vitesse.

Modèle	Données	RMSE	MAE	PSEUDO-R ²
PID	Stations	0.1477	0.1098	0.2549
	Arôme	0.0389	0.0276	0.8692
TENDANCE	Stations	0.1446	0.11458	0.2695
	Arôme	0.0736	0.0593	0.5187
	Arôme au Vent	0.0486	0.0392	0.8058
	Arôme Sous le Vent	0.0614	0.0480	0.0314

4.2.3.2 Modèle de tendance (TENDANCE)

L'analyse descriptive effectuée en 4.1.5 a permis d'identifier pour l'échantillon Arôme, une relation linéaire à la longitude, l'altitude, et la rugosité ainsi qu'une relation quadratique à la latitude. Le modèle de base (modèle 1) a été construit sur ces hypothèses et les paramètres estimés ont été reportés au Tableau 45. Le coefficient associé à la latitude au carré est non significatif et la tendance quadratique à la latitude a été supprimée au sein du modèle ultérieur (modèle 2) afin de ne conserver que des coefficients significatifs. Le nouveau modèle (modèle 2) est estimé et les résultats sont reportés au Tableau 46. On constate que les statistiques d'évaluation de la qualité de prédiction, reportées au Tableau 47, sont légèrement meilleures.

à la droite de prédiction idéale, respectivement en rouge et en vert sur la Figure 94, illustre le biais systématique du modèle pour les valeurs extrêmes. Pour les valeurs situées autour de la moyenne, la variabilité est élevée et le modèle manque à rendre compte de cette variabilité. Le pseudo R^2 est d'ailleurs bien plus faible (0.52) que pour le prédicteur de la moyenne pondéré par l'inverse de la distance (0.87).

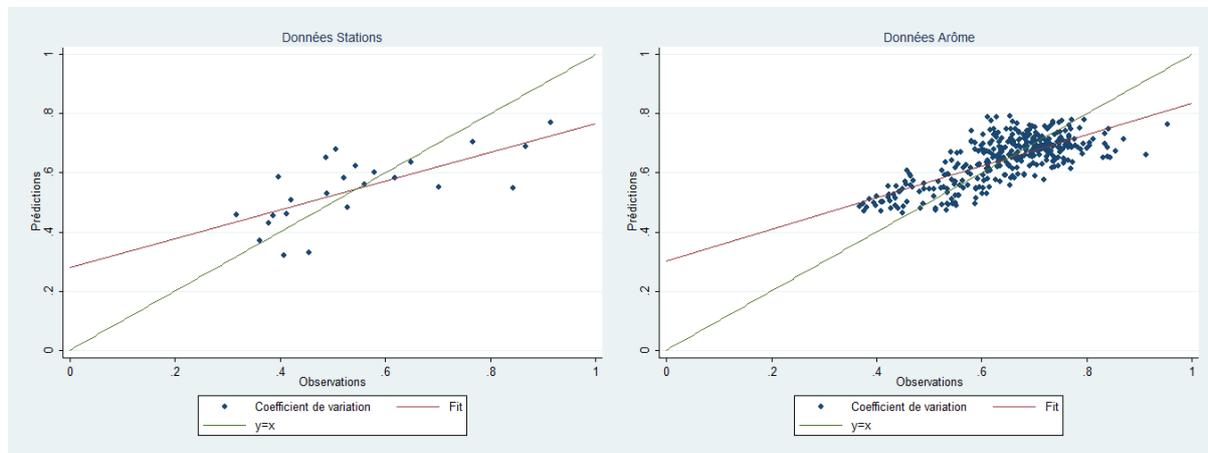


Figure 94 : Evaluation des prédictions du coefficient de variation de la vitesse par le modèle de la tendance.

Le modèle de contrôle établi à partir des données Stations (modèle 1) ne fait pas ressortir les mêmes résultats. Les paramètres de rugosité et d'altitude sont non significatifs au contraire de la relation quadratique à la latitude, comme on l'observe au Tableau 48. Le nouveau modèle (modèle 2) ne comporte plus qu'un lien au référencement spatial des points dans le plan, comme on l'observe au Tableau 49. Le modèle 2 pour les données Stations apporte une meilleure qualité de prédiction, notamment au regard du MAE comme on l'observe au Tableau 50.

Tableau 48 : Régressions du coefficient de variation pour les données Stations, modèle 1.

```
Linear regression                                Number of obs =      24
                                                F( 3,    18) =      .
                                                Prob > F      =      .
                                                R-squared     =  0.5779
                                                Root MSE     =  .12349
```

covar	Robust				
	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
lon	-4.07e-06	1.63e-06	-2.49	0.023	-7.50e-06 -6.42e-07
lat	.0060314	.0017714	3.40	0.003	.0023098 .0097531
alt	-.0000686	.0000438	-1.56	0.135	-.0001607 .0000235
rug	.0334334	.0245831	1.36	0.191	-.0182138 .0850807
lat2	-3.94e-10	1.16e-10	-3.41	0.003	-6.37e-10 -1.51e-10
_cons	-23092.72	6785.689	-3.40	0.003	-37348.92 -8836.513

Tableau 49 : Régressions du coefficient de variation pour les données Stations, modèle 2.

```

Linear regression                                Number of obs =      24
                                                F( 2, 20) =          .
                                                Prob > F           =          .
                                                R-squared         =  0.4868
                                                Root MSE        =  .12919
    
```

covar	Robust		t	P> t	[95% Conf. Interval]	
	Coef.	Std. Err.				
lon	-4.03e-06	2.11e-06	-1.91	0.070	-8.44e-06	3.70e-07
lat	.0051746	.0016875	3.07	0.006	.0016546	.0086945
lat2	-3.38e-10	1.10e-10	-3.07	0.006	-5.68e-10	-1.08e-10
_cons	-19808.95	6463.702	-3.06	0.006	-33291.99	-6325.9

Tableau 50 : Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions du coefficient de variation pour le modèle de tendance Stations.

Modèle	RMSE	MAE	PSEUDO-R ²
1	0.14522	0.12176	0.287761
2	0.14463	0.114579	0.269456

Au regard des statistiques d'évaluation de la qualité de prédiction utilisées reportées au Tableau 44, le modèle de tendance est légèrement moins performant que le modèle de la moyenne pondéré par l'inverse de la distance. Le RMSE est légèrement plus faible mais le MAE et le pseudo R² sont plus élevés. Dans le cas d'un échantillon comprenant un faible nombre d'observations comme celui des données des stations, on relève la difficulté d'obtenir une prédiction spatiale de qualité et on souligne la nécessité d'obtenir un échantillon plus important afin d'améliorer la qualité des prédictions.

Afin de tenter d'améliorer les prédictions du modèle de tendance, une modélisation du coefficient de variation distincte selon la zone géographique a été entreprise. Concernant l'échantillon des données Arôme au vent, le modèle de régression de base dérivé de l'analyse de la section 4.1.5 implique une relation linéaire à l'altitude, et la rugosité ainsi qu'une relation quadratique à la latitude et à la longitude. Les résultats d'estimation des paramètres pour ce modèle (modèle 1) sont reportés au Tableau 51. Les coefficients associés à la rugosité et l'élévation sont non significatifs et ces variables sont éliminées au sein d'un nouveau modèle (modèle 2). Au sein du modèle 2, demeurent uniquement les tendances quadratiques des coordonnées dans le plan comme l'illustre le Tableau 52 et les résultats de prédiction s'en trouvent légèrement améliorés, comme l'illustre le Tableau 53.

Tableau 51: Régressions du coefficient de variation pour les données Arôme au vent, modèle 1.

Linear regression Number of obs = 158
F(4, 151) = .
Prob > F = .
R-squared = 0.8207
Root MSE = .04773

covar	Robust		t	P> t	[95% Conf. Interval]	
	Coef.	Std. Err.				
lon	-.000113	.0000227	-4.97	0.000	-.0001579	-.0000681
lat	.0050138	.0004203	11.93	0.000	.0041834	.0058442
alt	9.33e-06	8.20e-06	1.14	0.257	-6.87e-06	.0000255
rug	-.0005477	.0014198	-0.39	0.700	-.003353	.0022575
lon2	1.40e-10	3.16e-11	4.43	0.000	7.77e-11	2.03e-10
lat2	-3.28e-10	2.74e-11	-11.94	0.000	-3.82e-10	-2.73e-10
_cons	-19156.37	1608.913	-11.91	0.000	-22335.26	-15977.49

Tableau 52: Régressions du coefficient de variation pour les données Arôme au vent, modèle 2.

Linear regression Number of obs = 158
F(2, 153) = .
Prob > F = .
R-squared = 0.8187
Root MSE = .04768

covar	Robust		t	P> t	[95% Conf. Interval]	
	Coef.	Std. Err.				
lon	-.0001082	.0000225	-4.81	0.000	-.0001526	-.0000637
lat	.0052945	.0003108	17.04	0.000	.0046806	.0059085
lon2	1.33e-10	3.14e-11	4.23	0.000	7.08e-11	1.95e-10
lat2	-3.46e-10	2.03e-11	-17.06	0.000	-3.86e-10	-3.06e-10
_cons	-20231.37	1190.065	-17.00	0.000	-22582.46	-17880.29

Tableau 53: Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions du coefficient de variation pour le modèle de tendance Arôme au vent.

Modèle	RMSE	ASE	PSEUDO-R ²
1	0.0490	0.0398	0.8022
2	0.0486	0.0392	0.8058

La division de l'échantillon selon la localisation des points de données permet d'améliorer considérablement la qualité des prédictions spatiales du coefficient de variation pour la côte au vent. Le biais mesuré par le RMSE et le MAE est réduit d'un tiers et on observe que la droite d'ajustement est substantiellement plus proche de la droite d'erreur de prédiction nulle, en vert sur la Figure 95. On note que la surestimation des valeurs extrêmes faibles de l'échantillon n'est plus observable. Par ailleurs, la variabilité autour de la tendance est bien plus faible comme en atteste la valeur élevée du pseudo R^2 (0.8). Les résultats obtenus par le modèle de tendance pour la côte sous le vent sont comparables aux résultats obtenus par le modèle de la moyenne pondérée sur l'échantillon Arôme.

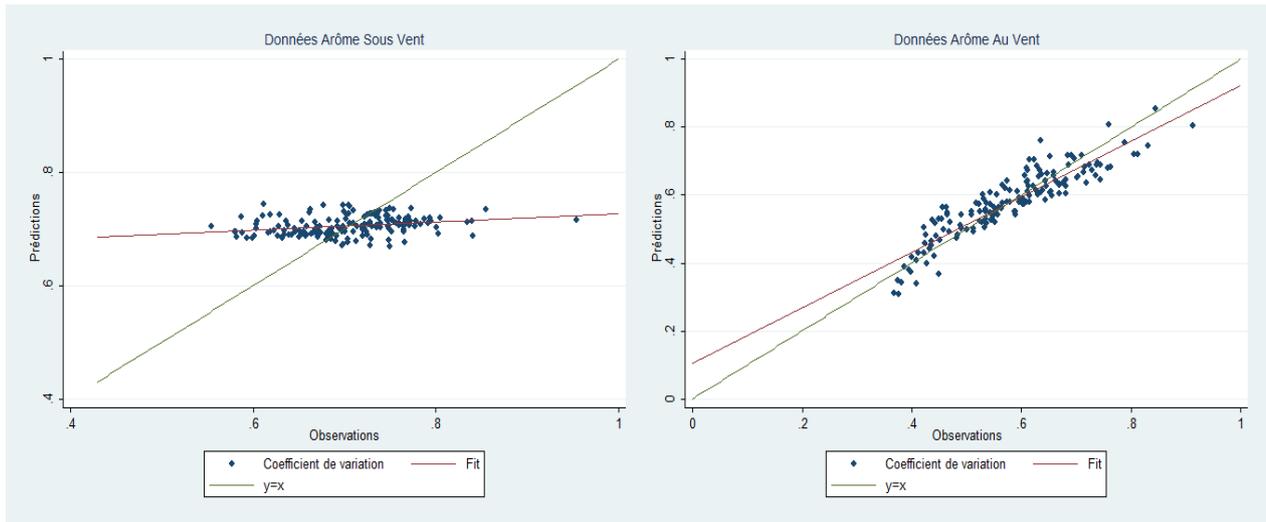


Figure 95 : Evaluation pour chaque sous-échantillon des prédictions du coefficient de variation par le modèle de tendance.

L'analyse descriptive de la section 4.1.5 faisait apparaître des liens assez faibles entre le coefficient de variation et les variables explicatives pour la côte sous le vent. La relation à la rugosité et la relation à l'altitude pouvaient être réduites à une constante alors que la relation à la longitude croissante et la relation à la latitude concave semblaient contre intuitives. Ces analyses préalables sont confirmées par la modélisation. Les coefficients associés à la rugosité et à la longitude sont non significatifs au sein du modèle 1, comme l'illustre le Tableau 54. Pour autant, la nouvelle modélisation (modèle 2) qui ne conserve que les variables dont les coefficients sont significatifs n'apporte pas d'amélioration à la qualité des prédictions comme l'atteste le Tableau 56. Les coefficients des variables explicatives sont d'ailleurs très proches de zéro, comme l'illustre le Tableau 55, et en définitive le modèle se réduit pour la côte sous le vent quasiment à une constante. Le modèle de tendance est donc incapable de capter la variabilité du coefficient directeur pour la côte sous le vent, comme l'illustre la Figure 95.

Tableau 54 : Régressions du coefficient de variation pour les données Arôme sous le vent, modèle 1.

```
Linear regression                                Number of obs =      172
F( 3, 166) = .
Prob > F = .
R-squared = 0.0761
Root MSE = .06074
```

covar	Robust		t	P> t	[95% Conf. Interval]	
	Coef.	Std. Err.				
lon	-6.78e-07	9.77e-07	-0.69	0.489	-2.61e-06	1.25e-06
lat	-.0018395	.0006918	-2.66	0.009	-.0032053	-.0004737
alt	.0000295	.0000149	1.97	0.050	-1.95e-08	.000059
rug	-.0006229	.0024513	-0.25	0.800	-.0054627	.0042169
lat2	1.20e-10	4.51e-11	2.66	0.009	3.09e-11	2.09e-10
_cons	7049.705	2651.298	2.66	0.009	1815.095	12284.32

Tableau 55 : Régressions du coefficient de variation pour les données Arôme sous le vent, modèle 2.

Linear regression	Number of obs = 172
	F(2, 168) = .
	Prob > F = .
	R-squared = 0.0700
	Root MSE = .06058

covar	Robust		t	P> t	[95% Conf. Interval]	
	Coef.	Std. Err.				
lat	-.0015184	.000452	-3.36	0.001	-.0024107	-.0006262
alt	.0000222	.0000103	2.16	0.032	1.92e-06	.0000424
lat2	9.91e-11	2.95e-11	3.36	0.001	4.08e-11	1.57e-10
_cons	5818.184	1731.011	3.36	0.001	2400.847	9235.52

Tableau 56 : Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions du coefficient de variation pour le modèle de tendance Arôme sous le vent.

Modèle	RMSE	ASE	PSEUDO-R ²
1	0.0629	0.0483	0.0093
2	0.0614	0.0480	0.0314

4.2.3.3 Evaluation de la qualité des prédictions des modèles en dehors de l'échantillon

Les prédictions du coefficient de variation issues des modèles établis à partir des données Arôme sont comparées aux observations des stations météorologiques. Les prédictions des trois modèles sont évaluées : le modèle de la moyenne pondérée par l'inverse de la distance (IDW), le modèle de tendance établi à partir des données Arôme (REG) et le modèle de tendance local (REGCOTE). Les prédictions du modèle REGCOTE proviennent des formes des modèles estimés à la section précédente pour la côte au vent et pour la côte sous le vent. Dans le cas où le point à prédire est situé sur la côte au vent (resp. sous le vent), il est prédit à partir du modèle final de la côte au vent (resp. sous le vent).

Les résultats des prédictions du coefficient de variation sont nettement inférieurs à ceux obtenus pour la moyenne. Les trois droites d'ajustement s'éloignent largement de la droite de prédiction idéale ($y = x$) comme on l'observe sur la Figure 96. Le meilleur modèle demeure celui de la moyenne pondérée dont le biais est le plus faible comme on l'observe au Tableau 57. Le RMSE et MAE sont plus faibles pour le modèle PID. Par ailleurs, la variabilité autour de la tendance ajustée est également plus faible comme en atteste la valeur du pseudo R^2 qui est néanmoins supérieure pour le modèle de la moyenne pondérée. Le modèle de tendance local REGCOTE n'apporte pas cette fois d'amélioration à la prédiction sans doute du fait de la faiblesse du modèle pour la côte sous le vent.

Il existe un écart important entre les prédictions des modèles et les coefficients de variation observés aux stations météorologiques. La hauteur des mâts de mesure des stations, principalement située à 10 mètres peut être la raison de ces différences. Les données du

modèle Arôme étant simulées à une altitude de 50 mètres, la méthode d'extrapolation verticale détaillée à la section 2.4 du Chapitre 2 a été appliquée. L'hypothèse avait été faite selon laquelle la forme de la distribution ne se modifiait pas avec l'altitude et le facteur de forme demeurait constant. Le coefficient de variation étant entièrement déterminé par le facteur de forme, la même hypothèse avait été appliquée au coefficient de variation. Les difficultés des modèles de prédiction spatiale du coefficient de variation sur les sites des stations météorologiques peuvent relever des hypothèses établies sur le profil vertical du coefficient de variation. Il peut également s'agir de difficultés provenant du modèle Arôme.

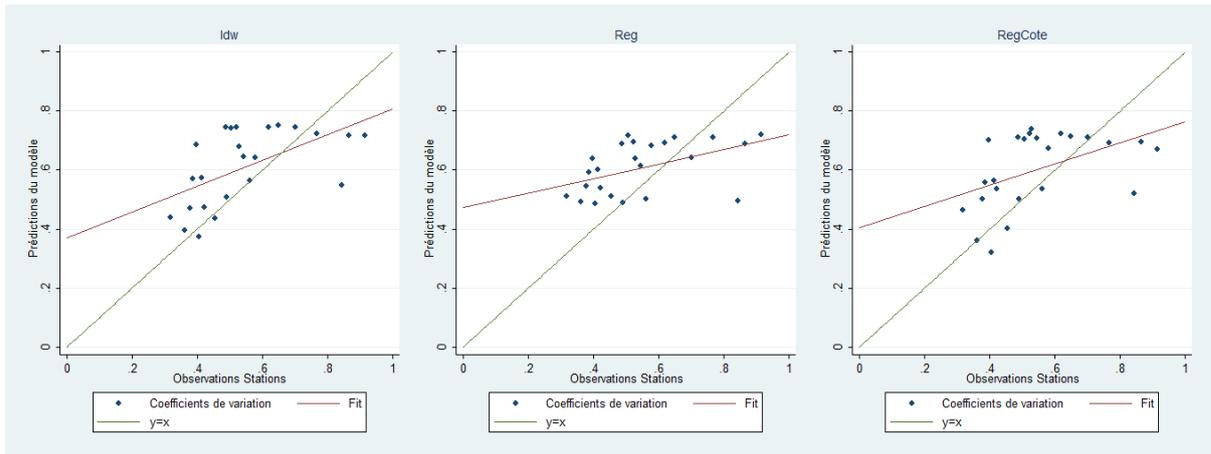


Figure 96: Evaluation des prédictions de du coefficient de variation à partir des données des stations météorologiques.

Tableau 57: Statistiques d'évaluation de la qualité des prédictions des coefficients de variation des stations météorologiques.

Modèle	RMSE	ASE	PSEUDO-R ²
IDW	0.1530	0.1250	0.3243
REG	0.1574	0.1368	0.2287
REGCOTE	0.1625	0.1366	0.2230

4.3 Conclusion

Nous avons au sein du présent chapitre étudié la structure spatiale du gisement éolien et évalué la capacité prédictive des variables de localisation, de l'altitude et de la rugosité. L'analyse descriptive des corrélations de la vitesse du vent entre stations météorologiques, nous a permis de dégager l'existence d'un rayon d'influence évalué à environ 15 km au sein duquel l'information des stations météorologiques pouvait être utilisée pour réaliser la prédiction spatiale du gisement sur les sites où aucune information n'était disponible. Nous préconisons donc une distance maximale de 15 km entre le point de prédiction et les points d'observations utilisées pour la prédiction spatiale dans le cadre de la prédiction par la moyenne pondérée par l'inverse de la distance (PID).

Le gisement éolien a été quantifié à partir du modèle de Weibull à deux paramètres dérivés de la moyenne et du coefficient de variation empirique de la vitesse du vent. L'analyse descriptive de la vitesse moyenne du vent nous a permis d'observer que les moyennes de la vitesse du vent croissaient d'ouest en est alors qu'elles étaient plus élevées aux extrémités nord et sud de l'île. Les zones situées à haute altitude apparaissent moins exposées aux vents forts et la hauteur croissante des obstacles entourant un point de mesure contribue à faire décroître les moyennes de la vitesse du vent. Nous avons découpé le domaine d'étude selon le relief réunionnais afin de dissocier les points de mesure situés sur la côte au vent à l'est, des points de mesure situés sur la côte sous le vent à l'ouest. Les résultats précédents correspondant à l'intuition a priori ont été confirmés à l'exception de la relation de la moyenne à l'altitude pour le domaine de la côte sous le vent. Nous avons ainsi pu observer que les vitesses moyennes du domaine étaient plus élevées à haute et à basse altitude, la relation des vitesses moyennes à l'altitude étant convexe. Un autre résultat a été dégagé pour la relation à la longitude de la moyenne pour le domaine de la côte sous le vent mais la modélisation nous confirmera qu'il s'agit d'un résultat à négliger. Au cours de la modélisation deux modèles ont été comparés, celui de la moyenne pondérée par l'inverse de la distance (PID) et le modèle de tendance produit d'une régression sur les variables issues de l'analyse descriptive. Il ressort des résultats une meilleure prédiction de la vitesse moyenne par le prédicteur de la moyenne pondérée par l'inverse de la distance (PID). Les modèles ont été évalués à partir de la construction d'erreur de prédiction par le procédé du leave-one-out ainsi que par l'évaluation des prédictions réalisées en dehors de l'échantillon des données Arôme à partir des données stations météorologiques. Le modèle de tendance obtient également des résultats satisfaisants à condition que la régression soit menée localement en distinguant le domaine de la côte au vent, de celui de la côte sous le vent. A contrario, les prédictions réalisées à partir de l'échantillon des données des stations météorologiques ont été plus mauvaises quel que soit le modèle évalué (PID ou TENDANCE). Les stations météorologiques sont situées à une distance respective évaluée à 30 km en moyenne, nous recommandons de diviser cette distance par au moins deux pour pouvoir obtenir des résultats qui puissent être validés.

Concernant la dispersion autour de la moyenne, mesurée à partir du coefficient de variation, nous pouvons déduire de l'analyse descriptive à l'échelle de l'île une décroissance de la dispersion en allant vers l'est. Les vitesses du vent semblent plus concentrées autour des moyennes les plus hautes. On observe de même que le coefficient de variation décrit une cloche concave en fonction de la latitude, la dispersion est donc plus faible au nord et au sud de l'île. La dispersion semblait croître avec l'altitude et avec la rugosité. La phase de

modélisation nous a néanmoins livré des résultats qui viennent nuancer les observations de l'analyse descriptive. En premier lieu, il convient de noter la supériorité du modèle de prédiction par la moyenne pondérée par l'inverse de la distance. Les résultats sont inférieurs à ceux obtenus pour la moyenne mais demeurent de bonne qualité. Concernant le modèle de tendance, les résultats varient selon le domaine géographique. Les résultats de la côte au vent sont bons mais apportent des résultats inattendus. Ni la rugosité, ni l'altitude n'apparaissent plus comme des indicateurs fiables de l'évolution du coefficient de variation. Le meilleur modèle se réduit à une explication par les coordonnées dans le plan, à savoir la longitude et la latitude, et le coefficient de variation semble entretenir une relation quadratique respectivement convexe et concave avec chacune des variables. Le coefficient de variation est donc plus faible au nord et au sud et plus élevé à l'ouest et à l'est. Il est plus faible dans le centre du domaine de la côte sous le vent. Concernant la côte sous le vent, la dispersion semble être expliquée par des facteurs autres que ceux que l'analyse a identifiés. La comparaison des observations des stations météorologiques et des prédictions établies à partir du modèle de prédiction basé sur les données de l'échantillon Arôme diffèrent et cela peut être dû aux hypothèses du modèle d'extrapolation vertical.

En définitive les résultats sont satisfaisants pour le modèle de prédiction par la moyenne pondérée par l'inverse de la distance (PID) et ce modèle sera retenu pour effectuer la prédiction spatiale dans le cadre du chapitre sur l'évaluation des politiques publiques de soutien à la production d'électricité éolienne.

Chapitre 5 Evaluation des politiques publiques de soutien à la production d'électricité éolienne

La décision d'investissement dans un projet éolien dépend essentiellement de l'accessibilité du site d'intérêt et de la rentabilité de l'investissement. Ces deux aspects de la décision d'investissement, d'ordre réglementaire et d'ordre économique sont traités simultanément au sein du présent chapitre afin d'évaluer la politique publique de promotion de l'électricité éolienne à La Réunion. Si l'approche classique consiste à identifier à partir de la législation existante uniquement les zones disponibles pour l'installation d'éoliennes sur un territoire, nous avons opté pour une approche construite en termes de scénarios afin d'évaluer l'impact d'une évolution de la politique publique réglementaire (Chapitre 2). Pour chaque scénario de politique réglementaire, une information en termes de puissance crête totale installable a été produite. Cette information ne permet pas néanmoins de différencier les investissements économiquement viables de ceux dont les coûts de production de l'électricité éolienne sont rédhibitoires. L'introduction de la notion de rentabilité permet de sélectionner les potentiels parcs éoliens qui constituent le potentiel éolien économiquement rentable. Pour ces sites, la production annuelle espérée est suffisamment importante pour que le coût unitaire espéré de production de l'électricité éolienne soit inférieur au tarif de rachat en vigueur. Cette analyse permet, à politique de subventionnement constante, de comparer le potentiel éolien économique de chaque scénario entre eux et aux objectifs publics de développement de l'éolien. Inversement, pour chaque scénario de politique réglementaire, il est possible d'évaluer la politique économique de promotion de l'éolien optimale qui permet d'atteindre des objectifs de développement fixés.

La première section de ce chapitre s'attache à quantifier la production annuelle que l'on peut espérer sur un site d'intérêt. La seconde section évalue pour chaque scénario le potentiel économique puis analyse les niveaux planchers des tarifs de rachat à mettre en place pour atteindre les objectifs de développement de l'éolien.

5.1 Quantification de la production d'électricité par scénario

L'électricité produite par une éolienne installée sur un site d'intérêt est évaluée à partir de la méthodologie détaillée à la section 2.6 du Chapitre 2. On a envisagé deux types d'éoliennes : celles en service au sein des parcs éoliens à La Réunion possèdent la technologie Vergnet GEV MP d'une puissance crête de 275 kW et celles des parcs éoliens récemment installés dans la zone des Mascareignes, plus précisément à l'île Maurice, bénéficiant d'une technologie Gamesa G58 d'une puissance crête supérieure de 850 kW. Les courbes de puissance électrique produite par ces deux modèles d'éoliennes pour une masse volumique moyenne annuelle de l'air de 1.193 kg.m^{-3} sont illustrées dans la Figure 51 et détaillées numériquement dans le Tableau 20.

Pour chaque éolienne installable, la production d'électricité annuelle espérée est évaluée à partir d'une spécification de Weibull à deux paramètres de la distribution marginale de la vitesse du vent dont la valeur des paramètres pour le site d'installation de l'éolienne sont évalués à partir de l'estimateur de l'inverse de la distance appliqué aux données fournies par le modèle Arôme de Météo-France. La production totale annuelle espérée est obtenue en consolidant les productions annuelles espérées évaluées pour chaque éolienne installable au sein d'un scénario de politique réglementaire. Rappelons qu'en procédant de la sorte on néglige l'effet de sillage pouvant se produire sur les parcs d'éoliennes denses et par voie de conséquence on surestime probablement la production totale annuelle espérée. Les résultats ainsi obtenus sont présentés pour chaque scénario et type d'éolienne dans le Tableau 58.

Tableau 58: Production électrique annuelle totale espérée par scénario de politique réglementaire et type d'éolienne.

Scenario de politique réglementaire		Production d'électricité éolienne (en GWh) et part à la consommation totale d'électricité (en %) selon le type d'éolienne			
		Vergnet GEV-MP	Part à la consommation totale	Gamesa G58	Part à la consommation totale
BAU		451	16	472	17
Biodiversité		406	14	421	15
Habitat		122	4	126	4
Eolien	A	607	21	637	22
	B	1212	42	1277	45
	C	1033	36	1085	38
	D	1532	54	1642	57

5.1.1 Scénario BAU

La production électrique annuelle espérée totale sous le scénario BAU permet en théorie de couvrir 13% des besoins électriques annuels de l'île. La production annuelle espérée varie fortement selon les sites comme on l'observe sur les histogrammes des productions annuelles présentés à la Figure 97 pour chaque technologie d'éolienne. La dispersion des productions

est importante (coefficient de variation proche de 0.89 et 0.83 respectivement pour la technologie Vergnet et Gamesa) et traduit la grande variabilité spatiale de l'abondance de la ressource sur le territoire de La Réunion. On observe d'ailleurs que le profil des distributions représentées à la Figure 97 est multimodal et on peut isoler trois composantes mélangées.

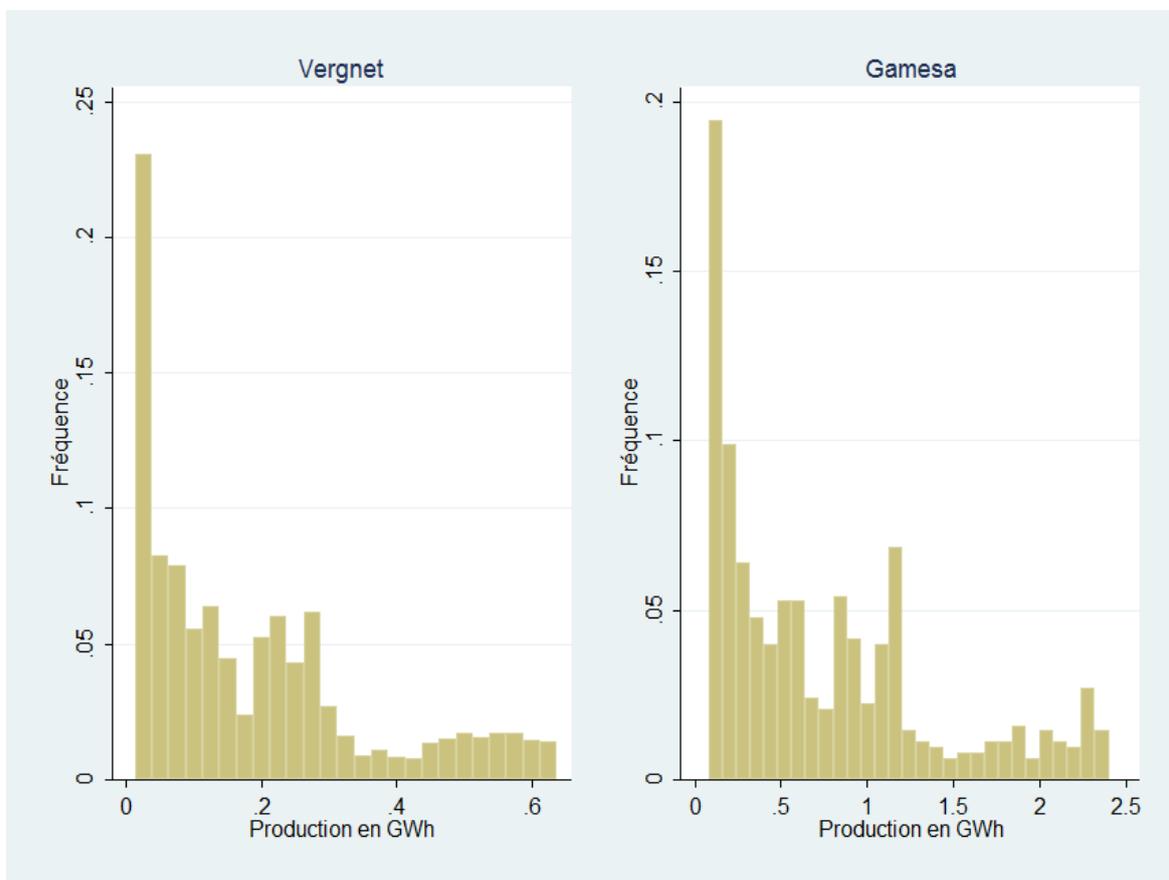


Figure 97: Histogramme des productions annuelles espérées du scénario BAU pour chaque technologie d'éolienne.

La première composante correspond à des valeurs centrées respectivement autour de 0.1 GWh et 0.35 GWh respectivement pour la technologie Vergnet et Gamesa et regroupe les valeurs les plus faibles de production annuelle espérée regroupée à gauche des histogrammes. La seconde composante regroupe des valeurs moyennes centrées respectivement autour de 0.25 GWh et 1 GWh respectivement pour la technologie Vergnet et Gamesa. Les valeurs plus élevées sont regroupées au sein d'une troisième composante dont la queue à gauche débute pour des valeurs de productions annuelles espérées situées autour de 0.5 GWh et 2 GWh respectivement pour la technologie Vergnet et Gamesa respectivement.

On observe selon les technologies d'éoliennes qu'entre environ 30 et 40% (proportion associée respectivement à la technologie Vergnet et à la technologie Gamesa) des puissances installables sous le scénario BAU peuvent produire suffisamment pour égaler ou dépasser la norme médiane des 10% de taux d'utilisation⁸¹ relevée sur les sites en opération à La Réunion. La courbe cumulative des taux d'utilisation qui classe par ordre croissant les puissances installables selon leur taux d'utilisation sous le scénario BAU est représentée à la Figure 98 pour chaque technologie.

⁸¹ Défini au Chapitre 2 à l'Eq.(56)

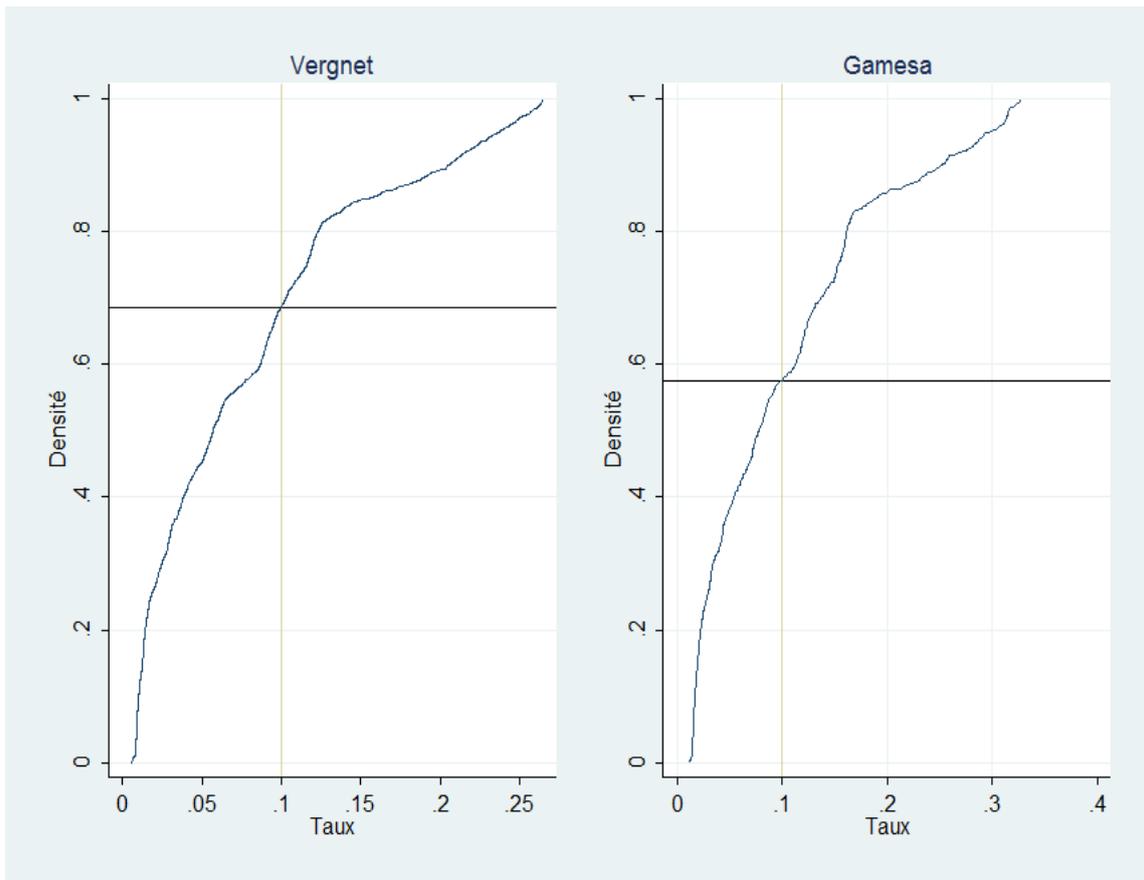


Figure 98: Courbe cumulative des taux d'utilisation des éoliennes installables du scénario BAU pour chaque technologie.

Les sites prometteurs sont concentrés sur cinq zones principales : le nord-est sur les communes de Sainte-Suzanne, Saint-André et Bras Panon ; au sud-est sur la commune de Sainte-Rose, au sud-sud-est sur la commune de Saint-Philippe, au sud sur la commune de Saint-Pierre et dans les hauteurs sud de l'île sur la commune du Tampon. Le reste ne correspond qu'à des sites isolés. En valeur absolue, ces éoliennes représentent une puissance installable totale de 210 MW pour la technologie Vergnet et de 227 MW pour la technologie Gamesa. La répartition spatiale des éoliennes installables prometteuses du scénario BAU est illustrée à la Figure 99.

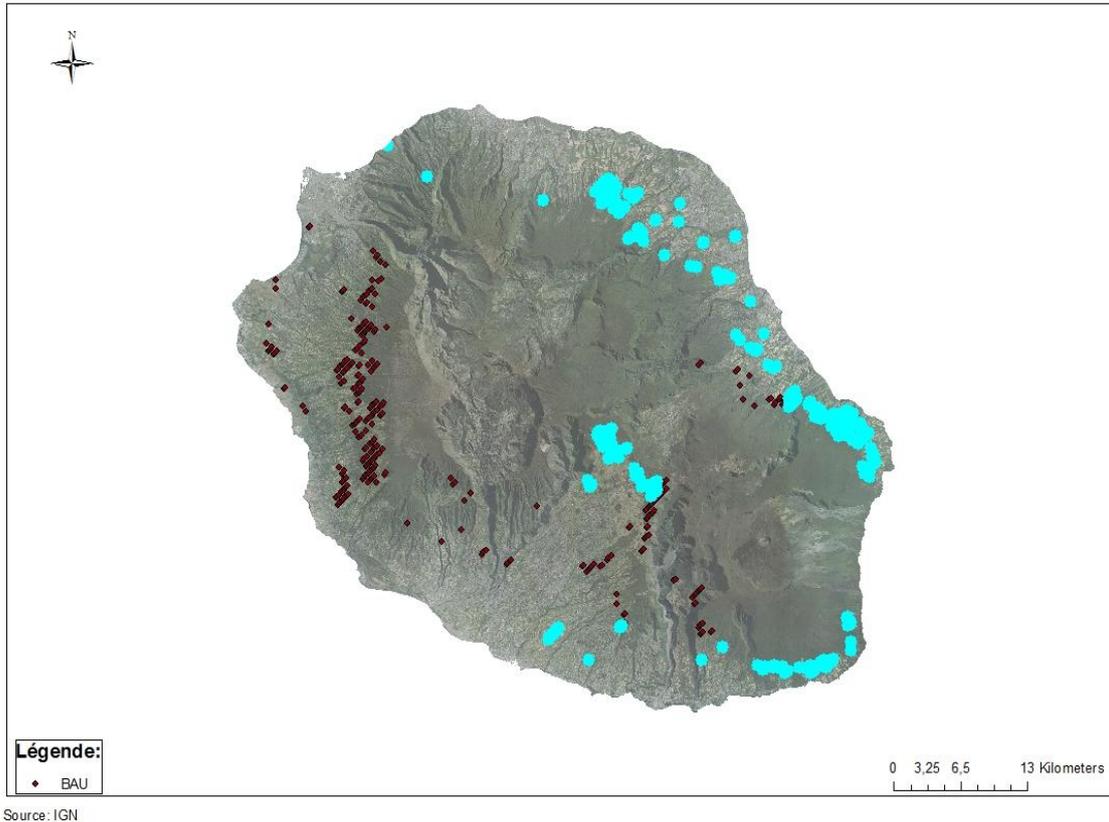


Figure 99: Répartition spatiale des éoliennes installables prometteuses du scénario BAU.

5.1.2 Scénario Biodiversité

Le scénario Biodiversité introduit au sein de la politique réglementaire une meilleure prise en compte des enjeux de conservation de l'avifaune endémique de La Réunion. Il induit une diminution des puissances installables de l'ordre de 13% par rapport au scénario de référence BAU (voir section 1.4 du Chapitre 3). La diminution des puissances installées induit une baisse correspondante de la production totale d'électricité éolienne de l'ordre de 10%. Les zones identifiées comme présentant un risque pour la survie des espèces avifaunes de La Réunion ne semblent pas au premier abord être parmi les zones les plus prometteuses pour la production d'électricité éolienne. Ceci est confirmé par l'histogramme de la production électrique (Figure 100) dont le profil des valeurs de la troisième composante n'est pas affecté par les nouvelles contraintes et demeure semblable au cas du scénario BAU.

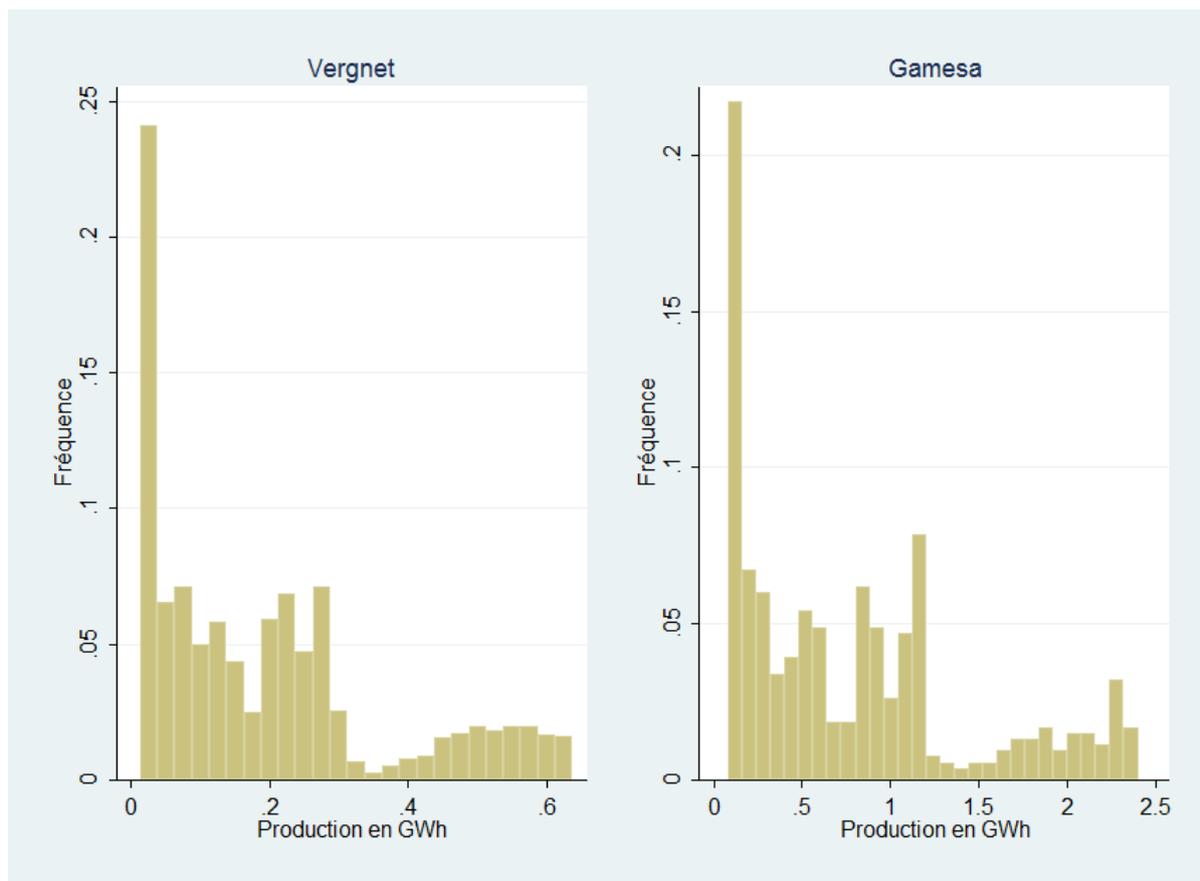


Figure 100: Histogramme des productions annuelles espérées du scénario Biodiversité pour chaque technologie d'éolienne.

Les valeurs centrales de l'histogramme comme la moyenne sont quasi identiques (identiques à un arrondi à deux décimales) pour la technologie Vergnet et se révèlent quasi similaires pour la technologie Gamesa. Dans les deux cas, la moyenne progresse très légèrement. La variabilité diminue très légèrement également et les coefficients de variation sont quasi identiques pour la technologie Vergnet et très proches pour la technologie Gamesa. Les nouvelles contraintes ne semblent donc pas avoir un impact majeur sur le profil de la répartition des productions électriques espérées à La Réunion. Les valeurs des moyennes et coefficient de variation de la production électrique annuelle espérée sont reportés pour chaque scénario au Tableau 59.

Tableau 59: Moyennes et coefficient de variation de la production annuelle totale espérée pour chaque scénario.

		Technologie Vergnet GEV-MP		Technologie Gamesa G58 (en GWh)	
		Moyenne (en GWh)	Coefficient de Variation	Moyenne (en GWh)	Coefficient de Variation
BAU		.186	.895	.752	.839
Biodiversité		.193	.889	.789	.830
Habitat		.213	.791	.862	.744
Eolien	A	.181	.898	.737	.837
	B	.156	.975	.649	.900
	C	.166	.971	.692	.896
	D	.159	.964	.663	.885

La proportion des éoliennes installables associée à un taux d'utilisation supérieur ou égal à 10% au sein de chaque scénario augmente pour la technologie Vergnet (+1.2%) et pour la technologie Gamesa (+3.3%). La légère augmentation des moyennes est donc expliquée par la disparition majoritaire d'éoliennes peu productives au sein du scénario comportant les nouvelles contraintes réglementaires. La courbe cumulative des taux d'utilisation qui classe par ordre croissant les puissances installables selon leur taux d'utilisation sous le scénario BAU est représentée à la Figure 101 pour chaque technologie.

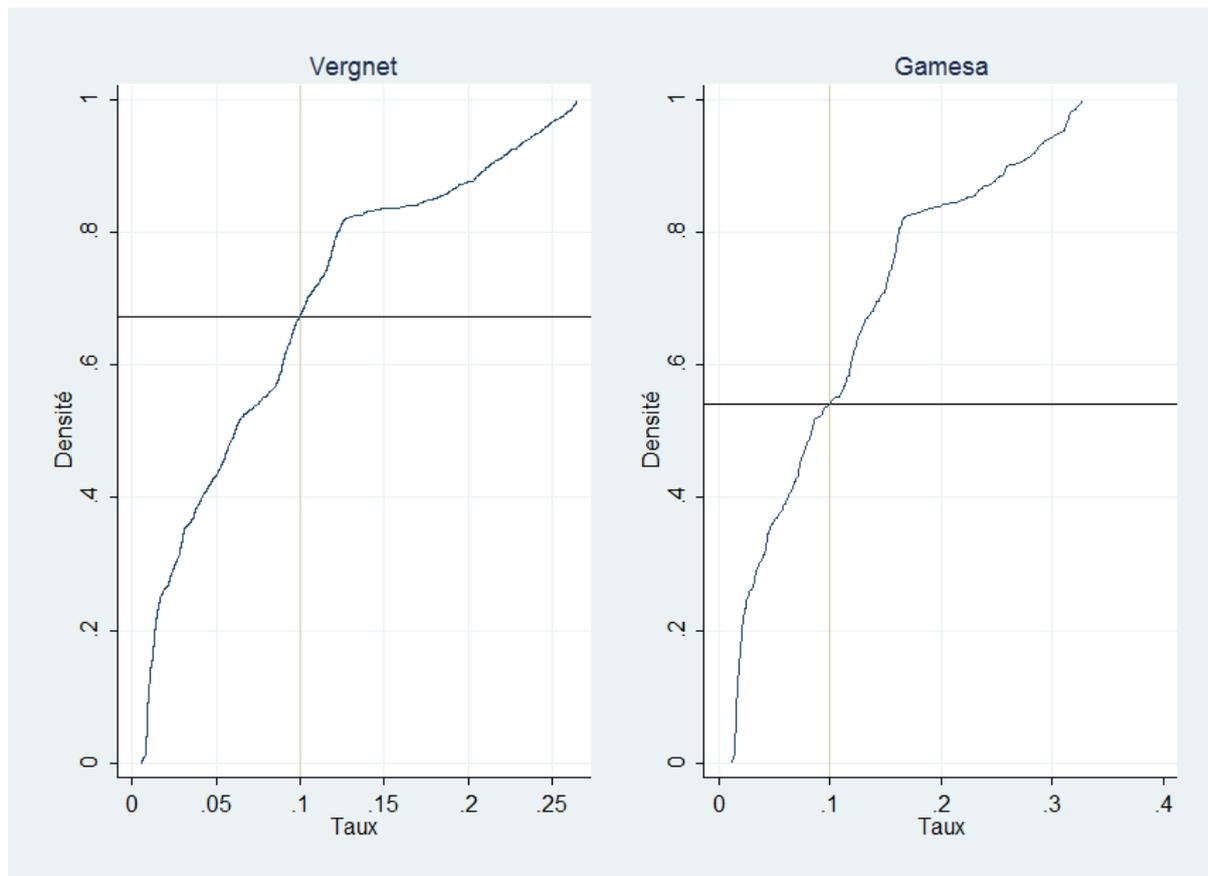


Figure 101: Courbe cumulative des taux d'utilisation des éoliennes installables du scénario Biodiversité pour chaque technologie.

En valeur absolue, les puissances installables prometteuses diminuent néanmoins de 10% pour la technologie Vergnet et de 8% pour la technologie Gamesa. L'étude de la répartition spatiale des éoliennes installables, illustrée à la Figure 102, permet de relever que certains parcs éoliens identifiés comme prometteurs sous le scénario BAU sont placés dans les couloirs de déplacement identifiés en vert clair sur la Figure 102. C'est notamment le cas au sud sur la commune de Saint-Pierre ainsi que sur la côte est à Saint André et à Saint Benoit. Autrement, la répartition spatiale des sites prometteurs demeure identique comme l'illustre la Figure 102.

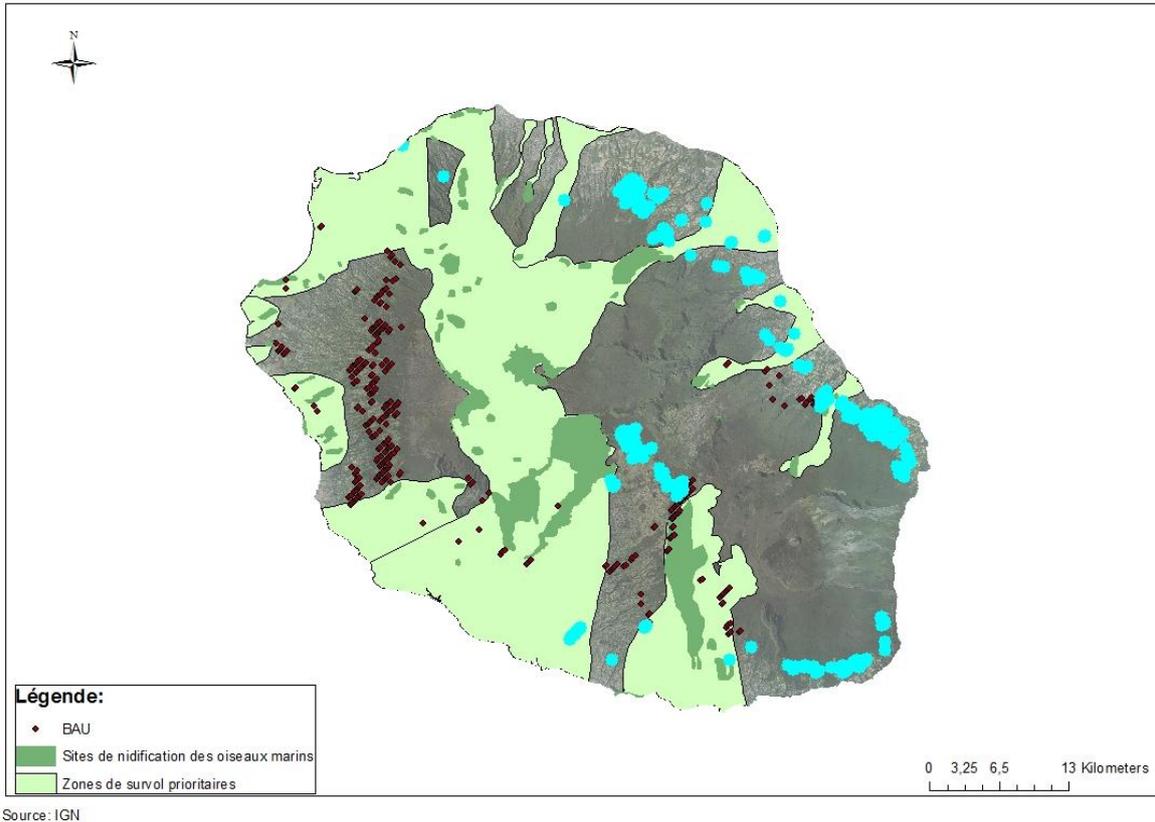


Figure 102: Impact des nouvelles normes de protection de la biodiversité sur les éoliennes installables prometteuses du scénario BAU et répartition spatiale des éoliennes installables prometteuses du scénario Biodiversité.

5.1.3 Scénario Habitat

La distance d'éloignement des zones d'habitations apparaissait dans le Chapitre 3 comme un facteur influant fortement le potentiel éolien installable. Le doublement de la distance d'éloignement, conforme aux dispositions de l'amendement Germain, induisait une diminution de 75 % du potentiel éolien exprimé en puissance installable. La production éolienne totale correspondante pour le scénario Habitat diminue dans les mêmes proportions (73%). L'analyse de la distribution de la production fait ressortir des valeurs de la production davantage concentrées autour d'une moyenne dont la valeur est, quant à elle, plus élevée que dans le scénario BAU. La lecture des histogrammes de la production annuelle espérée présentés pour chaque technologie à la Figure 103 fait émerger un profil de distribution multimodal dont les deux composantes mélangées les plus faibles sont disjointes de la composante des productions les plus élevées.

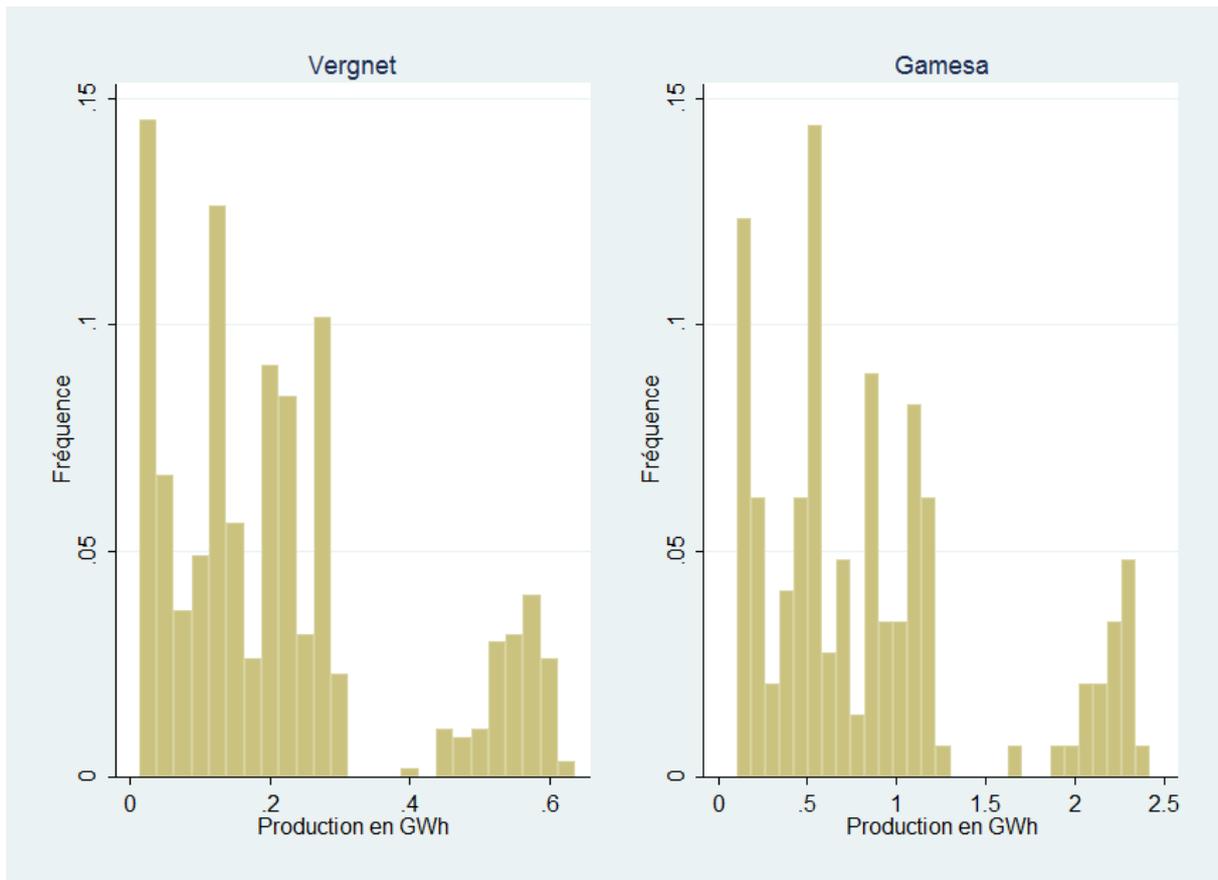


Figure 103: Histogramme des productions annuelles espérées du scénario Habitat pour chaque technologie d'éolienne.

L'observation de l'histogramme fait apparaître que la fréquence relative de la troisième composante est bien plus élevée pour les deux technologies que dans les scénarios précédents. En conséquence, la proportion des éoliennes associées à un taux d'utilisation supérieur à 10 sont en plus forte proportion pour la technologie Vergnet (+1.2%) et pour la technologie Gamesa (+5.5%) au sein du scénario Habitat. La répartition cumulative des éoliennes selon leur taux d'utilisation est illustrée à la Figure 104 pour le scénario Habitat.

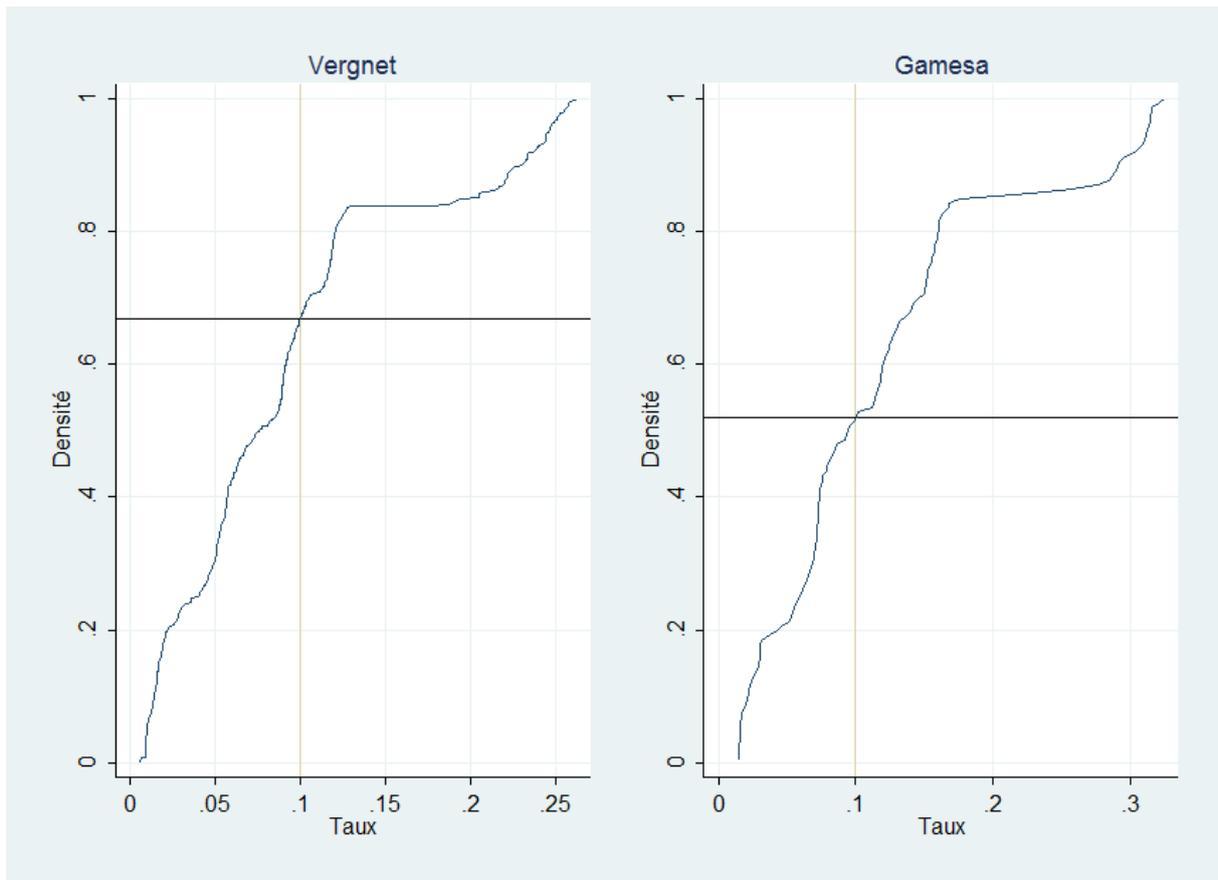


Figure 104: Courbe cumulative des taux d'utilisation des éoliennes installables du scénario Habitat pour chaque technologie.

En valeur absolue, on observe que le nombre d'éoliennes associées à un taux d'utilisation supérieure à 10% est nettement inférieur à ce qu'il est dans le cas du scénario de référence. Les puissances installables prometteuses diminuent ainsi de 75% pour la technologie Vergnet et de 73% pour la technologie Gamesa. La répartition spatiale des éoliennes prometteuses se résume à quelques sites épars illustrés à la Figure 105. On observe ainsi que seulement quelques sites demeurent à Sainte-Marie à l'est, et à Saint-Philippe au sud-sud-est.

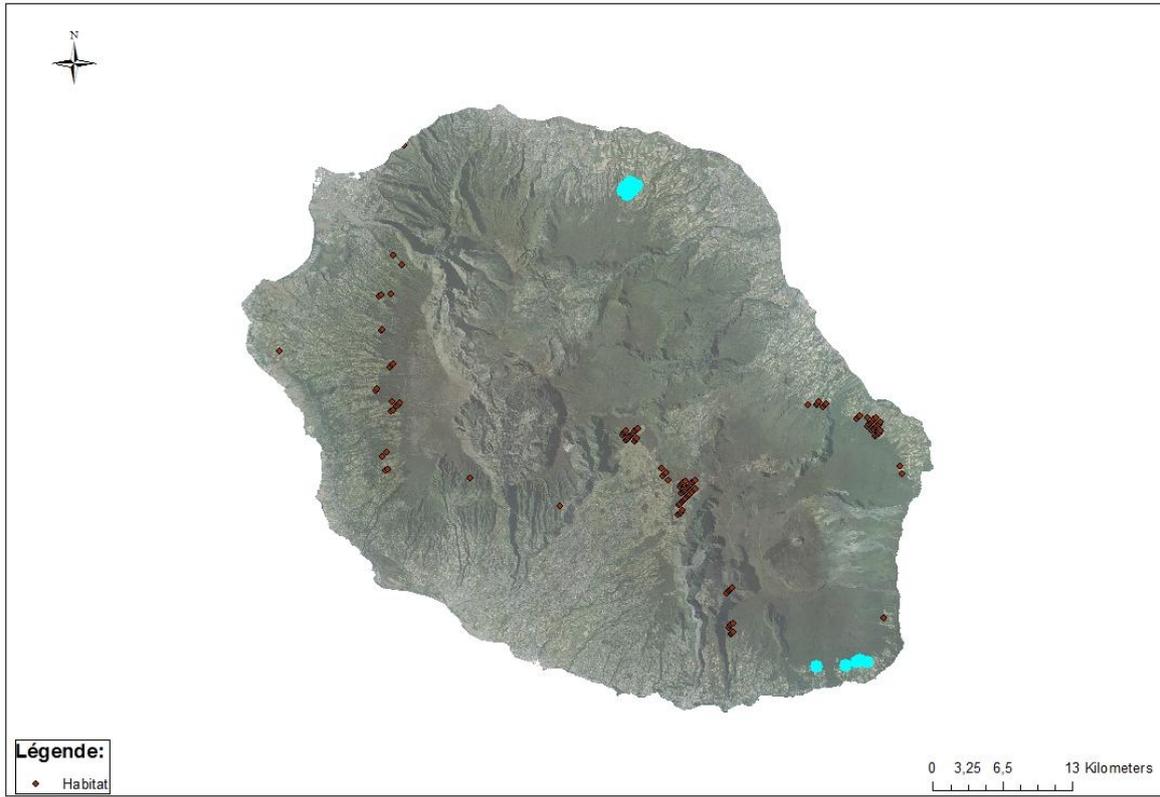


Figure 105: Répartition spatiale des éoliennes installables prometteuses du scénario Habitat.

5.1.4 Scénario Eolien A

La diminution de la distance d'éloignement de l'ordre de 100 mètres induit selon les résultats de la section 1.4 du Chapitre 3 une augmentation de l'ordre de 40% des puissances installables par rapport au scénario de référence. La production annuelle espérée totale correspondante augmente dans des proportions plus faibles, de l'ordre de 35%. L'augmentation des surfaces engendrée par la diminution des zones d'éloignement a donc majoritairement induit l'installation d'éoliennes moins productives. Les productions individuelles d'électricité sont en moyenne 2% inférieures au scénario BAU. L'histogramme de la production annuelle espérée est présenté à la Figure 106.

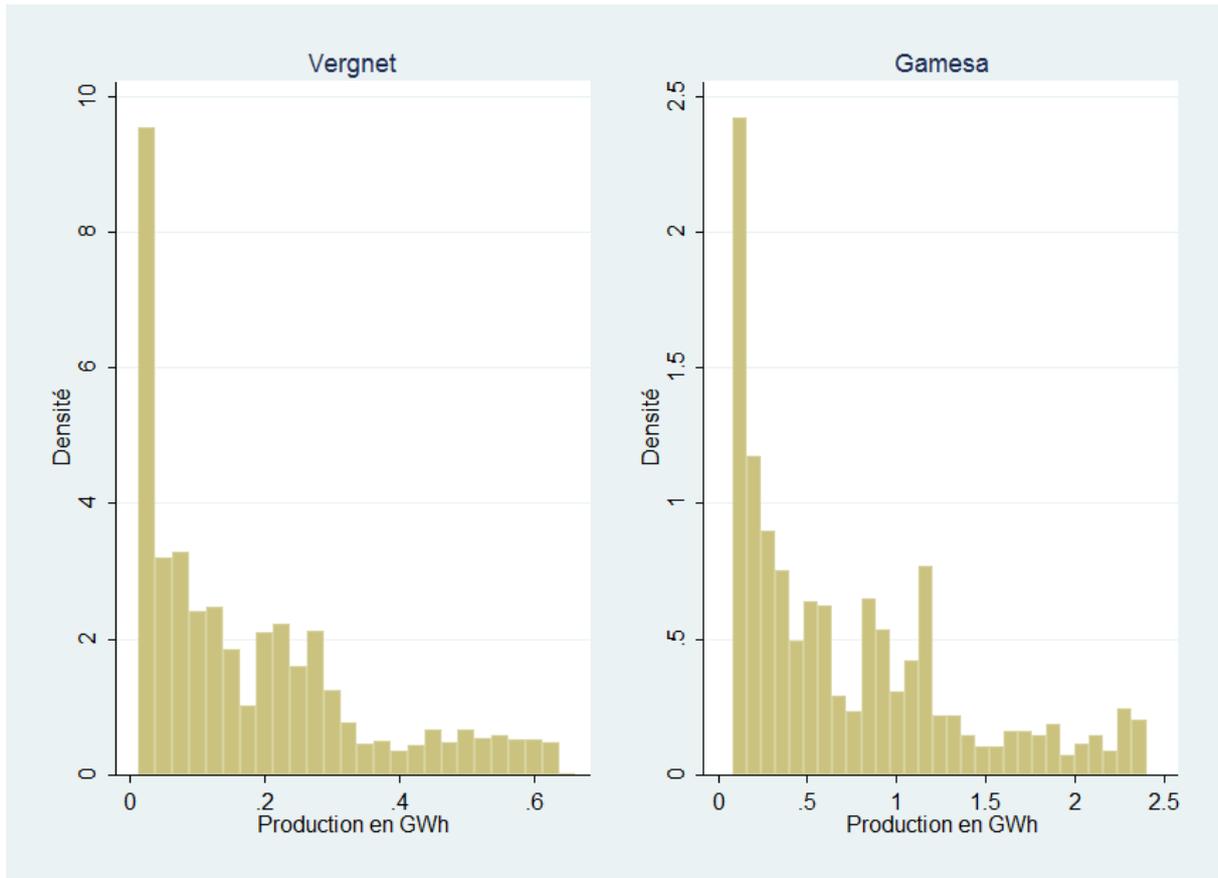


Figure 106: Histogramme des productions annuelles espérées du scénario Eolien A pour chaque technologie d'éolienne.

La proportion d'éoliennes produisant suffisamment d'électricité pour que le taux d'utilisation dépasse 10% diminue légèrement de l'ordre de 1% par rapport au scénario BAU pour les deux technologies.

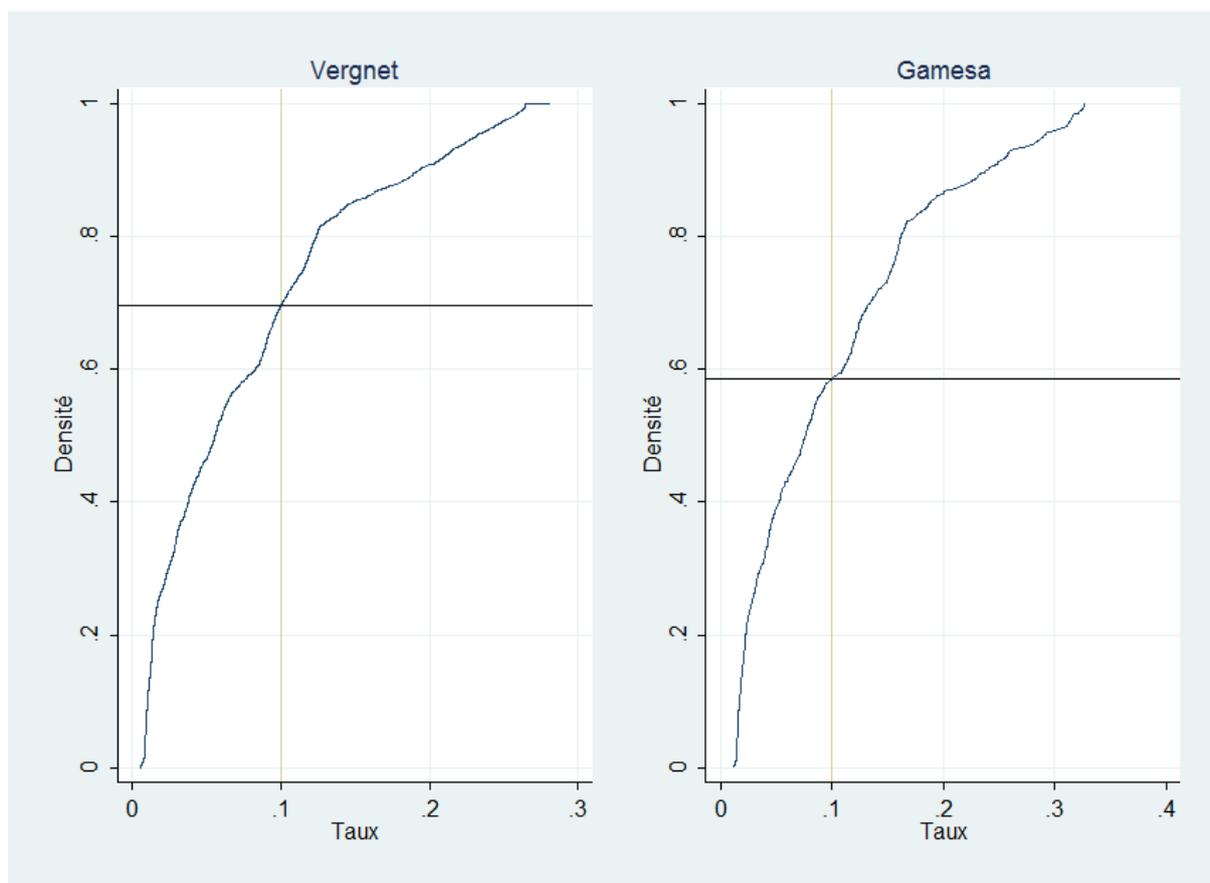


Figure 107: Courbe cumulative des taux d'utilisation des éoliennes installables du scénario Eolien A pour chaque technologie.

En valeur absolue, ceci se traduit néanmoins par une augmentation conséquente de la densité des sites prometteurs de l'ordre de 34% pour les deux technologies. Les sites prometteurs sont situés sur toute la côte-est entre Sainte-Suzanne et Sainte-Rose, au sud-sud-est à Saint-Philippe, au sud sur la commune du Saint-Pierre mais également sur les communes de Petite-île et Saint-Joseph. La concentration de sites a également augmenté dans les hauteurs de la commune du Tampon. Des nouveaux sites sont identifiés à l'ouest à Saint-Leu ainsi qu'au nord sur les communes de Saint-Denis et Sainte-Marie. Ces sites prometteurs sont représentés à la Figure 108.

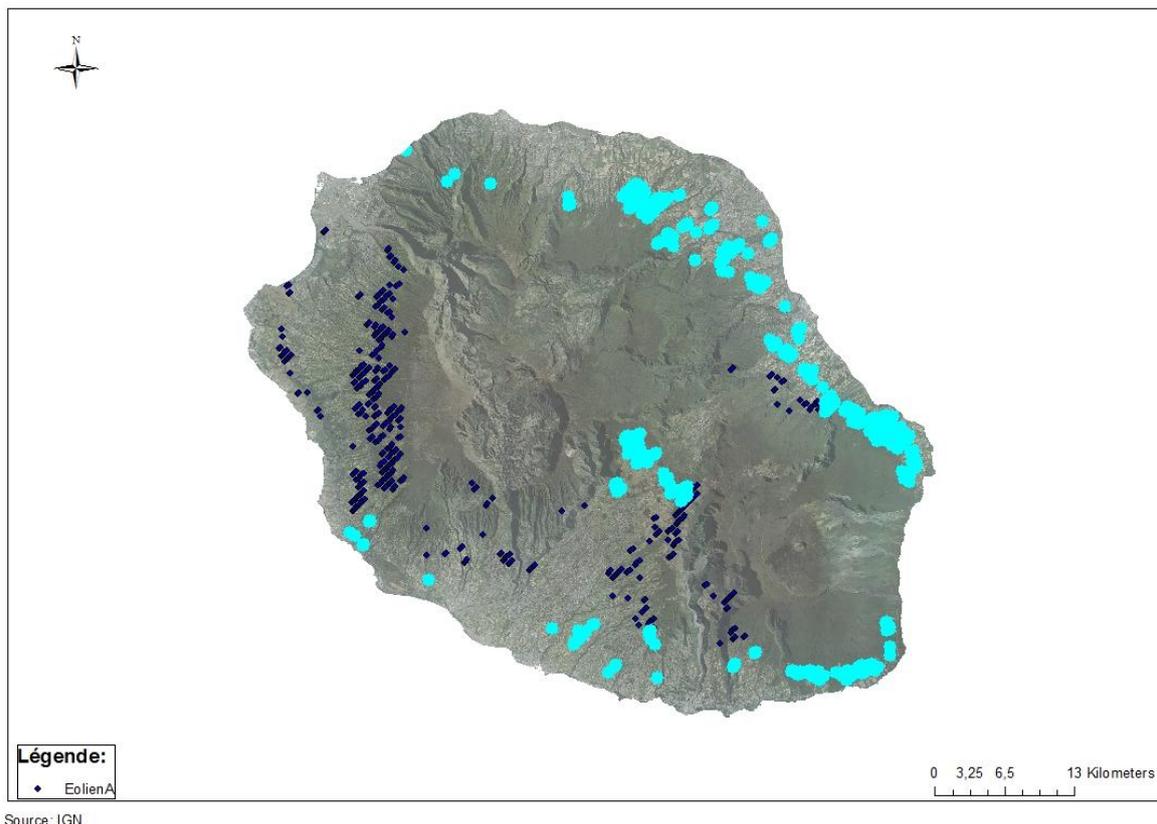


Figure 108: Répartition spatiale des éoliennes installables prometteuses du scénario Eolien A.

5.1.5 Scénario Eolien B

Le scénario éolien B est le premier des scénarios incluant un principe d'exception autorisant l'installation d'éoliennes sur les zones sensibles identifiées par la politique territoriale régionale. Selon les résultats de la section 1.4 du Chapitre 3, ce scénario aboutit à une augmentation considérable du potentiel éolien en puissance installable, de l'ordre de 220%. A nouveau, la croissance correspondante de la production annuelle espérée est plus faible, de l'ordre de 170%. Ceci est confirmé par la diminution significative de la moyenne de la production d'électricité sur les sites accessibles (-16% et -14% respectivement pour la technologie Vergnet et pour la technologie Gamesa). La dispersion de la distribution de la production est significativement plus importante comme on l'observe au Tableau 59 (+8% et +7% d'augmentation du coefficient de variation pour la technologie Vergnet et Gamesa). Le profil de l'histogramme apparaît globalement davantage écrasé du fait de l'augmentation relative des fréquences au sein de la première composante de l'histogramme. Les trois composantes du mélange se détachent d'ailleurs plus nettement, notamment pour l'histogramme de droite de la Figure 109 représentant la production annuelle espérée pour la technologie Gamesa.

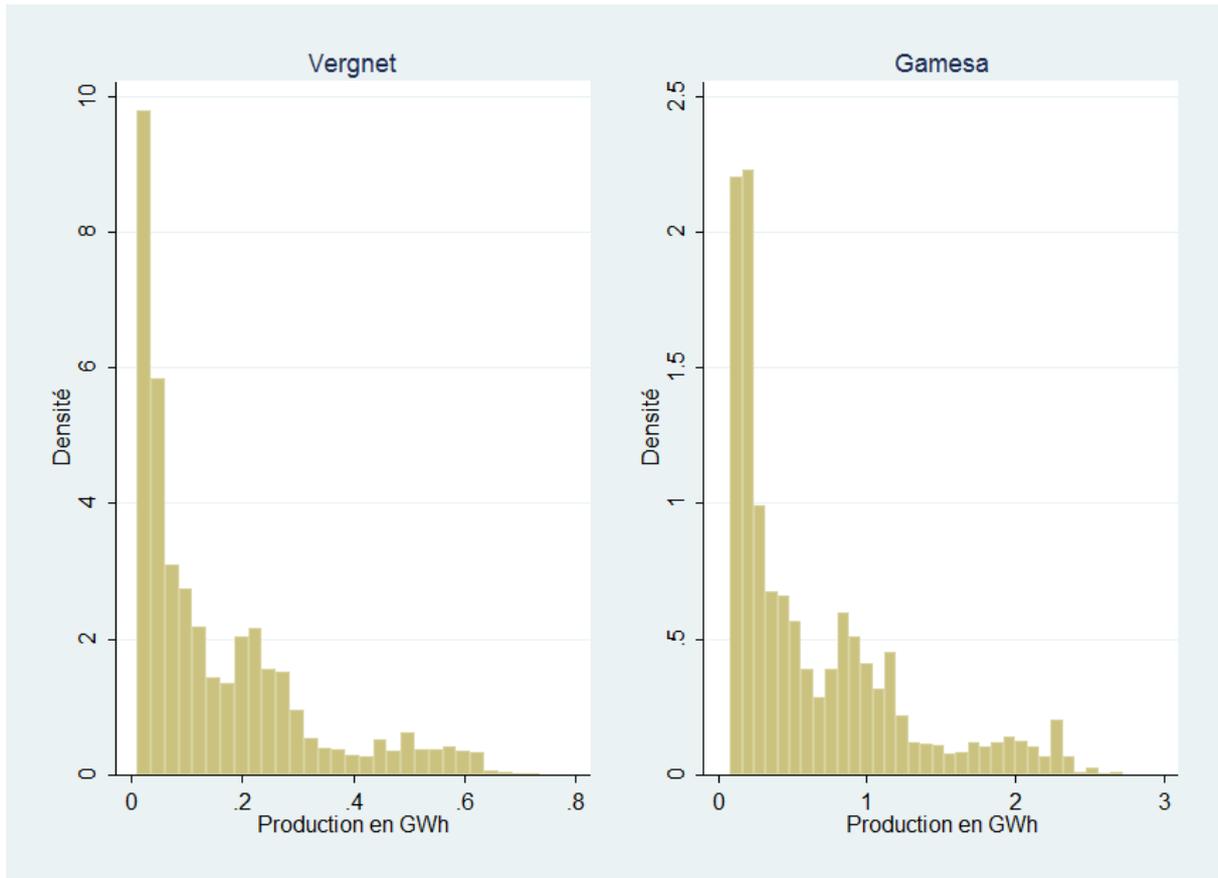


Figure 109: Histogramme des productions annuelles espérées du scénario Eolien B pour chaque technologie d'éolienne.

Comme attendu, la proportion des sites les plus prometteurs, à savoir les sites dont le taux d'utilisation est supérieur ou égal à 10%, diminue pour la technologie Vergnet de l'ordre de 7.8% et de l'ordre de 6.6% pour la technologie Gamesa.

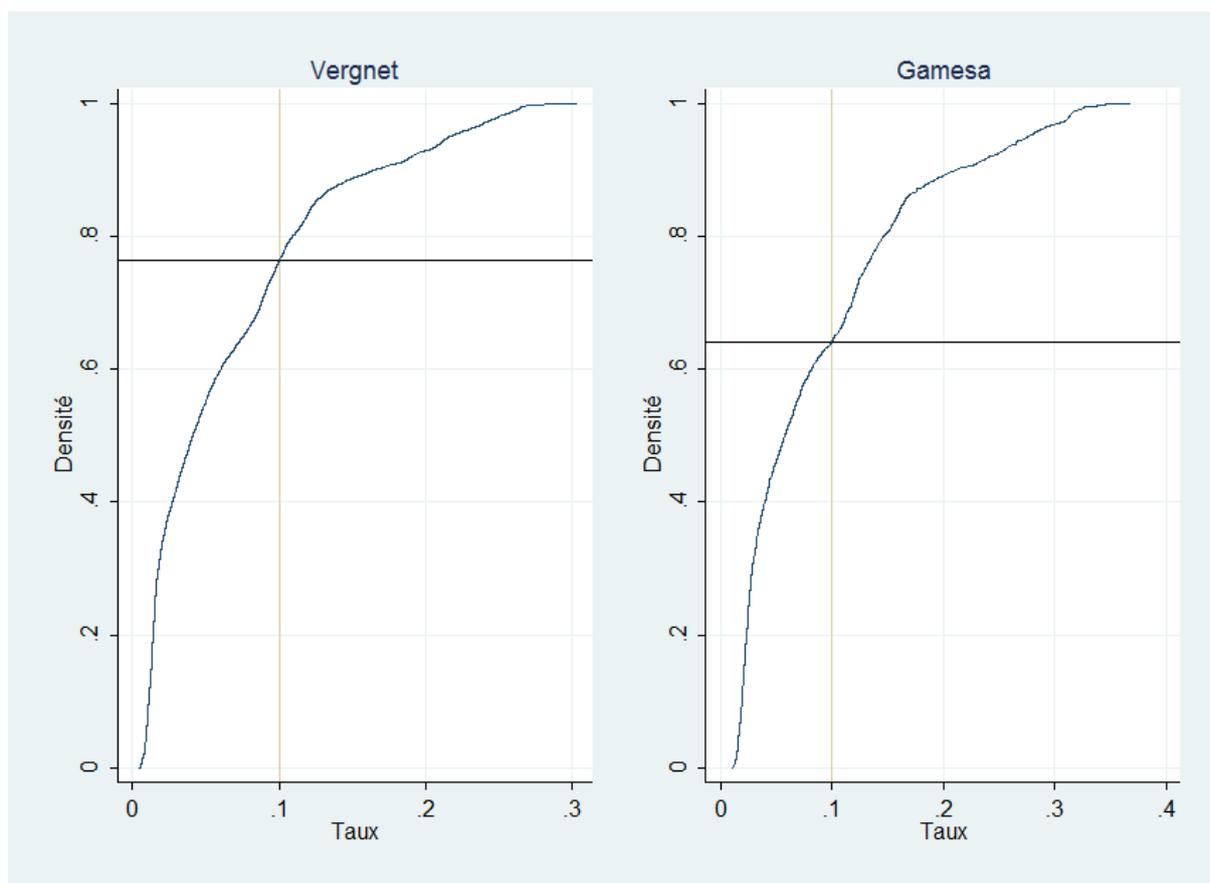


Figure 110: Courbe cumulative des taux d'utilisation des éoliennes installables du scénario Eolien B pour chaque technologie.

Dans la lignée des résultats précédents, on note que l'augmentation des surfaces accessibles conduit à inclure proportionnellement davantage de sites non prometteurs que de sites prometteurs. L'augmentation de la surface accessible, et de la puissance installable correspondante, est associée à une croissance marginale de la production décroissante. En valeur absolue néanmoins, la quantité d'éoliennes installables prometteuses a considérablement augmenté, de l'ordre de 138% pour la technologie Vergnet et de 164% pour la technologie Gamesa. Comme on l'observe sur la Figure 111, l'ensemble de la côte au vent est parcouru de sites prometteurs depuis le nord de l'île jusqu'au sud-est. Au sud, en particulier à Sainte-Philippe, la densité de sites prometteurs a fortement augmenté comme dans les hauteurs du Tampon.

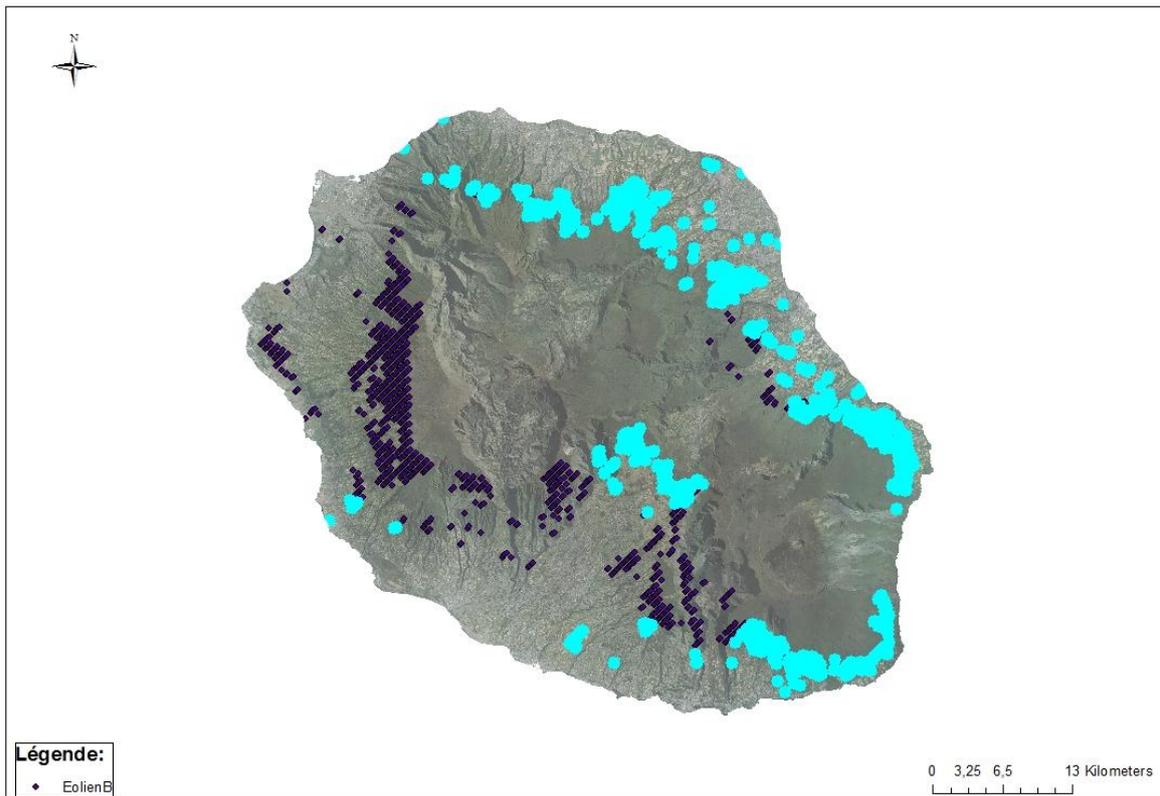


Figure 111: Répartition spatiale des éoliennes installables prometteuses du scénario Eolien B.

5.1.6 Scénario Eolien C

Le scénario Eolien C correspond à une refonte de la politique territoriale axée sur la prise en compte des zones à risques pour l'avifaune locale réunionnaise. Elle conduisait à une augmentation substantielle des puissances éoliennes installées, de l'ordre de 150%. Dans la lignée des résultats précédents, la croissance de la production est proportionnellement moins importante, de l'ordre de 130%. La moyenne de la production est également inférieure à celle du scénario BAU (-10% et -8% respectivement pour la technologie Vergnet et la technologie Gamesa) et la production estimée pour chaque éolienne est davantage dispersée autour de la moyenne (+9% et +7% d'augmentation du coefficient de variation pour la technologie Vergnet et Gamesa). Le profil de l'histogramme illustré à la Figure 112 est très proche du cas Eolien B.

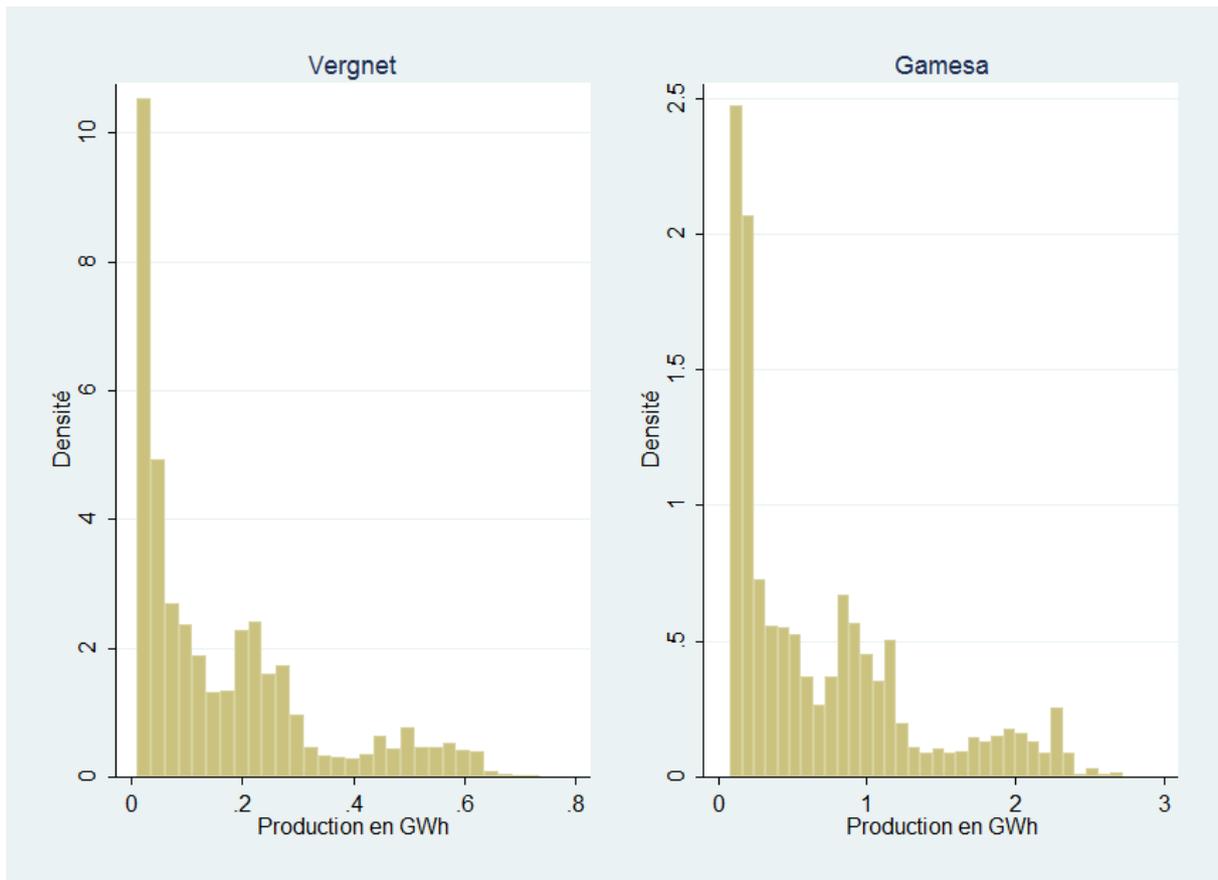


Figure 112: Histogramme des productions annuelles espérées du scénario Eolien C pour chaque technologie d'éolienne.

Dans la lignée des résultats précédents, la proportion des sites les plus prometteurs diminue pour la technologie Vergnet de l'ordre de 5.44% et de l'ordre de 2.8% respectivement pour la technologie Vergnet et pour la technologie Gamesa par rapport au scénario BAU. De même, comparée au scénario Eolien B la proportion des sites les plus prometteurs augmente bien plus (+2.3% pour la technologie Vergnet et +3.8 % pour la technologie Gamesa). La moyenne est également supérieure au cas du scénario Eolien B et la distribution de la production électrique est davantage concentrée autour de la moyenne.

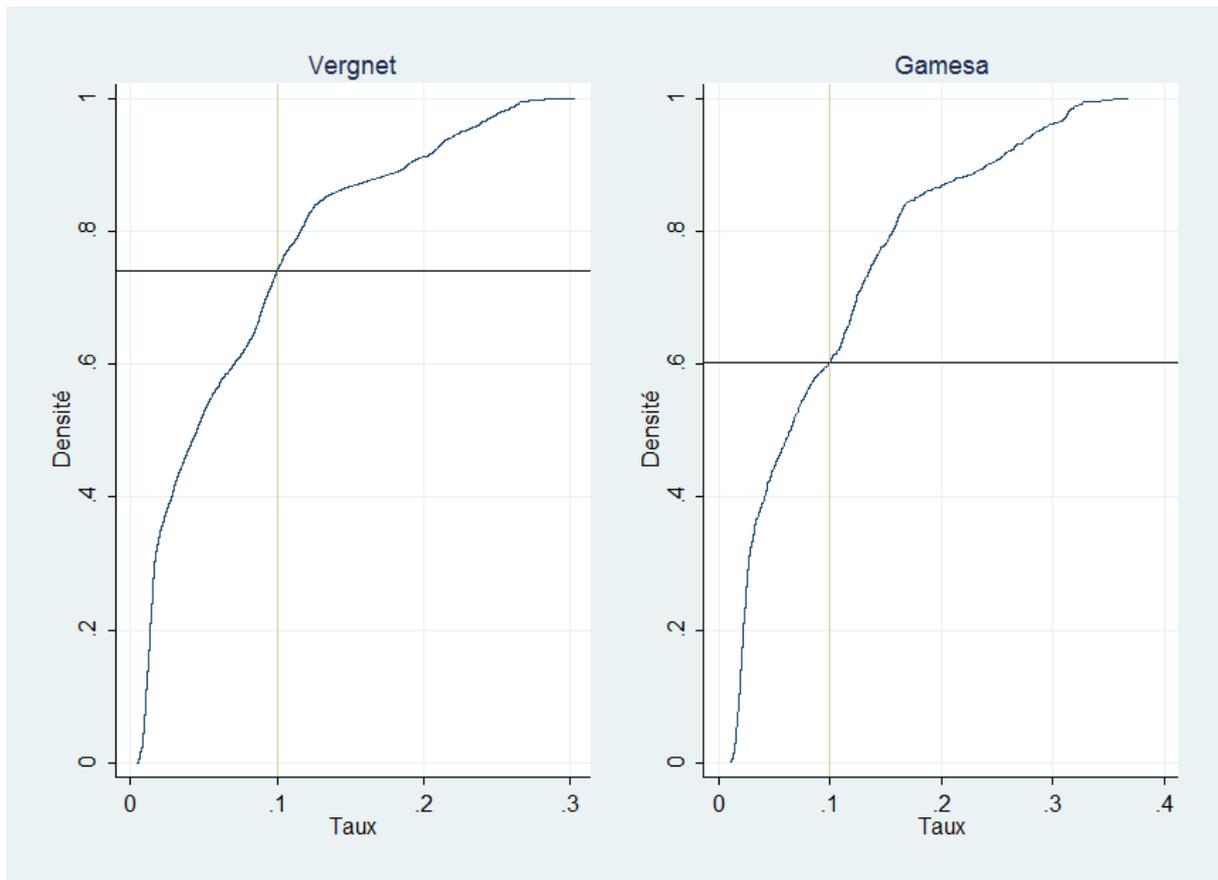


Figure 113: Courbe cumulative des taux d'utilisation des éoliennes installables du scénario Eolien C pour chaque technologie.

En valeur absolue, la quantité d'éoliennes installables prometteuses demeure considérablement plus importante que dans le cas du scénario BAU. Elle augmente respectivement de 112% et 133% pour les deux technologies. La répartition spatiale des puissances installables prometteuses demeure semblable à celle du scénario Eolien B et est illustrée à la Figure 114.

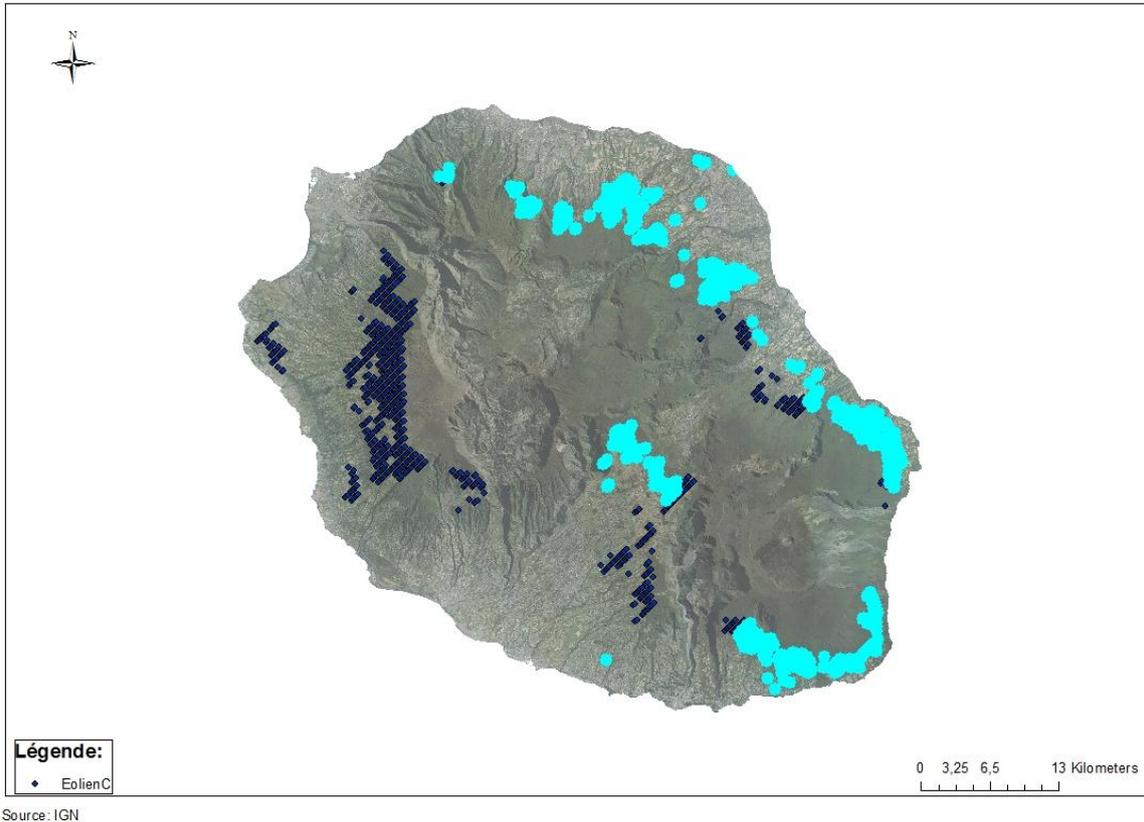


Figure 114: Répartition spatiale des éoliennes installables prometteuses du scénario Eolien C.

L'impact des nouvelles normes de conservation de la biodiversité réunionnaise sur la puissance installable prometteuse totale a été évalué à la section 5.1.2 dans une fourchette comprise entre 8 à 10% selon les technologies par rapport au scénario BAU. La comparaison des scénarios Eolien B et Eolien C permet de quantifier la différence en termes de puissance prometteuse installable pour ces scénarios. L'impact de la nouvelle réglementation est évalué à -12% et -15% pour la technologie Vergnet et pour la technologie Gamesa respectivement. Des sites prometteurs au sud de l'île sont ainsi impactés à Saint-Joseph, Petite-île et Saint-Pierre comme l'illustre la Figure 115. D'autres sites sont impactés sur l'ensemble de la côte au vent de Saint-Denis à Sainte-Rose ainsi qu'à l'ouest à Saint Leu. Il va sans dire qu'inversement, l'opération de parcs éoliens dans ces zones est susceptible d'affecter les populations d'oiseaux marins.

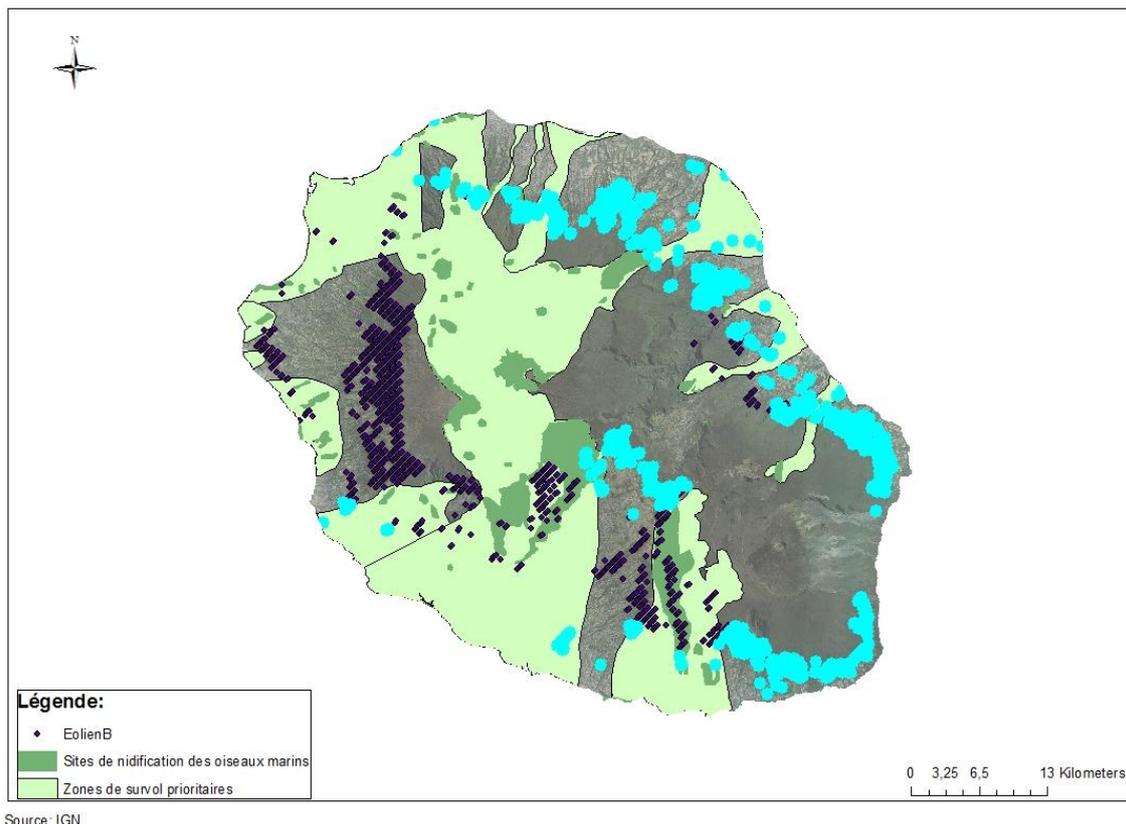


Figure 115: Impact des nouvelles normes de protection de la biodiversité sur les éoliennes installables prometteuses du scénario Eolien B.

5.1.7 Scénario Eolien D

Le scénario le moins contraignant conduisait à un triplement des puissances éoliennes installables (section 1.4 du Chapitre 3). Les hypothèses du scénario Eolien D induisent une diminution des distances d'éloignement et une remise à plat de la politique territoriale par le biais d'un principe d'exception accordé aux éoliennes sur certaines zones naturelles sensibles. La croissance en production par rapport au scénario BAU, de l'ordre de 250%, est inférieure à la croissance des capacités installables. La moyenne diminue à nouveau par rapport au scénario BAU (-15% pour la technologie Vergnet et -12% pour la technologie Gamesa) et la distribution est davantage resserrée autour de la moyenne (diminution du coefficient de variation de 7.7% et 5.5%). La proportion des sites prometteurs est également plus faible (-6.8% pour la technologie Vergnet et -5.7% pour la technologie Gamesa). Le profil de l'histogramme des productions annuelles espérées est représenté à la Figure 116. Il demeure similaire aux scénarios Eolien B et Eolien C. Néanmoins, la moyenne est plus élevée (+2%) et la distribution de la production est moins dispersée (+1.2% et 1.7%) que dans le cas du scénario Eolien B. La proportion de sites prometteurs est par ailleurs légèrement plus élevée que pour le scénario Eolien B, de l'ordre de +1%.

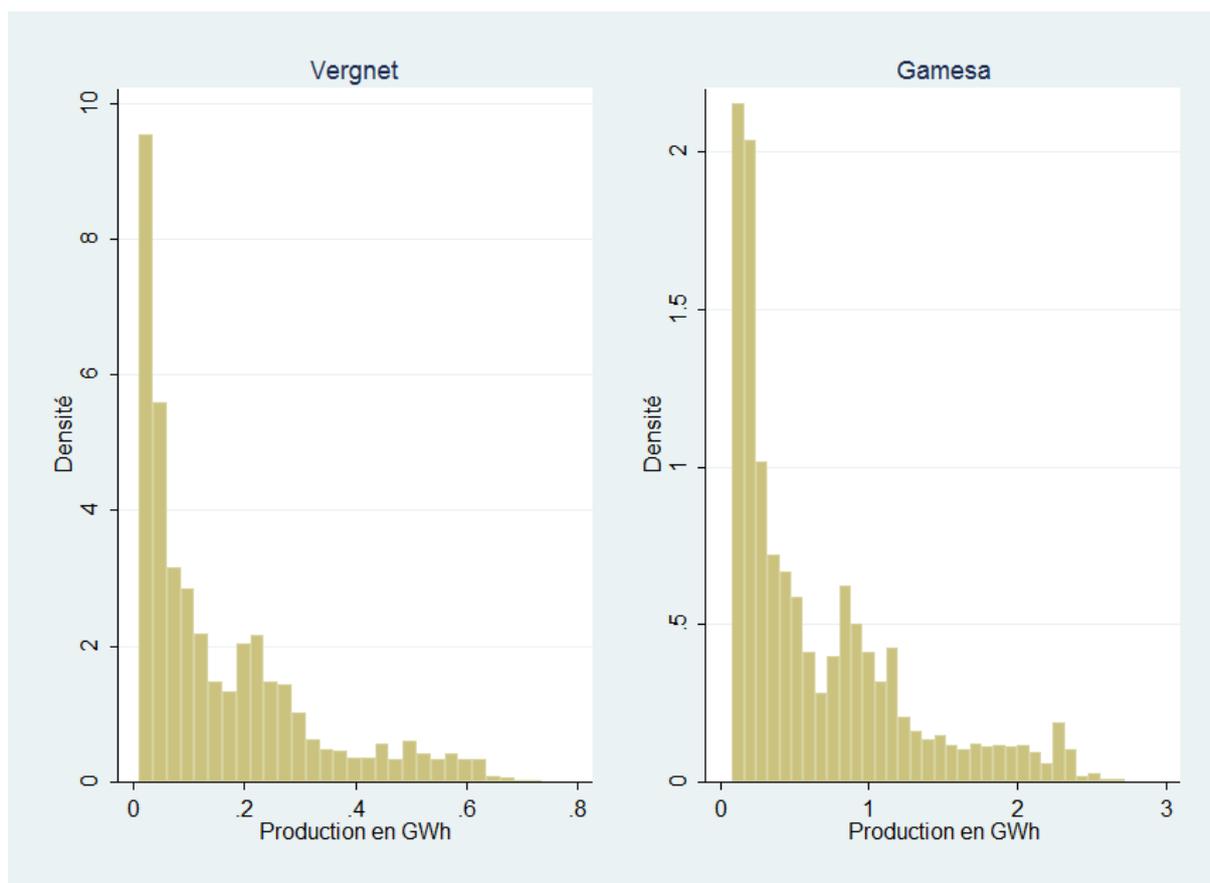


Figure 116: Histogramme des productions annuelles espérées du scénario Eolien D pour chaque technologie d'éolienne.

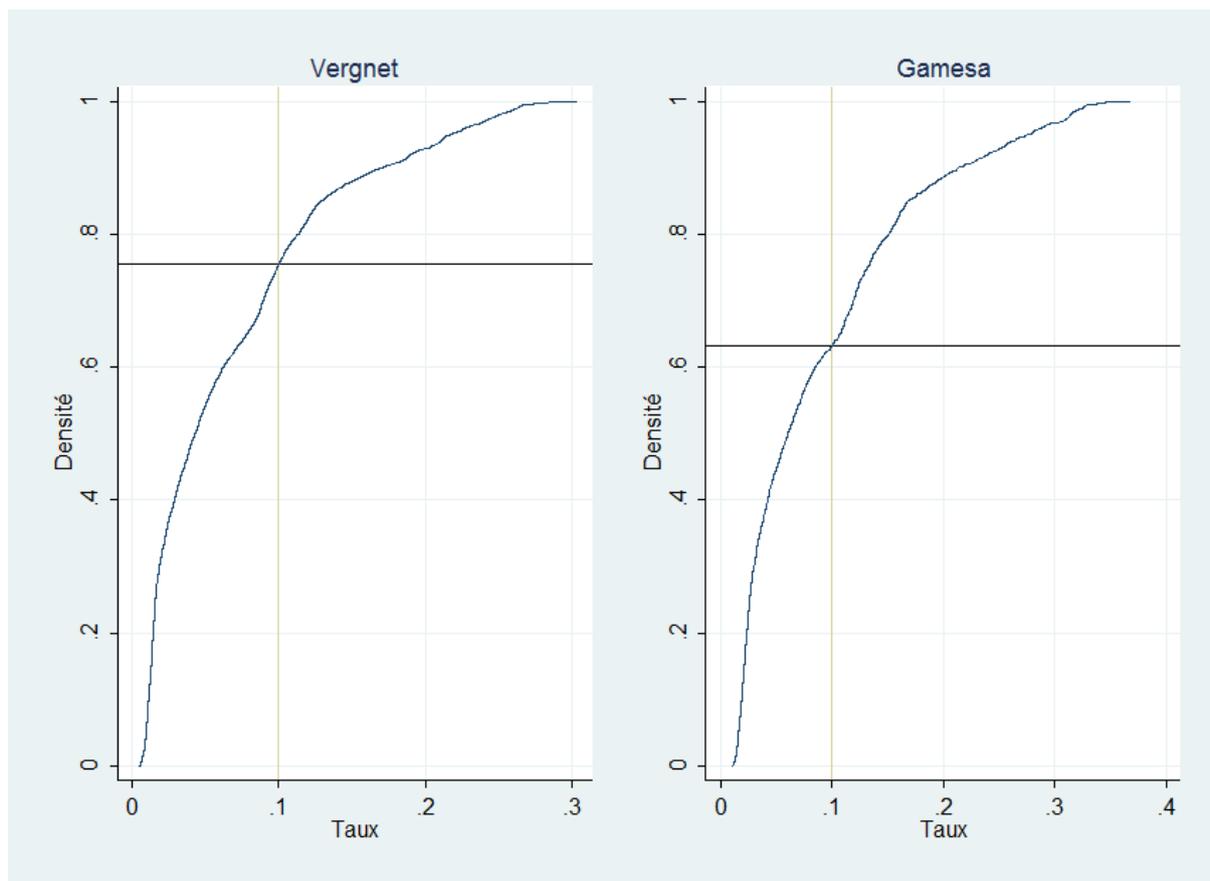
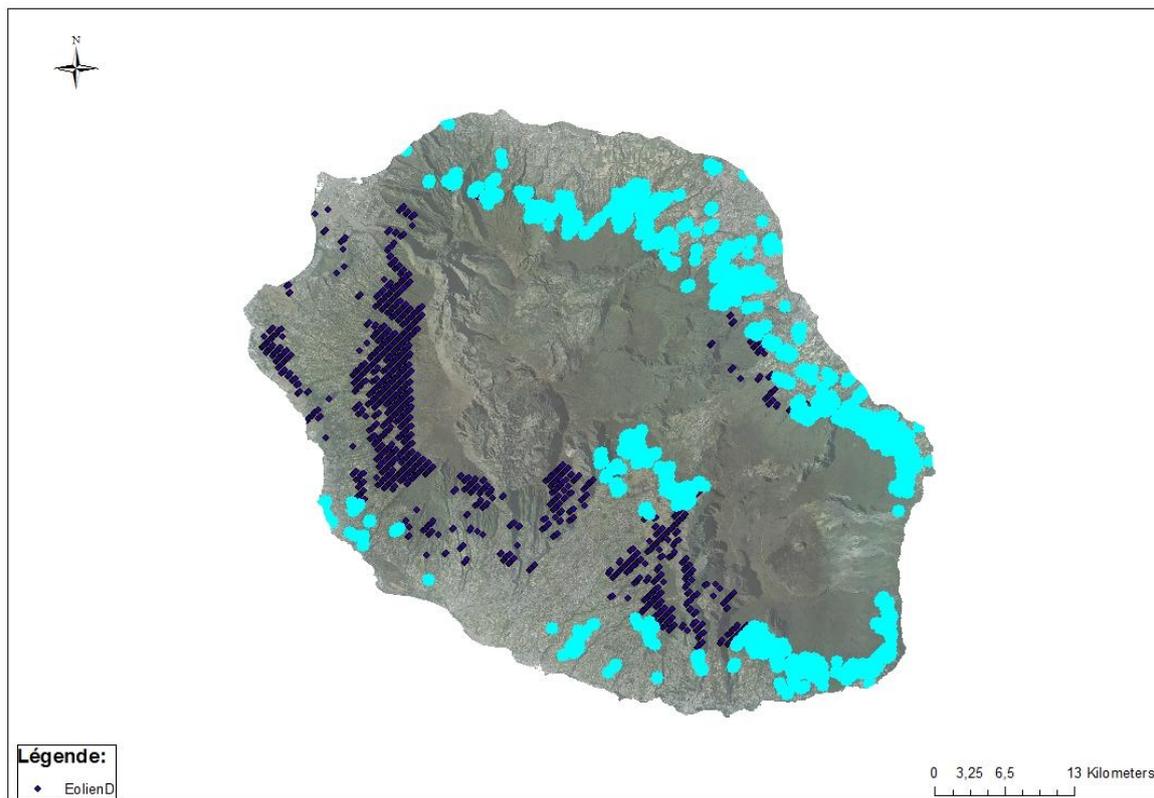


Figure 117: Courbe cumulative des taux d'utilisation des éoliennes installables du scénario Eolien D pour chaque technologie.

En valeur absolue, la quantité d'éoliennes installables prometteuses a considérablement augmenté, de l'ordre de 210% pour la technologie Vergnet et 240% pour la technologie Gamesa par rapport au scénario BAU, et de l'ordre de 30% pour les deux technologies par rapport au scénario Eolien B. Le scénario Eolien D aménage de nombreux sites prometteurs sur toute la côte au vent, en particulier les communes de Saint-Denis, Sainte-Marie, Sainte-Suzanne, Saint-André, Bras-Panon, Saint-Benoit et Sainte-Rose. De nombreux sites sont également identifiés au sud sur les communes de Saint-Philippe, Saint-Joseph, Petite-île et Saint-Pierre. Davantage dans les hauteurs de l'île, certains sites ont été repérés comme prometteurs au sein de la commune du Tampon. Enfin, à l'ouest, plus précisément sur la commune de Saint-Leu, de nombreux sites ont également été identifiés comme l'illustre la Figure 118.



Source: IGN

Figure 118: Répartition spatiale des éoliennes installables prometteuses du scénario Eolien D.

5.2 Evaluation des politiques publiques de soutien à la production d'électricité éolienne

Conformément à la méthodologie d'évaluation des politiques publiques de soutien à la production d'électricité éolienne détaillée dans la section 2.7.2 du Chapitre 2, nous présentons dans le Tableau 60, pour chaque scénario de politique réglementaire et chaque type d'éolienne à installer, d'une part, le potentiel de développement de l'éolien, mesuré en termes de puissance crête installable, que l'on peut espérer réaliser à La Réunion par le tarif de rachat en vigueur actuellement, soit 11 c€/kWh, et d'autre part, le niveau auquel il faudrait fixer le tarif de rachat pour atteindre l'objectif de développement de l'éolien de 50 MW_c à l'horizon 2050 établi par le SRCAE .

Tableau 60: Résultats de l'évaluation de la politique publique de promotion de l'éolien à La Réunion.

Scenario de politique réglementaire		Puissance crête installable (en MW _c) au tarif de rachat de 11 c€/kWh par type d'éolienne		Tarif de rachat (en c€/kWh) assurant l'installation de 50 MW _c par type d'éolienne:	
		Vergnet GEV-MP	Gamesa G58	Vergnet GEV-MP	Gamesa G58
BAU		17.325	45.05	12.62	11.33
Biodiversité		17.325	45.05	12.62	11.33
Habitat		3.575	17	27.71	24.40
Eolien	A	21.175	51	12.25	10.93
	B	36.85	103.7	11.27	9.58
	C	35.48	102.9	11.33	9.63
	D	48.125	125	11.07	9.30

5.2.1 Scénario BAU

Le potentiel éolien économique du scénario BAU s'élève à 17.325MW pour les éoliennes de type Vergnet, ce qui est légèrement inférieur au total des puissances éoliennes actuellement installées sur l'île (19.25MW). Afin d'atteindre l'objectif des 50MW de puissances installées à La Réunion, illustré par la ligne verticale verte sur la Figure 119, la politique de subvention de l'électricité éolienne doit être portée sous le scénario BAU à 12.62 c€/kWh ce qui amène un nouveau seuil de taux d'utilisation plancher évalué à 22.07%.

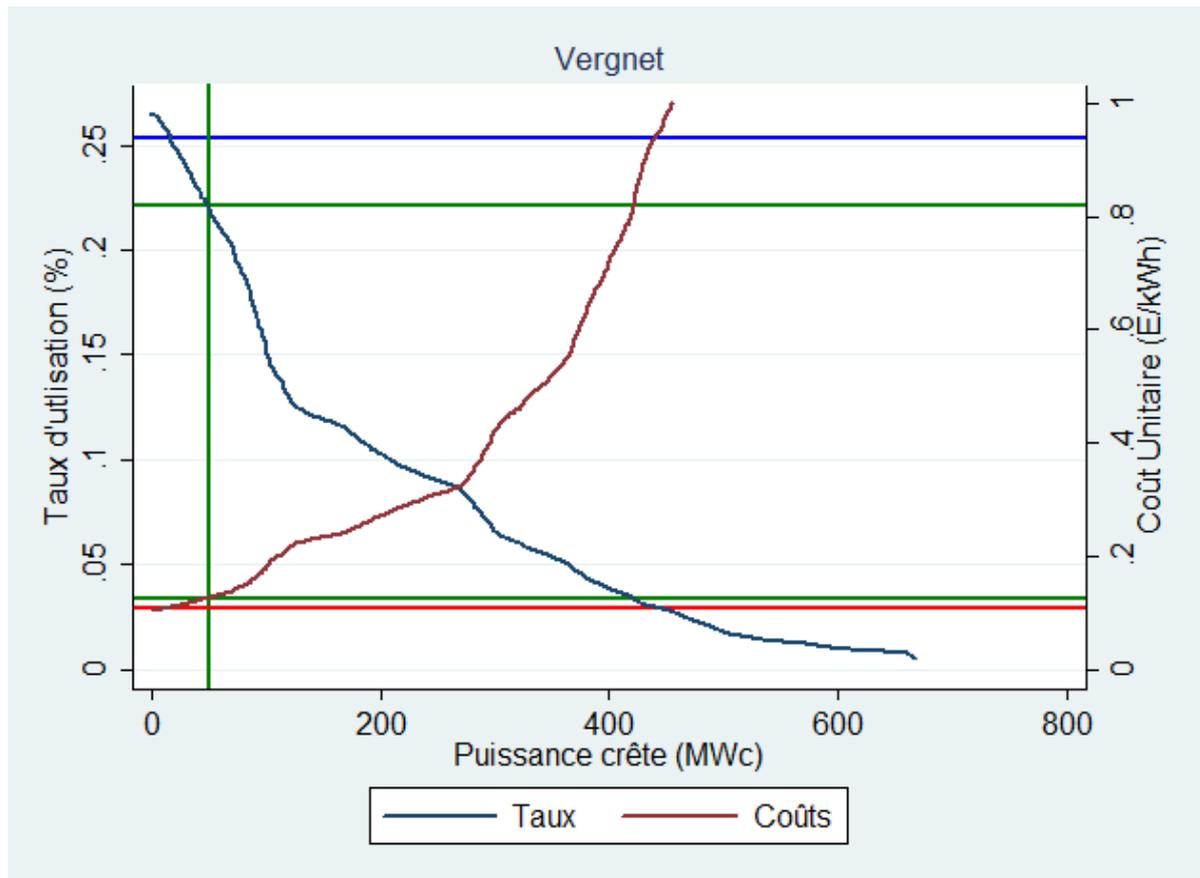


Figure 119: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Vergnet dans le cas du scénario BAU.

Les résultats obtenus à partir de la technologie Gamesa sont meilleurs, bien que le coût d'investissement par unité de puissance installée soit supérieur. Sous le scénario BAU, 45MW de puissance sont installables économiquement. Ce chiffre est assez proche des objectifs publics de développement. Le tarif de rachat devrait donc être légèrement augmenté sous ce scénario de référence pour atteindre 11.33 c€/kWh, permettant l'installation et l'opération d'éoliennes situées au-dessus d'un seuil d'utilisation de l'ordre de 25.65%. Les résultats sous le scénario BAU pour la technologie Gamesa sont illustrés à la Figure 120.

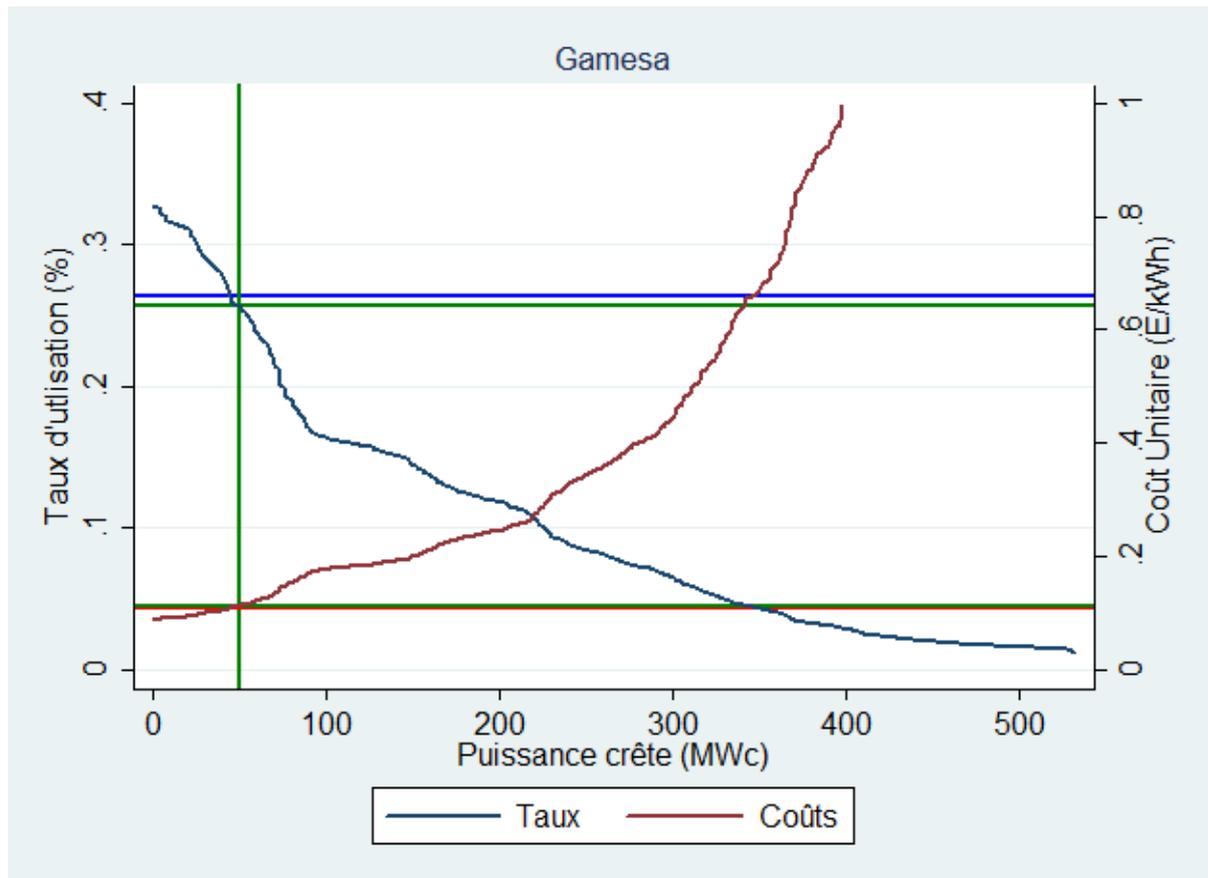


Figure 120: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Gamesa dans le cas du scénario BAU.

La répartition spatiale des éoliennes installables économiquement sous le scénario BAU pour la politique de subventionnement optimale est illustrée à la Figure 121. Les éoliennes sont groupées sur les zones nord-est à Sainte Suzanne et sud à Saint-Philippe. Il convient de noter que les résultats obtenus dans le cadre du présent travail ne prennent pas en compte les dimensions esthétiques liées à la préservation et à la valorisation touristique des paysages de l'île.

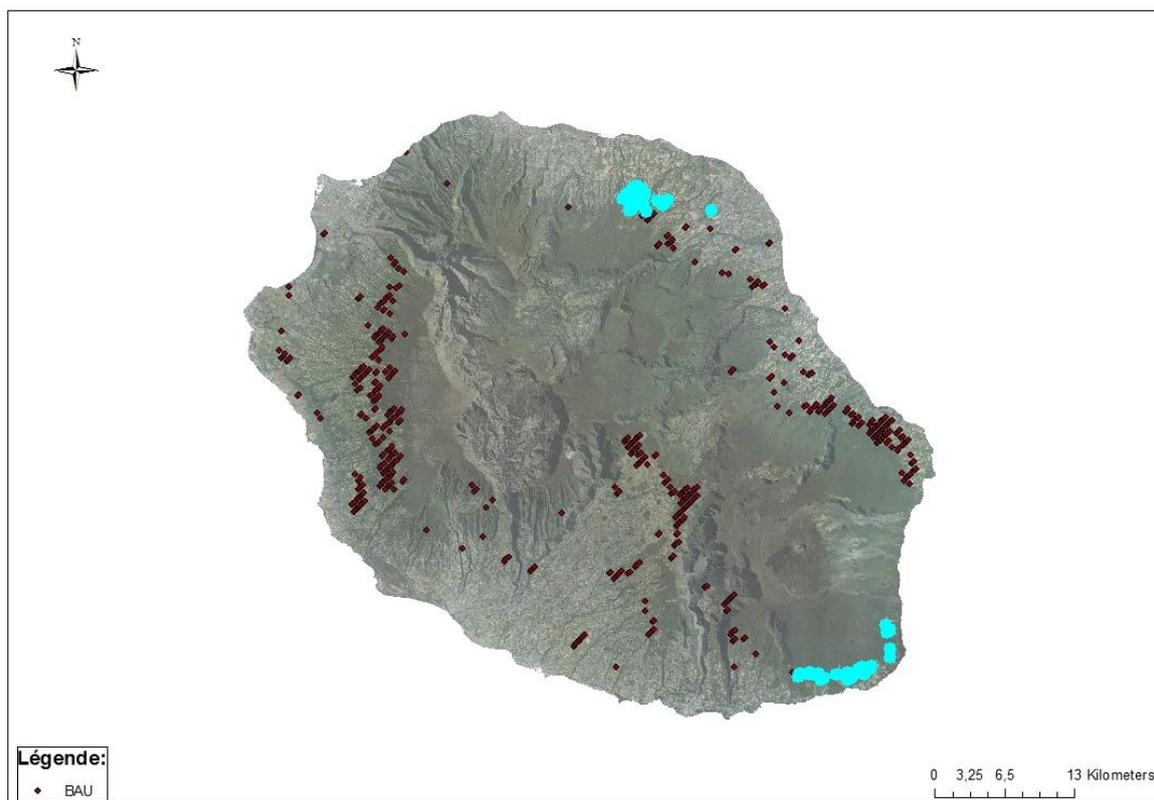


Figure 121: Potentiel éolien économique sous le scénario BAU et une politique de subvention optimale.

5.2.2 Scénario Biodiversité

Le scénario Biodiversité est plus restrictif que le scénario de référence mais les résultats empiriques sont identiques pour l'ensemble des variables étudiées au scénario BAU comme l'illustrent la Figure 122 et la Figure 123.

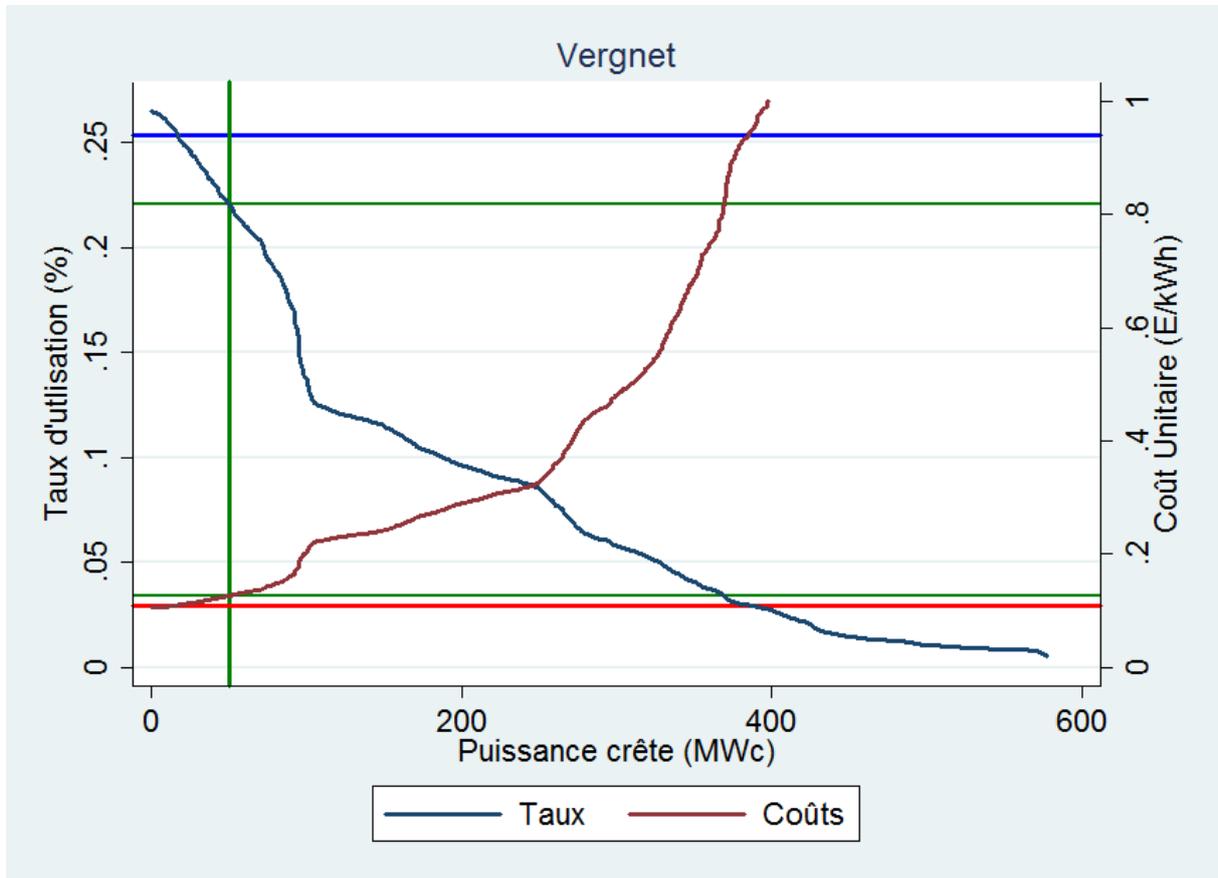


Figure 122: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Vergnet dans le cas du scénario Biodiversité.

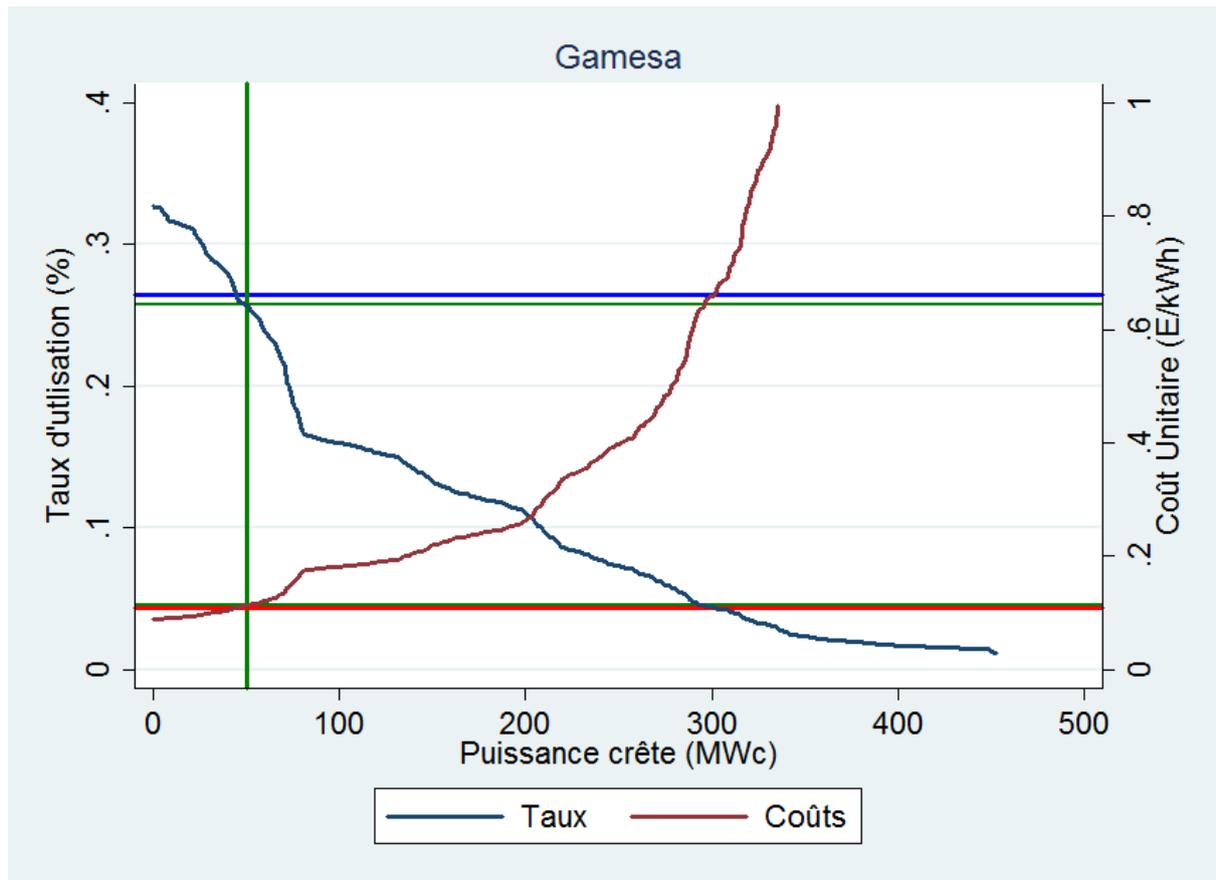


Figure 123: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Gamesa dans le cas du scénario Biodiversité.

Les restrictions introduites par le scénario Biodiversité par rapport au scénario de référence n'ont aucun impact sur le potentiel éolien économique installable, ni sur la détermination de la politique de subventionnement optimale. La mise en place d'une réglementation visant à protéger les espèces avifaunes endémiques de La Réunion en interdisant l'installation d'éoliennes sur les principales zones de survol n'a donc pas d'impact sur le potentiel éolien économique. On pouvait s'attendre à ce résultat au vu de la localisation spatiale des résultats du scénario de référence illustré à la Figure 102. Il convient néanmoins de noter que des scénarios plus onéreux, liés à des tarifs de rachat plus élevés, pourraient être mis en place. Dans ces cas, les éoliennes identifiées au point 5.1.2 pourraient être impactées par les nouvelles contraintes du scénario Biodiversité, notamment pour le site identifié à Saint-Pierre.

5.2.3 Scénario Habitat

L'étude des sites les plus prometteurs réalisée à la section 5.1.3 avait mis en évidence la présence de sites épars dispersés principalement entre les zones est, sud-est, sud et les hauteurs du sud de l'île. Cette dispersion des sites prometteurs soulignait l'impact de l'augmentation des distances d'éloignement sur le potentiel éolien de La Réunion, lequel avait été grevé en puissance totale de l'ordre de 75%. Le potentiel éolien économique correspondant est diminué de 80% pour la technologie Vergnet et de 62% pour la technologie Vergnet. Au vue de ces contraintes, les tarifs de rachat de rachat doivent être portés à 27.72 c€/kWh et 24.40 c€/kWh respectivement pour la technologie Vergnet et Gamesa dans le but d'atteindre les objectifs fixés pour La Réunion. Cela induit une sélection d'éoliennes dont le taux d'utilisation plancher est fixé respectivement à 10.05 % et 11.9%. Ces résultats sont

illustrés à la Figure 124 pour la technologie Vergnet et à la Figure 125 pour la technologie Gamesa.

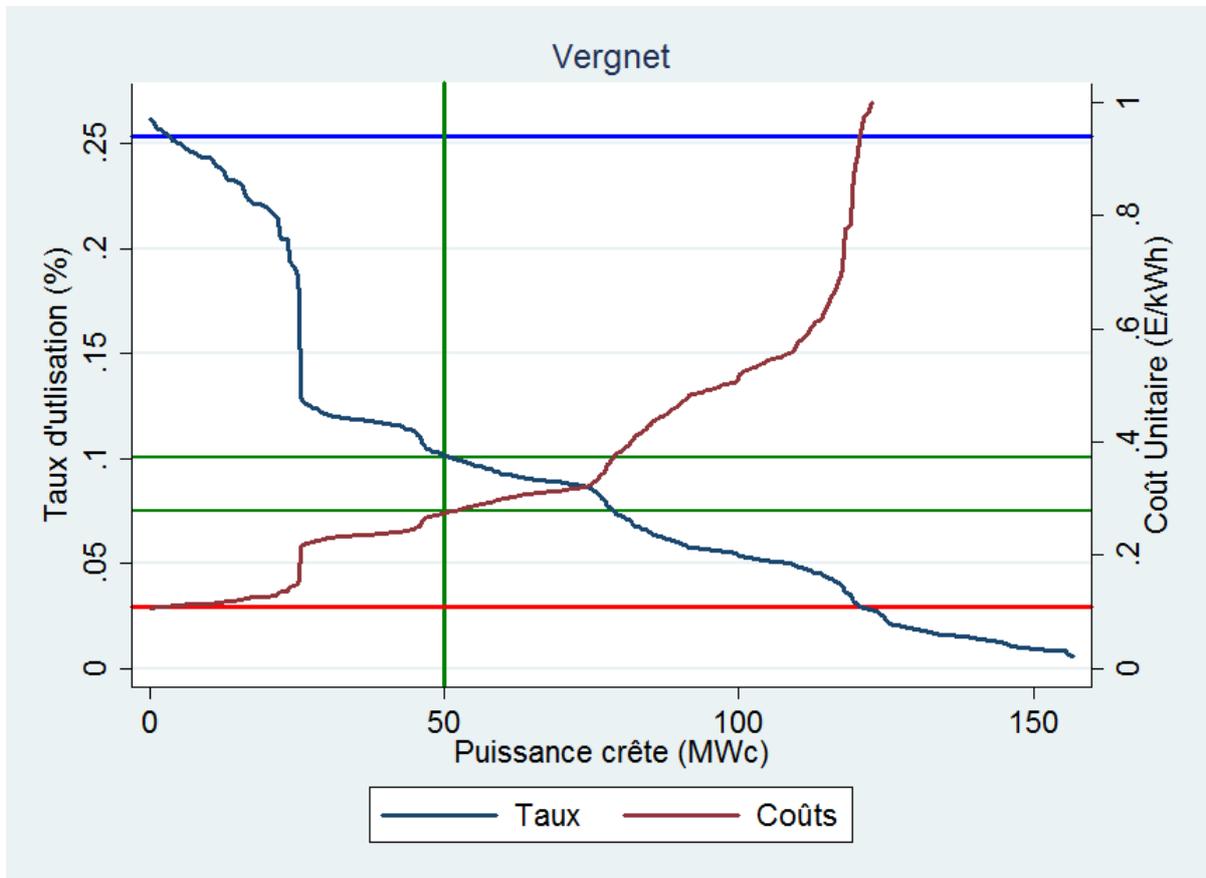


Figure 124: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Vergnet dans le cas du scénario Habitat.

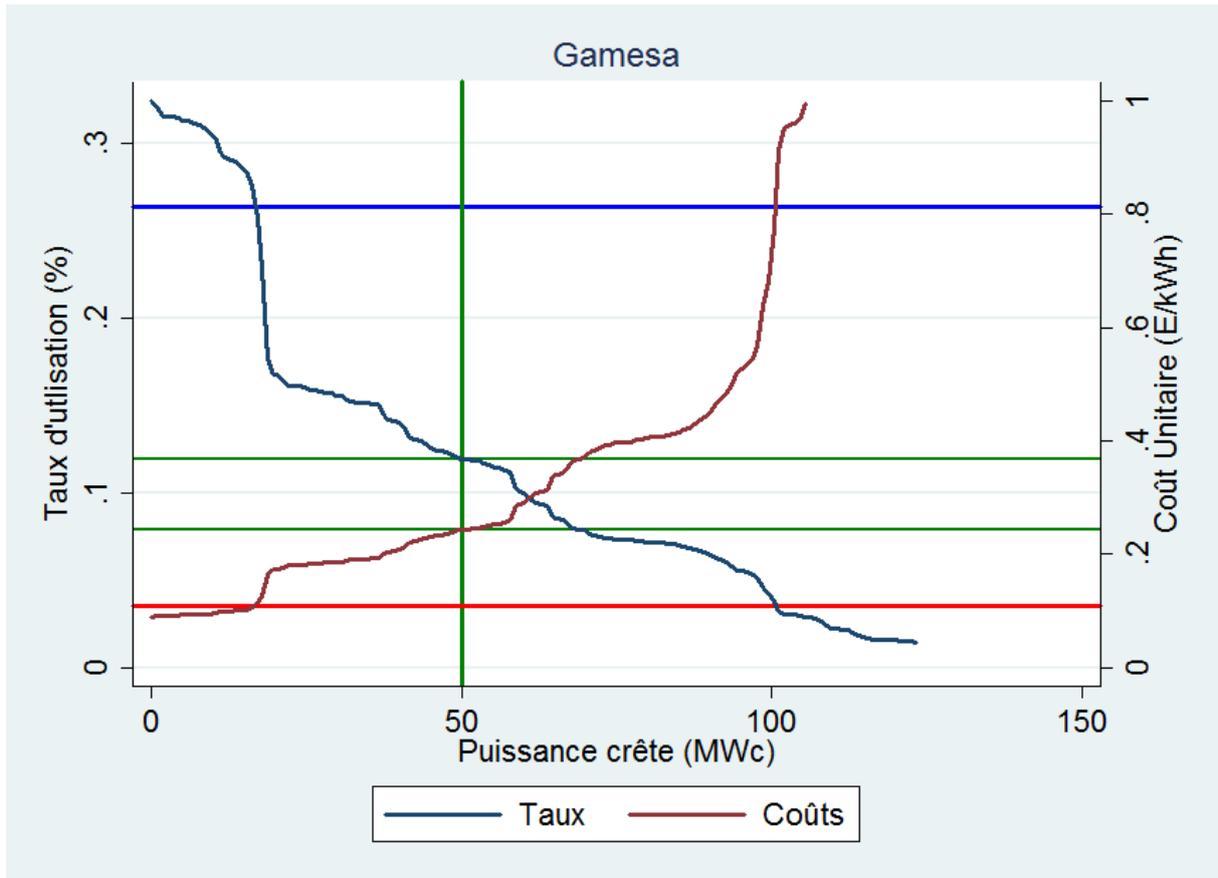


Figure 125: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Gamesa dans le cas du scénario Habitat.

La répartition spatiale des éoliennes sélectionnées en vue d'atteindre l'objectif public diffère du cas du scénario BAU. Les sites sont davantage dispersés comme l'illustre la Figure 126. Les sites de Sainte Suzanne et Saint-Philippe comportent un nombre d'éoliennes plus faible, substituées par de nouveaux sites à Sainte-Rose au sud-est et au Tampon au sud. Le site identifié au nord sur la commune de Saint-Denis ne semble pas intéressant du fait de la topographie alentour.

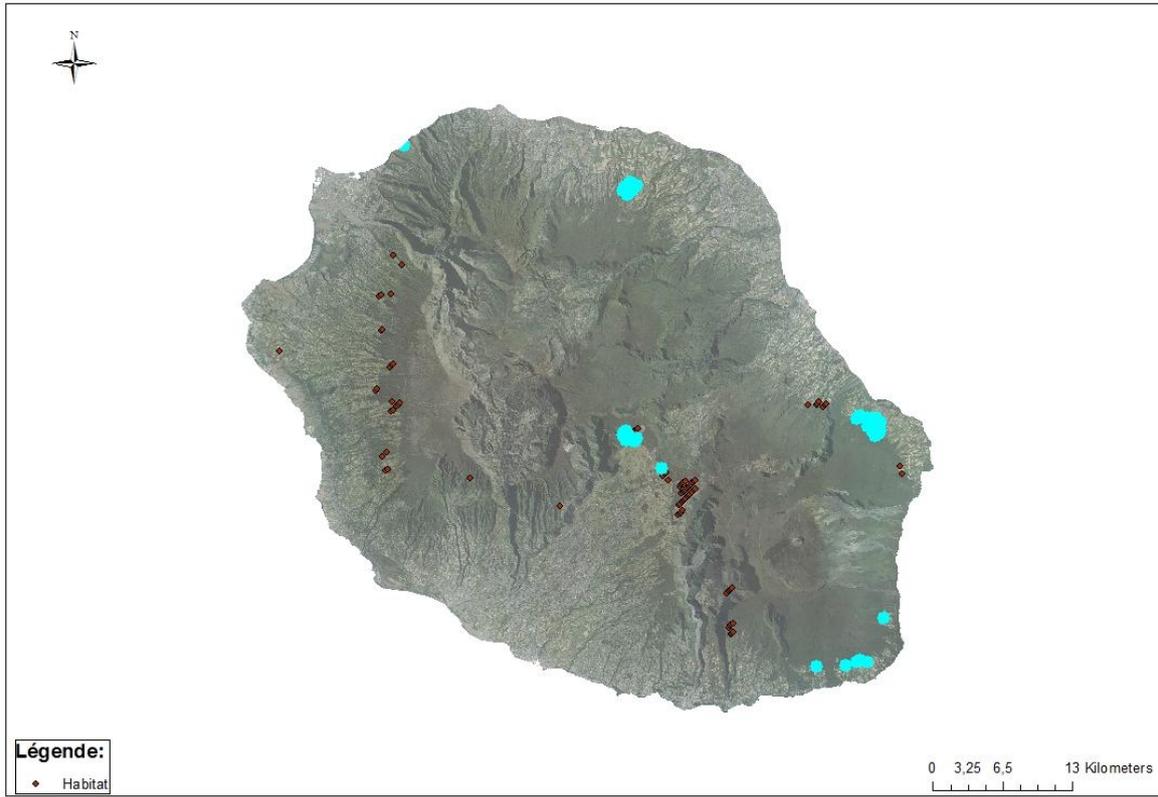


Figure 126: Potentiel éolien économique sous le scénario Habitat et une politique de subvention optimale.

5.2.4 Scénario Eolien A

La diminution de 20% des distances d'éloignement des zones d'habitations (soit 100 mètres) avait accru de manière significative la densité spatiale des sites prometteurs. Les résultats en termes de potentiel économique sont également supérieurs. 21.175 MW d'éoliennes sont économiquement installables pour la technologie Vergnet ce qui correspond à une augmentation du potentiel éolien économique de 22%. La diminution de 100 mètres permet d'atteindre les objectifs publics de développement de l'éolien pour la technologie Gamesa. Pour cette technologie d'éolienne, 51 MW sont économiquement installables sous le scénario Eolien A et pour la politique de subventionnement actuelle, ce qui correspond à une augmentation de 13% par rapport au scénario BAU.

La politique de subvention optimale est évaluée à 12.25 c€/kWh dans le cas où les éoliennes Vergnet demeurent la norme et 10.93 c€/kWh dans le cas du passage à des éoliennes plus puissantes de type Gamesa G58. Pour ces tarifs de rachat, les taux d'utilisation plancher des éoliennes seraient fixés respectivement à 22.74% et 26.40% pour la technologie Vergnet et pour la technologie Gamesa. Ces résultats sont illustrés à la Figure 127 pour la technologie Vergnet et à la Figure 128 pour la technologie Gamesa.

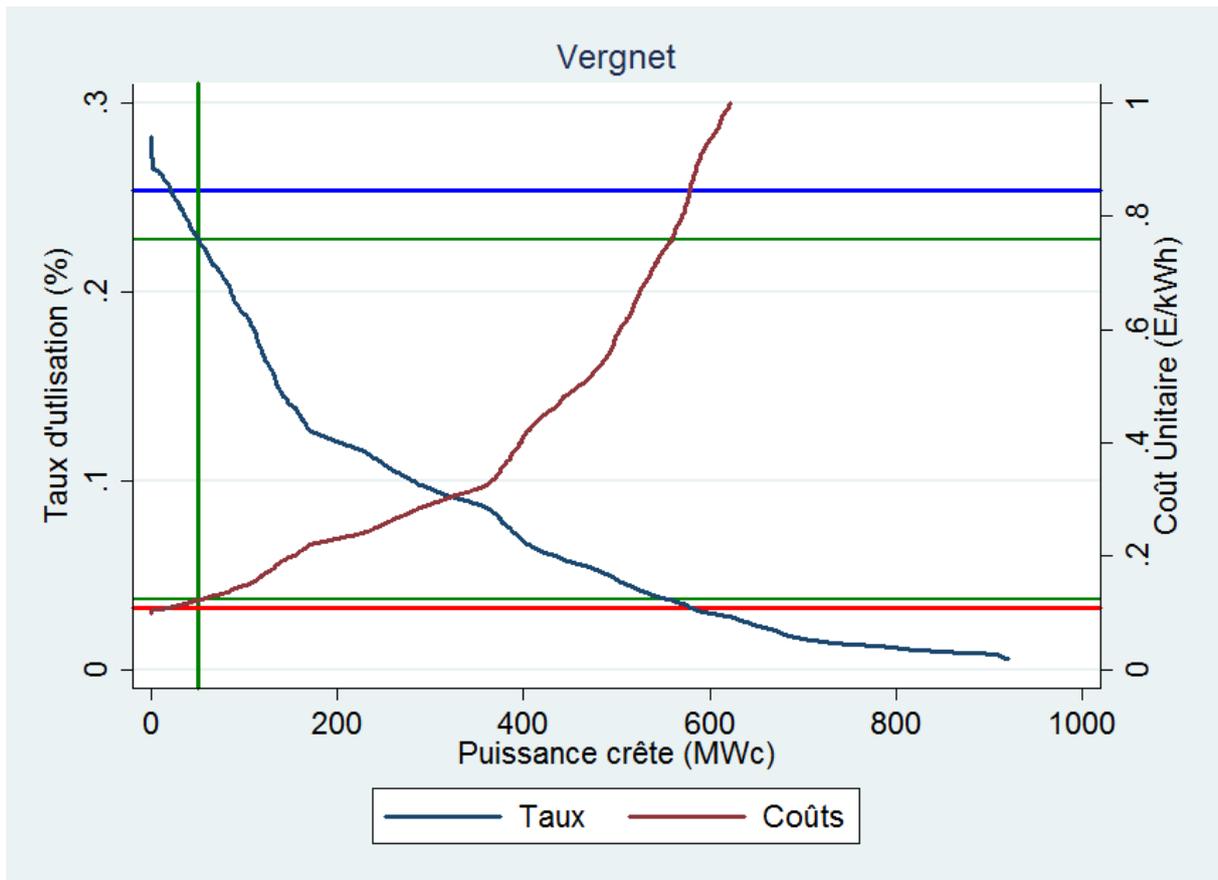


Figure 127: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Vergnet dans le cas du scénario Eolien A.

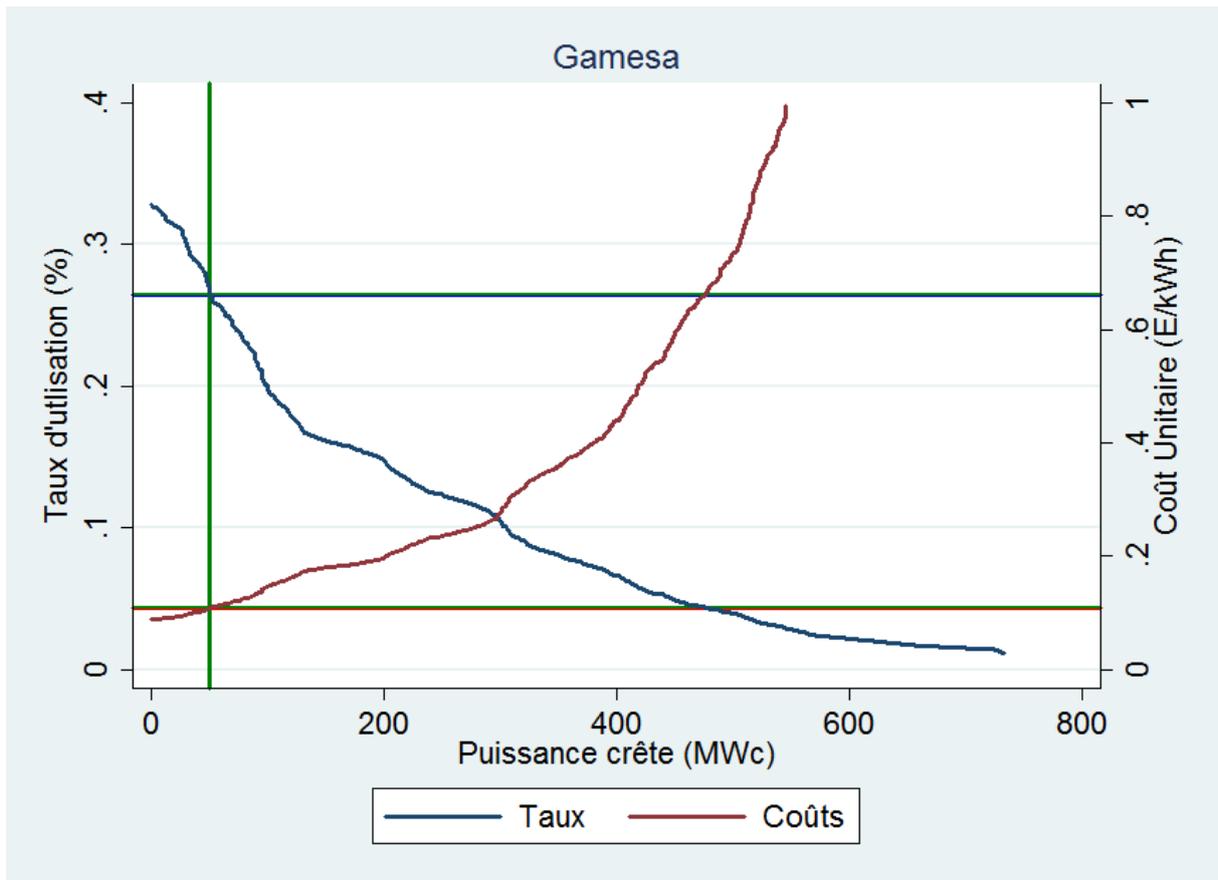
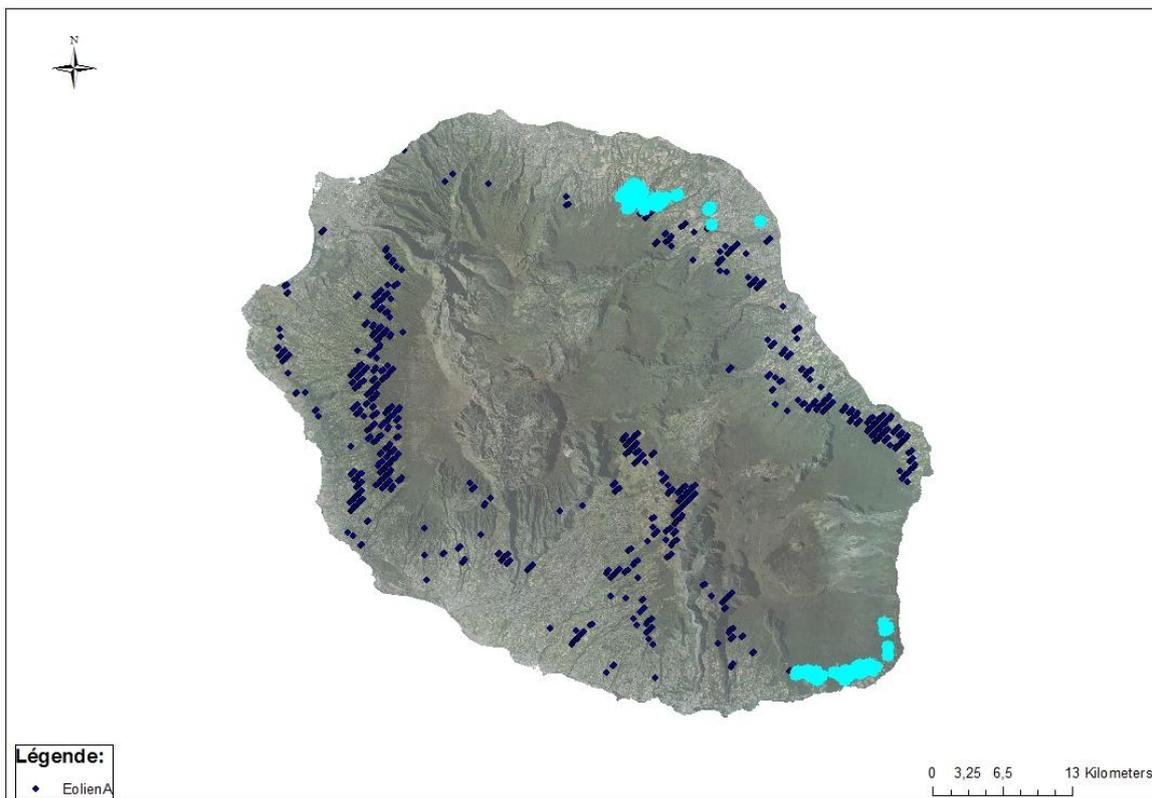


Figure 128: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Gamesa dans le cas du scénario Eolien A.

Les sites sélectionnés dans le cas d'une politique de subventionnement optimale sont assez semblables à l'échelle de La Réunion aux sites sélectionnés dans le cadre du scénario BAU, à savoir au nord-est à Sainte-Suzanne et Saint-André et au sud-est à Saint-Philippe. On observe néanmoins sur la Figure 129 la présence de d'avantage de sites sur la commune de Saint-André.



Source : IGN

Figure 129: Potentiel éolien économique sous le scénario Eolien A et une politique de subvention optimale.

En définitive, la diminution de la distance d'éloignement des zones d'habitations de 20% entraîne une augmentation du potentiel éolien économique de l'ordre de 13% à 22% selon la technologie. Cette mesure suffit seule à atteindre les objectifs de développement de l'éolien dans le cas du passage à des éoliennes de plus grande envergure. De même, la diminution des distances d'éloignement de 100 mètres induit une baisse du niveau de la politique de subvention optimale de l'ordre de 3 % pour les deux technologies. Ceci pose la question de savoir si les aménités négatives engendrées par le fonctionnement d'éoliennes plus proches de 100 mètres des zones d'habitations sont plus ou moins préjudiciables socialement qu'une augmentation de l'ordre de 3% à 15% des tarifs de rachat de l'électricité éolienne selon la technologie adoptée.

5.2.5 Scénario Eolien B

Un régime d'exception a été introduit au sein de la politique territoriale aménagée par le SAR pour les « installations (...) de production d'énergie et les infrastructures de transport (...) d'énergie ». Ce régime d'exception concerne l'implantation d'éoliennes sous réserve que la démonstration soit faite « qu'aucun autre emplacement ou aucune autre solution technique n'étaient envisageables à un coût supportable pour la collectivité »⁸². Lors de l'étude des scénarios précédents, nous avons pu mettre en évidence l'augmentation nécessaire des tarifs de rachat pour atteindre les objectifs publics de développement de l'éolien. Dans le cas du scénario de référence, les tarifs de rachat devaient notamment être augmentés de 15% dans le cas d'installation d'éoliennes de type Vergnet et de 3% dans le cas d'éoliennes plus puissantes

⁸² Schéma d'Aménagement Régional de La Réunion, 2011, p.71.

de type Gamesa. Dans le cas de figure où cette augmentation ne serait pas jugée supportable par la collectivité, le scénario Eolien B organise la possibilité d'installer des éoliennes sur des espaces naturels dits sensibles. Nous avons évalué à la section 5.1.5 l'impact de ces dispositions réglementaires sur les sites prometteurs et la croissance des puissances installables prometteuses était estimée à environ 150%. Les résultats correspondants en termes de potentiel éolien économique diffèrent selon la technologie. Ainsi, pour la technologie Vergnet, le potentiel éolien économique installable est porté à 36.85 MW, ce qui correspond à une hausse de 113% du potentiel éolien économique. Pour la technologie Gamesa, le potentiel éolien économique est évalué au double des objectifs publics de développement. 103.7 MW sont économiquement installables sous la politique de subventionnement actuelle.

Le niveau optimal de la politique de subvention est fixé à 11.27 c€/kWh dans le cas où les éoliennes Vergnet demeureraient la norme, et 9.52 c€/kWh dans le cas du passage à des éoliennes plus puissantes de type Gamesa G58. Pour ces tarifs de rachat, les taux d'utilisation plancher des éoliennes seraient fixés respectivement à 24.72% et 30.33% pour la technologie Vergnet et pour la technologie de type Gamesa G58. On constate que malgré un coût unitaire de la puissance installée supérieure, le recours à des éoliennes de type Gamesa de plus grande envergure, plus puissantes et à même de capter des vents soufflant à plus haute altitude s'avère bien plus profitable. Les résultats sont illustrés à la Figure 130 pour la technologie Vergnet et à la Figure 131 pour la technologie Gamesa.

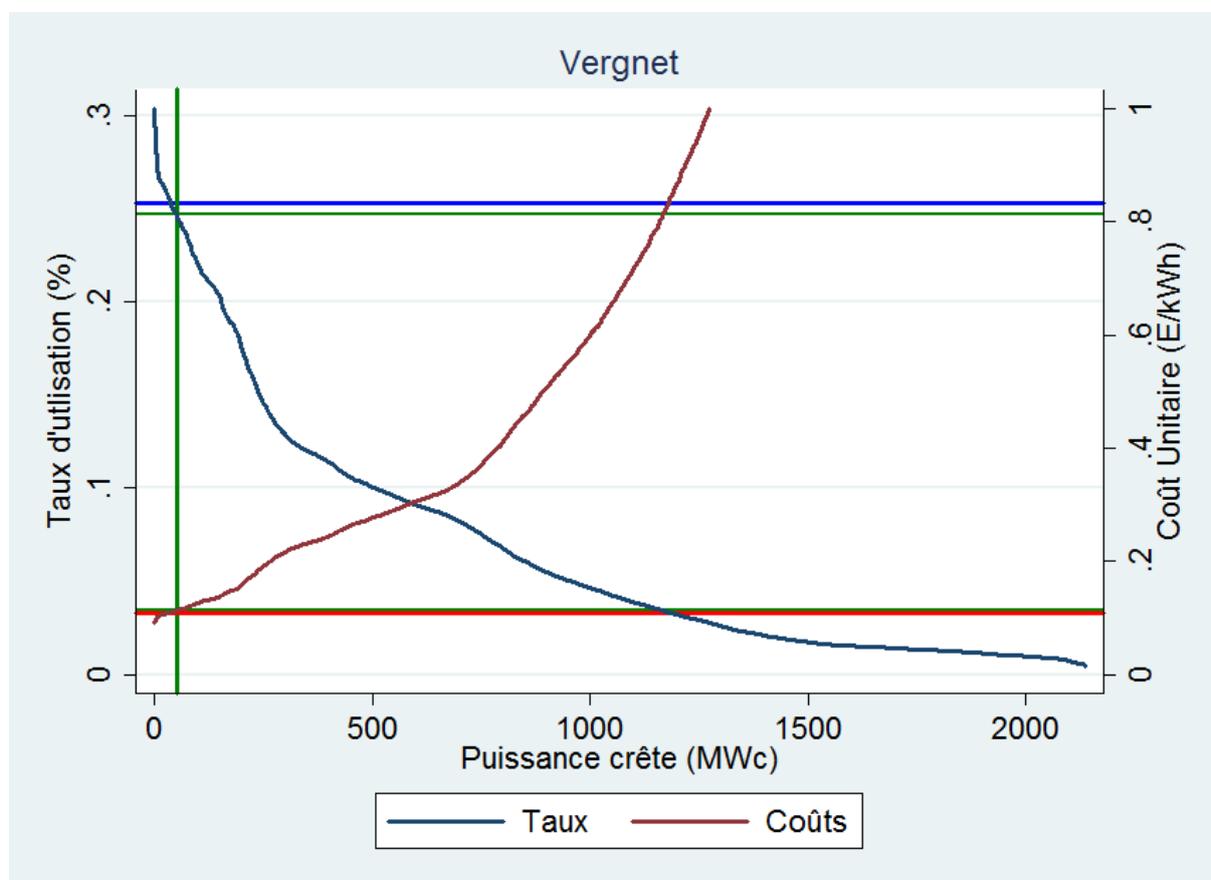


Figure 130: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Vergnet dans le cas du scénario Eolien B.

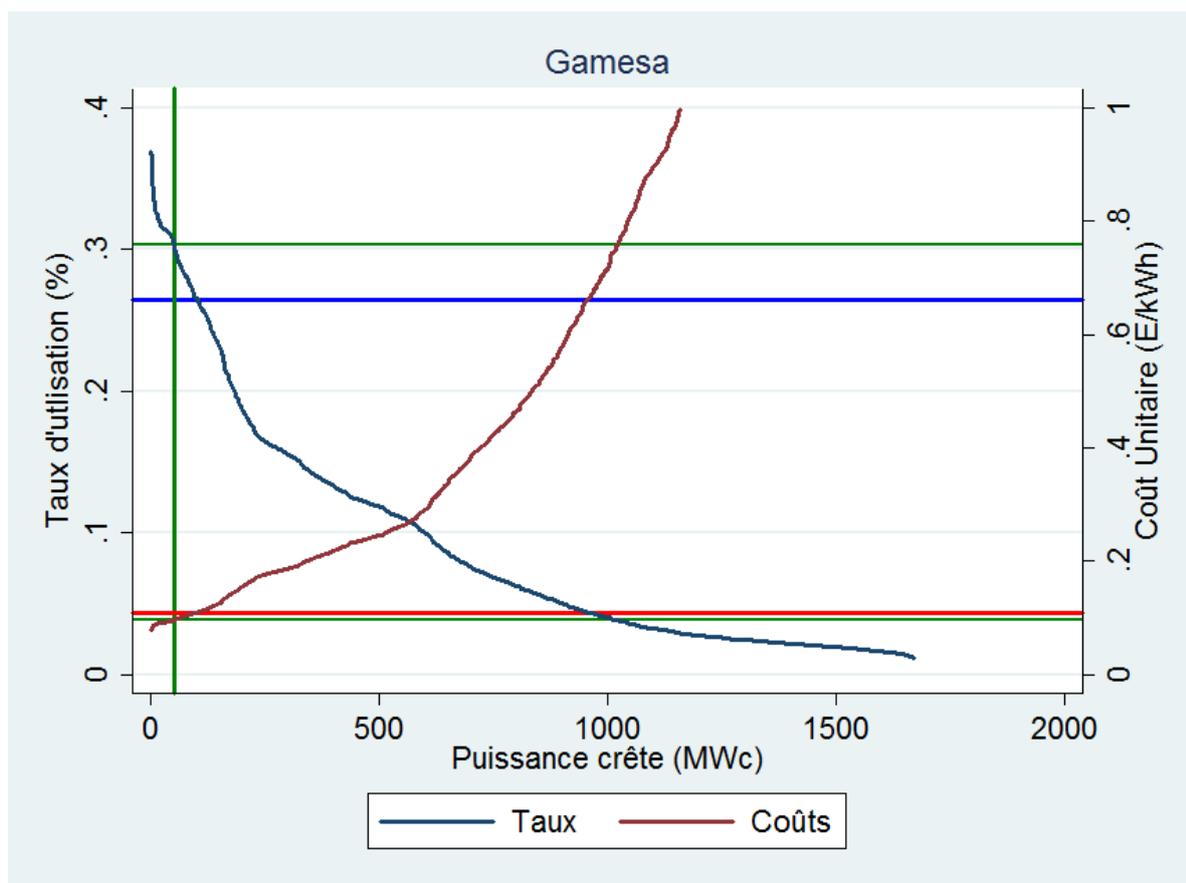


Figure 131: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Gamesa dans le cas du scénario Eolien B.

On constate que le tarif de rachat actuel figuré par la droite horizontale rouge sur la Figure 131 se situe au-dessus du niveau du tarif de rachat optimal figuré par la droite horizontale verte. Ce résultat se pose en contradiction avec la justification du principe d'exception accordé aux éoliennes sur les espaces sensibles identifiés à la section 3.2.3. En effet, les éoliennes sont autorisées au sein du scénario Eolien B sur ces espaces à condition « *qu'aucun autre emplacement ou aucune autre solution technique n'étaient envisageables à un coût supportable pour la collectivité* »⁸³. Par voie de conséquence, le chiffre d'un tarif de rachat acceptable de 9.52 c€/kWh dans le cas de la technologie Gamesa doit être nuancé. Dans le cas où le « *coût supportable pour la collectivité* » est équivalent au tarif de rachat actuel situé à 11 c€/kWh, les objectifs de développement de l'éolien devrait être atteint en priorité par l'installation sur les zones du scénario BAU d'éoliennes économiquement installables, à savoir le potentiel éolien économique identifié à la section 5.2.1. Les puissances restantes, à savoir 4.85 MW, devraient être installées en vertu du principe d'exception au cas par cas, en privilégiant les sites naturels les moins sensibles à l'installation et à l'opération d'éoliennes. Les éoliennes économiquement installables sous le tarif de rachat fixé à 9.52 c€/kWh sont néanmoins illustrées à la Figure 132. Certaines d'entre-elles sont situées sur des zones dites de coupures d'urbanisation et de continuité écologique. Une attention particulière devra être portée à celles situées sur les zones de continuité écologique. On note néanmoins que la répartition des sites identifiés est très similaire à celle du scénario BAU et que les ajustements de la politique réglementaire s'effectueraient à la marge des sites d'intérêt du scénario BAU.

⁸³ Schéma d'Aménagement Régional de La Réunion, 2011, p.71.

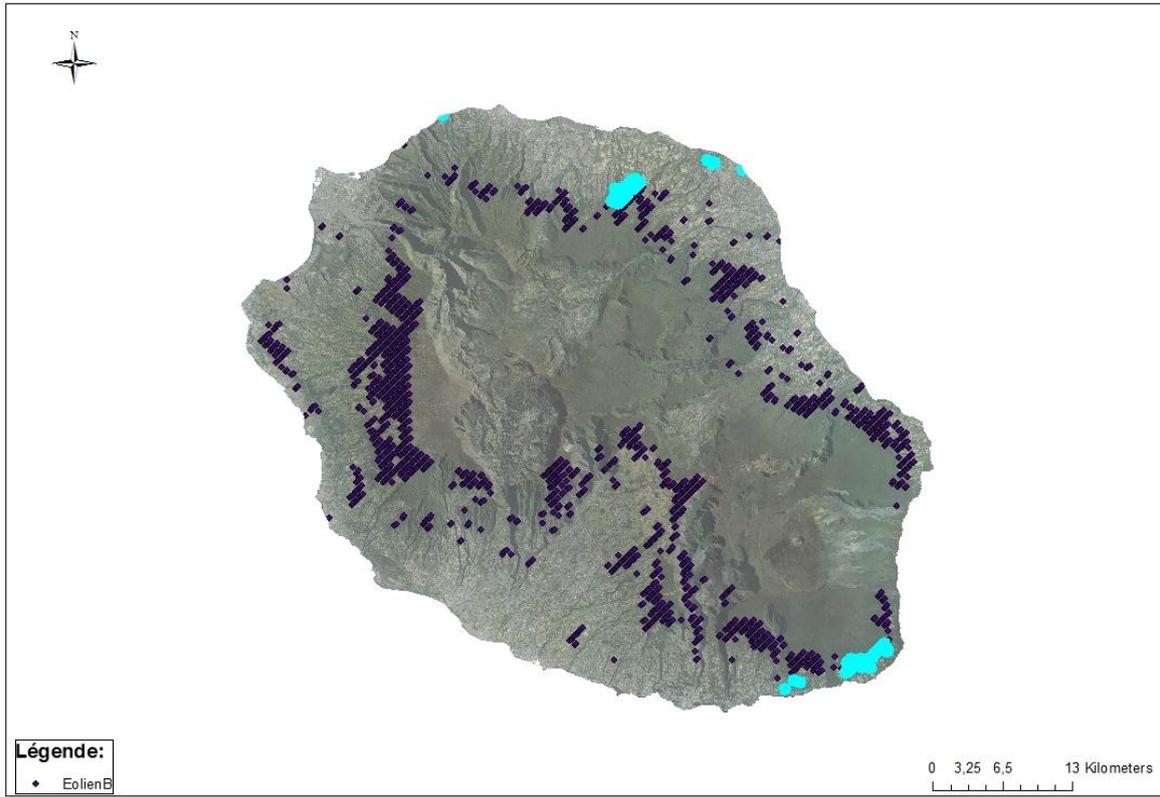


Figure 132 : Potentiel éolien économique sous le scénario Eolien B et une politique de subvention optimale.

5.2.6 Scénario Eolien C

L'introduction d'une politique réglementaire de protection des espèces avifaunes a impacté entre 12% et 16 % des puissances éoliennes prometteuses du scénario Eolien B selon les technologies, tel qu'observé à la section 5.1.6. Le potentiel éolien économique est affecté à la marge par les nouvelles normes pour la technologie Gamesa (-0.7%) et ne diminue que de 3.7% dans le cas de la technologie Vergnet. On constate donc que l'impact de normes plus exigeantes de protection de l'avifaune locale n'a pas de répercussions significatives sur le potentiel éolien de l'île. Il convient néanmoins de noter qu'elles peuvent impacter par ailleurs des sites alternatifs tels ceux identifiés à la section 5.1.6. Le potentiel éolien économique et la politique de subvention optimale sont quasiment semblables au cas du scénario Eolien B. Les résultats sont illustrés à la Figure 133 pour la technologie Vergnet et à la Figure 134 pour la technologie Gamesa. La répartition spatiale des éoliennes installables économiquement est semblable à celle du scénario Eolien B comme l'illustre la Figure 135.

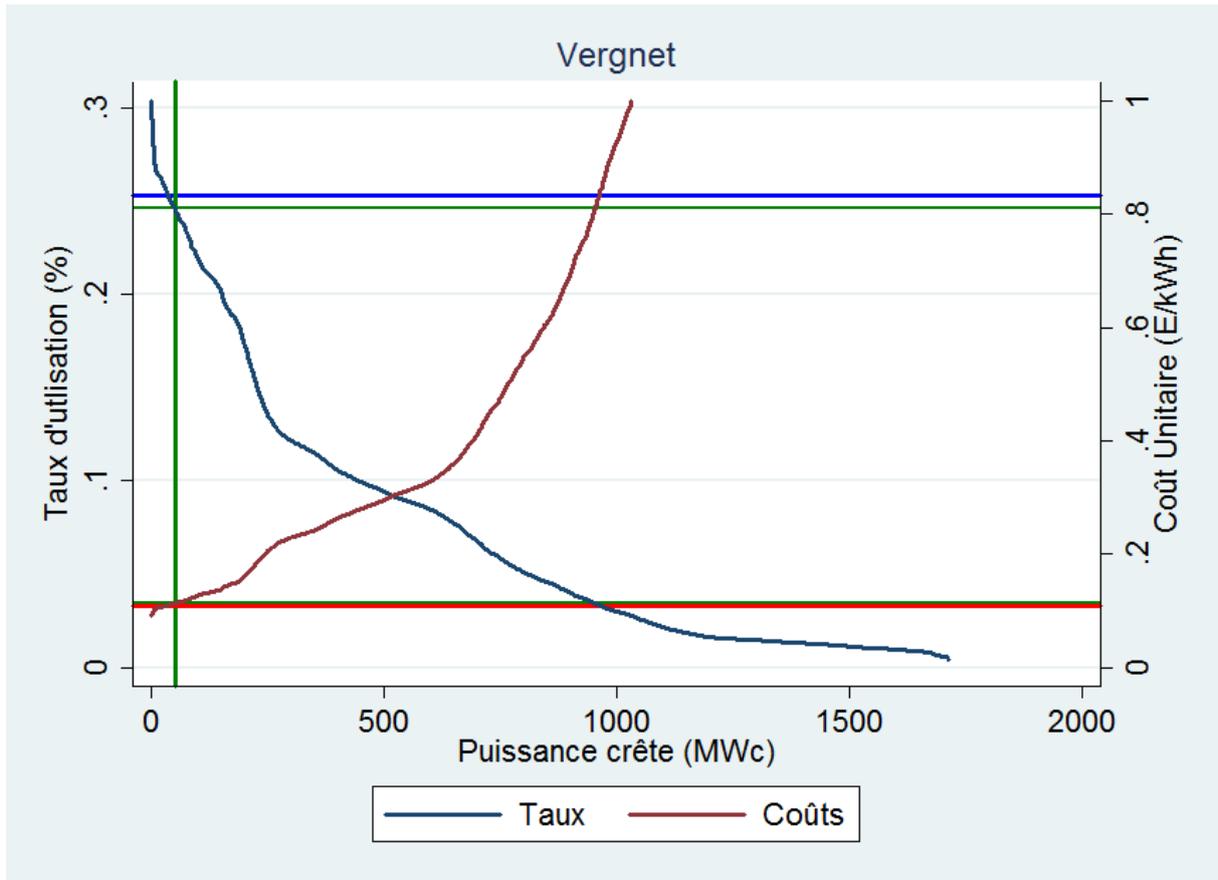


Figure 133 : Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Vergnet dans le cas du scénario Eolien C.

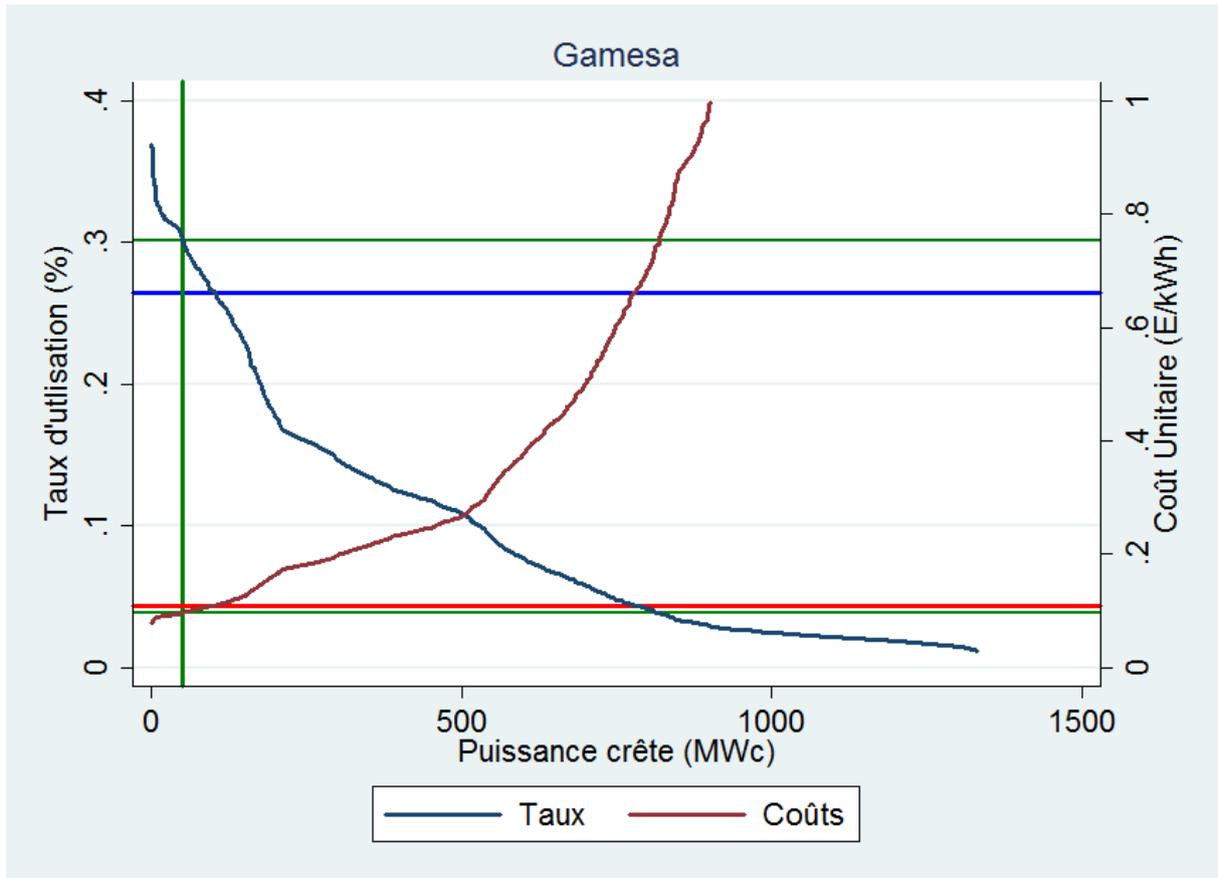


Figure 134 : Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Gamesa dans le cas du scénario Eolien C.

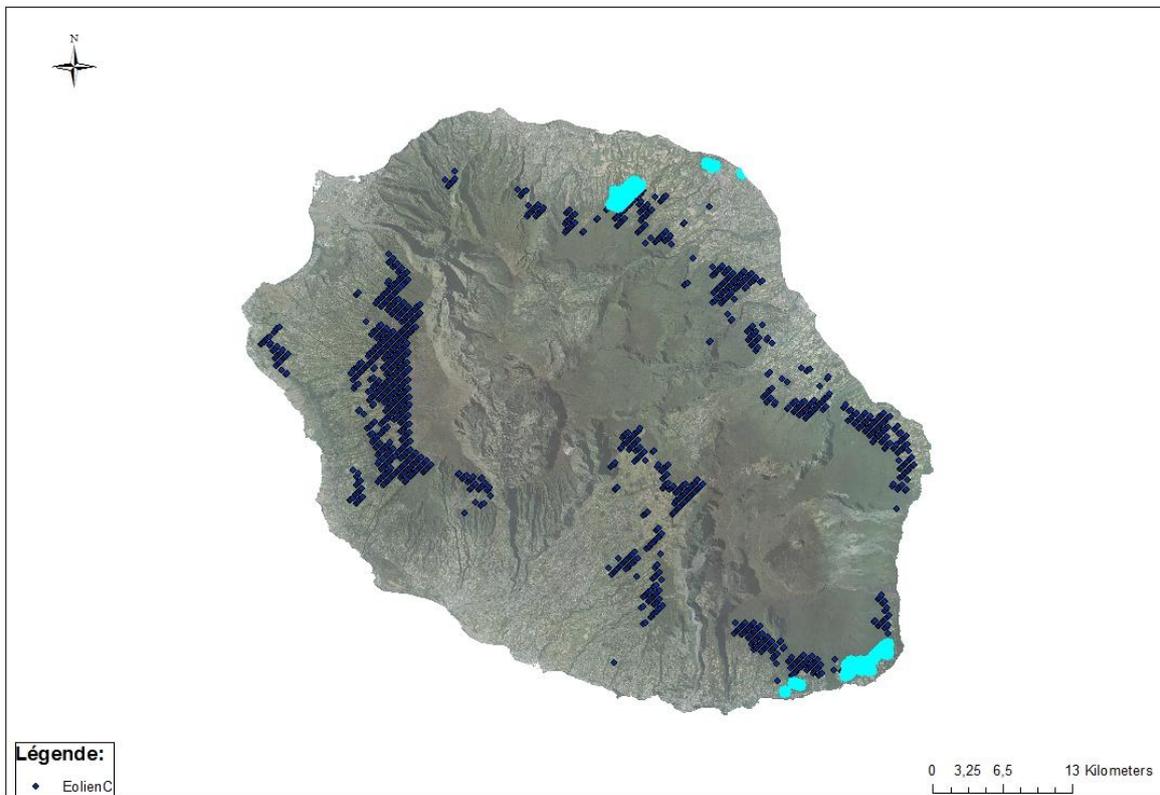


Figure 135: Potentiel éolien économique sous le scénario Eolien C et une politique de subvention optimale.

5.2.7 Scénario Eolien D

Le scénario Eolien D comprend les hypothèses réglementaires les plus volontaristes, orientées vers le développement des capacités de production d'électricité éoliennes à La Réunion. Il induit une augmentation de l'ordre de 225% des puissances installables prometteuses identifiés à La Réunion (voir section 5.1.7). Cette hausse conséquente des sites prometteurs se traduit par un potentiel éolien économique quasiment équivalent aux objectifs de développement public pour la technologie Vergnet. Pour ce type de technologie, 48 MW de puissance éolienne sont économiquement installables sous le scénario Eolien D. Le potentiel économique évalué pour la technologie Gamesa se révèle bien supérieur aux objectifs publics de développement de l'éolien avec 125 MW de puissance installable économiquement. Le progrès technique et l'arrivée sur le marché d'éoliennes de plus grande envergure adaptées aux conditions tropicales, à défaut de faire baisser le coût unitaire de la puissance installée, permet de produire davantage et de faire chuter les coûts moyens unitaires de production. Par voie de conséquence, la politique de subventionnement optimale est fixée à 9.3 c€/kWh pour la technologie Gamesa et à 11.07 c€/kWh pour la technologie Vergnet. Pour ces tarifs de rachat, les taux d'utilisation plancher des éoliennes seraient fixés respectivement à 25.18% et 31.24% pour la technologie Vergnet et pour la technologie Gamesa. Les résultats sont illustrés à la Figure 136 pour la technologie Vergnet et à la Figure 137 pour la technologie Gamesa.

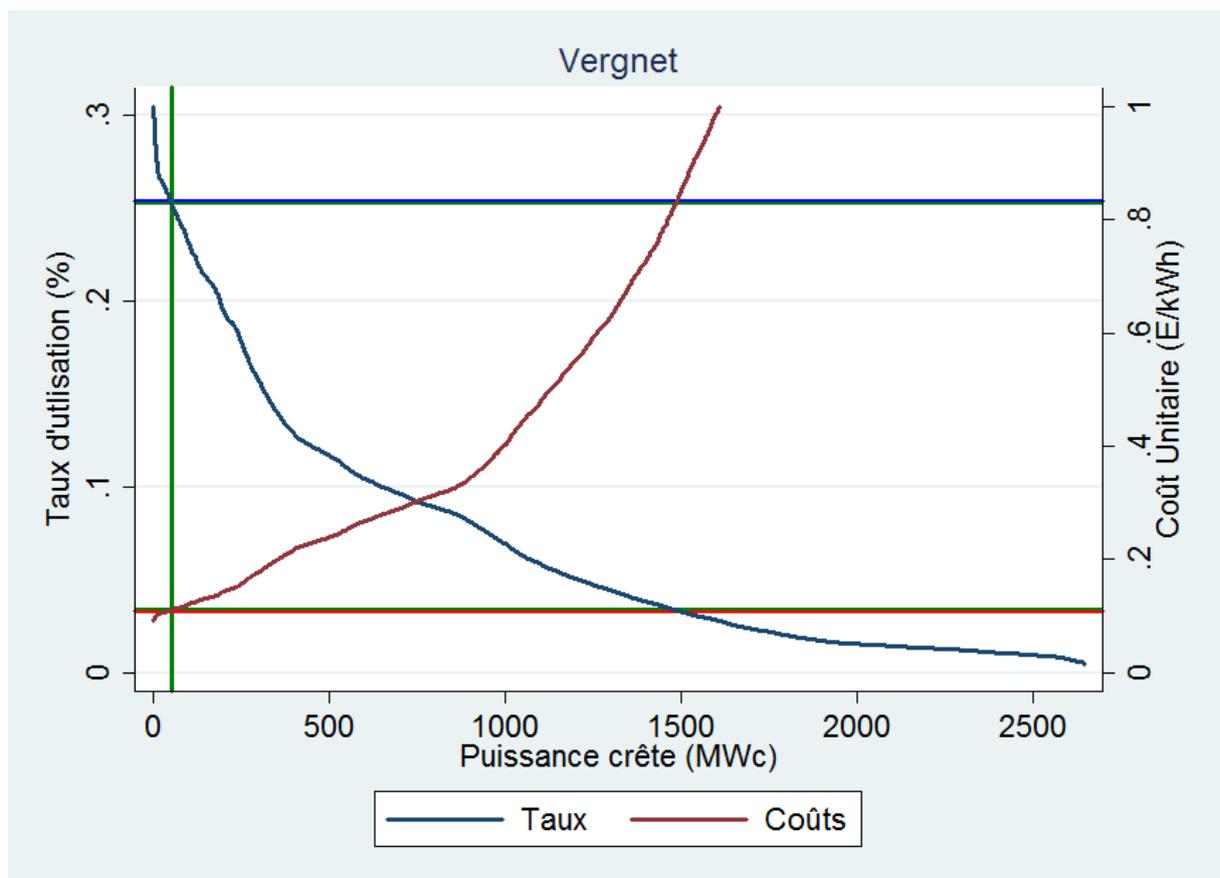


Figure 136: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Vergnet dans le cas du scénario Eolien D.

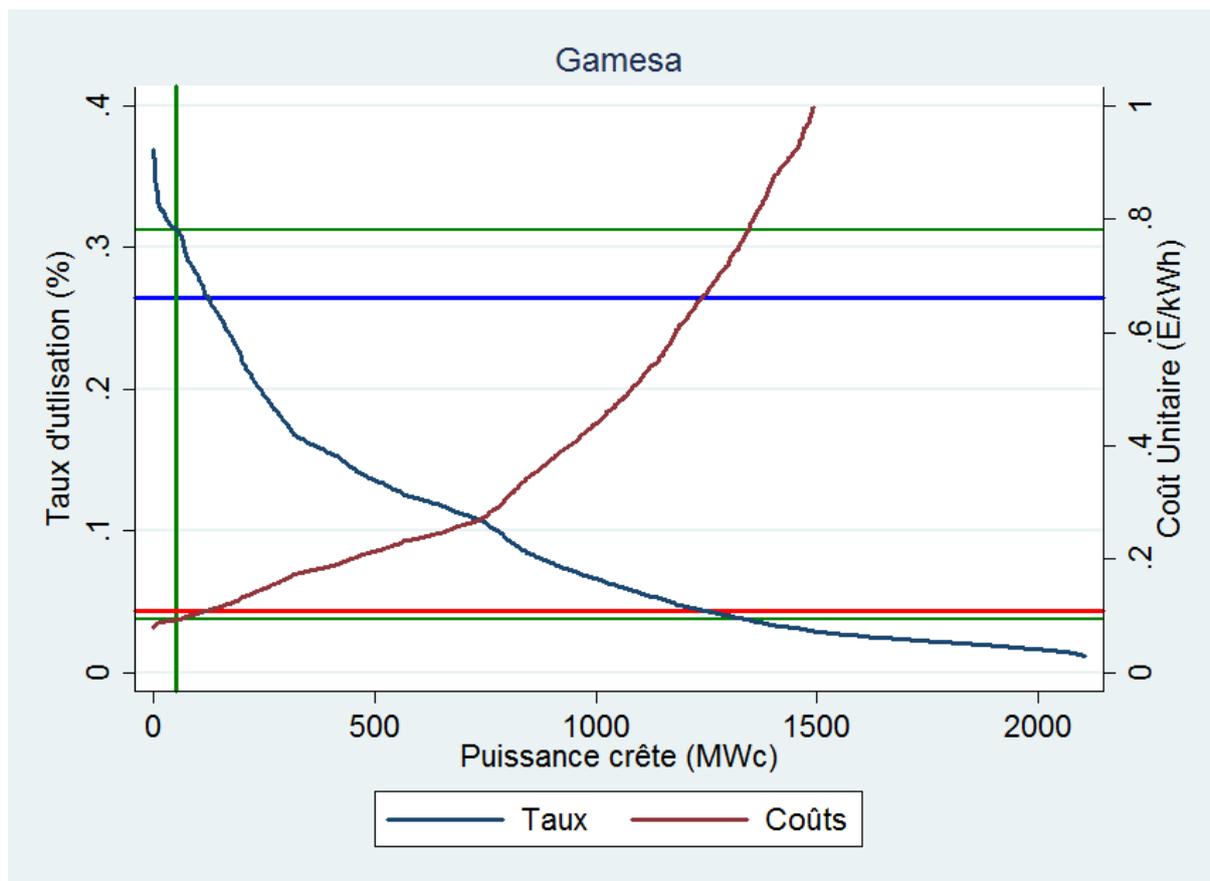


Figure 137: Taux d'utilisation et coûts unitaires espérés pour la technologie Gamesa dans le cas du scénario Eolien D.

Les observations de la section 5.2.6 sont également valables ici. Les éoliennes devraient être en priorité installées sur les zones du scénario Eolien A. Par voie de conséquence, les conclusions de la section 5.2.4 s'appliquent, et 51 MW sont économiquement installables sur les zones du scénario Eolien A sous la politique de subventionnement. Le tarif de rachat optimal devrait être fixé à 10.93 c€/kWh dans le cas du passage à des éoliennes plus puissantes de type Gamesa G58 et la répartition des éoliennes économiquement installables sous ce scénario est illustrée à la Figure 129 à laquelle le lecteur est renvoyé.

5.3 Conclusions

Les résultats du Chapitre 3 qui traitait de l'évaluation des puissances installables par scénarios de politique réglementaire avaient permis d'identifier les variations de puissances installables illustrées à la Figure 138.

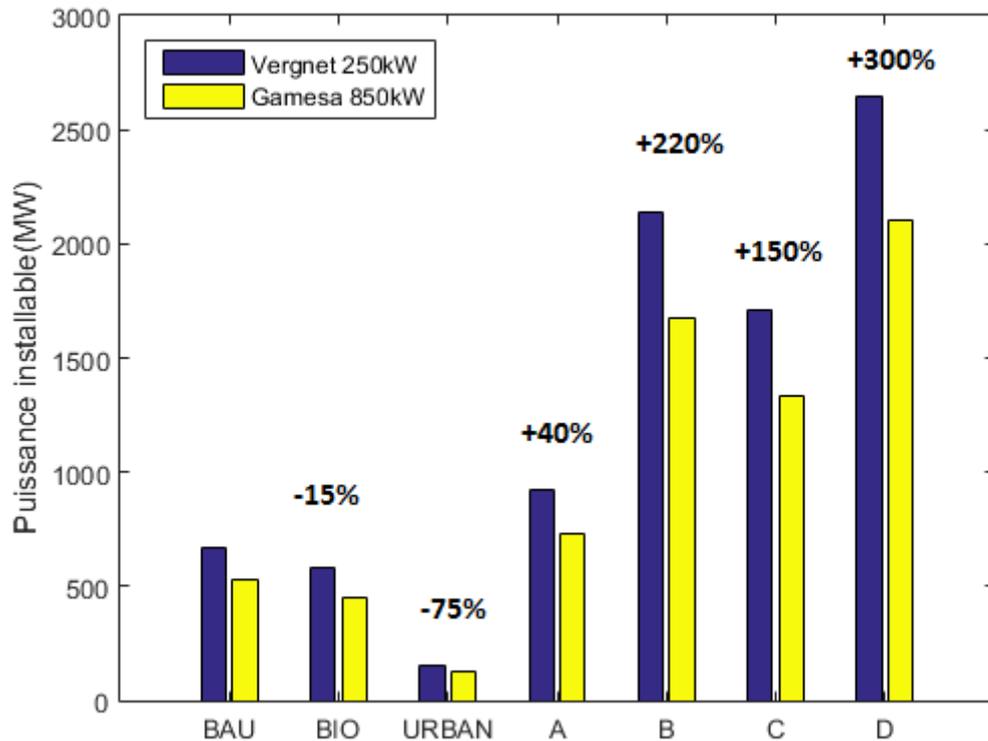


Figure 138: Puissance éolienne crête totale installable à La Réunion selon différents scénarios réglementaires et deux technologies d'éoliennes.

L'évaluation des productions correspondantes, illustrée à la Figure 139, a permis de mettre en évidence une croissance marginale décroissante des productions électriques avec la surface disponible. La moyenne de la production des scénarios avait tendance à décroître lorsque les surfaces disponibles augmentaient et la distribution de la production était davantage étalée. La proportion de sites prometteurs définis comme les sites pour lesquels le taux d'utilisation des éoliennes dépassait 10% était également plus faible lorsque la surface disponible augmentait.

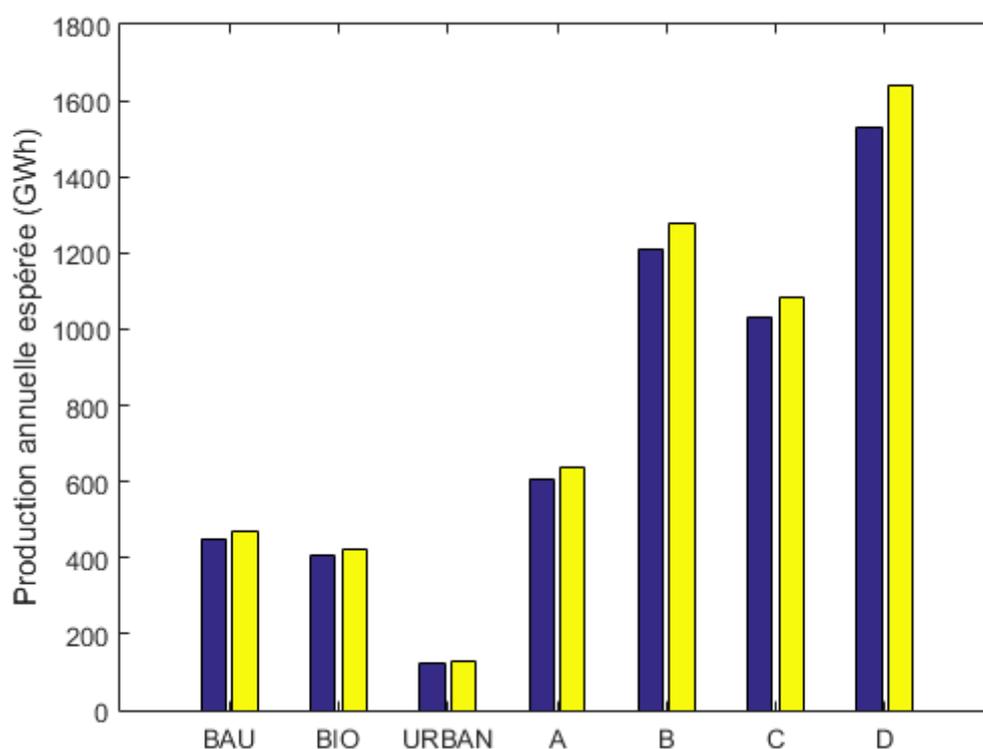


Figure 139 : Production électrique espérée totale à La Réunion selon différents scénarios réglementaires et deux technologies d'éoliennes.

Les sites prometteurs ont été identifiés sur toute la côte-est entre Sainte-Suzanne et Sainte-Rose, au sud-sud-est à Saint-Philippe, au sud sur la commune du Saint-Pierre mais également sur les communes de Petite-île et Saint-Joseph. De nombreux sites prometteurs ont également été identifiés dans les hauteurs de la commune du Tampon. Les puissances installables semblaient plus faibles pour la technologie Gamesa, technologie plus puissante mais dont les contraintes d'éloignement entre éoliennes et entre rangs d'éoliennes étaient identifiées comme plus importantes. On observe néanmoins qu'à puissance totale installée plus faible la production correspondante est quasiment équivalente à celle des éoliennes Vergnet installables pour chaque scénario, comme l'illustre la Figure 139.

Parmi les puissances installables prometteuses, le taux d'utilisation plancher pour qu'une éolienne soit rentable est évalué à 25.34% pour les éoliennes de type Vergnet et à 26.41% pour les éoliennes de type Gamesa. La puissance totale d'éoliennes économiquement rentables est évaluée à 17.325 MW dans le cas de la technologie Vergnet et 45.05 MW dans le cas de la technologie Gamesa. Nos résultats permettent de prouver l'intérêt du repowering ou remplacement des éoliennes par des éoliennes plus puissantes. A scénario réglementaire constant, le passage à des technologies plus puissantes permet d'atteindre quasiment les objectifs de développement de l'éolien pour La Réunion sans modifier la politique de subvention.

L'impact des normes environnementales sur le potentiel éolien économique est évalué comme nul et les sites les plus profitables de l'île ne semblent pas situés au sein des couloirs de déplacement des oiseaux marins endémiques de Le Réunion.

A contrario, la politique de réglementation des distances d'éloignement des zones

d'habitations a un rôle prépondérant sur la quantité d'éoliennes installables sous la contrainte de rentabilité. L'augmentation des distances d'éloignement dans les proportions de l'amendement Germain conduit à diviser le potentiel éolien économique par un ordre de grandeur de 3 à 5. Dans ce cas de figure, le développement de l'éolien n'est plus envisageable. Le mouvement inverse correspondant à une diminution des distances d'éloignement de 20%, les éoliennes demeurant éloignées de 400 mètres des zones d'habitations, permet d'atteindre les objectifs de développement de l'éolien comme l'atteste la Figure 140. Il n'est donc pas nécessaire d'augmenter les tarifs de rachat dans le cas où les nouvelles technologies d'éoliennes peuvent être installées plus près des zones d'habitations.

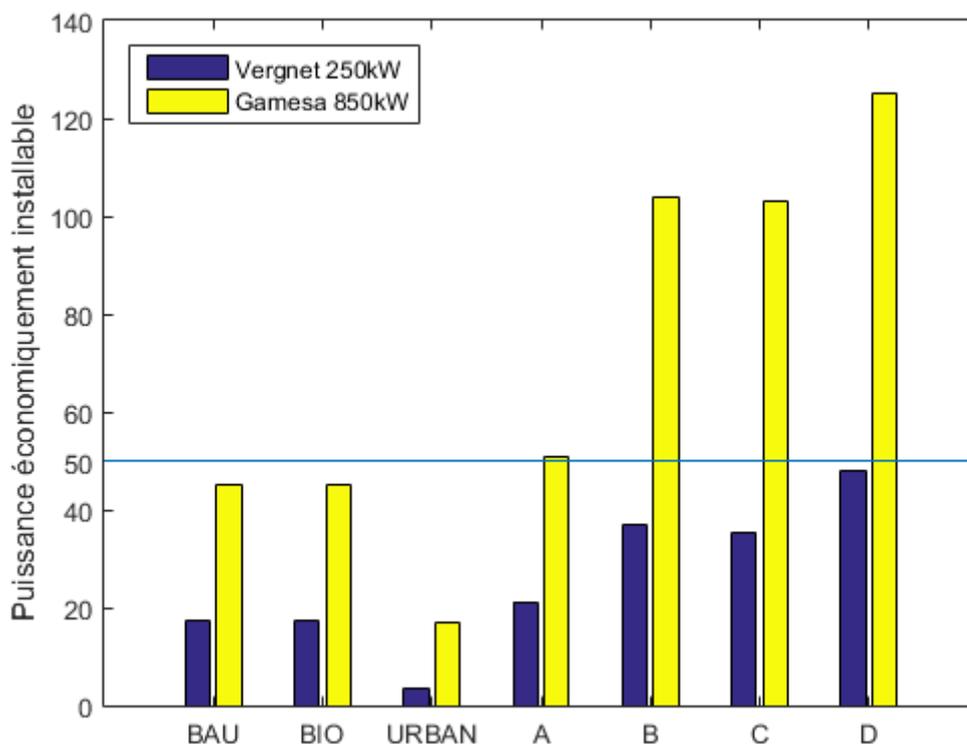


Figure 140: Puissance économiquement installable à La Réunion selon différents scénarios réglementaires et deux technologies d'éoliennes.

Par ailleurs la refonte de la politique territoriale centrée sur la protection des espèces avifaunes de La Réunion, espèces les plus sujettes au risque causé par l'opération d'éolienne conduit à la multiplication du potentiel éolien économique par un facteur supérieur à 2. Les objectifs publics de développement de l'éolien pourraient être doublés dans ce cas de figure.

Le potentiel éolien économique maximal pour le tarif de rachat actuel est évalué à 125 MW de puissance éolienne économiquement installable dans le cas simultané d'une diminution des distances d'éloignement de 100 mètres et d'une refonte de la politique territoriale.

Les tarifs de rachat peuvent également être modulés afin d'atteindre les objectifs publics de développement de l'éolien. Dans les cas des scénarios BAU et Biodiversité, le tarif de rachat doit être augmenté au minimum de 0.33 c€/kWh. Dans le cas du scénario Habitat, il doit être plus que doublé (+13.4 c€/kWh au minimum). En revanche en cas de modulation de la politique d'éloignement des zones d'habitations ou de la politique territoriale de protection des espaces naturels sensibles, les tarifs de rachat paraissent trop généreux.

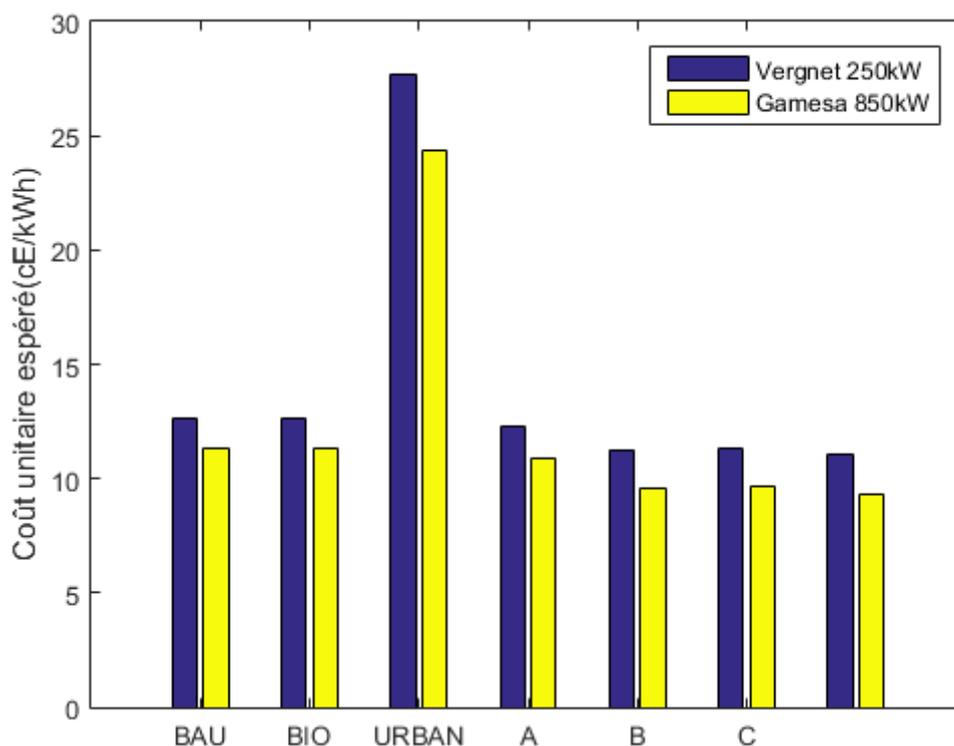


Figure 141 : Tarif de rachat optimal à La Réunion selon différents scénarios réglementaires et deux technologies d'éoliennes.

En définitive, le progrès technique et l'arrivée sur le marché des éoliennes de plus forte puissance adaptées au contexte tropical permettent quasiment d'atteindre les objectifs de développement de l'éolien à La Réunion ou de le revoir à la hausse. En effet, malgré un coût unitaire de la puissance installée supérieure, le recours à des éoliennes de plus grande envergure, plus puissantes et à même de capter des vents soufflant à plus haute altitude s'avère bien plus profitable.

Il demeure à l'heure actuelle un trade-off entre l'acceptation sociale des éoliennes dans le voisinage des zones d'habitations et l'accroissement des tarifs de rachat. Dans le cas où le choix se porterait à payer collectivement davantage, on pourrait donc à partir de cette approche quantifier un shadow-price aux aménités négatives que provoquent les éoliennes dans les 100 mètres situés à l'intérieur de la zone d'éloignement légale.

Enfin, il existe également un trade-off entre l'augmentation des tarifs de rachat et l'installation d'éoliennes sur des espaces sensibles. Un principe d'exception pourrait permettre l'installation d'éoliennes sur ces espaces à condition « *qu'aucun autre emplacement ou aucune autre solution technique n'étaient envisageables à un coût supportable pour la collectivité* »⁸⁴. Le travail de thèse a pour but de fournir une évaluation qui permette de nourrir le débat sur le niveau d'un tel coût supportable pour la société.

⁸⁴ Schéma d'Aménagement Régional de La Réunion, 2011, p.71.

Chapitre 6 Conclusion

« La découverte du « soi », culminant dans la conception chrétienne et gnostique d'une intériorité humaine entièrement soustraite du monde, eut un effet curieusement polarisant sur le tableau général de la réalité : la possibilité même de la notion d'un « univers inanimé » émergea comme la contrepartie de l'accent de plus en plus exclusif mis sur l'âme humaine, sur sa vie intérieure et son caractère incommensurable par rapport à quoi que ce soit dans la nature. »⁸⁵

Sans être nommé, René Descartes est à nouveau convoqué pour tâcher de comprendre en quoi la pensée philosophique moderne, dont il a posé les fondements, a contribué à isoler l'homme de son environnement. Descartes fonde avec le cogito une pensée du retrait du monde qui naît de l'enfermement physique au sein du poêle et du doute méthodique de toute expérience sensible. Le cogito émerge de cette posture et immédiatement avec lui la séparation radicale entre l'immatérialité de la chose qui pense (*Res cogitans*) et l'extériorité de la chose étendue (*Res extensa*). Cette séparation ontologique justifie d'emblée le statut de l'homme comme « maître et possesseur de la nature »⁸⁶ et renvoie l'animal au rang d'automate⁸⁷. La philosophie contemporaine après Heidegger s'efforce de dépasser cette dualité âme/corps et par la même rompt la digue ontologique établie entre l'homme et l'animal ainsi qu'entre la conscience et le monde comme l'illustre Hans Jonas : « l'organique, même dans les formes inférieures, préfigure l'esprit, et l'esprit même dans ce qu'il atteint de plus haut, demeure partie intégrante de l'organique. »⁸⁸ Par cette révolution ontologique, Hans Jonas décrit deux mouvements. Le premier consiste à envisager la conscience comme une réalité incarnée et l'existence comme un être au monde faisant du mouvement la condition de tout devenir. Puis en réhabilitant le statut ontologique de l'organique Jonas opère le second mouvement par lequel l'homme ne procède plus de l'animalité par l'ajout d'une différence ; il s'inscrit au contraire dans la vie biologique et est annoncé dans ses formes les plus primitives.

Dans le domaine des Sciences Economiques également de nombreux efforts ont été produits afin de replacer l'homme au sein de son environnement, en intégrant notamment les enseignements de la physique thermodynamique à la manière de Nicholas Georgescu-Roegen.

Ce travail de thèse a tenté de se placer au sein du même cadre, avec l'ambition de produire une information sur une énergie locale et renouvelable sans ce départir d'une perspective holistique qui mette au même niveau les préoccupations des riverains, la protection des milieux naturels, la conservation de la biodiversité et le développement de moyen de production d'électricité éolienne.

Par le biais d'une étude de la réglementation en vigueur à La Réunion et d'une méthodologie basée sur les systèmes d'information géographique (SIG), nous avons pu mettre en évidence l'importance de la problématique liée à l'usage du sol sur une île tropicale comme La Réunion. Sur un territoire insulaire, à la densité démographique élevée comme La

⁸⁵ Hans JONAS, *Le phénomène de la vie- Vers une biologie philosophique*, Paris, De Boeck, 2001, p.25

⁸⁶ René DESCARTES, *Discours de la méthode*, Paris, GF Flammarion, 2000, p.99

⁸⁷ René DESCARTES, *Discours de la méthode*, Paris, GF Flammarion, 2000, p.91

⁸⁸ Hans JONAS, *Le phénomène de la vie- Vers une biologie philosophique*, Paris, De Boeck, 2001, p.13

Réunion, les contraintes d'éloignement des zones d'habitations ont un impact majeur. Nous avons notamment pu observer que la réduction des zones d'éloignement de 100 mètres pouvait permettre d'atteindre les objectifs publics de développement à La Réunion. Pour des territoires insulaires où la pression sur l'usage du sol est si forte, la législation nationale devrait ouvrir la possibilité à des aménagements locaux. C'est notamment le cas en Allemagne où la compétence concernant l'établissement des distances d'éloignement des zones d'habitations a été transférée depuis 2010 aux Länder. La réduction des distances d'éloignement ne paraît pas incongrue, elles sont en effet de moitié inférieures notamment au Portugal (250 mètres). A contrario, nous avons pu montrer que le doublement des distances d'éloignement amenait à réduire le potentiel éolien économique d'un ordre de grandeur compris entre 3 et 5.

Nous avons également pu montrer que la politique de protection des espaces naturels et de conservation de la biodiversité doit être mise en place en prenant en compte très précisément la problématique posée par l'opération d'éoliennes en particulier au regard de la survie des espèces d'avifaune menacées. Nous avons ainsi pu observer que le potentiel éolien économique pouvait varier selon un facteur supérieur à 2 selon les politiques territoriales mises en place. Par ailleurs, les nouvelles normes de protection de la biodiversité n'affecteraient pas les sites économiquement viables situés à Sainte-Suzanne au nord-est et Saint-Philippe au sud.

Deux types de technologies ont également été comparés au sein de la thèse. Le premier modèle correspondait au standard actuellement en opération sur l'île à savoir une éolienne de puissance assez faible (0.275 MW), et le second modèle correspondait aux nouveaux standards installés dans la zone des Mascareignes d'une puissance plus élevée (0.850 MW). Nous avons observé que les puissances totales au sein de chaque scénario étaient plus faibles pour les grandes éoliennes. L'évaluation des productions électriques totales correspondantes pour chaque scénario a permis de faire ressortir le meilleur rendement des éoliennes de plus grande envergure. A puissances installables inférieures, les productions totales des grandes éoliennes ont été évaluées équivalentes à celles des éoliennes de puissance plus faible. Cette méthodologie nous a permis de quantifier à partir de données réelles, l'impact du progrès technologiques sur les productions électriques espérées en prenant en compte les contraintes techniques d'espacement plus importantes entre éoliennes de plus grande envergure. Le meilleur rendement des grandes éoliennes et leur capacité à capter les vents plus puissants soufflant à plus haute altitude, conformément au profil vertical du vent, permet aux grandes éoliennes d'être davantage compétitives que les modèles de plus faible envergure. Sous le scénario de référence, le repowering permettrait quasiment d'atteindre les objectifs publics de développement de l'éolien fixé à 50 MW pour La Réunion en 2050. En cas de passage à des technologies de plus grande envergure, la politique de subvention devient généreuse pour certains scénarios et permet d'atteindre des objectifs supérieurs à 50 MW dans le cas où elle est conservée. Autrement, nous avons montré qu'il pouvait être nécessaire de prendre en compte la structure des coûts de production de l'électricité éolienne et de réévaluer les tarifs de rachat.

L'étude statistique de la ressource éolienne a également permis de mettre en évidence l'influence des différents régimes de vent sur le territoire de La Réunion. Nous avons pu mettre en évidence l'intérêt d'étudier les variations saisonnières et journalières de la distribution empirique jointe de la vitesse et de la direction du vent pour réaliser une identification précise des divers régimes de vent. En définitive, le régime d'alizés, et les régimes de brises de terre et de brises de mer ont pu être isolés par le biais de distributions empiriques de la vitesse du vent conditionnelles à des secteurs de 30° de la direction du vent. Nous avons montré qu'il est préférable d'avoir recours à l'étude des distributions de la vitesse

du vent conditionnelles à la direction du vent plutôt qu'à la distribution marginale de la vitesse du vent notamment dans les cas de bimodalité. Nous avons également pu mettre en évidence que dans ce cas, un mélange de modèles de Weibull ajustés aux distributions conditionnelles à la direction du vent était préférable. La modélisation du gisement éolien pourrait également être réalisée à partir de processus aléatoire afin de considérer la problématique d'intégration de la production électrique sur le réseau de distribution électrique. Dans le cas d'un système électrique non interconnecté, l'équilibre du réseau est réalisé à partir des capacités de production domestiques et l'intégration d'électricité provenant de sources intermittentes se trouve limitée par cette contrainte. La thèse pourrait être prolongée par l'étude de l'intégration sur le réseau de distribution des capacités éoliennes identifiées comme économiquement viables.

Deux modèles de prédiction spatiale ont par ailleurs été utilisés, celui de la moyenne pondérée par l'inverse de la distance et un modèle de régression utilisé pour modéliser la tendance. Le modèle de la moyenne pondérée par l'inverse de la distance obtient les meilleurs résultats pour la prédiction de la vitesse moyenne du vent et du coefficient de variation. La prédiction spatiale pourrait néanmoins être améliorée en intégrant des modèles plus complexes. En premier lieu, il pourrait être envisagé de modéliser la structure spatiale des résidus des régressions effectuées afin de caractériser la matrice de variance-covariance spatiale de ces derniers. En procédant de la sorte, il est possible de prédire le terme d'erreurs et de réduire la part de la variabilité non expliquée par les modèles. Cette méthodologie correspond au prédicteur de Goldberger (1962), dont la méthode de krigeage introduite par Matheron G. (1969) constitue un cas particulier où les variables explicatives sont réduites aux coordonnées de l'espace. Le recours à l'intelligence artificielle et en particulier aux réseaux de neurones artificiels semble également prometteur et pourrait être développé dans un travail à venir.

Bibliographie

- Aitchison, J., 1955. On the Distribution of a Positive Random Variable Having a Discrete Probability Mass at the Origin. *J. Am. Stat. Assoc.* 50, 901. doi:10.2307/2281175
- Akpinar, S., Akpinar, E.K., 2009. Estimation of wind energy potential using finite mixture distribution models. *Energy Convers. Manag.* 50, 877–884. doi:10.1016/j.enconman.2009.01.007
- Aydin, N.Y., Kentel, E., Duzgun, S., 2010. GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: A case study from Western Turkey. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 364–373. doi:10.1016/j.rser.2009.07.023
- Barclay, R.M.R., Baerwald, E.F., Gruver, J.C., 2007. Variation in bat and bird fatalities at wind energy facilities: assessing the effects of rotor size and tower height. *Can. J. Zool.* 85, 381–387. doi:10.1139/Z07-011
- Bechrakis, D.A., and P.D Sparis, 2000. Simulation of the wind speeds at different heights using artificial neural networks. *Wind Eng.* 24, 127–136.
- Caceres, 2011. Plan de conservation de la Roussette noire (*Pteropus niger*) à La Réunion.
- Carta, J.A., Ramírez, P., 2007. Analysis of two-component mixture Weibull statistics for estimation of wind speed distributions. *Renew. Energy* 32, 518–531. doi:10.1016/j.renene.2006.05.005
- Carta, J.A., Ramírez, P., 2007. Use of finite mixture distribution models in the analysis of wind energy in the Canarian Archipelago. *Energy Convers. Manag.* 48, 281–291. doi:10.1016/j.enconman.2006.04.004
- Carta, J.A., Ramírez, P., Velázquez, S., 2009. A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 933–955. doi:10.1016/j.rser.2008.05.005
- Cellura, M., Cirrincione, G., Marvuglia, A., Miraoui, A., 2008a. Wind speed spatial estimation for energy planning in Sicily: Introduction and statistical analysis. *Renew. Energy* 33, 1237–1250. doi:10.1016/j.renene.2007.08.012
- Cellura, M., Cirrincione, G., Marvuglia, A., Miraoui, A., 2008b. Wind speed spatial estimation for energy planning in Sicily: A neural kriging application. *Renew. Energy* 33, 1251–1266. doi:10.1016/j.renene.2007.08.013
- Commission de Régulation de l'Énergie, 2014. Coûts et rentabilité des énergies renouvelables en France métropolitaine.
- Cressie, N., 1990. The origins of kriging. *Math. Geol.* 22, 239–252. doi:10.1007/BF00889887
- Da Rosa, A.V., 2013. Fundamentals of renewable energy processes, Third edition. ed. Elsevier/AP, Amsterdam.
- Davenport, 1968. The dependence of wind loads on meteorological parameters. Proc. Second Int. Conf. Wind Eff. Ott. 1967 Univ. Tor.
- EDF, 2015. Systèmes énergétiques insulaires-Bilan prévisionnel 2015-la Réunion.
- Farrugia, R.N., 2003. The wind shear exponent in a Mediterranean island climate. *Renew. Energy* 28, 647–653. doi:10.1016/S0960-1481(02)00066-6
- Fırtın, E., Güler, Ö., Akdağ, S.A., 2011. Investigation of wind shear coefficients and their effect on electrical energy generation. *Appl. Energy* 88, 4097–4105. doi:10.1016/j.apenergy.2011.05.025

- Fueyo, N., Sanz, Y., Rodrigues, M., Montañés, C., Dopazo, C., 2011. The use of cost-generation curves for the analysis of wind electricity costs in Spain. *Appl. Energy* 88, 733–740. doi:10.1016/j.apenergy.2010.09.008
- Garcia, A., Torres, J.L., Prieto, E., de Francisco, A., 1998. Fitting wind speed distributions: a case study. *Sol. Energy* 62, 139–144. doi:10.1016/S0038-092X(97)00116-3
- Goldberger, A.S., 1962. Best Linear Unbiased Prediction in the Generalized Linear Regression Model. *J. Am. Stat. Assoc.* 57, 369–375. doi:10.1080/01621459.1962.10480665
- Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for natural resources evaluation, Applied geostatistics series. Oxford University Press, New York.
- Grassi, S., Chokani, N., Abhari, R.S., 2012. Large scale technical and economical assessment of wind energy potential with a GIS tool: Case study Iowa. *Energy Policy* 45, 73–85. doi:10.1016/j.enpol.2012.01.061
- Grondin, Philippe, 2011. Plan de conservation du Busard de Maillard (*Circus maillardi*).
- Harris, R.I., Cook, N.J., 2014. The parent wind speed distribution: Why Weibull? *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 131, 72–87. doi:10.1016/j.jweia.2014.05.005
- Hasager, Nielsen, Jensen, Bøgh, Christensen, Dellwik, Søgaaard, 2003. Effective roughness calculated from satellite-derived land cover maps and hedge-information used in a weather forecasting model. *Bound.-Layer Meteorol.*
- Hötker, H., Thomsen, K.-M., Jeromin, H., 2006. Impacts on biodiversity of exploitation of renewable energy sources: the example of birds and bats facts, gaps in knowledge, demands for further research, and ornithological guidelines for the development of renewable energy exploitation. Books on Demand, Norderstedt.
- H. Tennekes, 1973. The Logarithmic Wind Profile. *J. Atmospheric Sci.* 30, 234–238.
- Isaaks, E.H., 1989. Applied Geostatistics. Oxford Univ. Press, New York ; Oxford.
- Janke, J.R., 2010. Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. *Renew. Energy* 35, 2228–2234. doi:10.1016/j.renene.2010.03.014
- Jaramillo, O.A., Borja, M.A., 2004. Wind speed analysis in La Ventosa, Mexico: a bimodal probability distribution case. *Renew. Energy* 29, 1613–1630. doi:10.1016/j.renene.2004.02.001
- Johnson, N.L., Kotz, S., Balakrishnan, N., 1994. Continuous univariate distributions, 2nd ed. ed, Wiley series in probability and mathematical statistics. Wiley, New York.
- Journel, A.G., Huijbregts, C.J., 2003. Mining geostatistics. Blackburn Press, Caldwell, N.J.
- K. Smith, G. Randall, D. Malcolm, N. Kelley, B. Smith, 2002. Evaluation of Wind Shear Patterns at Midwest Wind Energy Facilities.
- Luo, W., Taylor, M.C., Parker, S.R., 2008. A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales. *Int. J. Climatol.* 28, 947–959. doi:10.1002/joc.1583
- Manwell, J.F., 2009. Wind energy explained: theory, design and application, 2nd ed. ed. Wiley, Chichester, U.K.
- Matheron G., 1969. Le krigeage universel, Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, Vol.1 École des Mines de Paris, Fontainebleau..
- Monin, Obukhov, 1954. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Slovak Acad. Sci.* 24, 163–187.
- Morgan, E.C., Lackner, M., Vogel, R.M., Baise, L.G., 2011. Probability distributions for offshore wind speeds. *Energy Convers. Manag.* 52, 15–26. doi:10.1016/j.enconman.2010.06.015
- Ouarda, T.B.M.J., Charron, C., Shin, J.-Y., Marpu, P.R., Al-Mandoos, A.H., Al-Tamimi, M.H., Ghedira, H., Al Hosary, T.N., 2015. Probability distributions of wind speed in the UAE. *Energy Convers. Manag.* 93, 414–434. doi:10.1016/j.enconman.2015.01.036

0- Bibliographie

- Palomino, I., Martín, F., 1995. A Simple Method for Spatial Interpolation of the Wind in Complex Terrain. *J. Appl. Meteorol.* 34, 1678–1693. doi:10.1175/1520-0450-34.7.1678
- Qin, X., Zhang, J., Yan, X., 2012. Two Improved Mixture Weibull Models for the Analysis of Wind Speed Data. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 51, 1321–1332. doi:10.1175/JAMC-D-11-0231.1
- Région Réunion, 2011. Schéma d'Aménagement Régional de La Réunion.
- Rehman, S., Al-Abbadi, N.M., 2005. Wind shear coefficients and their effect on energy production. *Energy Convers. Manag.* 46, 2578–2591. doi:10.1016/j.enconman.2004.12.005
- Riethmuller, Jan, Giloux, 2012. Plan national d'actions en faveur du pétrel noir de Bourbon (*Pseudobulweria aterrima*).
- Roux D., Le bot A., Clement J., 2002. Impact des éoliennes sur les oiseaux. Synthèse des connaissances actuelles.
- Salamolard, 2008. Plan de conservation du Pétrel de Barau (*Pterodroma barau*).
- Service eau et biodiversité de la DEAL, 2014. Etude préalable d'identification et de cartographie des réseaux écologiques à la Réunion.
- Sliz-Szkliniarz, B., Vogt, J., 2011. GIS-based approach for the evaluation of wind energy potential: A case study for the Kujawsko–Pomorskie Voivodeship. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 1696–1707. doi:10.1016/j.rser.2010.11.045
- Smith, 1976. Vector Wind and Vector Shear Models 0 to 27 km Altitude for Cape Kennedy. NASA TM-X.
- Syndicat des Energies Renouvelables, 2014. Etats des coûts de production de l'éolien terrestre en France.
- UICN-Muséum National d'Histoire Naturelle, 2010. Liste rouge des espèces menacées en France-Premiers résultats pour la faune de la Réunion.
- Wieringa, J., 1993. Representative roughness parameters over homogeneous terrain. *Boundary Layer Meteorology* 323–363.

LETTRÉ D'ENGAGEMENT DE NON-PLAGIAT

Je, soussigné(e) **VINCENT DEODAT** en ma qualité de doctorant(e) de l'Université de La Réunion, déclare être conscient(e) que le plagiat est un acte délictueux passible de sanctions disciplinaires. Aussi, dans le respect de la propriété intellectuelle et du droit d'auteur, je m'engage à systématiquement citer mes sources, quelle qu'en soit la forme (textes, images, audiovisuel, internet), dans le cadre de la rédaction de ma thèse et de toute autre production scientifique, sachant que l'établissement est susceptible de soumettre le texte de ma thèse à un logiciel anti-plagiat.

Fait à Saint-Denis le : 14/10/2018

Signature :



Extrait du Règlement intérieur de l'Université de La Réunion
(validé par le Conseil d'Administration en date du 11 décembre 2014)

Article 9. Protection de la propriété intellectuelle – Faux et usage de faux, contrefaçon, plagiat

L'utilisation des ressources informatiques de l'Université implique le respect de ses droits de propriété intellectuelle ainsi que ceux de ses partenaires et plus généralement, de tous tiers titulaires de ces droits.

En conséquence, chaque utilisateur doit :

- utiliser les logiciels dans les conditions de licences souscrites ;
- ne pas reproduire, copier, diffuser, modifier ou utiliser des logiciels, bases de données, pages Web, textes, images, photographies ou autres créations protégées par le droit d'auteur ou un droit privatif, sans avoir obtenu préalablement l'autorisation des titulaires de ces droits.

La contrefaçon et le faux

Conformément aux dispositions du code de la propriété intellectuelle, toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle d'une œuvre de l'esprit faite sans le consentement de son auteur est illicite et constitue un délit pénal.

L'article 444-1 du code pénal dispose : « Constitue un faux toute altération frauduleuse de la vérité, de nature à causer un préjudice et accomplie par quelque moyen que ce soit, dans un écrit ou tout autre support d'expression de la pensée qui a pour objet ou qui peut avoir pour effet d'établir la preuve d'un droit ou d'un fait ayant des conséquences juridiques ».

L'article L335_3 du code de la propriété intellectuelle précise que : « Est également un délit de contrefaçon toute reproduction, représentation ou diffusion, par quelque moyen que ce soit, d'une œuvre de l'esprit en violation des droits de l'auteur, tels qu'ils sont définis et réglementés par la loi. Est également un délit de contrefaçon la violation de l'un des droits de l'auteur d'un logiciel (...) ».

Le plagiat est constitué par la copie, totale ou partielle d'un travail réalisé par autrui, lorsque la source empruntée n'est pas citée, quel que soit le moyen utilisé. Le plagiat constitue une violation du droit d'auteur (au sens des articles L 335-2 et L 335-3 du code de la propriété intellectuelle). Il peut être assimilé à un délit de contrefaçon. C'est aussi une faute disciplinaire, susceptible d'entraîner une sanction.

Les sources et les références utilisées dans le cadre des travaux (préparations, devoirs, mémoires, thèses, rapports de stage...) doivent être clairement citées. Des citations intégrales peuvent figurer dans les documents rendus, si elles sont assorties de leur référence (nom d'auteur, publication, date, éditeur...) et identifiées comme telles par des guillemets ou des italiques.

Les délits de contrefaçon, de plagiat et d'usage de faux peuvent donner lieu à une sanction disciplinaire indépendante de la mise en œuvre de poursuites pénales.