

# Projet de parc éolien off-shore en Bretagne Sud

Lot 1 - AO5 Bretagne <sup>1</sup>



Version 1.0 du 22/03/2021

<b>Client</b> Direction Générale de l'Énergie et du Climat du Ministère de la Transition Écologique	@ <a href="mailto:guillaume.rouviere@developpement-durable.gouv.fr">guillaume.rouviere@developpement-durable.gouv.fr</a>  ☎ 01 40 81 20 98	 MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE <i>Liberté Égalité Fraternité</i>
<b>Responsable commercial :</b> Météo-France D2C Toulouse	<a href="mailto:christophe.jacolin@meteo.fr">christophe.jacolin@meteo.fr</a> +33 5 61 07 86 85	
<b>Responsable technique :</b> Météo-France DSM/CS/DC	@ <a href="mailto:Raphael.Legrand@meteo.fr">Raphael.Legrand@meteo.fr</a> ☎ +33 5 61 07 86 11	

<sup>1</sup> Nom pouvant être redéfini

- page laissée intentionnellement vide -

## Documents de référence antérieurs

	Intitulé	Référence	Date	Version
DR1	Climatologie de visibilité de parcs éoliens fictifs en mer	livraison_DGEC_LotPréliminaire_Analyse_Visibilité_BretagneSud	08/04/2020	2.3
DR2	Analyse du vent dans la macro-zone de Bretagne Sud	livraison_DGEC_LotPréliminaire_Analyse_Vent_BretagneSud	05/03/2020	2.0

## Évolutions successives

Référence	Date	Version	Évolution
AO5_BretagneSud_Lot1_Rapport_Bretagne_V1_20210322	22/03/2021	V1	Création

## Signatures

	Nom	Service	Signature
Rédacteur(s)	Régine Merle	DSM/CS/DC	
Relecteur(s)	B. Poupponneau/V. Chatel	DSM/CS/DC	
	R. Legrand	DSM/CS/DC	
Approbateur(s)	Christophe Jacolin	D2C/DV/PRO	

## RÉSUMÉ

L'objectif de ce lot 1 est d'étudier les risques usuels du vent dans le cadre d'une problématique d'éolien off-shore. Il vise à définir une climatologie du vent dans les basses couches de l'atmosphère sur la zone d'intérêt, à y estimer le potentiel éolien et à quantifier les risques de vents forts autres que les conditions météorologiques turbulentes et rafales.

Les données utilisées pour cette étude sont principalement des séries temporelles de vent moyen horaire i) de points d'observation retenus pour leur proximité avec la zone maritime étudiée et la qualité de leurs mesures ainsi que ii) celles des analyses du modèle météorologique AROME à la résolution horizontale  $0,025^\circ$  (environ 2,5 km) sur la période 2000-2020.

Ces données horaires sont livrées en complément à ce rapport.

Les résultats obtenus sont présentés sous forme cartographique et parfois accompagnés de tableaux.

Les principales conclusions sont les suivantes :

La zone étudiée est ventée avec une répartition des forces et des directions assez homogène quelle que soit l'altitude.

Les vents les plus forts sont principalement de secteur nord-ouest à sud-ouest.

Concernant le potentiel éolien, prenant appui sur une courbe de puissance donnée sélectionnée pour ce rapport, le facteur de charge moyen estimé pour les points étudiés (lidars) dépasse légèrement 50 % aux niveaux 100 et 140 m.

En termes de fréquence de retour de vent fort, les valeurs les plus élevées se situent au niveau 10 m sur l'ouest et le centre de la zone et au niveau 100 m, à l'ouest et au nord-est ; à ce dernier niveau, elles dépassent 32 m/s pour le risque décennal et 35 m/s pour le risque cinquantennal, associées à des incertitudes (intervalle de confiance de 70 %).

## Table des matières

1	Objet de l'étude et méthode	1
1.1	Objet de l'étude	1
1.2	Méthode	1
1.3	Campagne de mesure	2
2	Géographie physique de la zone	3
3	Typologie des différentes situations météorologiques	4
3.1	Les situations de sud-ouest	5
3.2	Les situations de nord à nord-ouest	7
3.3	Les situations d'est à nord-est	9
3.4	Les orages	10
3.5	Les trombes marines	11
3.6	Le phénomène de brise	11
4	Climatologie fine du vent	13
4.1	Comparaison des vents observés et du modèle AROME au niveau 10 m	14
4.1.1	Belle-Île-en-Mer	15
4.1.2	Île de Groix	20
4.1.3	Lorient	24
4.1.4	Brittany	29
4.2	Vents modélisés sur la zone	34
4.2.1	Vents modélisés au niveau 10 m	35
4.2.2	Vents modélisés au niveau 100 m	41
4.2.3	Vents modélisés au niveau 160 m	47
4.2.4	Vents modélisés au niveau 250 m	53
5	Estimation du potentiel éolien	59
5.1	Méthode du facteur de charge	59
5.2	Statistiques de potentiel éolien	60
5.2.1	Point AROME Lidar Nord	61
5.2.2	Point AROME Lidar Sud	65
6	Durées de retour des vents forts	68
6.1.1	Durées de retour pour le niveau 10 m	70
6.1.2	Durées de retour pour le niveau 100 m	73
6.1.3	Durée de retour sur la zone	76
7	Conclusion	78
	Annexes	79

## Liste des illustrations

Illustration 1.1 : Exemple de bouée équipée d'un lidar	2
Illustration 2.1 : Côtes de Bretagne Sud avec la zone éolienne d'intérêt	3
Illustration 3.1 : Situations de sud-ouest	5
Illustration 3.2 : Profil vertical du point AROME central de la zone Bretagne le 17/11/2015 à 12h UTC	6
Illustration 3.3 : Situations de nord à nord-ouest	7
Illustration 3.4 : Profil vertical du point AROME central de la zone Bretagne le 21/11/2015 à 12h UTC	8
Illustration 3.5 : Situations d'est à nord-est	9
Illustration 3.6 : Profil vertical du point AROME central de la zone Bretagne le 28/02/2016 à 12h UTC	10
Illustration 3.7 : Trombe marine aux alentours de l'île Hoëdic le 10 juin 2019 (Photo CENTRE de CROISIERE ATLANTIQUE NANTES)	11
Illustration 3.8 : Phénomène de brise	12
Illustration 3.9 : Roses des vents horaires moyens à 10 m de Lorient du mois de juillet à 6 h UTC à gauche et 15 h UTC à droite sur la période 2000-2020	13
Illustration 4.1 : Classes de vitesse (m/s) pour le niveau 10 m	14
Illustration 4.2 : Carte des points d'observation	15
Illustration 4.3 : Station de Belle-Île (Sémaphore du Talut)	16
Illustration 4.4 : Roses annuelles des vents horaires du point d'observation (à gauche) et du point AROME 10 m (à droite) sur la période 2000-2020	16
Illustration 4.5 : Roses saisonnières des vents horaires du point d'observation (à gauche) et du point AROME (à droite) sur la période 2000-2020	17
Illustration 4.6 : Comparaison des forces de vent (fréquences par m/s) à gauche et des directions (fréquences par secteur) à droite du point d'observation et du point AROME 10 m sur la période 2000-2020	18
Illustration 4.7 : Forces moyennes des vents horaires en m/s du point d'observation et du point AROME 10 m par heure UTC (pour tous les mois de l'année) sur le graphique de gauche et par mois (pour toutes les heures) sur le graphique de droite de 2000 à 2020 (seuil plafond des forces : 25 m/s)	18
Illustration 4.8 : Forces de vent en m/s au pas de temps horaire du point d'observation et du point AROME 10 m sur les périodes du 14 mars 2010 à 00 h UTC au 15 mars 2018 à 23 h UTC (graphique gauche) et du 30 octobre 2010 à 00 h UTC au 31 octobre 2010 à 23 h UTC (graphique droit)	19
Illustration 4.9 : Groix (Sémaphore de Beg Melen)	20
Illustration 4.10 : Roses annuelles des vents horaires du point d'observation (à gauche) et du point AROME 10 m (à droite) sur la période 2000-2020	21
Illustration 4.11 : Roses saisonnières des vents horaires du point d'observation (à gauche) et du point AROME (à droite) sur la période 2000-2020	22
Illustration 4.12 : Comparaison des forces de vent (fréquences par m/s) à gauche et des directions (fréquences par secteur) à droite du point d'observation et du point AROME 10 m sur la période 2000-2020	23
Illustration 4.13 : Forces moyennes des vents horaires en m/s du point d'observation et du point AROME 10 m par heure UTC sur le graphique gauche et par mois sur le graphique droit de 2000 à 2020 (seuil plafond des forces : 25 m/s)	23
Illustration 4.14 : Forces horaires en m/s du point d'observation et du point AROME 10 m sur les périodes du 30 octobre 2010 à 00 h UTC au 31 octobre 2010 à 23 h UTC (graphique gauche) et du 15 mai 2015 à 00 h UTC au 16 mai 2015 à 23 h UTC (graphique droit)	24

Illustration 4.15 : Lorient (Lann Bihoue)	25
Illustration 4.16 : Roses annuelles des vents horaires du point d'observation (à gauche) et du point AROME 10 m (à droite) sur la période 2000-2020	26
Illustration 4.17 : Roses saisonnières des vents horaires du point d'observation (à gauche) et du point AROME (à droite) sur la période 2000-2020	27
Illustration 4.18 : Comparaison des forces de vent (fréquences par m/s) à gauche et des directions (fréquences par secteur) à droite du point d'observation et du point AROME 10 m sur la période 2000-2020	28
Illustration 4.19 : Forces moyennes des vents horaires en m/s du point d'observation et du point AROME 10 m par heure UTC sur le graphique gauche et par mois sur le graphique droit de 2000 à 2020 (seuil plafond des forces : 25 m/s)	28
Illustration 4.20 : Forces horaires en m/s du point d'observation et du point AROME 10 m sur les périodes du 30 octobre 2010 à 00 h UTC au 31 octobre 2010 à 23 h UTC (graphique gauche) et du 15 mai 2015 à 00 h UTC au 16 mai 2015 à 23 h UTC (graphique droit)	29
Illustration 4.21 : Exemple de bouée ancrée du réseau OMM	30
Illustration 4.22 : Roses annuelles des vents horaires du point d'observation (à gauche) et du point AROME 10 m (à droite) sur la période 2018-2020	30
Illustration 4.23 : Roses saisonnières des vents horaires du point d'observation (à gauche) et du point AROME (à droite) sur la période 2018-2020	31
Illustration 4.24 : Comparaison des forces de vent (fréquences par m/s) à gauche et des directions (fréquences par secteur) à droite du point d'observation et du point AROME 10 m sur la période 2018-2020	32
Illustration 4.25 : Forces moyennes des vents horaires en m/s du point d'observation et du point AROME 10 m par heure UTC sur le graphique gauche et par mois sur le graphique droit de 2018 à 2020 (seuil plafond des forces : 25 m/s)	32
Illustration 4.26 : Forces horaires en m/s du point d'observation et du point AROME 10 m sur les périodes du 30 octobre 2018 à 00 h UTC au 31 octobre 2018 à 23 h UTC (graphique gauche) et du 15 mai 2019 à 00 h UTC au 16 mai 2019 à 23 h UTC (graphique droit)	33
Illustration 4.27 : Classes des vents pour le niveau 10 m	34
Illustration 4.28 : Classes des vents pour les autres niveaux	34
Illustration 4.29 : Roses annuelles simulées au niveau 10 m sur la zone de Bretagne (2000-2020)	35
Illustration 4.30 : Roses saisonnières simulées au niveau 10 m sur la zone	39
Illustration 4.31 : Forces moyennes du vent sur la zone au niveau 10 m sur la période 2000-2019	40
Illustration 4.32 : Roses annuelles simulées au niveau 100 m sur la zone (2000-2020)	41
Illustration 4.33 : Roses saisonnières simulées au niveau 100 m sur la zone	45
Illustration 4.34 : Forces moyennes du vent sur la zone de Bretagne Sud au niveau 100 m sur la période 2000-2019	46
Illustration 4.35 : Roses annuelles simulées au niveau 160 m sur la zone (2000-2020)	47
Illustration 4.36 : Roses saisonnières simulées au niveau 160 m sur la zone	51
Illustration 4.37 : Forces moyennes du vent sur la zone au niveau 160 m sur la période 2000-2019	52
Illustration 4.38 : Roses annuelles simulées au niveau 250 m sur la zone (2000-2020)	53
Illustration 4.39 : Roses saisonnières simulées au niveau 250 m sur la zone	57
Illustration 4.40 : Forces moyennes du vent sur la zone au niveau 250 m sur la période 2000-2019	58
Illustration 5.1 : Courbe de puissance d'une éolienne pour 10 MW installés en fonction de la vitesse du vent en m/s	60
Illustration 5.2 : Localisation des lidars	61

Illustration 5.3 : Facteurs de charge mensuels sur la période 2000-2020 au niveau 100 m	62
Illustration 5.4 : Facteurs de charge mensuels sur la période 2000-2020 au niveau 140 m	63
Illustration 5.5 : Facteurs de charge annuels sur la période 2000-2020 au niveau 100 m	64
Illustration 5.6 : Facteurs de charge annuels sur la période 2000-2020 au niveau 140 m	64
Illustration 5.7 : Facteurs de charge mensuels sur la période 2000-2020 au niveau 100 m	65
Illustration 5.8 : Facteurs de charge mensuels sur la période 2000-2020 au niveau 140 m	66
Illustration 5.9 : Facteurs de charge annuels sur la période 2000-2020 au niveau 100 m	67
Illustration 5.10 : Facteurs de charge annuels sur la période 2000-2020 au niveau 140 m	68
Illustration 6.1 : Carte des points AROME « durée de retour »	69
Illustration 6.2 : graphique des durées de retour (10, 20 et 50 ans) du vent pour le point C à 10 m.	70
Illustration 6.3 : graphique des durées de retour (10, 20 et 50 ans) du vent pour le point C à 100 m.	73

## Liste des tableaux

Tableau 4.1 : Statistiques de distribution des 2 séries de données pour Belle-Île	19
Tableau 4.2 : Statistiques de distribution des 2 séries de données pour Groix.	24
Tableau 4.3 : Statistiques de distribution des 2 séries de données pour Lorient	29
Tableau 4.4 : Statistiques de distribution des 2 séries de données pour Brittany	33
Tableau 6.1 : Points AROME « durée de retour »	69
Tableau 6.2 : Tableau des forces du vent pour une durée de retour de 10 ans du Point C à 10 m.	71
Tableau 6.3 : Tableau des forces du vent pour une durée de retour de 20 ans du Point C à 10 m.	71
Tableau 6.4 : Tableau des forces du vent pour une durée de retour de 50 ans du Point C à 10 m.	72
Tableau 6.5 : Tableau des forces du vent pour une durée de retour de 10 ans du Point C à 100 m.	74
Tableau 6.6 : Tableau des forces du vent pour une durée de retour de 20 ans du Point C à 100 m.	75
Tableau 6.7 : Tableau des forces du vent pour une durée de retour de 50 ans du Point C à 100 m.	75
Tableau 6.8 : Tableau récapitulatif des durées de retour des points AROME étudiés au niveau 10 m	76
Tableau 6.9 : Tableau récapitulatif des durées de retour des points AROME étudiés au niveau 100 m	77

## Glossaire

Abréviation	Signification
<b>FF</b>	Vitesse du vent moyenné sur les 10 minutes précédant l'heure ronde. Hauteur de la mesure : 10 mètres. Unité : mètres par seconde et dixièmes (1 m/s = 3,6 km/h = 1,945 noeuds).
<b>DD</b>	Direction du vent moyenné sur les 10 minutes précédant l'heure ronde. Hauteur de la mesure : 10 mètres. La direction du vent s'exprime en degrés, de 0 à 360. Elle indique la direction d'où vient le vent.
<b>OMM</b>	Organisation météorologique mondiale
<b>UTC</b>	Coordinated Universal Time

# 1 Objet de l'étude et méthode

## 1.1 Objet de l'étude

L'objet de cette étude consiste à élaborer sur la base de vents représentatifs de vent moyen 10 minutes :

- une climatologie fine du vent dans les basses couches de l'atmosphère (du sol à 250 m), au large de la Bretagne Sud à partir des données mesurées et modélisées,
- une estimation du potentiel éolien,
- des durées de retour des vents forts.

L'ensemble des données et statistiques sont jointes à ce rapport.

## 1.2 Méthode

Après une description des caractéristiques géographiques de la région côtière bretonne, une climatologie fine du vent est élaborée à partir de données observées (françaises et anglaises), ainsi que de données d'analyse du modèle AROME de Météo-France.

Pour AROME, les éléments de l'étude s'appuient sur une série historique établie sur la période de 21 ans (2000-2020).

Une sélection d'un certain nombre de points de grille représentatifs est effectuée pour l'estimation de la distribution spatiale du vent sur la zone d'implantation des éoliennes off-shore. Les données sont présentées sous forme de roses de vent et des durées de retour des vents (représentatifs du vent moyen 10 minutes) forts sont calculées.

## 1.3 Campagne de mesure

Cette zone fait l'objet d'une campagne de mesure depuis le 23 juillet 2020 au point lidar Nord de coordonnées  $47,400^{\circ}$  N /  $-3,575^{\circ}$  E et au point lidar Sud  $47,225^{\circ}$  N /  $-3,500^{\circ}$  E.



*Illustration 1.1 : Exemple de bouée équipée d'un lidar*

## 2 Géographie physique de la zone

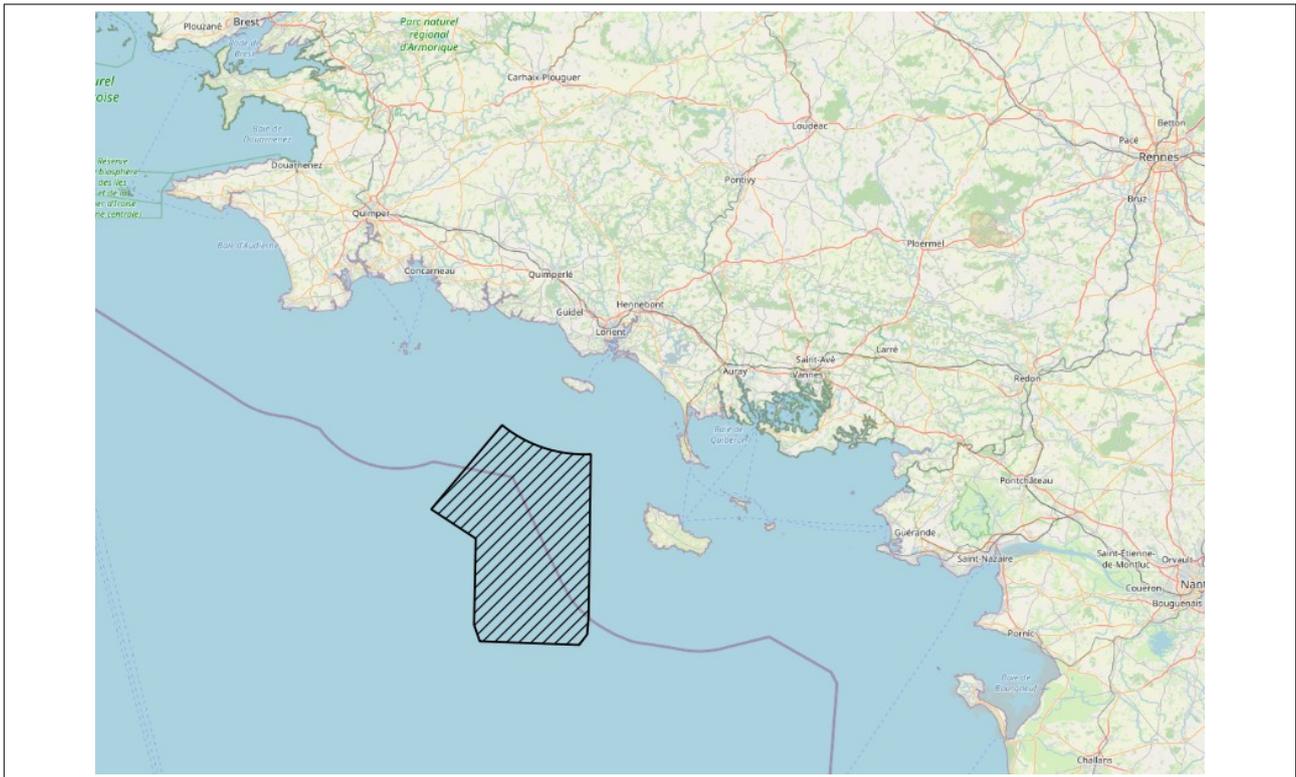


Illustration 2.1 : Côtes de Bretagne Sud avec la zone éolienne d'intérêt

Les côtes maritimes de la Bretagne Sud présentent des aspects très divers avec des dunes battues par le vent, des falaises de granit qui se jettent dans l'océan, des estuaires servant de refuges aux poissons, mollusques ou oiseaux, des marais salants, des cordons de galets. De nombreuses îles sont présentes tout le long du littoral ; la plus grande est Belle-Île-en-Mer dans le prolongement de la presqu'île de Quiberon. A proximité, on trouve le golfe du Morbihan, un golfe ramifié et quasiment fermé avec de nombreux îlots et des petites plages de sable fin.

### 3 Typologie des différentes situations météorologiques

Le climat de Bretagne est de type océanique et tempéré. Il est marqué par une amplitude thermique annuelle relativement faible et une pluviométrie importante. Il existe naturellement des contrastes locaux, liés à l'altitude ou encore à la proximité de l'espace maritime.

La situation météorologique au large de la Bretagne dépend de la position :

- de l'anticyclone des Açores,
- de la dépression d'Islande,
- de hautes pressions continentales (surtout pour les vents de nord-est à est l'hiver).

Les cartes d'analyse de surface qui sont présentées ci-dessous sont des figures isobariques dans lesquelles la pression atmosphérique est ramenée au niveau moyen de la mer. La valeur de ces isobares est exprimée en hectopascals (hPa) ou millibars (mb). Ces isobares permettent d'identifier les centres de basse pression nommés « dépressions » et identifiés par la lettre D (en rouge) et de haute pression ou « anticyclones » identifiés par la lettre A (en bleu), ainsi que les systèmes.

La différence de pression entre deux points de la carte, ou gradient horizontal de pression, permet de déterminer l'intensité du vent : plus les isobares sont serrées, plus le vent est fort.

Les 3 types de situation météorologique qui vont être présentées seront illustrées par un graphique « Profil vertical » avec les vecteurs vents reconstitués par le modèle AROME décrit au paragraphe 4 de ce rapport, sur le point AROME le plus proche du point central de la zone d'intérêt. Les coordonnées de ce point sont 47,300° N / -3,625° E. Les vents sont pointés dans ces graphiques en nœuds pour une journée type (une petite barbule vaut 5 nœuds, une grande barbule 10 nœuds et un triangle noir 50 nœuds). Le vent souffle de la direction où figurent les barbules.

## 3.1 Les situations de sud-ouest

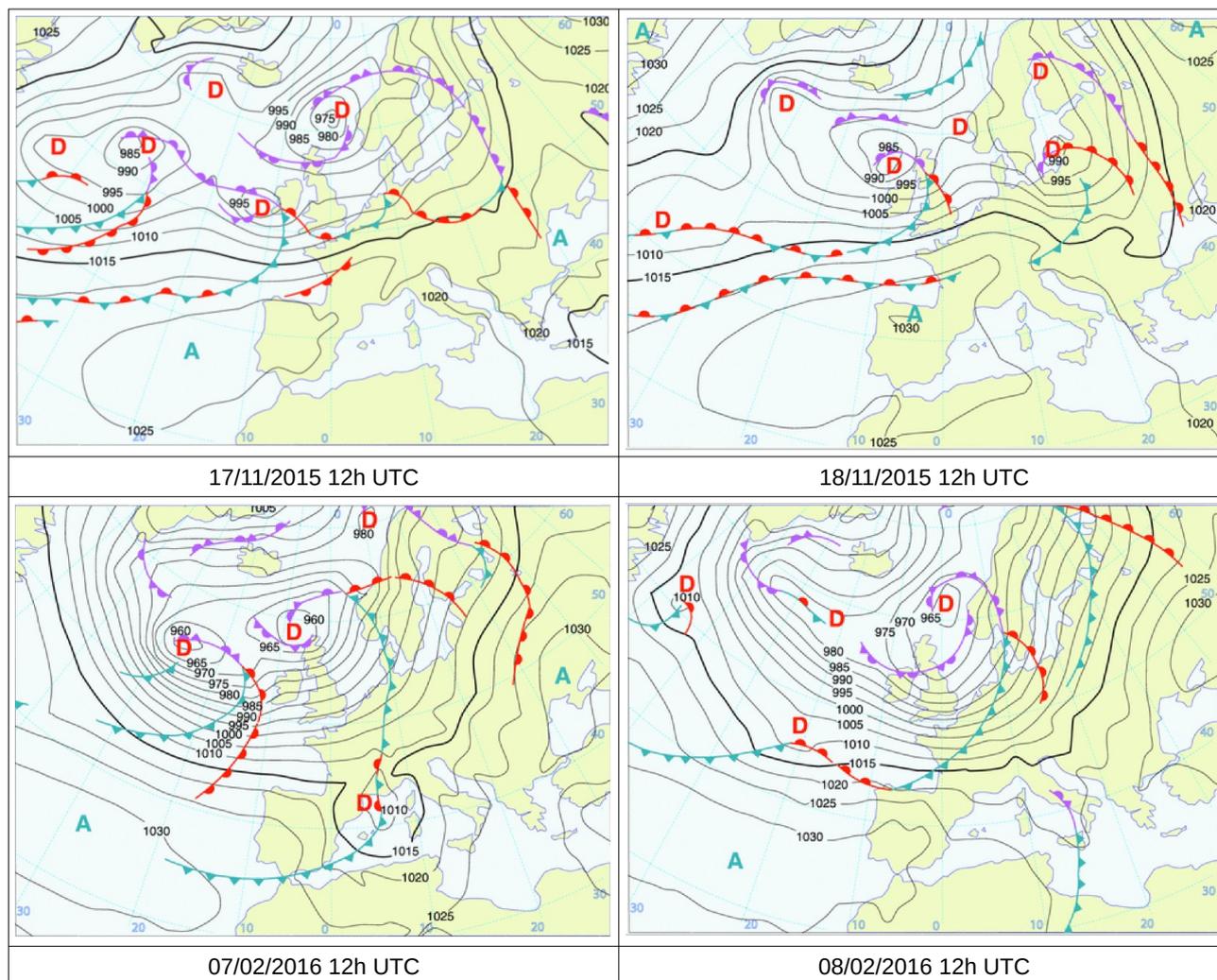
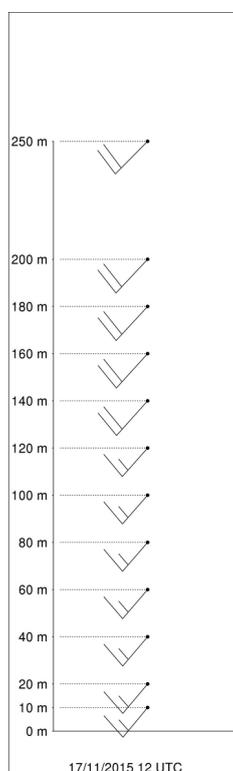


Illustration 3.1 : Situations de sud-ouest

Les cartes ci-dessus présentent deux situations différentes : les 17 et 18 novembre 2015 et les 7 et 8 février 2016. Sur ces cartes, l'anticyclone des Açores se situe de l'ouest de l'Espagne à la mer Méditerranée. Sa position permet aux dépressions issues de celle d'Islande de circuler sur l'Europe du Nord. Chaque dépression est accompagnée d'une perturbation.

Le vent venant du sud-ouest, appelé « Suroît » est plutôt doux et souffle régulièrement.



*Illustration 3.2 : Profil vertical du point AROME central de la zone Bretagne le 17/11/2015 à 12h UTC*

Le vent de sud-ouest atteint 15 nœuds de 10 à 120 m au centre de la zone Bretagne puis 20 nœuds.

Par situation de sud-ouest, la vitesse du vent moyen augmente légèrement mais régulièrement entre 10 et 250 m alors que la direction demeure stable.

Cependant, il arrive que lors du passage des fronts chauds (en rouge sur les cartes précédentes) mais surtout lors du passage des fronts froids (en bleu), des processus de cisaillement vertical de vent (changement de direction et ou de vitesse entre les différents niveaux verticaux) se produisent, dans les basses couches de l'atmosphère, sur des distances très courtes (quelques kilomètres).

## 3.2 Les situations de nord à nord-ouest

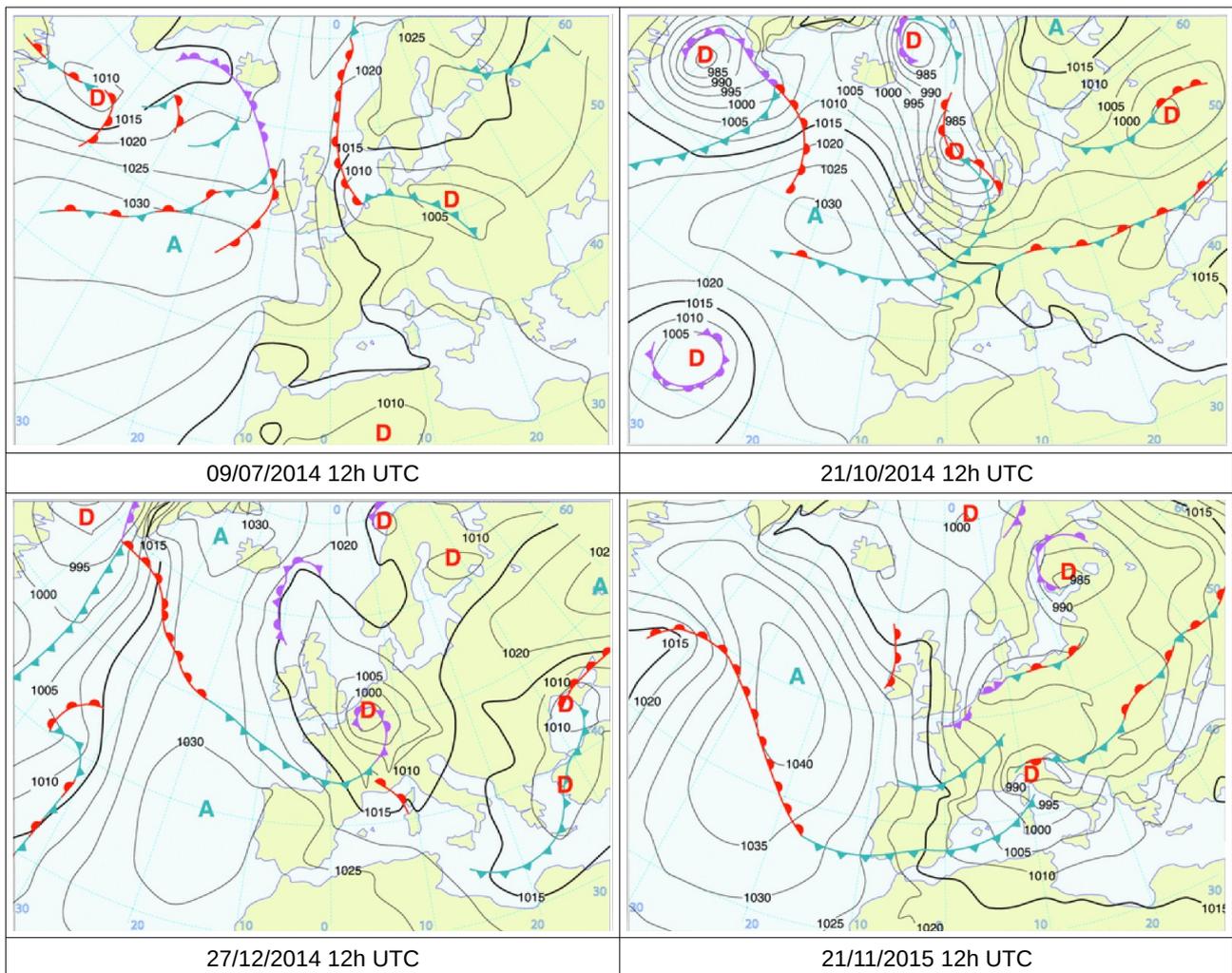


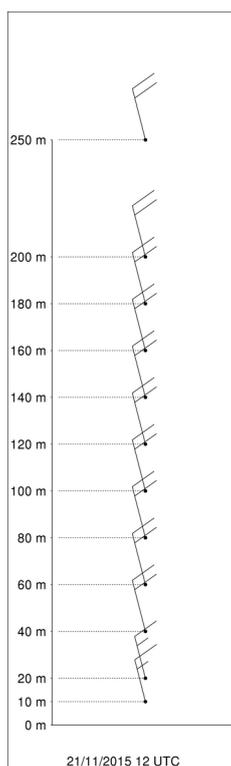
Illustration 3.3 : Situations de nord à nord-ouest

Ces 4 situations distinctes se caractérisent par :

- l'anticyclone des Açores positionné à l'ouest de l'Irlande sur l'Atlantique,
- une zone dépressionnaire à l'est des hautes pressions.

La position des dépressions pour le 21 octobre 2014 et le 27 décembre 2014 renforce le vent de nord à nord-ouest sur l'est de la Manche et sur la mer du Nord. Les vents de nord-ouest ou de nord qui portent le nom de « Noroît », soufflent irrégulièrement et ils sont plus turbulents. Les rafales associées sont souvent marquées dans une masse d'air

instable quand de l'air froid circule en altitude au-dessus d'une surface plus chaude (sol ou mer).



*Illustration 3.4 : Profil vertical du point AROME central de la zone Bretagne le 21/11/2015 à 12h UTC*

Par situation de nord à nord-ouest, la vitesse du vent moyen passe de 15 à 20 nœuds au-dessus de 20 m puis ne varie pas jusqu'à 250 m avec une direction stable.

Les rafales mentionnées précédemment ne sont pas indiquées dans l'illustration 3.4 car la figure ne représente que le vent moyen.

### 3.3 Les situations d'est à nord-est

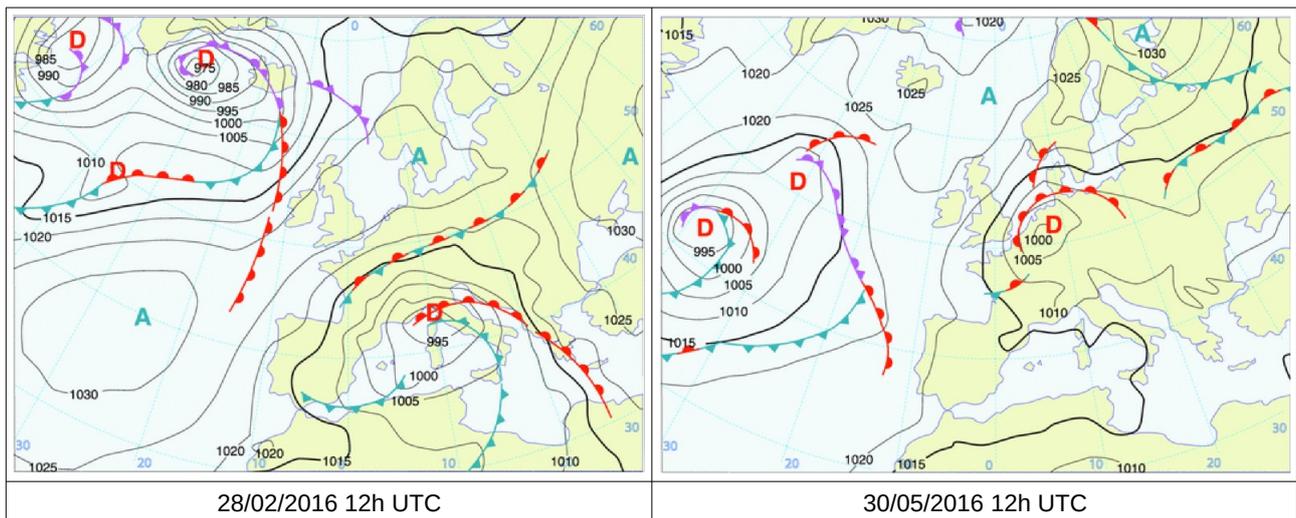


Illustration 3.5 : Situations d'est à nord-est

Pour ces 2 situations distinctes, les hautes pressions sur l'Europe du Nord repoussent les perturbations océaniques vers le nord ; l'hiver, ce type de scénario peut être lié à la présence de l'anticyclone de Sibérie qui s'étend vers l'Europe. Les basses pressions se situent souvent en mer Méditerranée d'où elles ramènent sur le nord de la France des retours humides qui génèrent des chutes de neige l'hiver.

Les vents d'est à nord-est, nommés « Nordet », sont des vents réguliers parfois soutenus qui accentuent la sensation de froid surtout en hiver. En été, ils sont associés souvent à de longues périodes de beau temps stable.

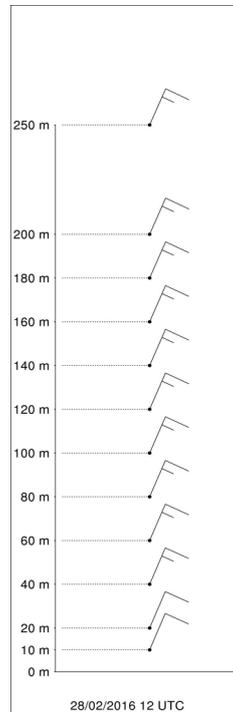


Illustration 3.6 : Profil vertical du point AROME central de la zone Bretagne le 28/02/2016 à 12h UTC

Par situation de nord-est, la vitesse du vent moyen augmente très peu entre 10 et 250 m avec une direction stable.

### 3.4 Les orages

Les orages démarrent à partir de mouvements verticaux générés par l'approche d'un front, un relief ou un différentiel important de températures de la masse d'air entre les basses couches, chaudes et les hautes altitudes, froides. Ces courants ascendants vont donner naissance, par compensation, à des mouvements subsidents (vers le bas), l'ensemble permet le développement de nuages à forte extension verticale : les cumulonimbus. Ces derniers s'accompagnent d'averses de pluie, de fortes rafales de vent, d'orages, parfois de grêle. Ils peuvent donner lieu à la formation de trombes sur mer et de tornades sur terre.

## 3.5 Les trombes marines

Une trombe marine est une colonne d'air en rotation prenant la forme d'un entonnoir nuageux, aussi appelé tuba, se développant entre la surface d'un plan d'eau (mer, lac, etc.) et un nuage en altitude. Les trombes se développent grâce à l'instabilité de l'air et au cisaillement des vents au-dessus de leur lieu de formation. Elles se forment sous les cumulus ou cumulonimbus.

Une trombe est ordinairement moins puissante que la tornade mais si elle parvient à toucher terre et à y survivre, elle en prendra le nom. La vitesse des vents associés peut dépasser les 100 km/h. Se produisant pendant la journée, elles peuvent former des groupes de deux ou plus, durer jusqu'à 20 minutes et avoir des diamètres d'une vingtaine de mètres. Elles se déplacent généralement à une vitesse de l'ordre de 15 à 25 km/h. La Manche est un bassin où l'on peut les observer.

On peut en observer au large de la zone Bretagne Sud.



*Illustration 3.7 : Trombe marine aux alentours de l'île Hoëdic le 10 juin 2019 (Photo CENTRE de CROISIÈRE ATLANTIQUE NANTES)*

## 3.6 Le phénomène de brise

Le trait de séparation entre la mer et la terre, ou plus généralement entre la terre et une étendue d'eau, constitue une ligne de discontinuité pour les différents paramètres

météorologiques. Les brises sont des phénomènes qui se créent lorsqu'un contraste thermique important se met en place entre les deux surfaces. L'orientation du vent synoptique, liée à la position des centres d'action, va s'en trouver modifié.

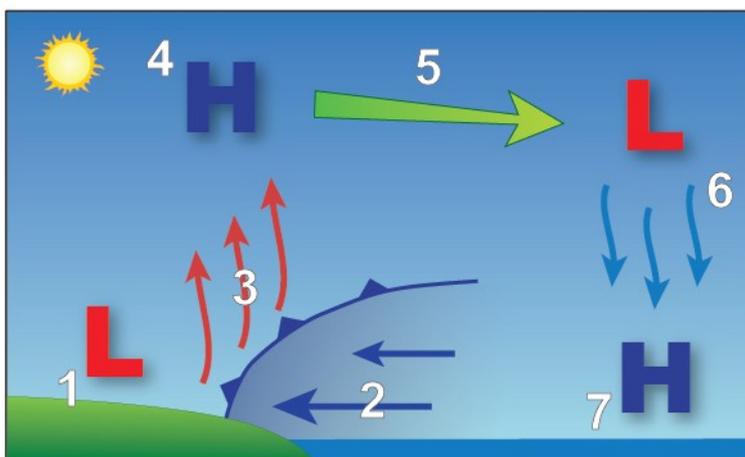


Illustration 3.8 : Phénomène de brise

En été, au cours de la journée, le sol se réchauffe sous l'action du rayonnement solaire plus rapidement que la mer. Par conduction tout d'abord puis par convection, il transmet une grande partie de la chaleur emmagasinée aux basses couches de l'atmosphère. La pression dans cet air ascendant décroît donc avec l'altitude plus lentement sur terre que sur mer. Les surfaces isobares s'inclinent vers le large et un courant de pente se forme en altitude de la côte vers le large (où il se crée de la subsidence). Dans le même temps, près du sol, un afflux horizontal d'air maritime (donc humide) vient compenser l'ascendance d'air sur terre et peut être à l'origine de formations nuageuses si l'air est potentiellement instable dans les basses couches. Cet afflux constitue la **brise de mer**.

La brise de mer peut pénétrer à environ 50 km à l'intérieur des terres. L'extension du courant subsident (vers le bas) en mer est, par contre, difficilement quantifiable. Les brises de mer peuvent théoriquement atteindre 45 à 50 nœuds abstraction faite des forces de frottement. Dans la réalité, elles atteignent généralement 10 à 15 nœuds (5 à 8 m/s) et l'épaisseur de la couche intéressée par ce phénomène est de l'ordre de 1 000 à 2 000 m en moyenne.

Au cours de la nuit, le phénomène s'inverse. À cause du rayonnement nocturne, accentué par la présence d'un ciel dégagé, le sol se refroidit rapidement alors que la mer, en raison de son inertie thermique, reste tiède. Les courants ascendants prennent naissance sur mer et un courant de compensation venant de la terre s'établit. C'est la **brise de terre**. Cette dernière n'a toutefois que très rarement l'intensité et l'extension des brises de mer.

Exemple pour la station de Lorient (département du Morbihan) :

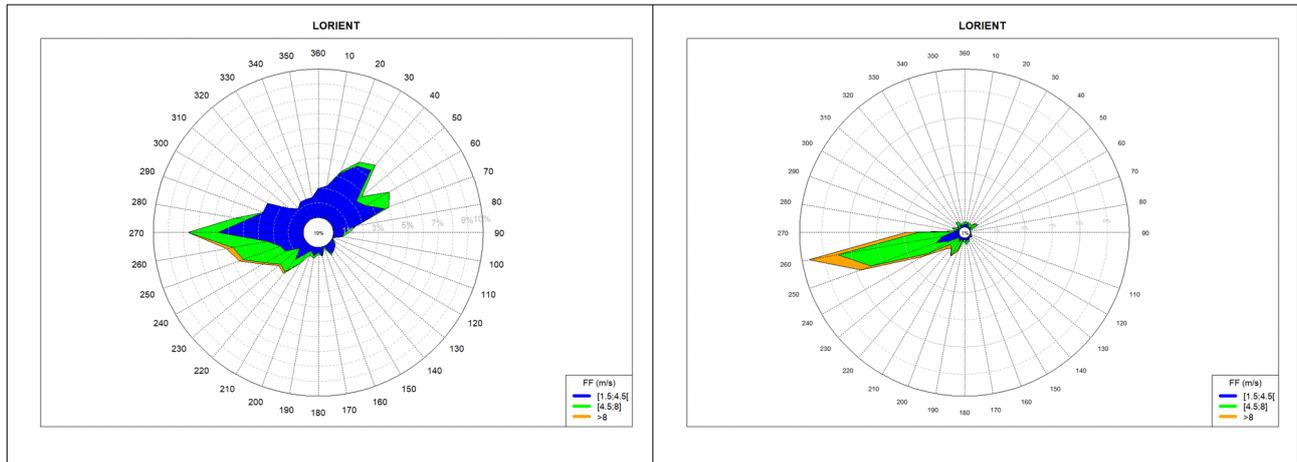


Illustration 3.9 : Roses des vents horaires moyennes à 10 m de Lorient du mois de juillet à 6 h UTC à gauche et 15 h UTC à droite sur la période 2000-2020

Ces roses de vent sur Lorient à deux heures différentes de la journée illustrent bien le phénomène de brise avec, en moyenne, une prédominance climatologique de ces brises l'après-midi.

Il est possible que la brise thermique influence les conditions de vent sur la zone off shore considérée, notamment sur sa partie nord la plus proche de la côte.

## 4 Climatologie fine du vent

Des données du vent moyen sur 10 minutes **mesurées** sont comparées à des données de vent représentatives du vent moyen 10 minutes issues de la base de données de climatologie du modèle AROME.

La base de données issue du modèle AROME est disponible au **pas de temps horaire** de paramètres liés au potentiel éolien (P, T, Hu, DD et FF moyennées sur 10 minutes) à des niveaux proches du sol à la résolution de 2.5 km.

L'utilisation du modèle AROME permet une bonne prise en compte du relief, des effets côtiers, de la turbulence et des phénomènes de petites échelles (nuages convectifs par exemple). Il décrit avec plus de finesse la répartition spatiale du vent avec un point tous les 2.5 km. Douze niveaux sont disponibles : 10, 20, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 et 250 m ; seul le niveau 10 m est utilisé pour la comparaison avec les données observées.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Voir en Annexe1 : Description du modèle atmosphérique AROME

L'échelle des vitesses (unité le mètre par seconde) choisie pour les roses de vent à 10 m est la suivante :



Illustration 4.1 : Classes de vitesse (m/s) pour le niveau 10 m

Le pourcentage de vent calme est inscrit dans le centre des roses de vent.

## 4.1 Comparaison des vents observés et du modèle AROME au niveau 10 m

Parmi les stations d'observation existantes, 4 ont été retenues pour leur proximité avec la zone maritime étudiée et la qualité de leurs mesures.

- 3 terrestres : Belle-Île, Groix, Lorient,
- 1 maritime : Brittany (bouée ancrée).

### Remarque :

Les roses de vent saisonnières sont établies sur des intervalles d'années différents en fonction des données disponibles et de façon à obtenir un nombre égal de saisons sur la période considérée, considérant que l'hiver météorologique s'étend de décembre de l'année AAAA à février de l'année AAAA+1.

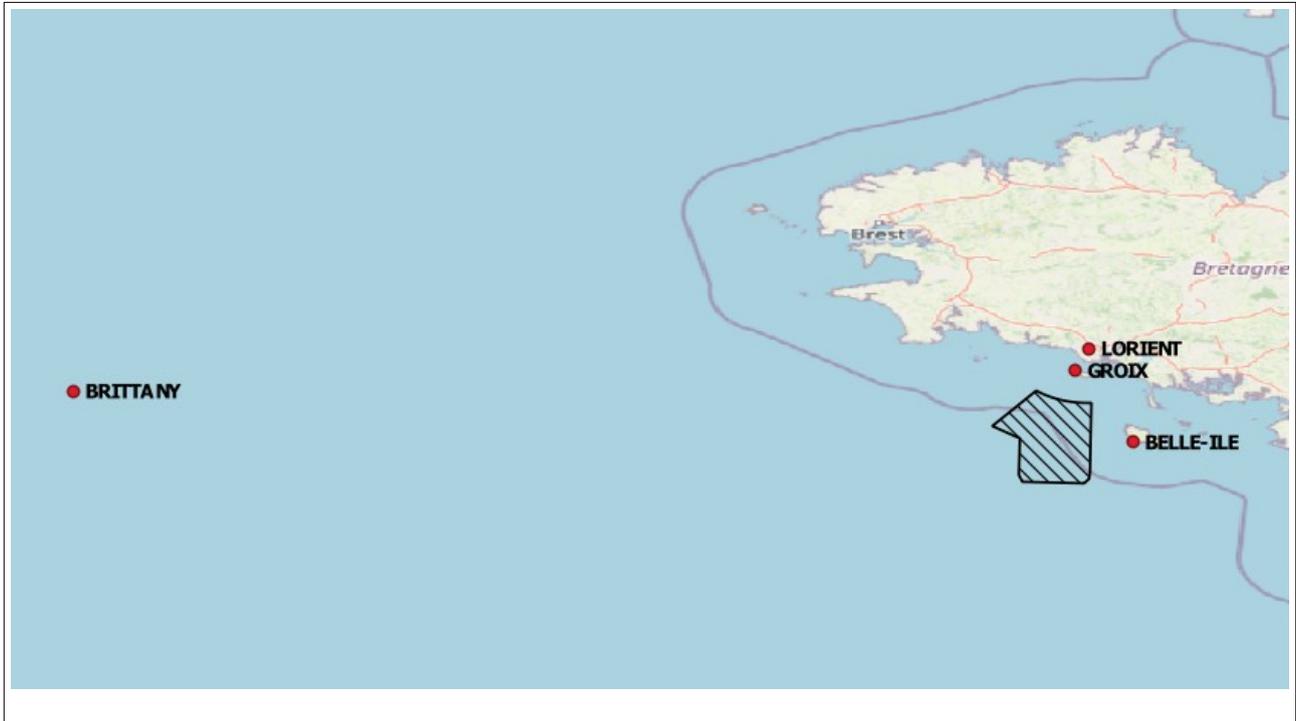


Illustration 4.2 : Carte des points d'observation

### 4.1.1 Belle-Île-en-Mer

Ce point de mesure se situe au lieu-dit sémaphore du Talut, sur la commune de Bangor de Belle-Île dans le département du Morbihan (56). Ce sémaphore est implanté sur la côte sud de l'île en bordure d'une falaise de 30 m environ de hauteur

Ses coordonnées géographiques sont 47,294° N / -3,218° E. L'altitude de la station est 34 m.



Illustration 4.3 : Station de Belle-Île (Sémaphore du Talut)

Le point le plus proche sur terre de cette station est le point de la grille AROME de coordonnées 47,300° N / -3,225° E ; il est situé à une altitude un peu supérieure à 0 m et est éloigné de 1,4 km du point d'observation.

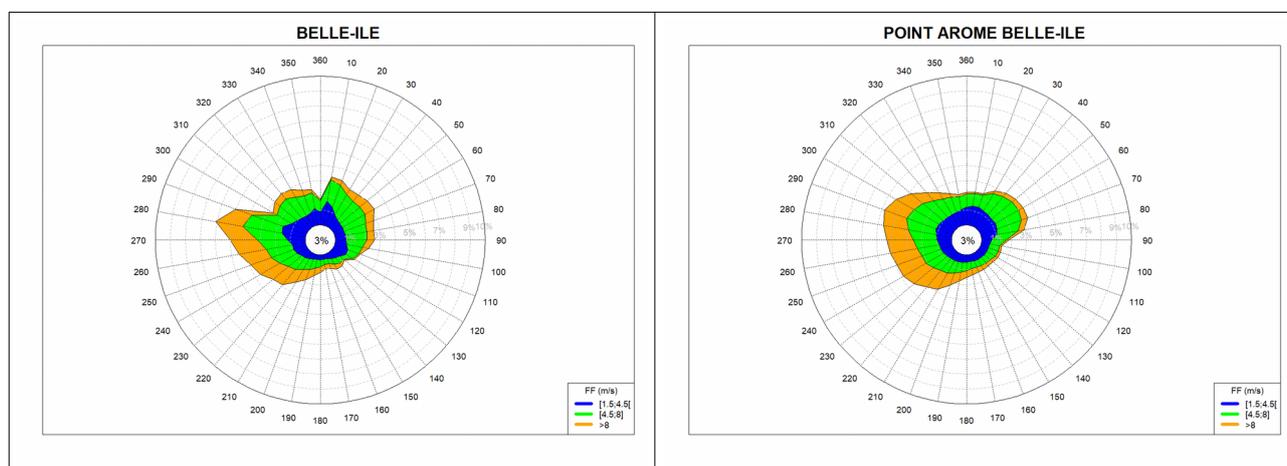


Illustration 4.4 : Roses annuelles des vents horaires du point d'observation (à gauche) et du point AROME 10 m (à droite) sur la période 2000-2020

Le pourcentage de vents ayant une force supérieure ou égale à 4.5 m/s s'élève à 67,3 % pour le point de mesure de Belle-Île et 66,4 % pour le point AROME.

Deux directions dominant : un large secteur ouest-sud-ouest et le secteur nord-est.

## 4 Climatologie fine du vent



Illustration 4.5 : Roses saisonnières des vents horaires du point d'observation (à gauche) et du point AROME (à droite) sur la période 2000-2020

Les roses de vent du sémaphore de Belle-Île-ci présentent de petites irrégularités pour le vent venant du nord ; celles-ci sont probablement liées à la turbulence engendrée par des obstacles quand le vent vient de l'intérieur de l'île.

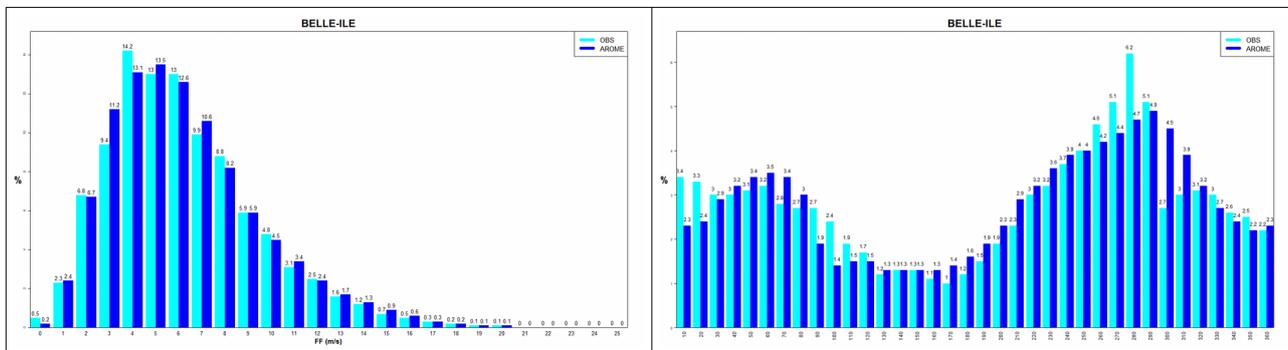


Illustration 4.6 : Comparaison des forces de vent (fréquences par m/s) à gauche et des directions (fréquences par secteur) à droite du point d'observation et du point AROME 10 m sur la période 2000-2020

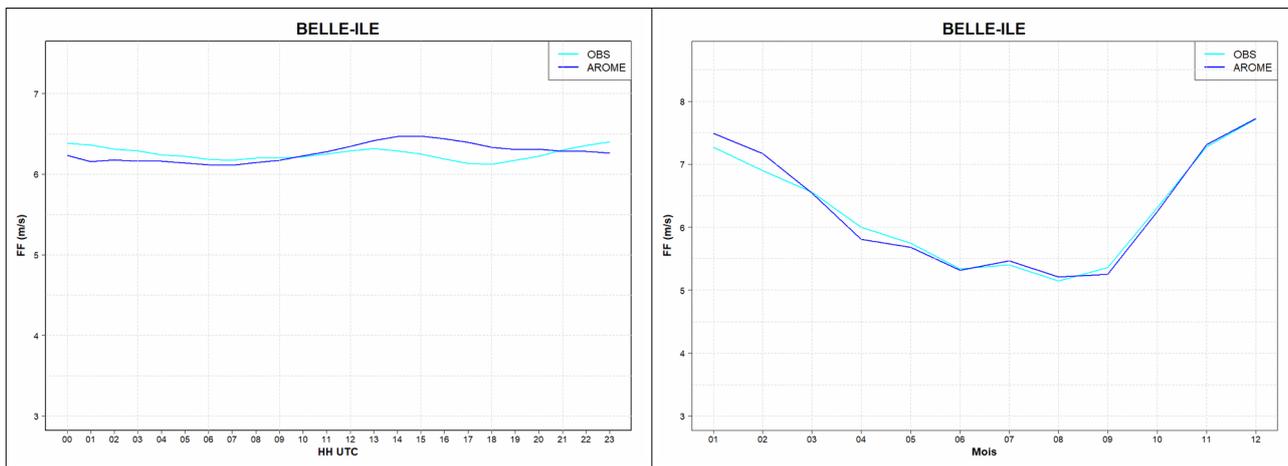


Illustration 4.7 : Forces moyennes des vents horaires en m/s du point d'observation et du point AROME 10 m par heure UTC (pour tous les mois de l'année) sur le graphique de gauche et par mois (pour toutes les heures) sur le graphique de droite de 2000 à 2020 (seuil plafond des forces : 25 m/s)

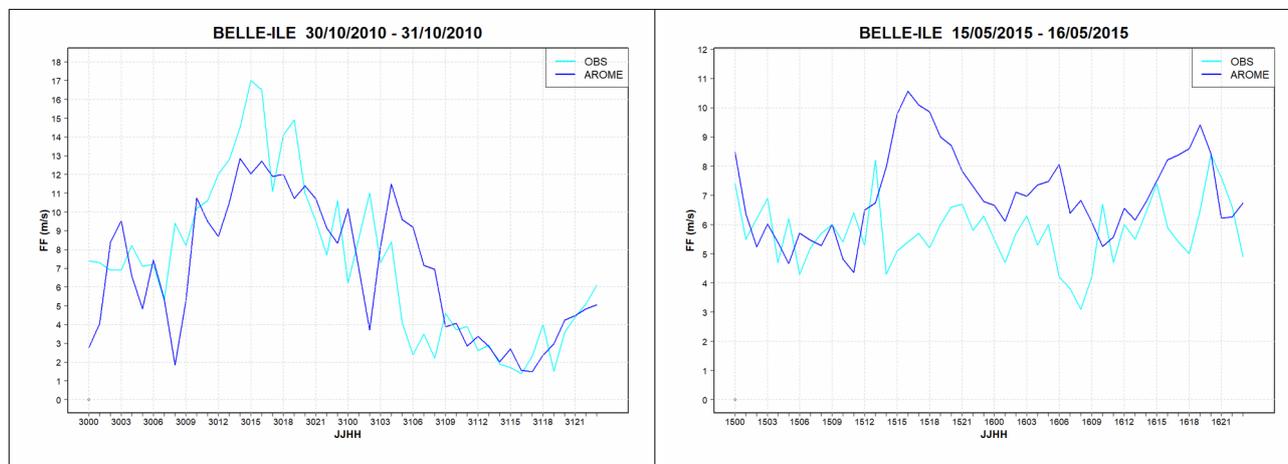


Illustration 4.8 : Forces de vent en m/s au pas de temps horaire du point d'observation et du point AROME 10 m sur les périodes du 14 mars 2010 à 00 h UTC au 15 mars 2018 à 23 h UTC (graphique gauche) et du 30 octobre 2010 à 00 h UTC au 31 octobre 2010 à 23 h UTC (graphique droit)

	<b>Début des mesures</b>	<b>Données absentes</b>	<b>Moyenne des forces</b>	<b>Q25</b>	<b>Q75</b>	<b>Maximum des forces</b>
<b>Point d'observation</b>	2000	1.2 %	6.3 m/s	4.0 m/s	8.0 m/s	26.4 m/s
<b>Point AROME 10 m</b>	2000	0,1 %	6.3 m/s	3.8 m/s	8.0 m/s	28.9 m/s

Tableau 4.1 : Statistiques de distribution des 2 séries de données pour Belle-Île

Rappel : par construction 50 % des données d'une série sont comprises entre le Q25 et le Q75.

### Conclusion :

Les deux séries de forces du vent étudiées sont climatologiquement très proches et présentent une bonne corrélation.

### 4.1.2 Île de Groix

Ce point de mesure se situe au lieu-dit sémaphore Beg Melen, sur la commune de Groix dans le département du Morbihan (56). Ce sémaphore est implanté non loin d'une falaise de 30 m de haut environ sur la côte ouest de l'île.

Ses coordonnées géographiques sont  $47,652^{\circ}$  N /  $-3,502^{\circ}$  E. L'altitude de la station est 41 m.



*Illustration 4.9 : Groix (Sémaphore de Beg Melen)*

Le point le plus proche sur terre de cette station est le point de la grille AROME de coordonnées  $47,650^{\circ}$  N /  $-3,500^{\circ}$  E ; il est situé à 8 m d'altitude et est éloigné de 0,5 km du point d'observation.

## 4 Climatologie fine du vent

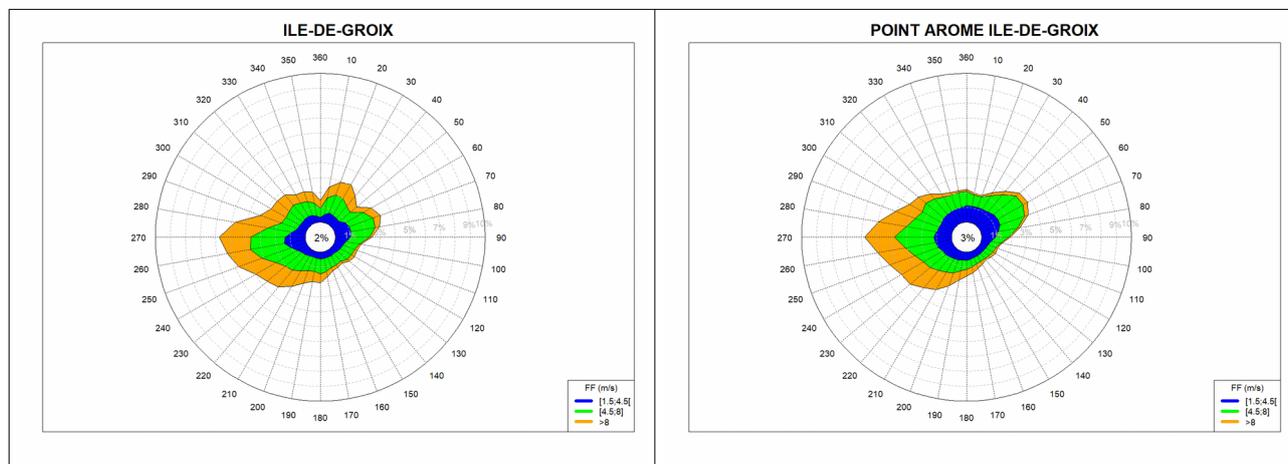


Illustration 4.10 : Roses annuelles des vents horaires du point d'observation (à gauche) et du point AROME 10 m (à droite) sur la période 2000-2020

Le pourcentage de vents ayant une force supérieure ou égale à 4,5 m/s s'élève à 73,3 % pour le point de mesure de Groix et 65,6 % pour le point AROME.

Deux directions dominent : un large secteur ouest-sud-ouest et le secteur est-nord-est.



Illustration 4.11 : Roses saisonnières des vents horaires du point d'observation (à gauche) et du point AROME (à droite) sur la période 2000-2020

Comme celles du sémaphore de Belle-Île, les roses de vent du sémaphore de Groix présentent de petites irrégularités pour le vent venant du nord ; celles-ci sont probablement liées à la turbulence engendrée par des obstacles aux alentours quand le vent vient de l'intérieur de l'île.

## 4 Climatologie fine du vent

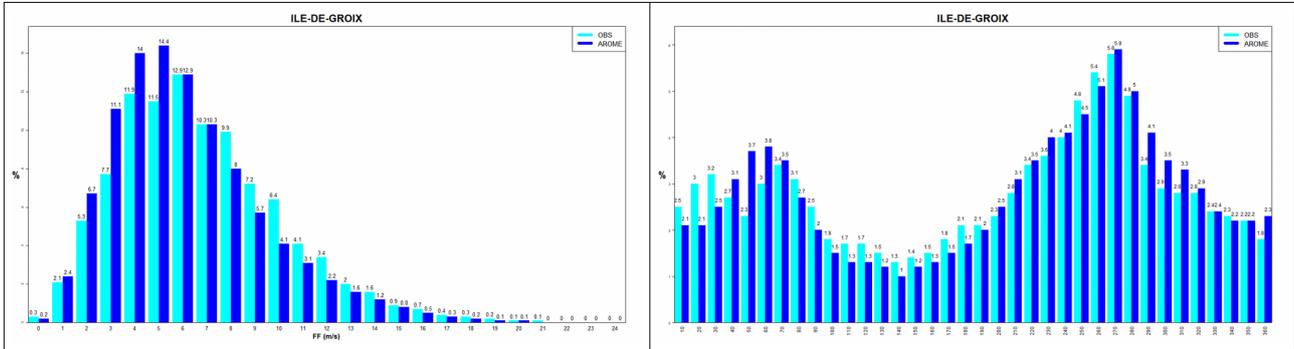


Illustration 4.12 : Comparaison des forces de vent (fréquences par m/s) à gauche et des directions (fréquences par secteur) à droite du point d'observation et du point AROME 10 m sur la période 2000-2020

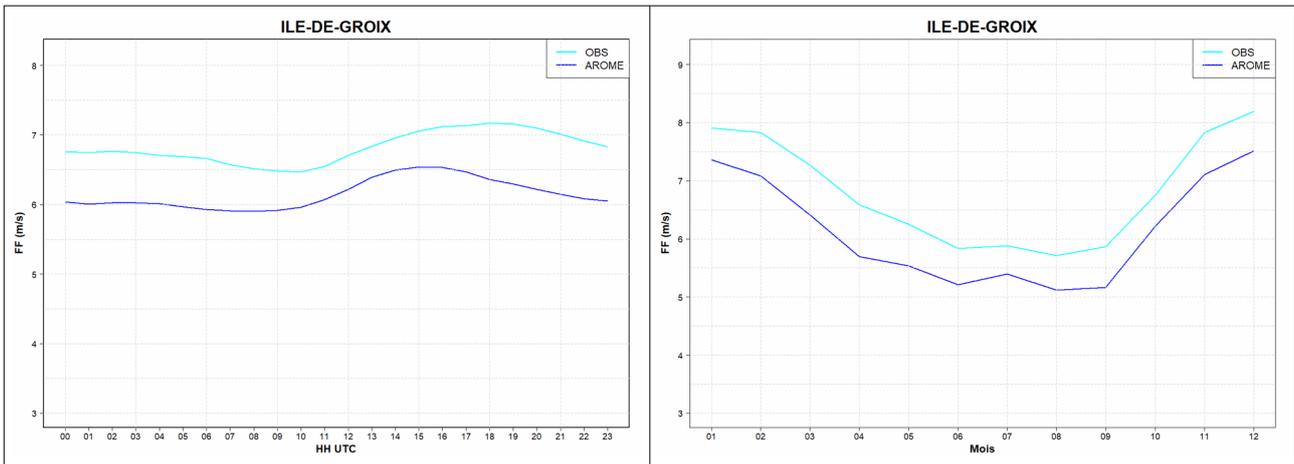


Illustration 4.13 : Forces moyennes des vents horaires en m/s du point d'observation et du point AROME 10 m par heure UTC sur le graphique gauche et par mois sur le graphique droit de 2000 à 2020 (seuil plafond des forces : 25 m/s)

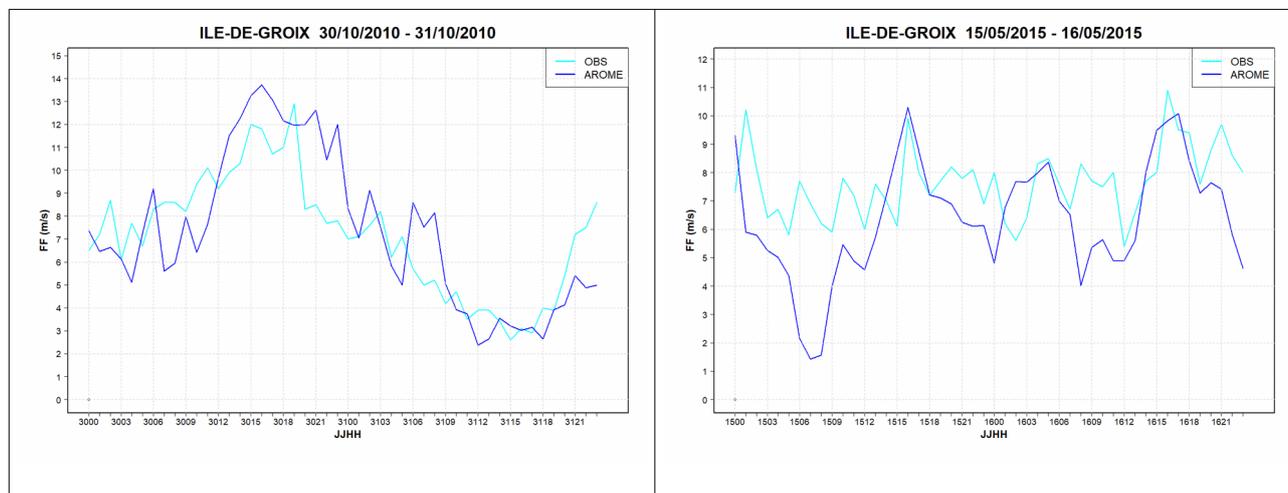


Illustration 4.14 : Forces horaires en m/s du point d'observation et du point AROME 10 m sur les périodes du 30 octobre 2010 à 00 h UTC au 31 octobre 2010 à 23 h UTC (graphique gauche) et du 15 mai 2015 à 00 h UTC au 16 mai 2015 à 23 h UTC (graphique droit)

	<b>Début des mesures</b>	<b>Données absentes</b>	<b>Moyenne des forces</b>	<b>Q25</b>	<b>Q75</b>	<b>Maximum des forces</b>
<b>Point d'observation</b>	2000	1.1 %	6.8 m/s	4.2 m/s	9.0 m/s	28.4 m/s
<b>Point AROME 10 m</b>	2000	0.1 %	6.1 m/s	3.8 m/s	7.8 m/s	30.3 m/s

Tableau 4.2 : Statistiques de distribution des 2 séries de données pour Groix.

### Conclusion :

Pour l'île de Groix, la corrélation entre les données du point d'observation et celles du point de grille du modèle AROME au niveau 10 m est bonne, même si le modèle a tendance à sous-estimer les forces. Cette sous-estimation peut s'expliquer par la mauvaise représentation de l'île de Groix dans le modèle AROME liée à sa taille réduite. Les différences de forces les plus marquées se situent en cours de nuit.

### 4.1.3 Lorient

Ce point de mesure se situe au lieu-dit Lan Bihoue, sur la commune de Queven dans le département du Morbihan (56).

Ses coordonnées géographiques sont  $47,763^{\circ}$  N /  $-3,436^{\circ}$  E. L'altitude de la station est 45 m.

La classe de performance de la mesure du vent est de 1 sur une échelle de 5 (qualité décroissante de 1 à 5).



*Illustration 4.15 : Lorient (Lann Bihoué)*

Le point le plus proche sur terre de cette station est le point de la grille AROME de coordonnées  $47,775^{\circ}$  N /  $-3,425^{\circ}$  E ; il est situé à 39 m d'altitude et est éloigné de 2,5 km du point d'observation.

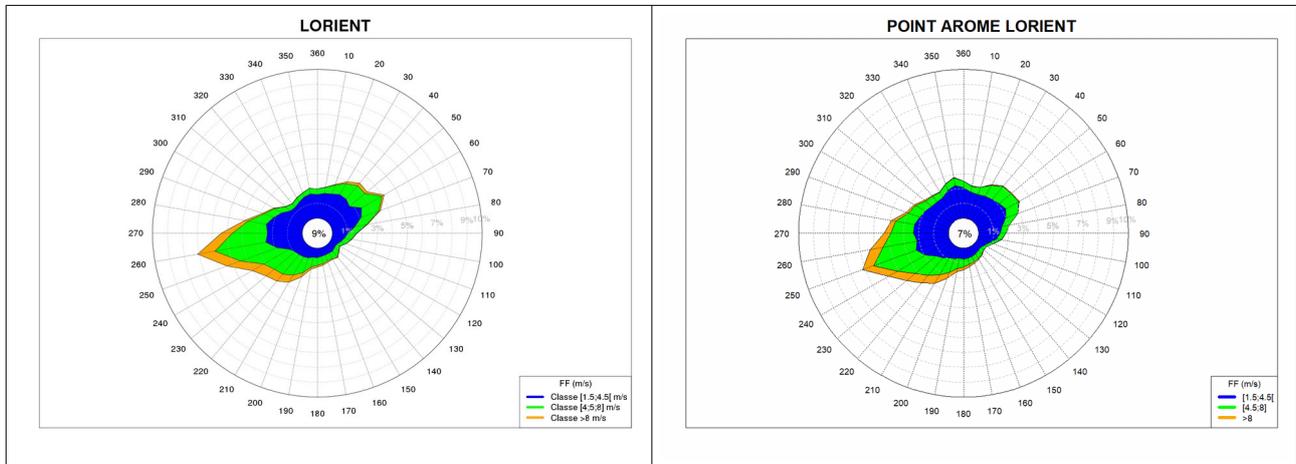


Illustration 4.16 : Roses annuelles des vents horaires du point d'observation (à gauche) et du point AROME 10 m (à droite) sur la période 2000-2020

Le pourcentage de vents ayant une force supérieure ou égale à 4.5 m/s s'élève à 42,2 % pour le point de mesure de Lorient et 37,1 % pour le point AROME.

Deux directions dominant : un large secteur sud-ouest et le secteur nord-est.

## 4 Climatologie fine du vent

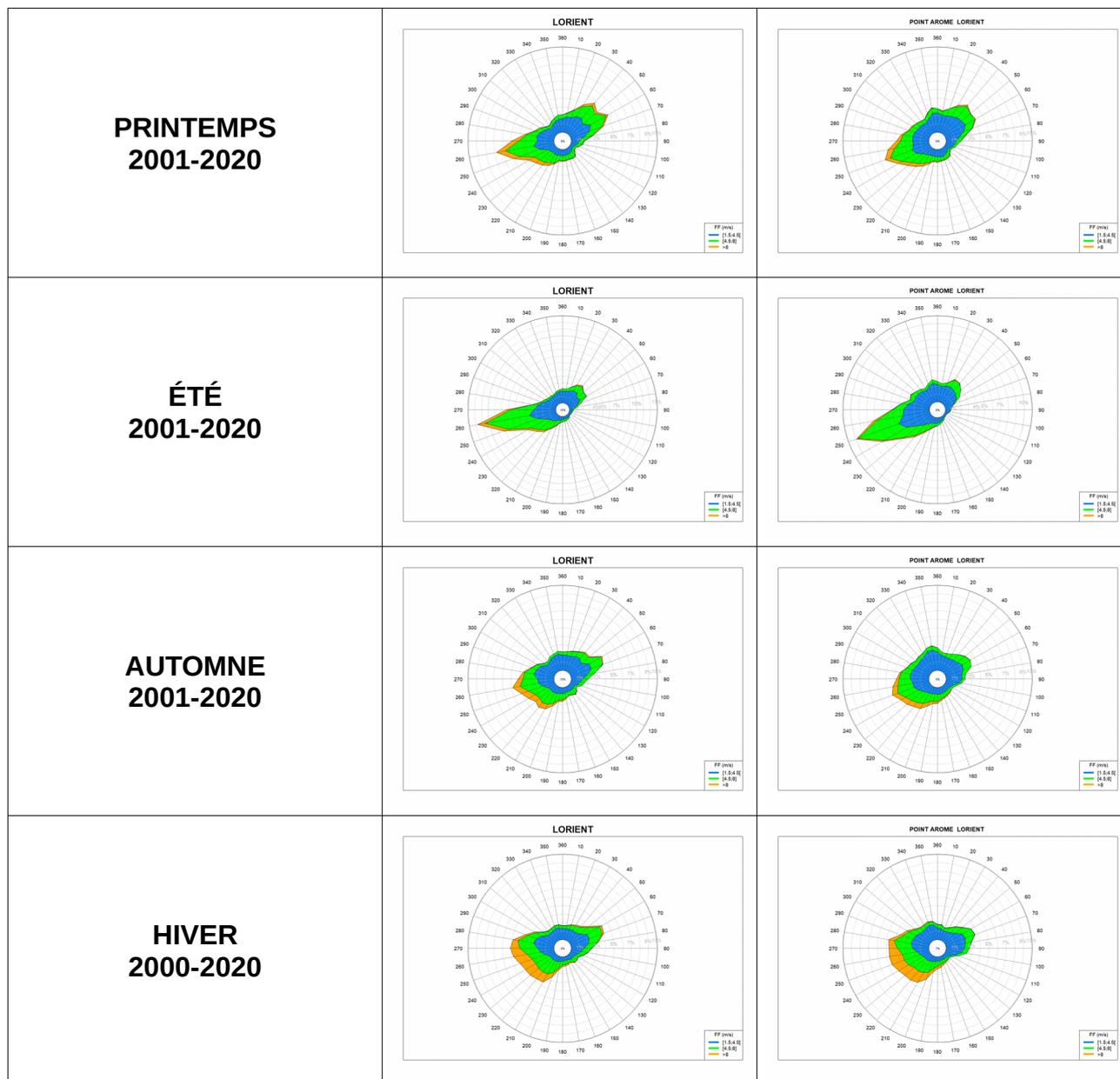


Illustration 4.17 : Roses saisonnières des vents horaires du point d'observation (à gauche) et du point AROME (à droite) sur la période 2000-2020

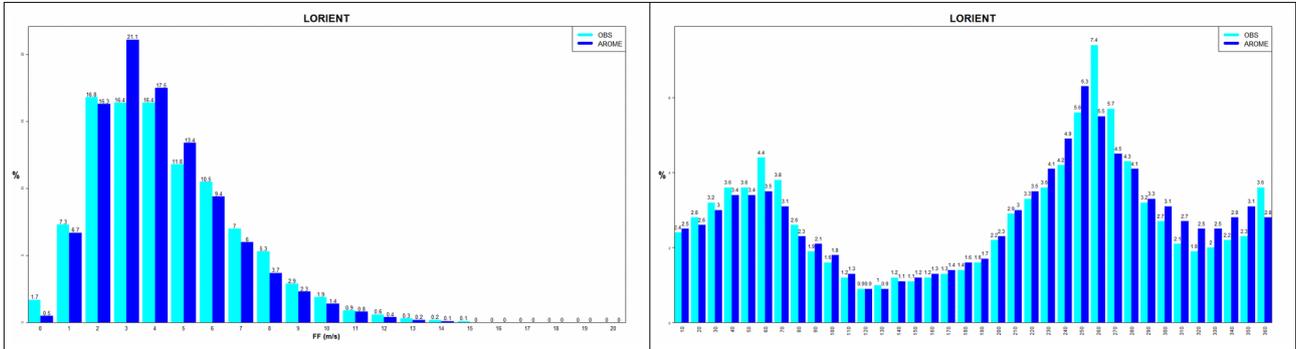


Illustration 4.18 : Comparaison des forces de vent (fréquences par m/s) à gauche et des directions (fréquences par secteur) à droite du point d'observation et du point AROME 10 m sur la période 2000-2020

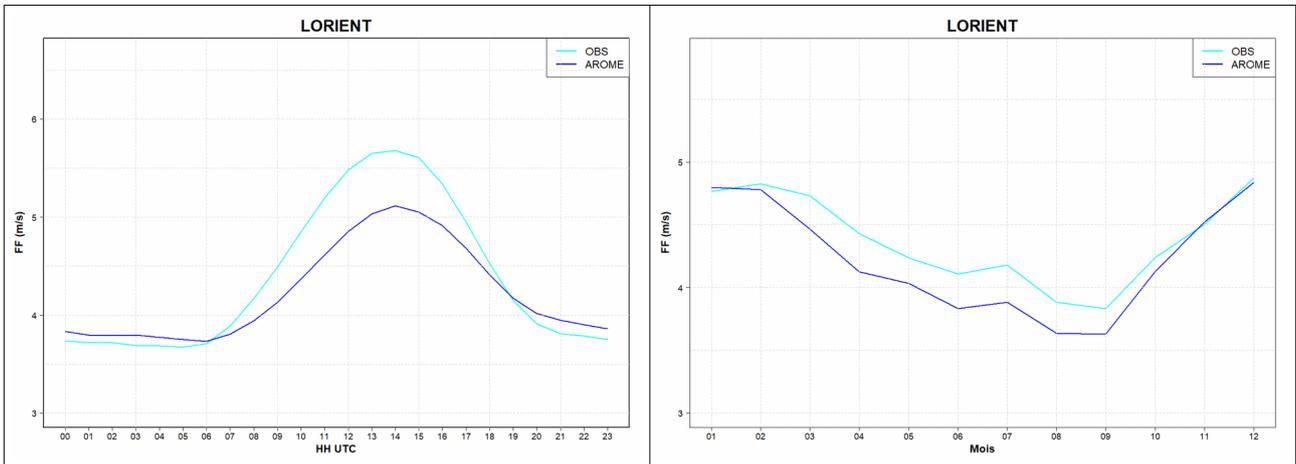


Illustration 4.19 : Forces moyennes des vents horaires en m/s du point d'observation et du point AROME 10 m par heure UTC sur le graphique gauche et par mois sur le graphique droit de 2000 à 2020 (seuil plafond des forces : 25 m/s)

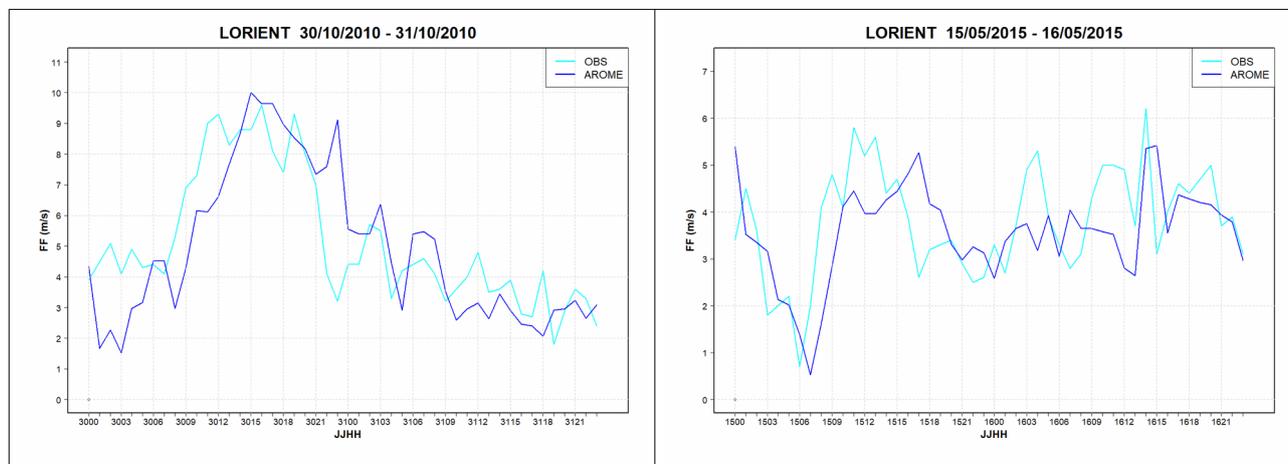


Illustration 4.20 : Forces horaires en m/s du point d'observation et du point AROME 10 m sur les périodes du 30 octobre 2010 à 00 h UTC au 31 octobre 2010 à 23 h UTC (graphique gauche) et du 15 mai 2015 à 00 h UTC au 16 mai 2015 à 23 h UTC (graphique droit)

	<b>Début des mesures</b>	<b>Données absentes</b>	<b>Moyenne des forces</b>	<b>Q25</b>	<b>Q75</b>	<b>Maximum des forces</b>
<b>Point d'observation</b>	2000	0.1 %	4.4 m/s	2.5 m/s	6.0 m/s	21.2 m/s
<b>Point AROME 10 m</b>	2000	0.1 %	4.2 m/s	2.5 m/s	5.5 m/s	20.0 m/s

Tableau 4.3 : Statistiques de distribution des 2 séries de données pour Lorient

### Conclusion :

Le modèle AROME sous-estime un peu les forces du vent, notamment en période diurne et pour le biais mensuel, de mars à octobre ; mais la corrélation entre la série observée et celle de ce modèle est très bonne.

## 4.1.4 Brittany

Le point d'observation Brittany (station 62 163) est une bouée ancrée gérée par le UK MetOffice en coopération avec Météo-France. Elle fait partie du réseau de l'OMM et elle est destinée à mesurer les paramètres atmosphériques et la hauteur des vagues. Ses coordonnées géographiques sont 47,550° N / -8,470° E. L'anémomètre se situe à 3 m au-dessus du niveau de la mer.



Illustration 4.21 : Exemple de bouée ancrée du réseau OMM

Les coordonnées de ce point correspondent à celles d'un point de grille du modèle AROME.

La série de données de ce poste utilisées pour l'étude ne sont disponibles qu'à partir de 2018.

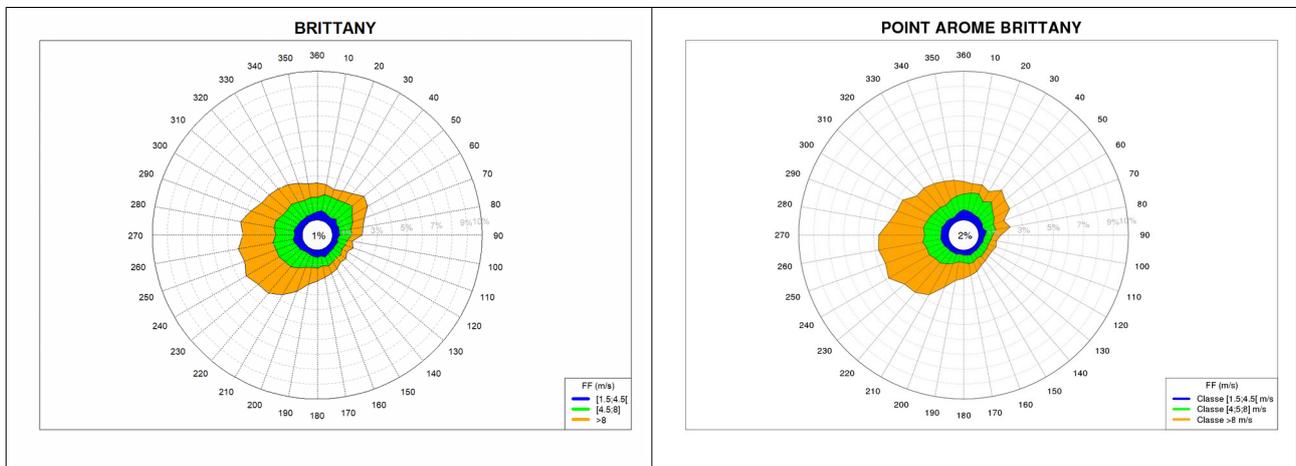


Illustration 4.22 : Roses annuelles des vents horaires du point d'observation (à gauche) et du point AROME 10 m (à droite) sur la période 2018-2020

Le pourcentage de vents ayant une force supérieure ou égale à 4,5 m/s s'élève à 81,3 % pour le point de mesure de Brittany et 82,0 % pour le point AROME.

Les directions dominantes sont ouest-sud-ouest et le nord-est.

## 4 Climatologie fine du vent



Illustration 4.23 : Roses saisonnières des vents horaires du point d'observation (à gauche) et du point AROME (à droite) sur la période 2018-2020

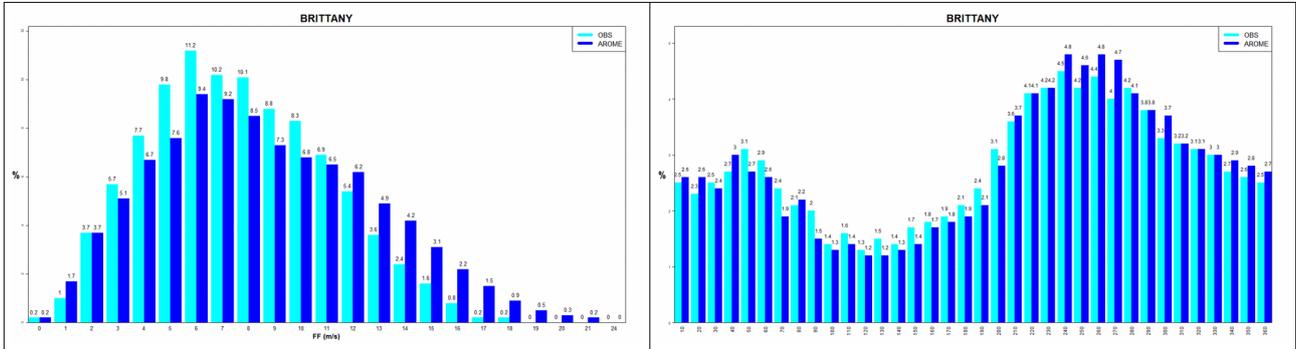


Illustration 4.24 : Comparaison des forces de vent (fréquences par m/s) à gauche et des directions (fréquences par secteur) à droite du point d'observation et du point AROME 10 m sur la période 2018-2020

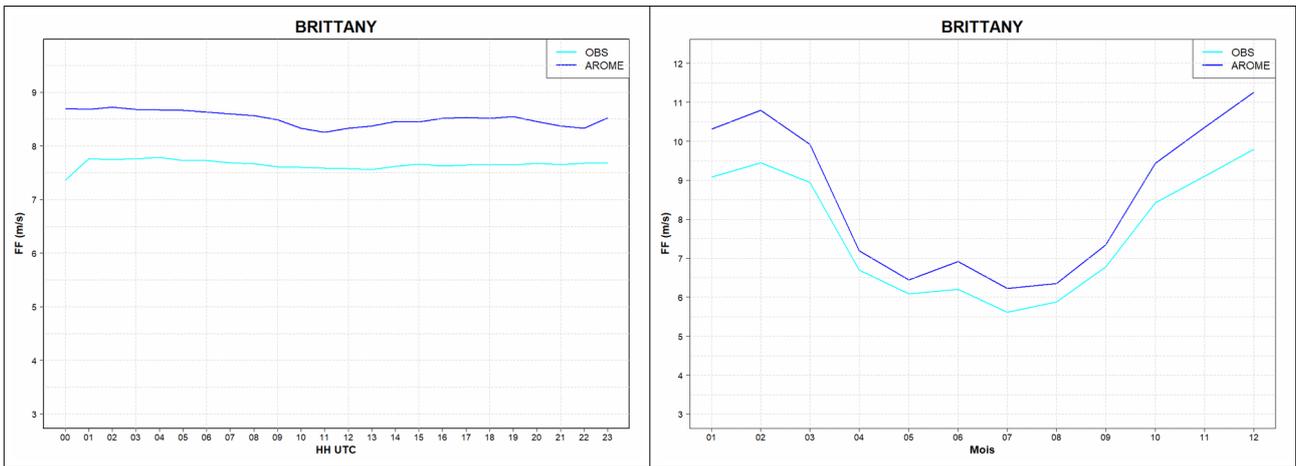


Illustration 4.25 : Forces moyennes des vents horaires en m/s du point d'observation et du point AROME 10 m par heure UTC sur le graphique gauche et par mois sur le graphique droit de 2018 à 2020 (seuil plafond des forces : 25 m/s)

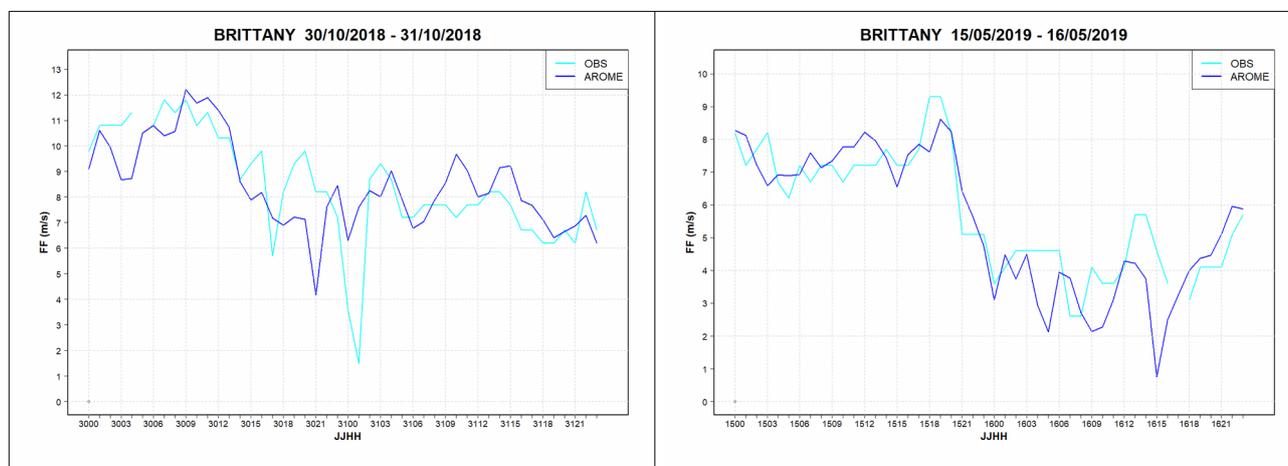


Illustration 4.26 : Forces horaires en m/s du point d'observation et du point AROME 10 m sur les périodes du 30 octobre 2018 à 00 h UTC au 31 octobre 2018 à 23 h UTC (graphique gauche) et du 15 mai 2019 à 00 h UTC au 16 mai 2019 à 23 h UTC (graphique droit)

	<b>Début des mesures</b>	<b>Données absentes</b>	<b>Moyenne des forces</b>	<b>Q25</b>	<b>Q75</b>	<b>Maximum des forces</b>
<b>Point d'observation</b>	2018	2.2 %	7.7 m/s	5.1 m/s	10.3 m/s	24.2 m/s
<b>Point AROME 10 m</b>	2018	3.3 %	8.5 m/s	5.4 m/s	11.5 m/s	26.3 m/s

Tableau 4.4 : Statistiques de distribution des 2 séries de données pour Brittany

### Conclusion :

On note une sur-estimation des forces du modèle AROME avec un biais mensuel plus marqué d'octobre à mars. Le biais du cycle horaire varie peu. À noter toutefois que la hauteur des valeurs de vent au-dessus de la mer diffère légèrement entre la bouée (3 m) et le modèle (10 m), ce qui peut expliquer ce biais.

**Les résultats de cette étude comparative restent tout à fait corrects et permettent une validation du modèle AROME au niveau 10 m.**

## 4.2 Vents modélisés sur la zone

Les cartes de roses de vent annuelles et saisonnières issues du modèle AROME vont être présentées pour les niveaux 10, 100, 160 et 250 m sur la zone maritime étudiée sur la période de 2000-2020 ainsi qu'une carte de forces du vent moyen sur la période 2000-2019.

Les classes de vent retenues (pour des forces en mètres/seconde) sont :

- pour le niveau 10 m :

 [1.5;4.5[  [4.5;8]  >8

*Illustration 4.27 : Classes des vents pour le niveau 10 m*

- pour les autres niveaux :

 [3.5;8[  [8;13]  >13

*Illustration 4.28 : Classes des vents pour les autres niveaux*

### 4.2.1 Vents modélisés au niveau 10 m

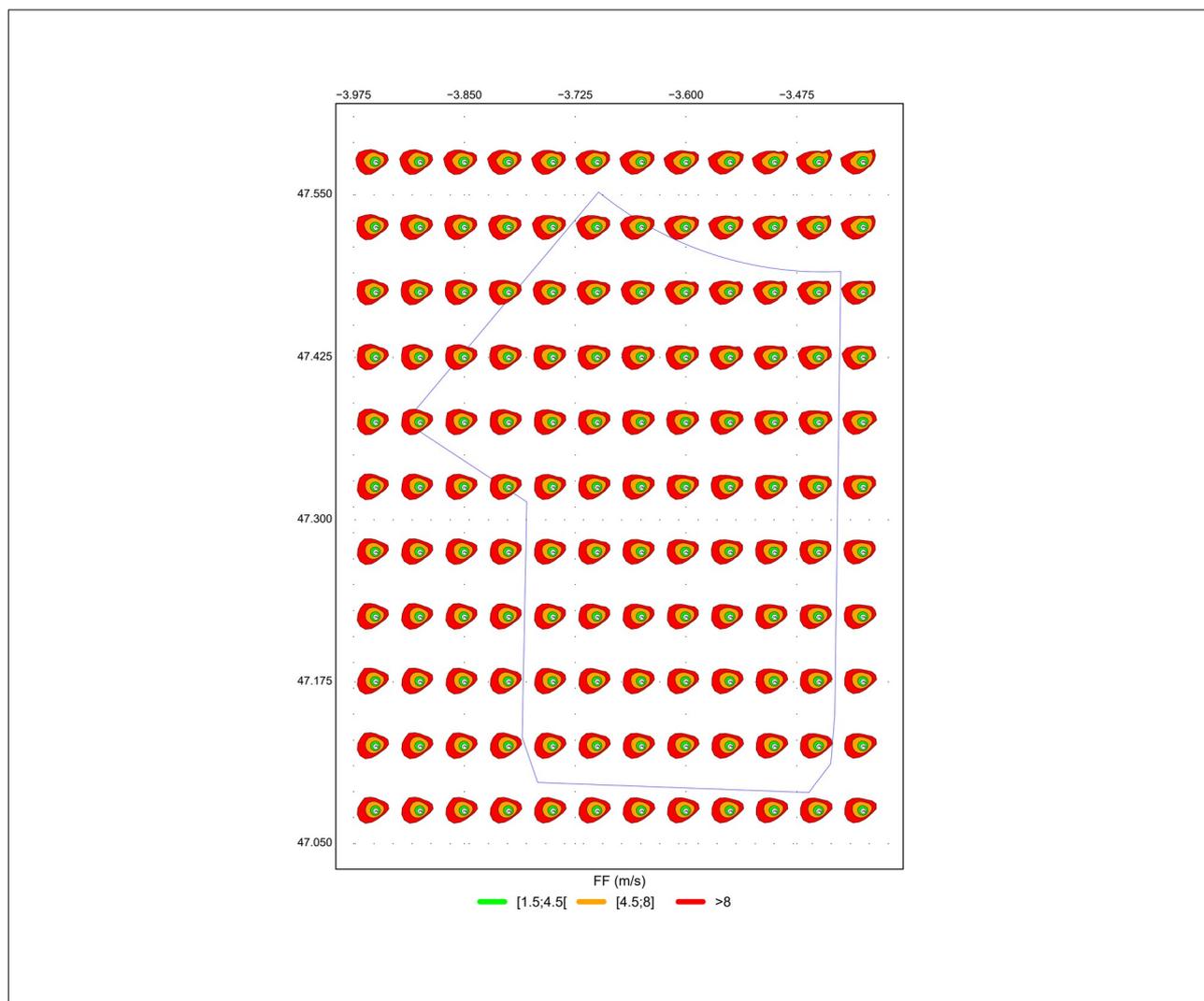
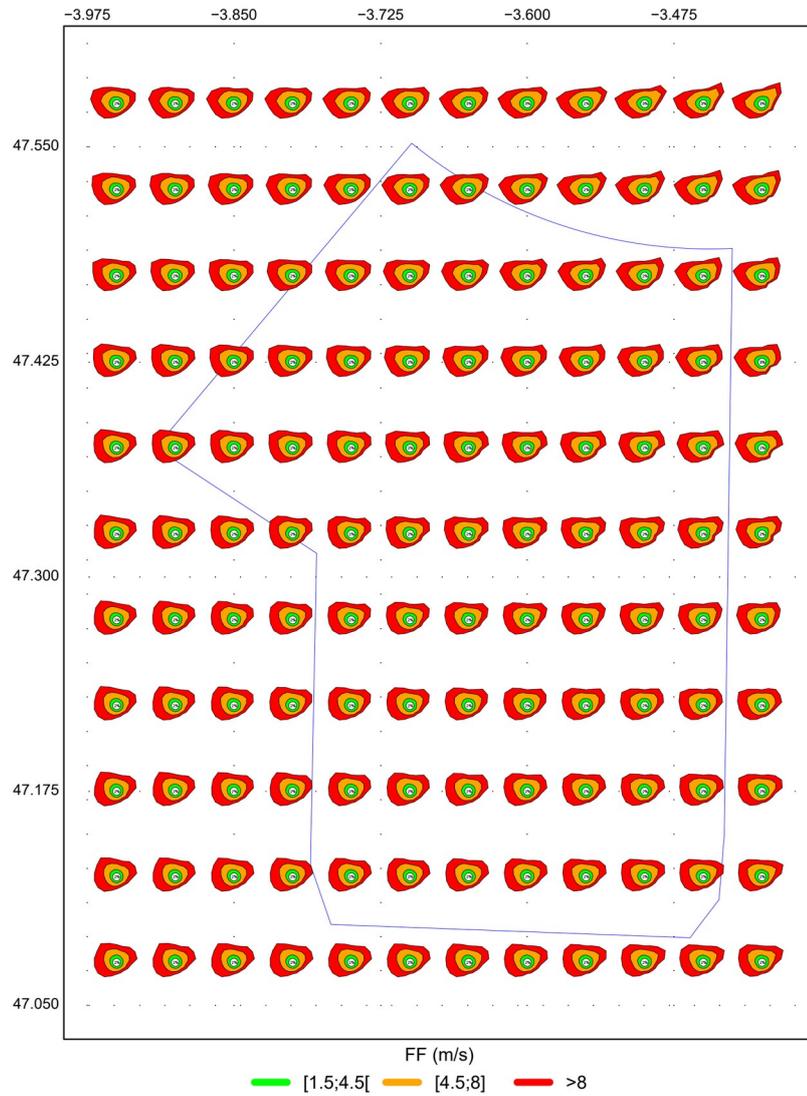


Illustration 4.29 : Roses annuelles simulées au niveau 10 m sur la zone de Bretagne (2000-2020)

Sur la zone, les roses de vent sont assez homogènes en force ; le vent a pour direction dominante un large secteur sud-ouest. À noter le léger impact des effets côtiers au nord-est de la zone.

PRINTEMPS  
2001-2020

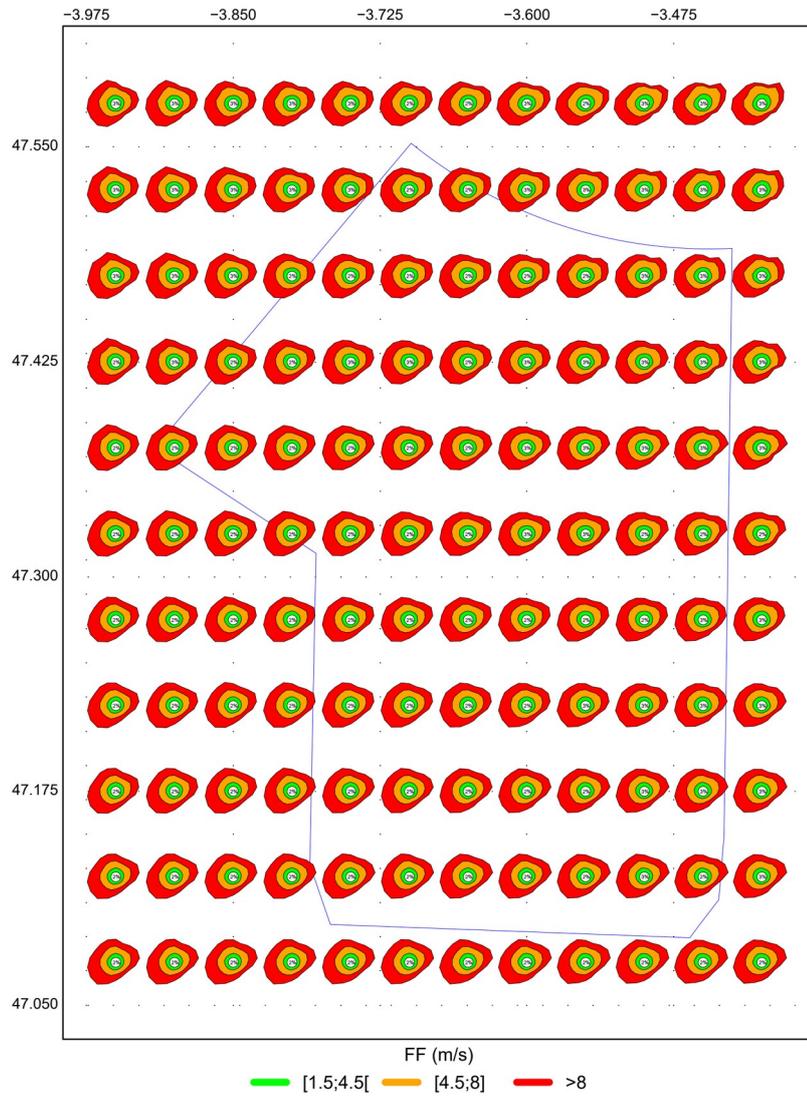




ÉTÉ  
2001-2020



AUTOMNE  
2001-2020



HIVER  
2000-2020

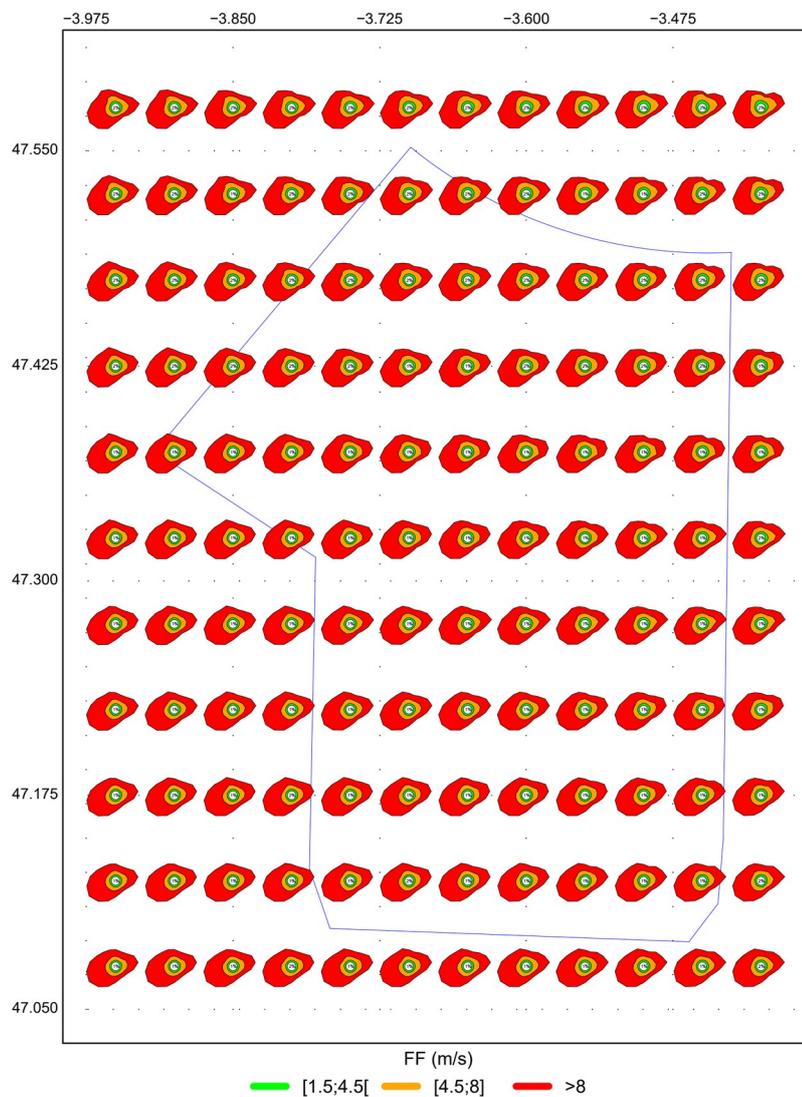


Illustration 4.30 : Roses saisonnières simulées au niveau 10 m sur la zone

Les directions du vent varient selon les saisons avec une dominante :

- ouest à sud-ouest au printemps,
- large secteur ouest en été,
- sud-ouest l'automne et en hiver.

Les vents les plus soutenus se produisent généralement en hiver ; la saison la moins ventée est l'été.

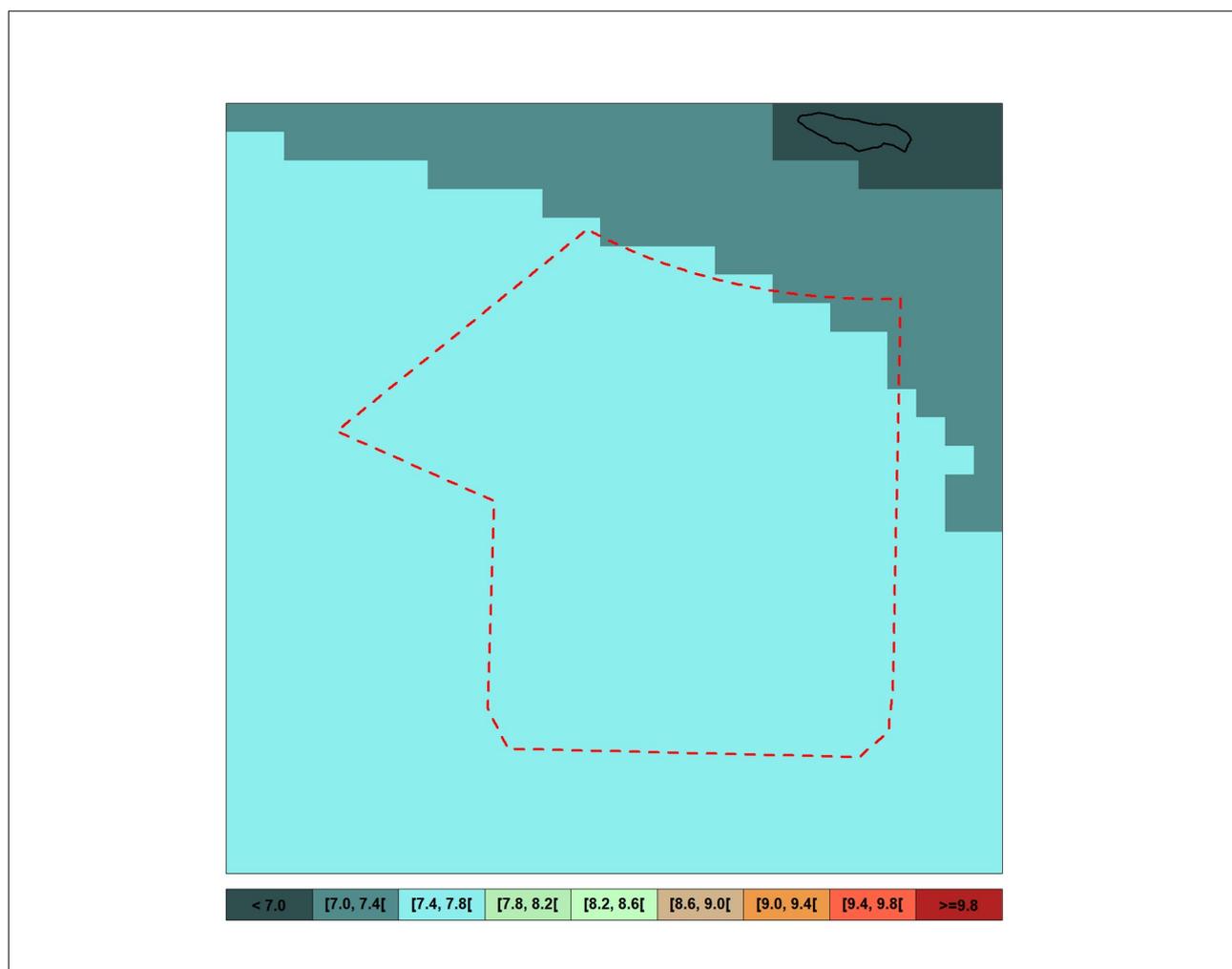


Illustration 4.31 : Forces moyennes du vent sur la zone au niveau 10 m sur la période 2000-2019

Les forces du vent moyennées sur la période 2000-2019 au niveau 10 m sont comprises principalement entre 7,4 et 7,8 m/s. Les valeurs un peu plus faibles au nord-est de la zone peuvent s'expliquer la proximité de Belle-Île (plus de rugosité donc moins de vent).

4.2.2 Vents modélisés au niveau 100 m

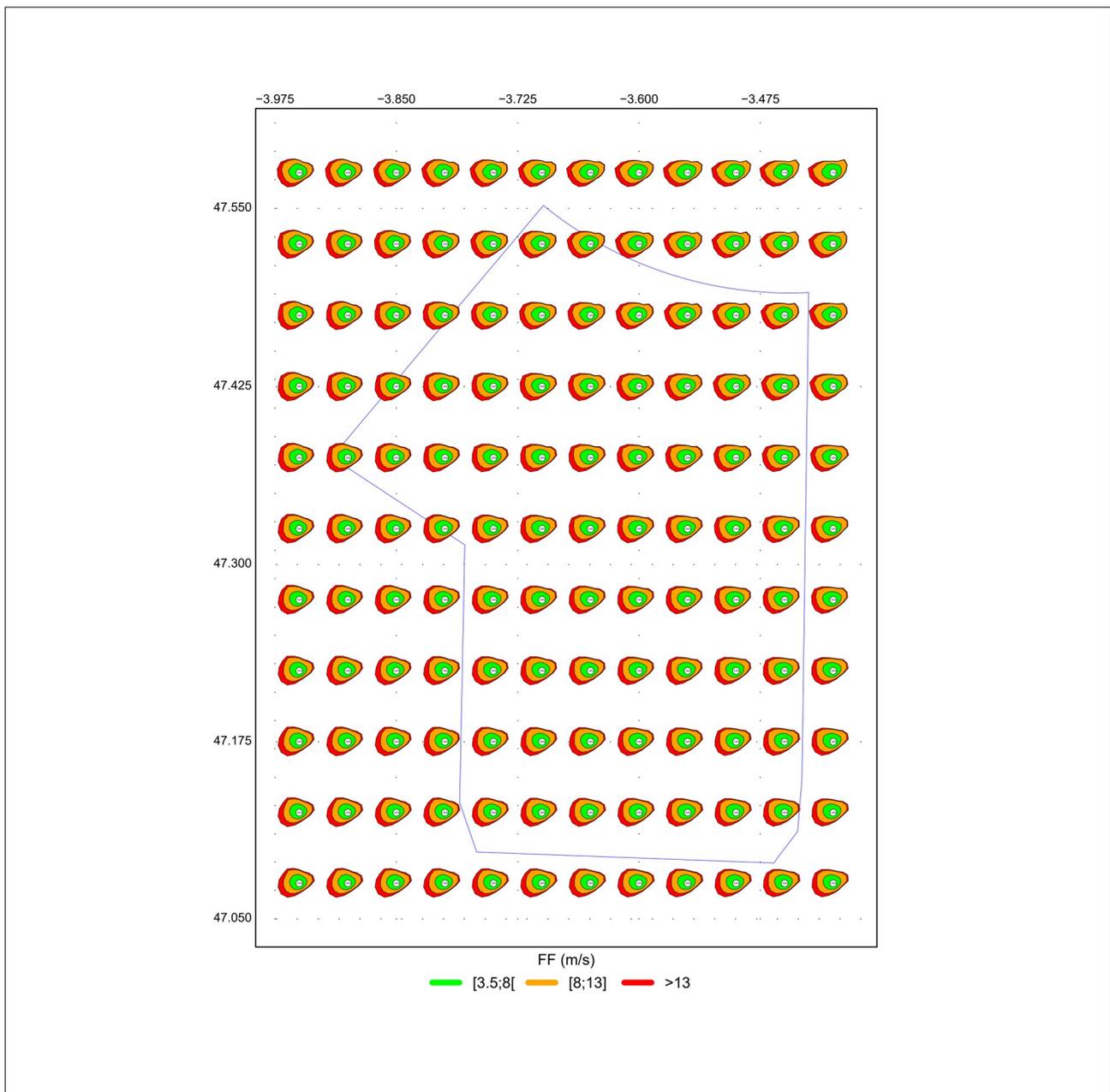
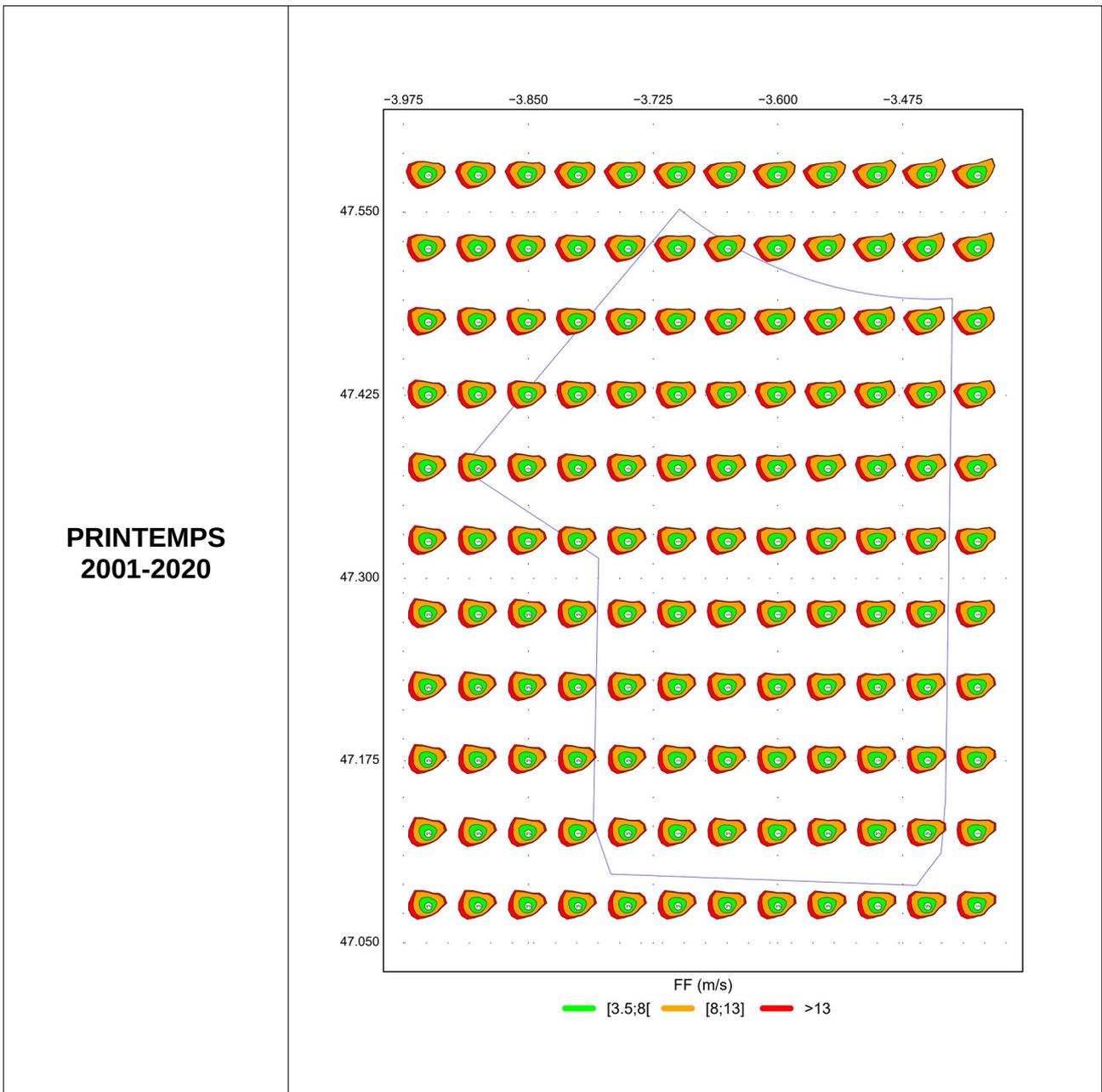
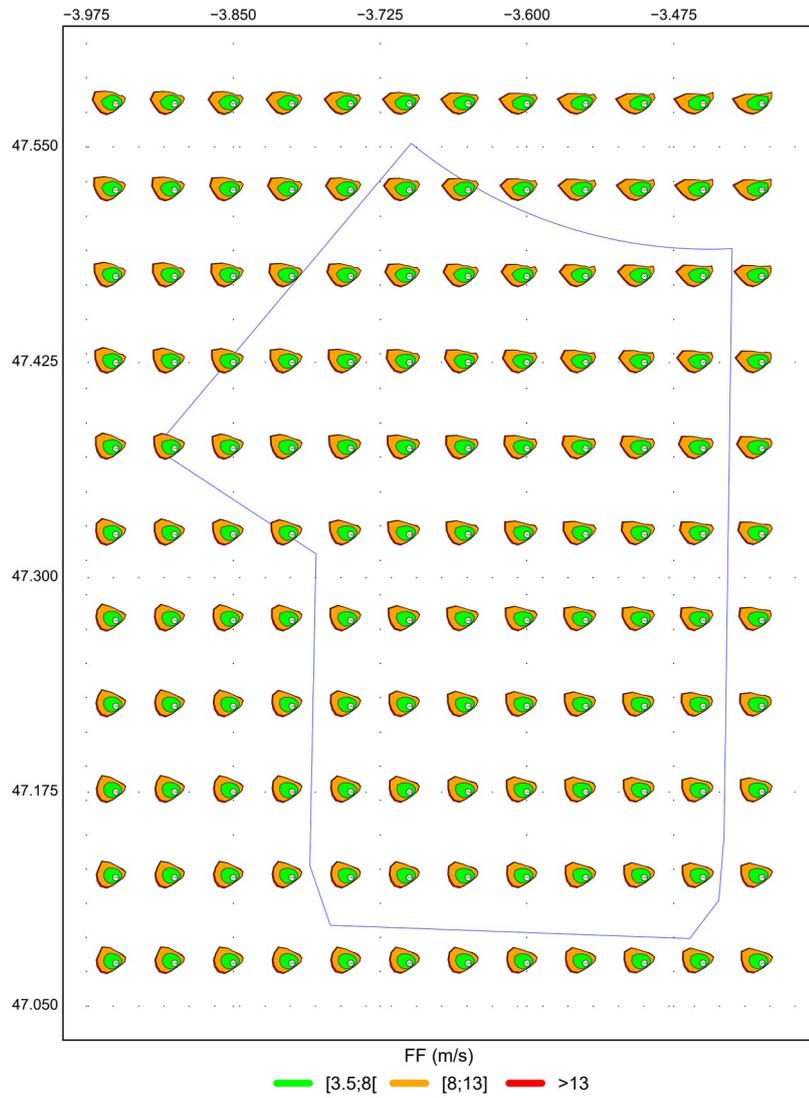


Illustration 4.32 : Roses annuelles simulées au niveau 100 m sur la zone (2000-2020)

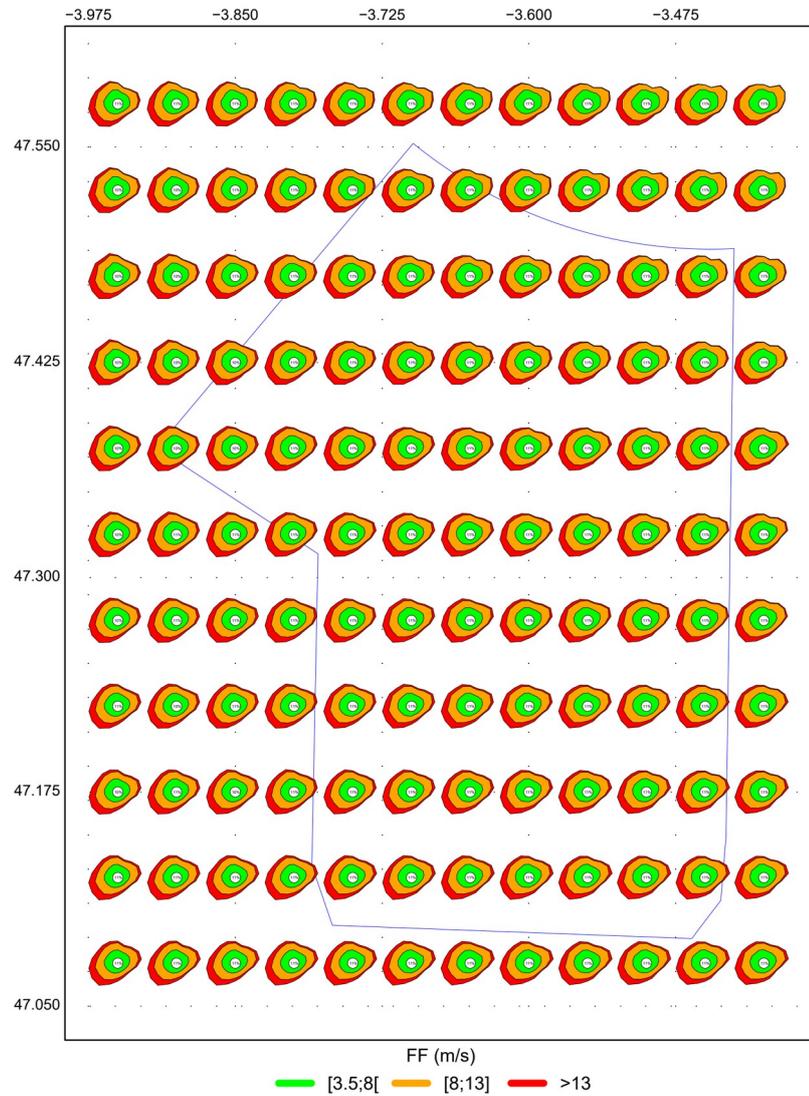
Sur la zone, les roses de vent sont assez homogènes en force ; le vent a pour direction dominante un large secteur ouest dans la partie nord de la zone et sud-ouest ailleurs. À noter le léger impact des effets côtiers au nord-est de la zone.



ÉTÉ  
2001-2020



AUTOMNE  
2001-2020



HIVER  
2000-2020

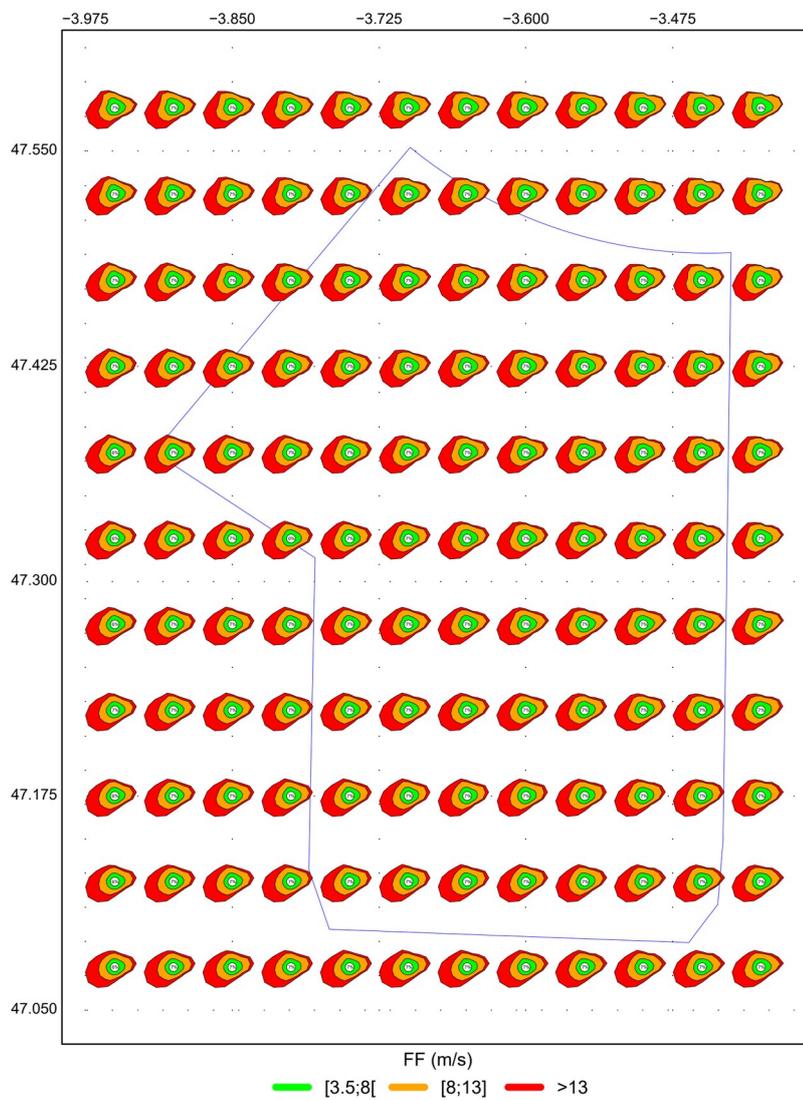


Illustration 4.33 : Roses saisonnières simulées au niveau 100 m sur la zone

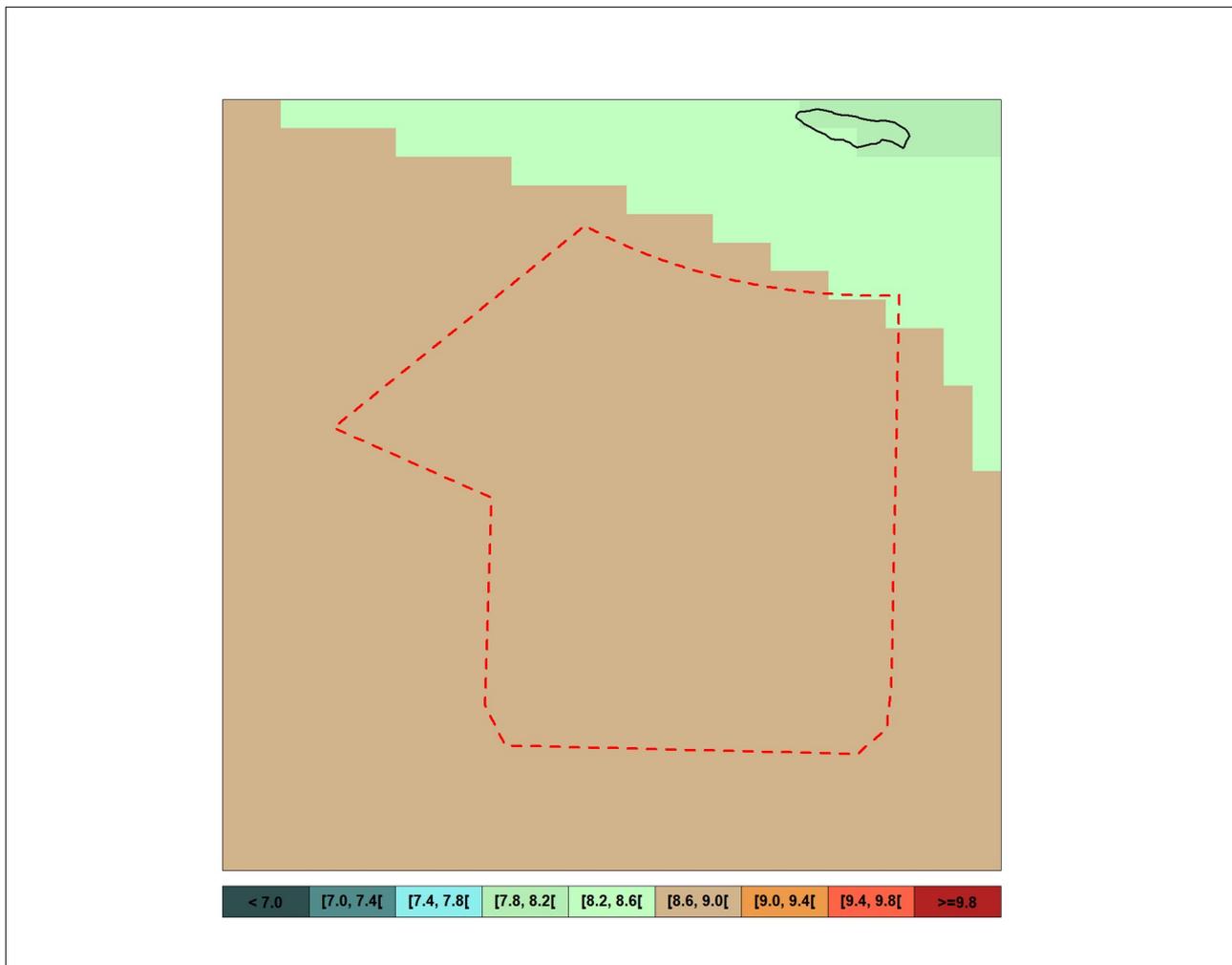


Illustration 4.34 : Forces moyennes du vent sur la zone de Bretagne Sud au niveau 100 m sur la période 2000-2019

Les forces du vent moyennées sur la période 2000-2019 au niveau 100 m sont comprises entre 8,6 et 9,0 m/s.

4.2.3 Vents modélisés au niveau 160 m

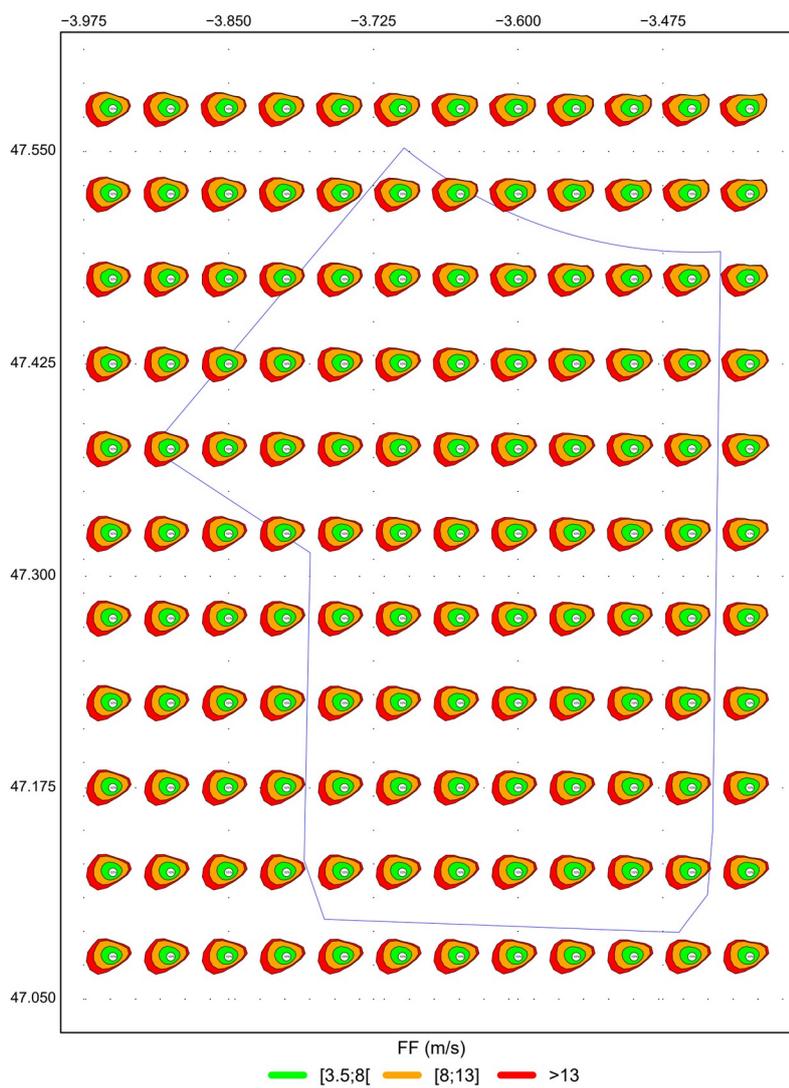
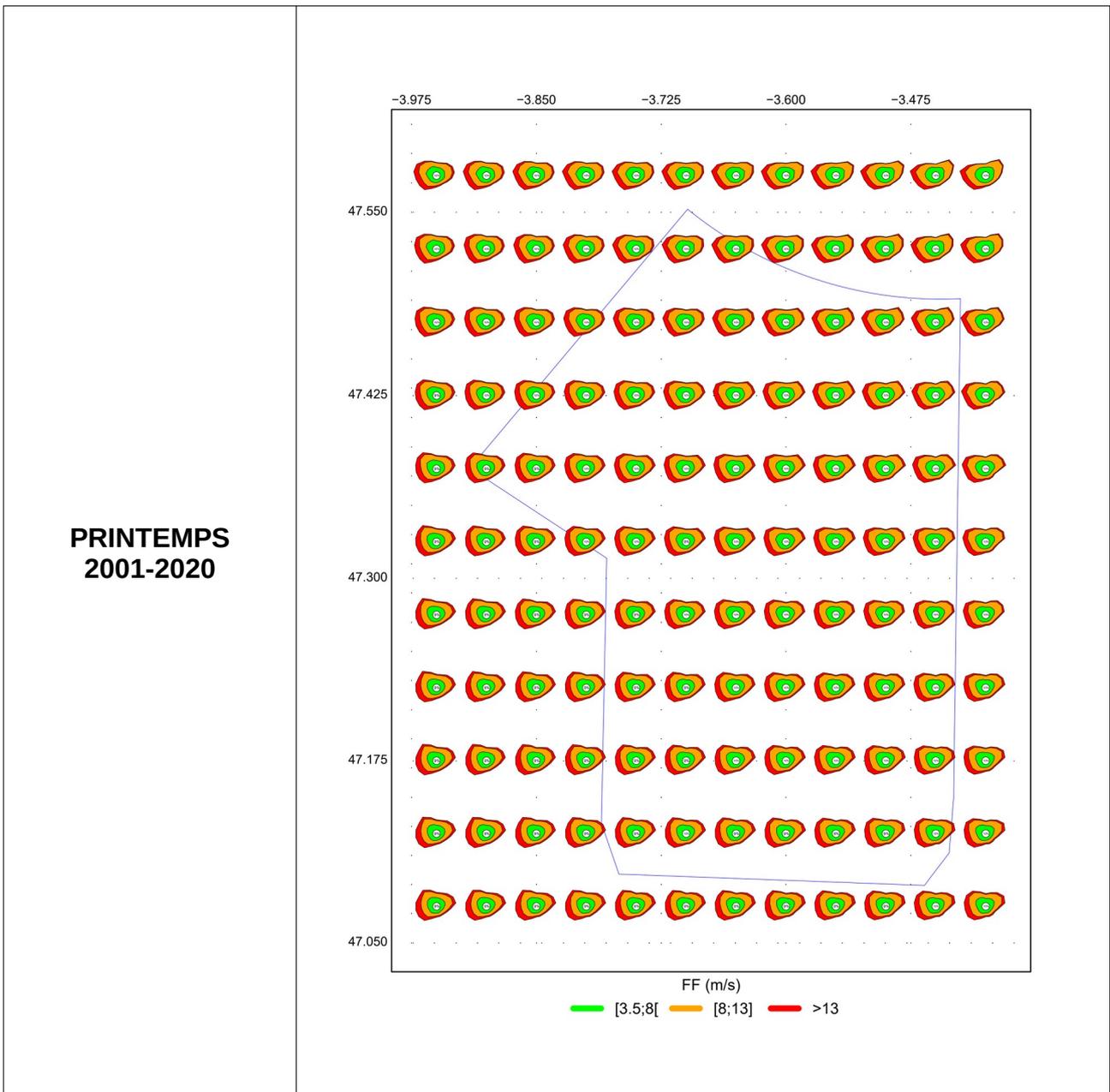


Illustration 4.35 : Roses annuelles simulées au niveau 160 m sur la zone (2000-2020)

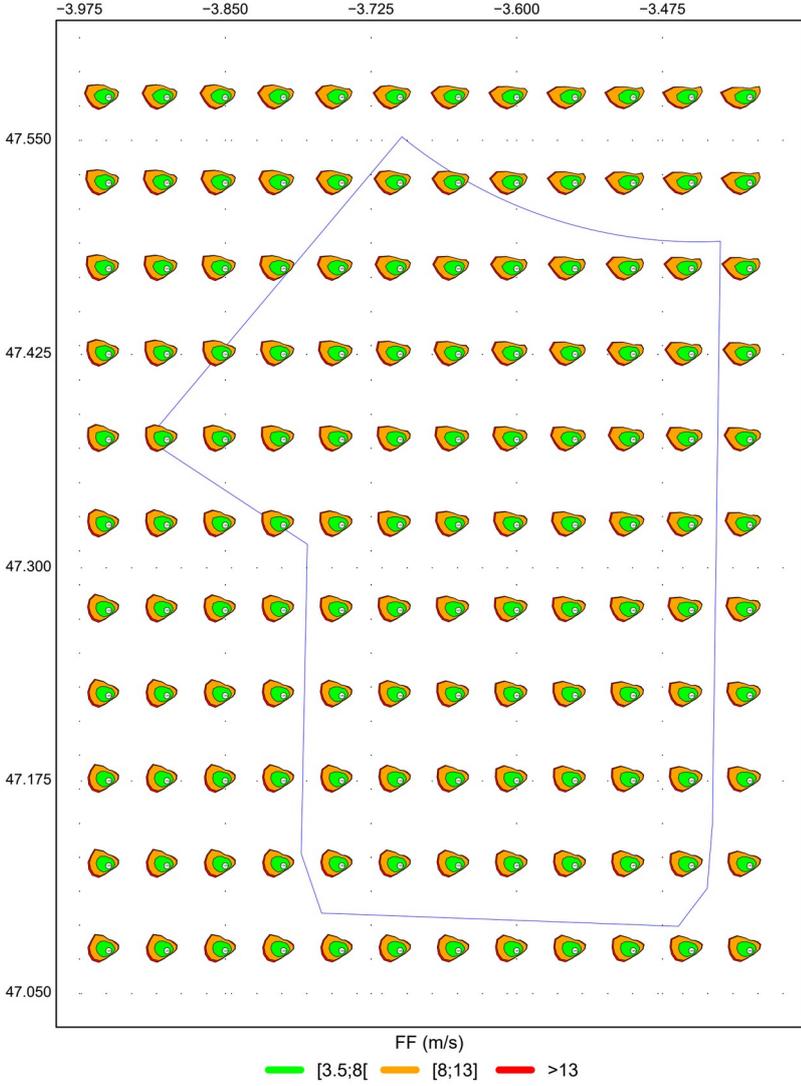
Comme pour les autres niveaux, les roses de vent sur la zone sont assez homogènes en force avec, en direction dominante un large secteur ouest dans la partie nord de la zone et sud-ouest ailleurs. À noter le léger impact des effets côtiers au nord-est de la zone.



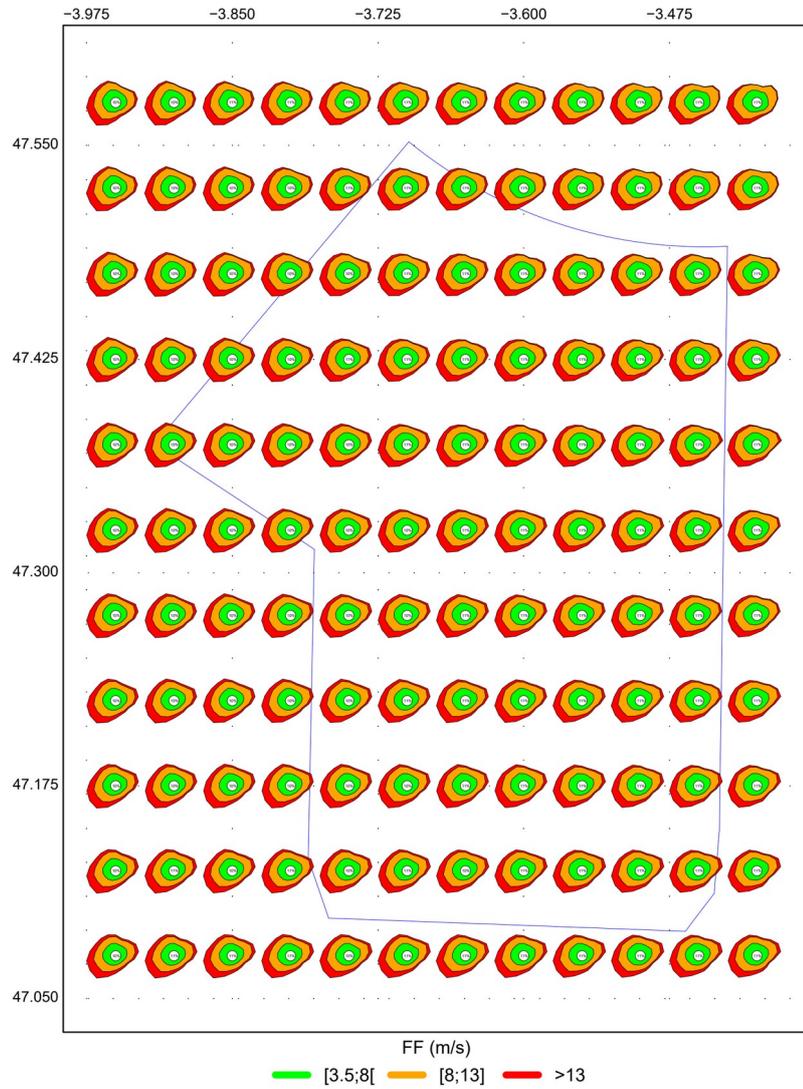
4 Climatologie fine du vent



ÉTÉ  
2001-2020



AUTOMNE  
2001-2020



HIVER  
2000-2020

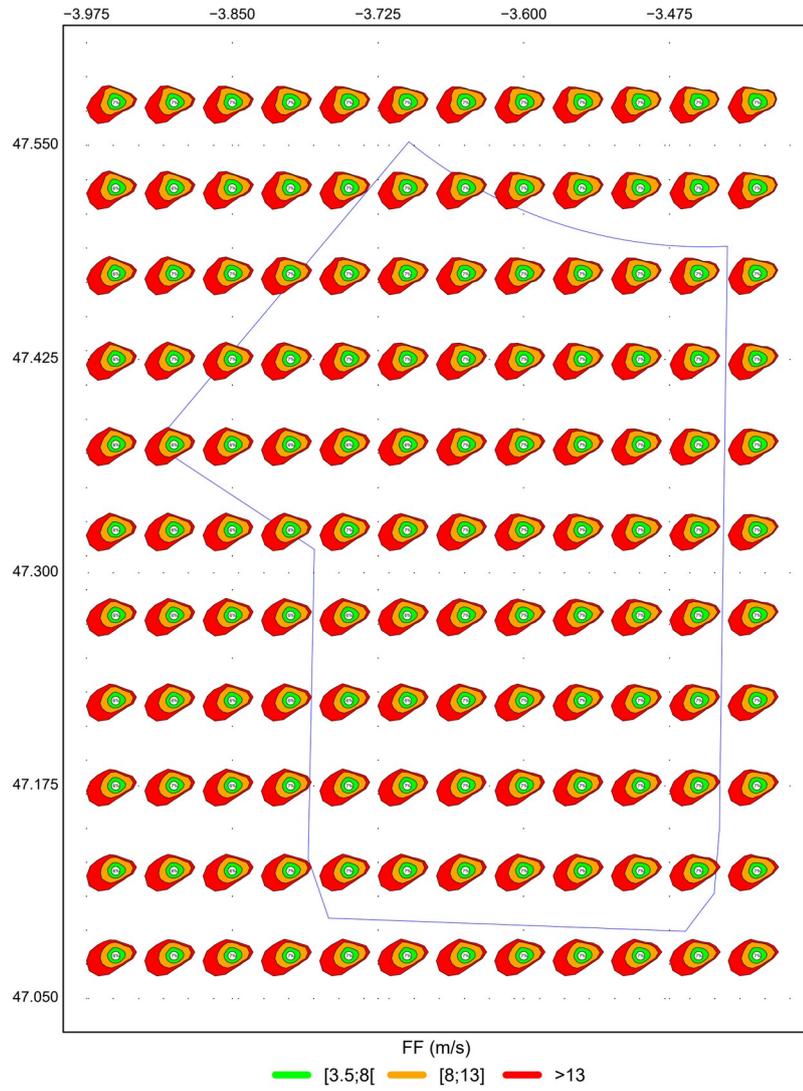


Illustration 4.36 : Roses saisonnières simulées au niveau 160 m sur la zone

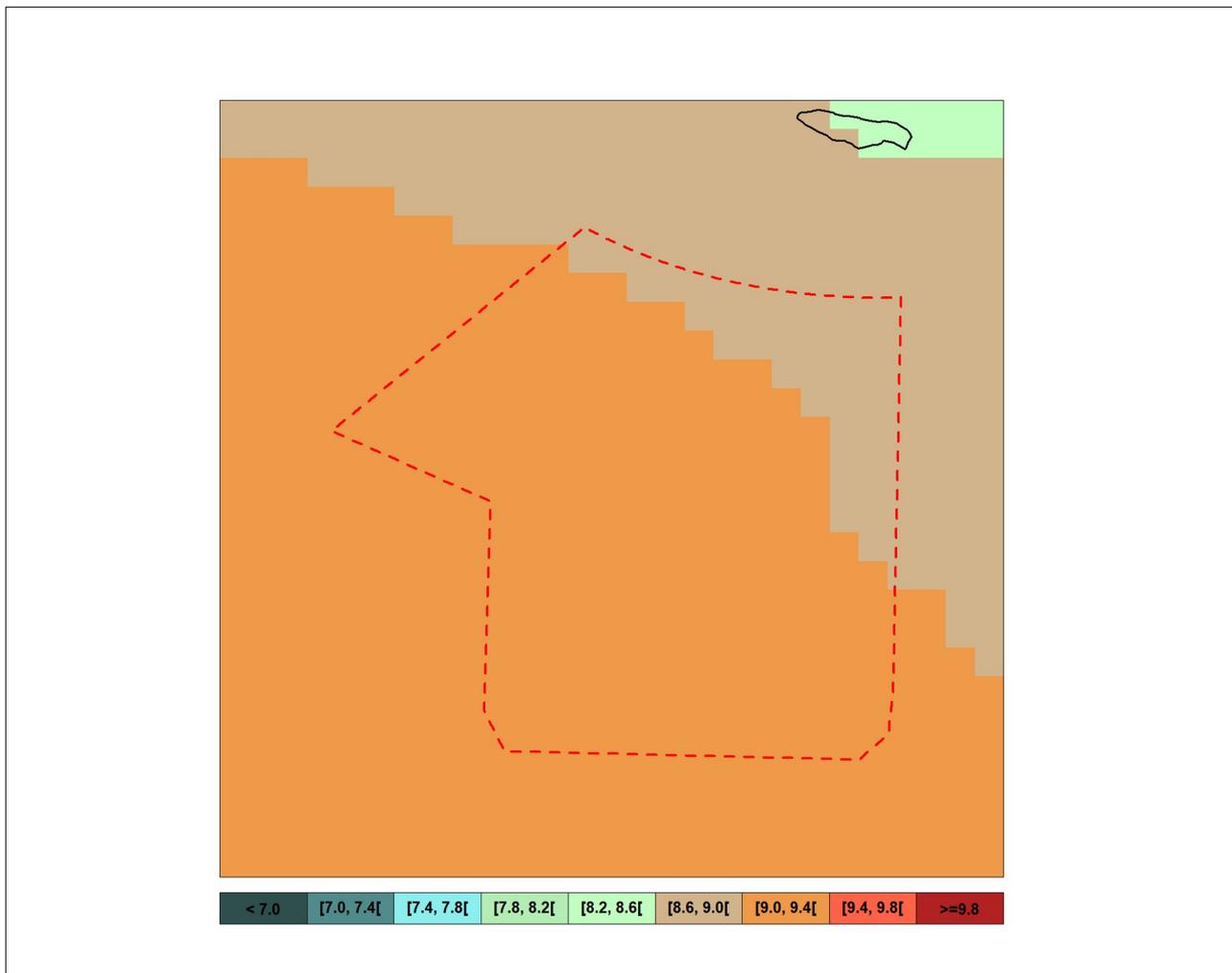


Illustration 4.37 : Forces moyennes du vent sur la zone au niveau 160 m sur la période 2000-2019

Les forces du vent moyennées sur la période 2000-2019 au niveau 160 m sont comprises entre 8,6 et 9,0 m/s sur la partie nord-est de la zone et entre 9,0 et 9,4 m/s ailleurs.

4.2.4 Vents modélisés au niveau 250 m

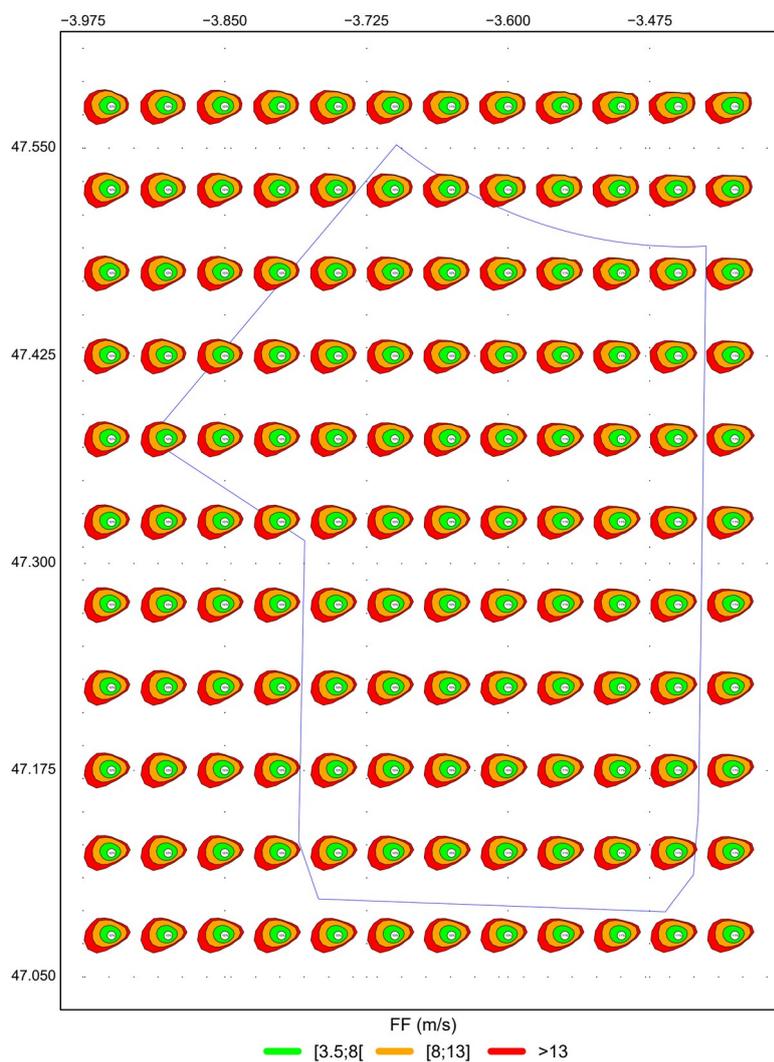
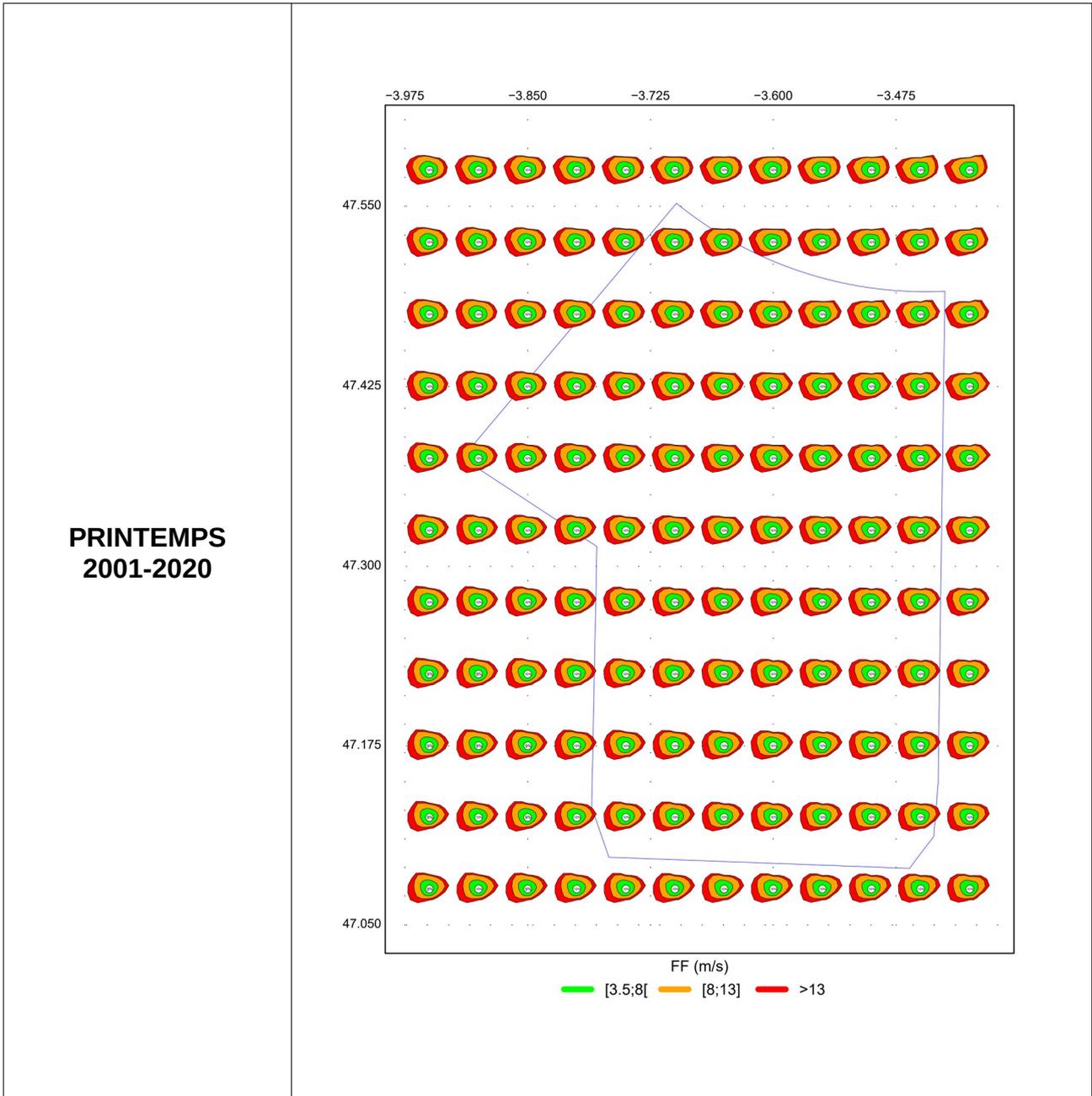


Illustration 4.38 : Roses annuelles simulées au niveau 250 m sur la zone (2000-2020)

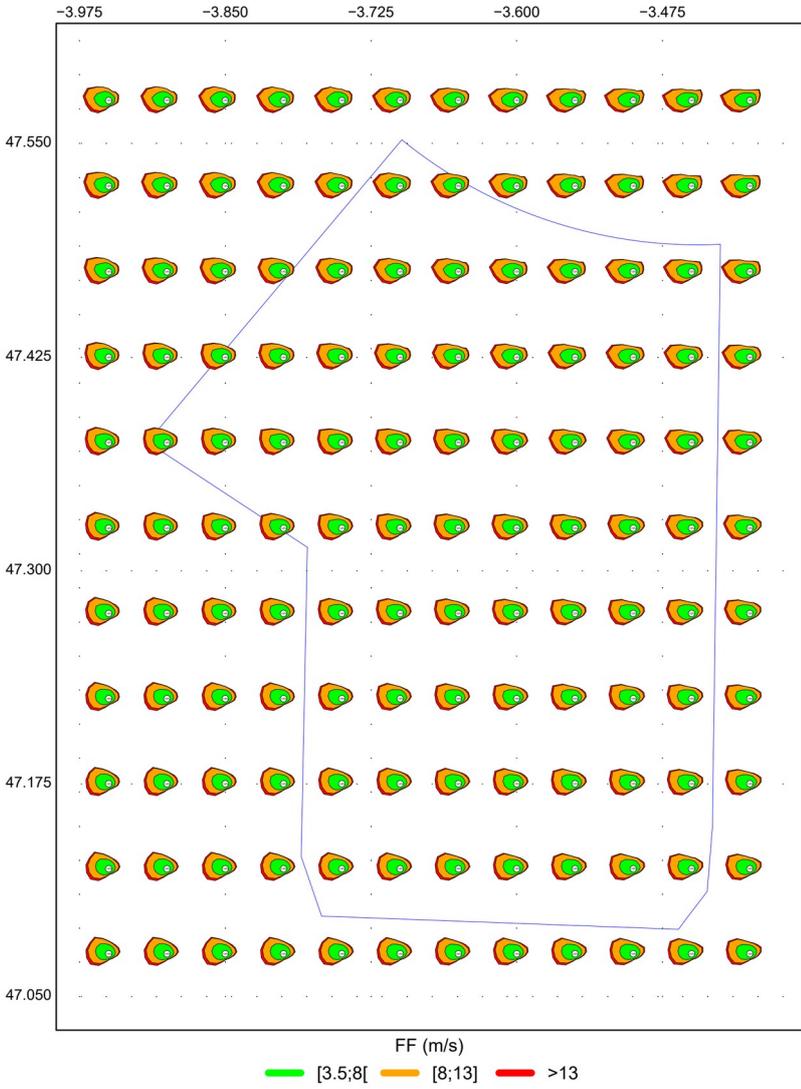
Les roses de vent restent assez homogènes en force sur la zone avec des vents de direction dominante ouest à sud-ouest. À noter la persistance du léger impact des effets côtiers au nord-est de la zone.



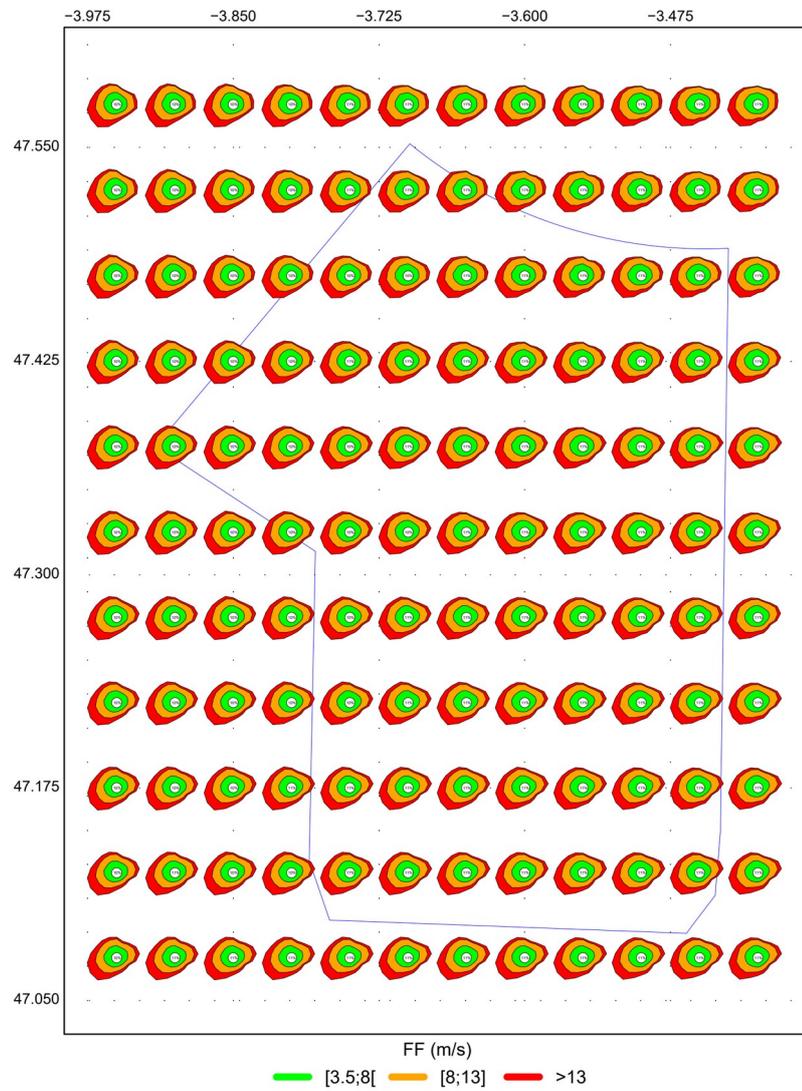
4 Climatologie fine du vent



ÉTÉ  
2001-2020



AUTOMNE  
2001-2020



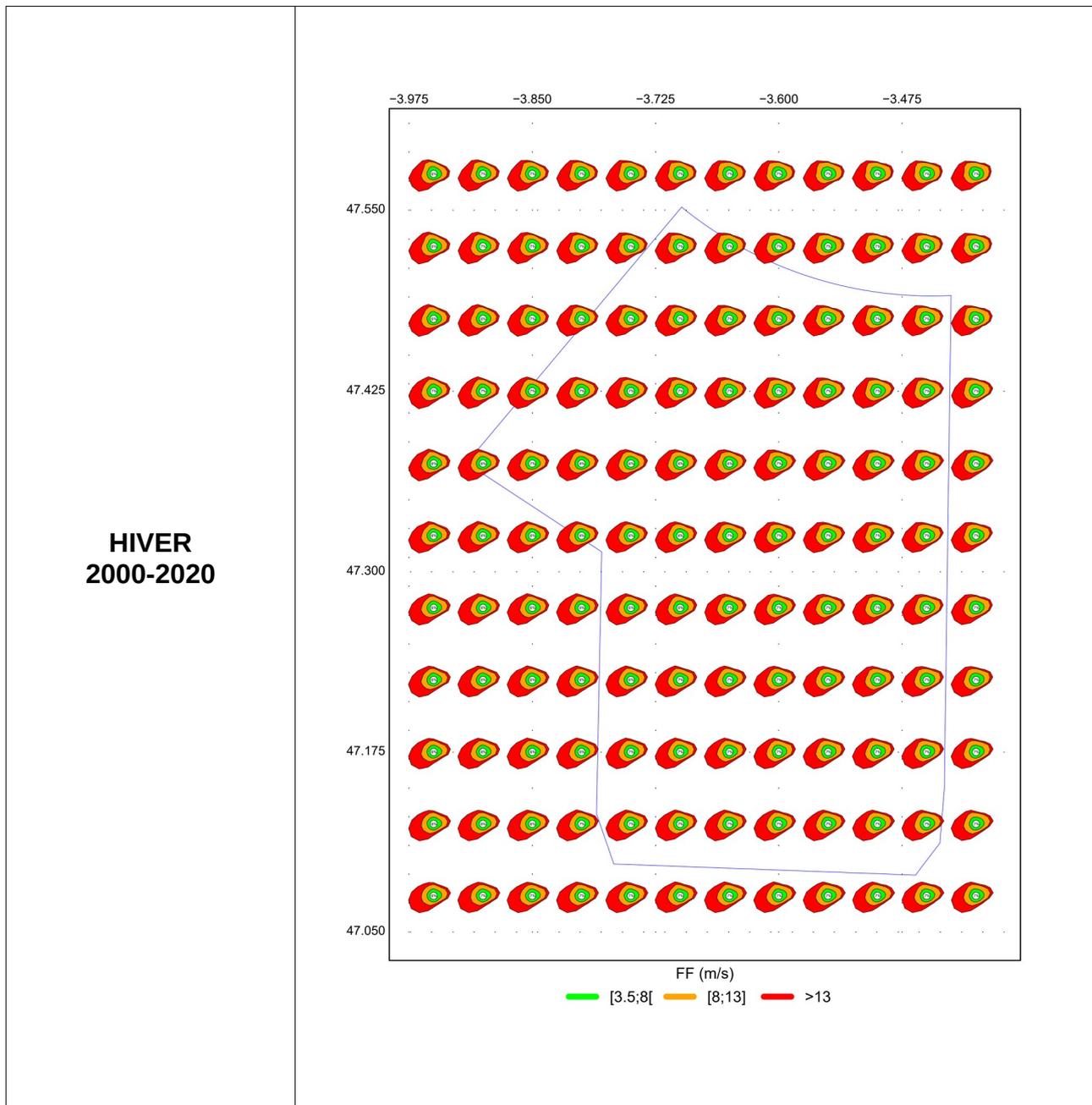


Illustration 4.39 : Roses saisonnières simulées au niveau 250 m sur la zone

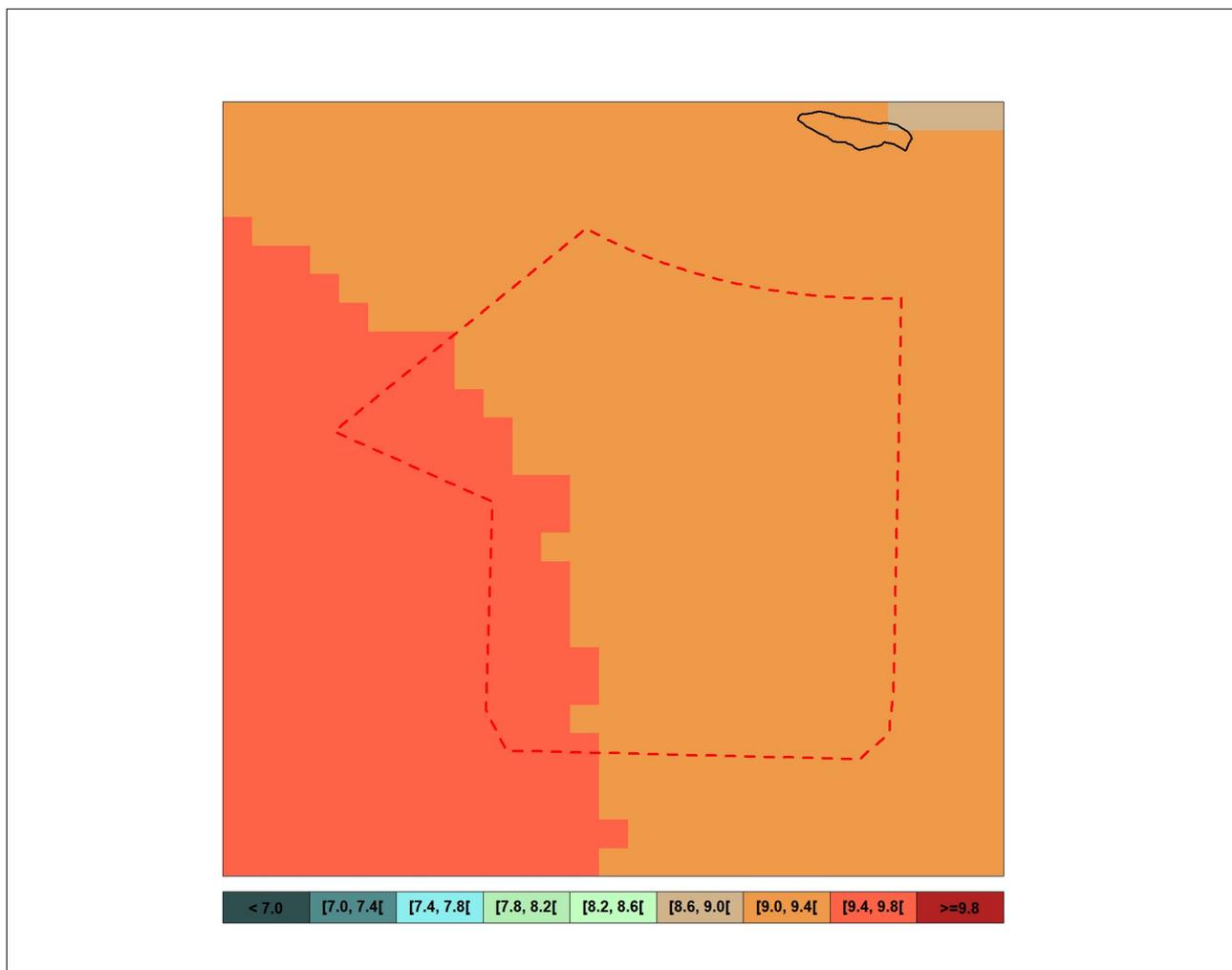


Illustration 4.40 : Forces moyennes du vent sur la zone au niveau 250 m sur la période 2000-2019

Les forces du vent moyennées sur la période 2000-2019 au niveau 250 m sont comprises entre 9,4 et 9,8 m/s sur la partie ouest de la zone et entre 9,0 et 9,4 m/s ailleurs.

### Conclusion :

Quel que soit le niveau considéré, les roses de vent annuelles sont assez homogènes en force; la direction dominante de roses est un secteur ouest à sud-ouest.

Les directions dominantes varient selon les saisons :

- ouest à sud-ouest au printemps,

- un large secteur ouest en été,
- sud-ouest l'automne et en hiver.

Les vents les plus soutenus se produisent l'hiver; la saison la moins ventée est l'été.

Sur la zone étudiée, les moyennes des forces du vent moyen modélisé sur la période 2000-2019 sont assez homogènes malgré un secteur au nord-est un peu moins venté; elles varient de 7,0 à 8,0 m/s au niveau 10 m jusqu'à 9,0 à 9,5 m/s au niveau 250 m.

## 5 Estimation du potentiel éolien

Les chiffres présentés ici constituent une première estimation de ce potentiel. Ils sont essentiellement destinés à montrer la variabilité (mensuelle, interannuelle) de la production électrique potentielle. L'estimation du potentiel est complétée par la campagne in situ et son analyse (lots 4 et 5) et pourra évidemment faire l'objet d'investigations ultérieures des porteurs de projet .

### 5.1 Méthode du facteur de charge

Les données de vent issues du modèle AROME, reconstituées à plusieurs hauteurs, permettent de faire une première estimation du potentiel éolien des zones considérées au large des côtes normandes.

Notre estimation est basée sur l'utilisation d'une courbe de puissance d'une éolienne qui permet d'obtenir un facteur de charge (pourcentage de puissance utilisable) à partir de vitesses de vent.

Cette courbe est issue d'un document publique disponible à partir du site :

[http://www.leanwind.eu/wp-content/uploads/LEANWIND-8-MW-turbine\\_Summary.pdf](http://www.leanwind.eu/wp-content/uploads/LEANWIND-8-MW-turbine_Summary.pdf)

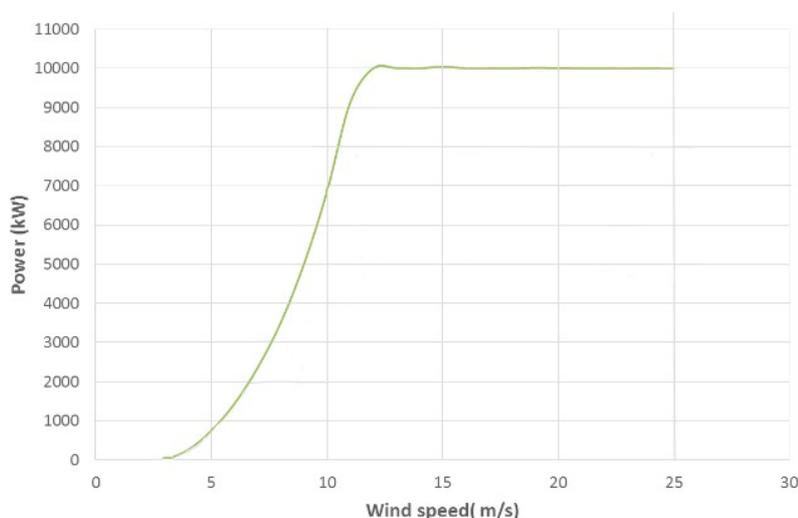


Illustration 5.1 : Courbe de puissance d'une éolienne pour 10 MW installés en fonction de la vitesse du vent en m/s

Cette production est traduite en facteur de charge, rapport en pourcentage entre le potentiel déduit de la courbe précédente en fonction de la vitesse du vent et le potentiel maximal.

Pour estimer la production potentielle des éoliennes, nous avons utilisé la courbe affichée ci-dessus mais les éoliennes qui seront installées sur la zone seront probablement un peu différentes et optimisées pour fonctionner sur des zones bien ventées.

L'analyse statistique de potentiel éolien qui suit doit donc être interprétée avec prudence.

## 5.2 Statistiques de potentiel éolien

Les données utilisées sont les vents moyens horaires du modèle AROME aux points Lidar Nord et Lidar Sud aux niveaux 100 et 140 m.

Les coordonnées géographiques, aux points de grille du modèle AROME, du Lidar Nord sont 47,400° N / -3,575° E, celles du Lidar Sud 47,225° N / -3,500° E.

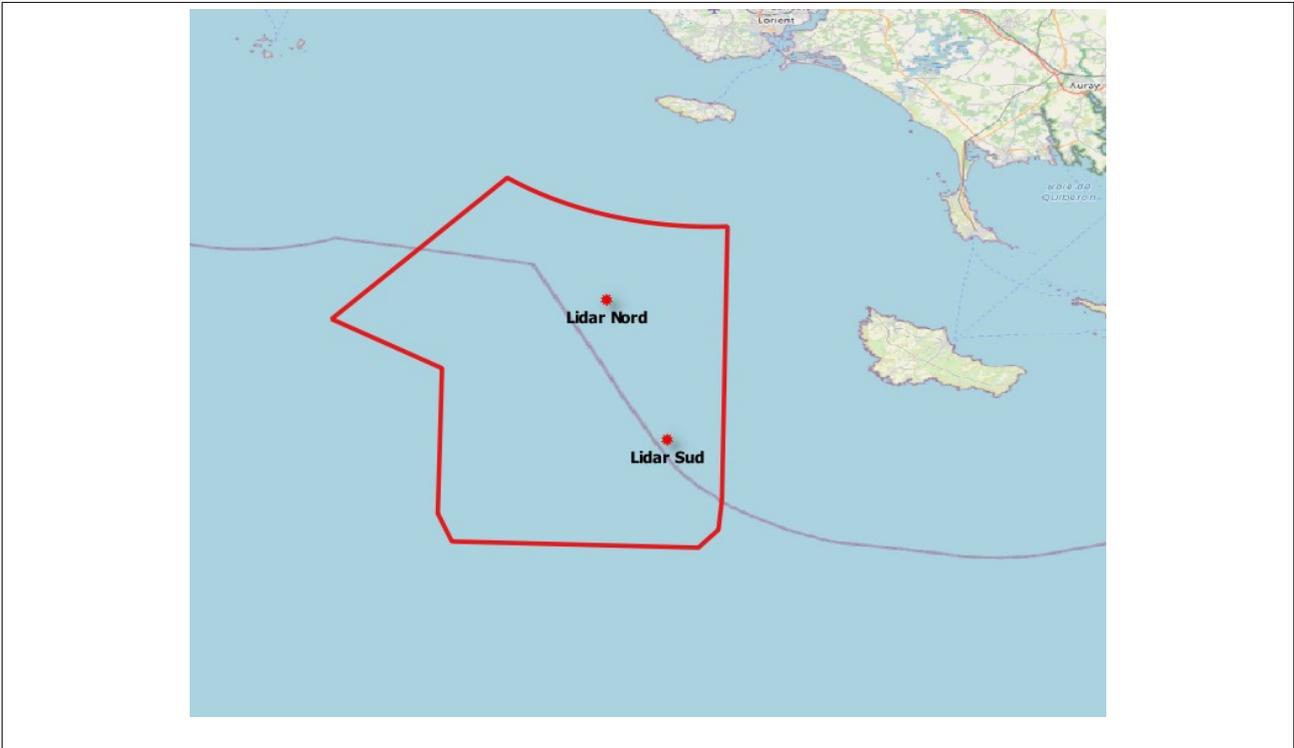


Illustration 5.2 : Localisation des lidars

### 5.2.1 Point AROME Lidar Nord

Sur la période 2000-2020, le facteur de charge moyen de ce point s'élève à 51,5 % pour le niveau 100 m et 52,8 % pour le niveau 140 m.

Pour cette étude statistique, le pourcentage de vitesses manquantes de vent AROME est de 0.13 % pour chaque niveau considéré.

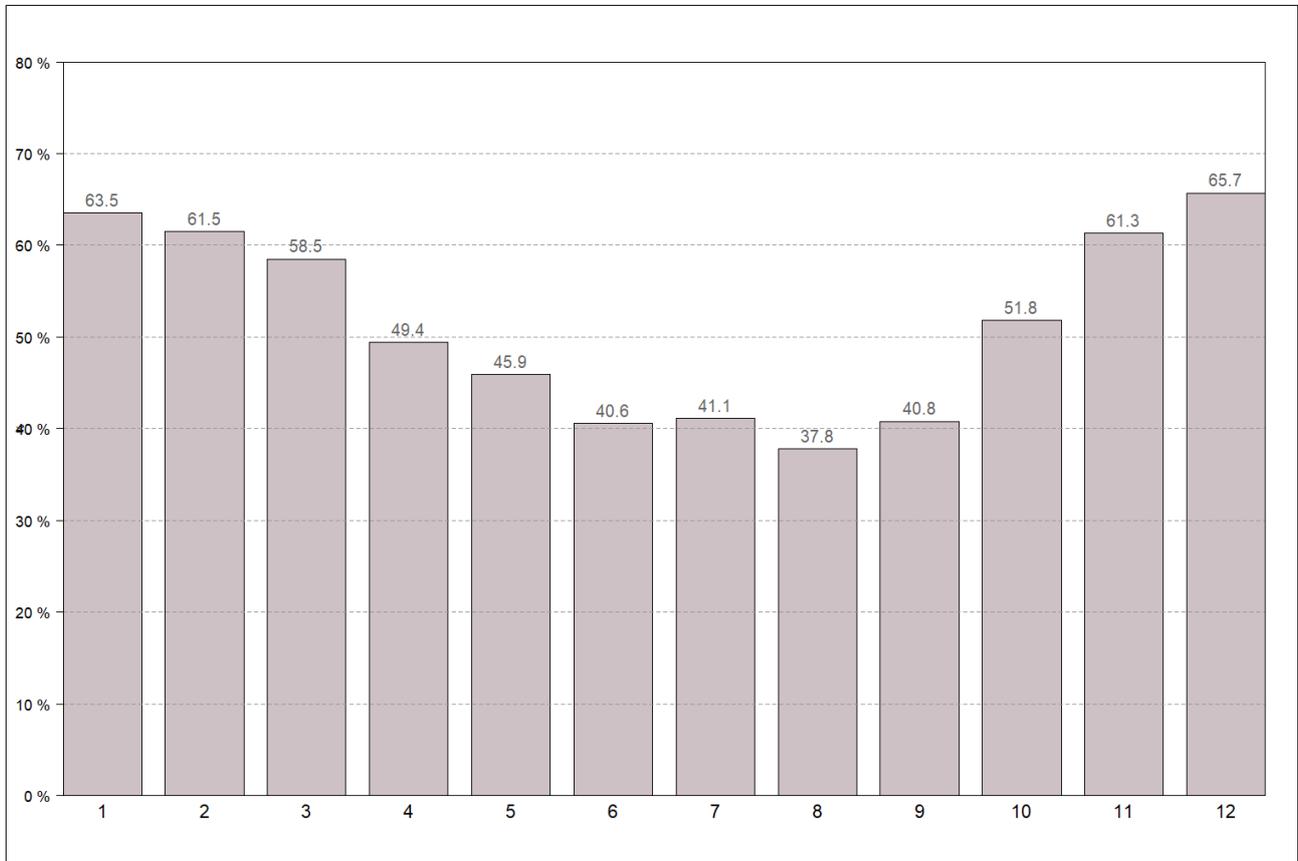


Illustration 5.3 : Facteurs de charge mensuels sur la période 2000-2020 au niveau 100 m

## 5 Estimation du potentiel éolien

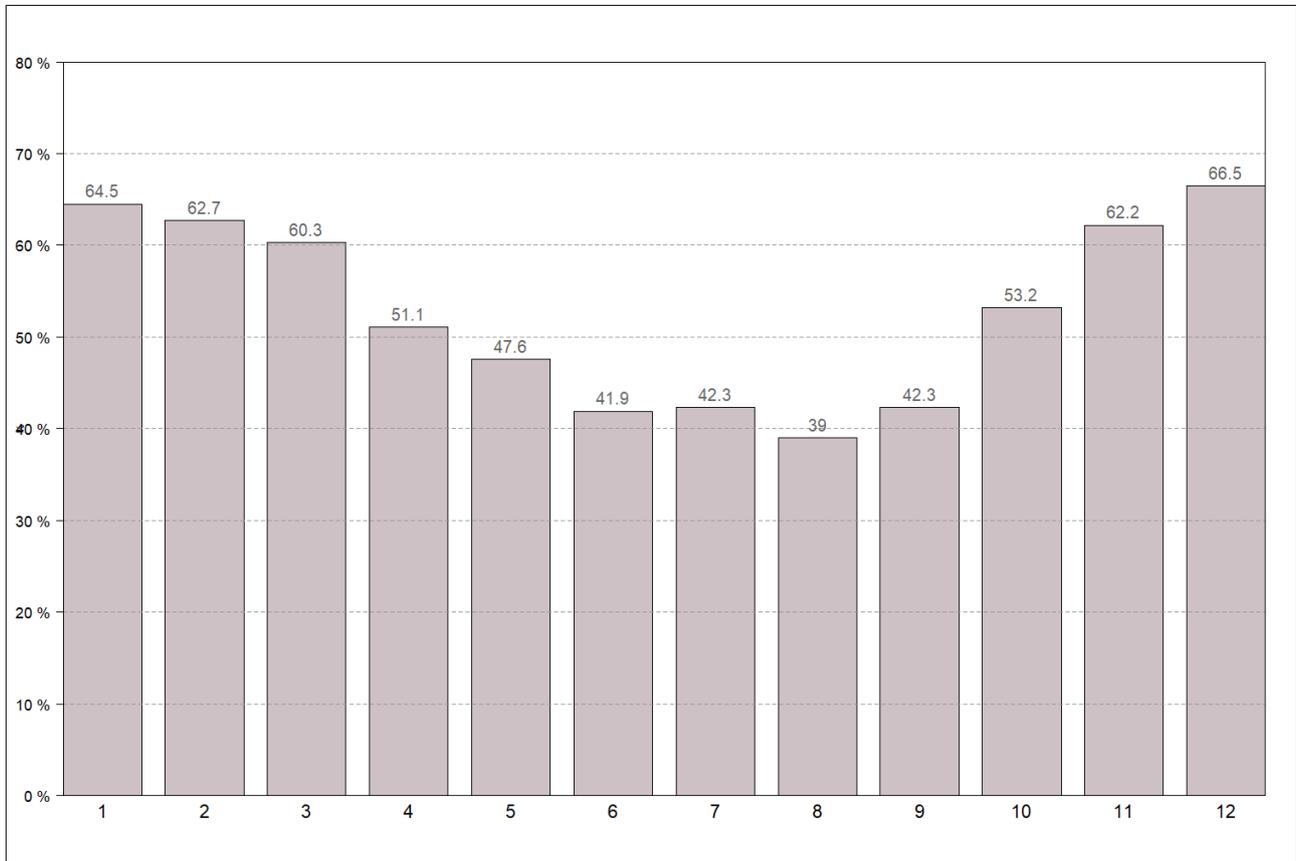


Illustration 5.4 : Facteurs de charge mensuels sur la période 2000-2020 au niveau 140 m

Les figures au-dessus montrent la variabilité mensuelle du facteur de charge avec des périodes plus favorables les mois d'hiver (de 60 à 67 %) que l'été (de 37 à 41 % pour le niveau 100 m et de 39 à 42 % pour le niveau 140 m).

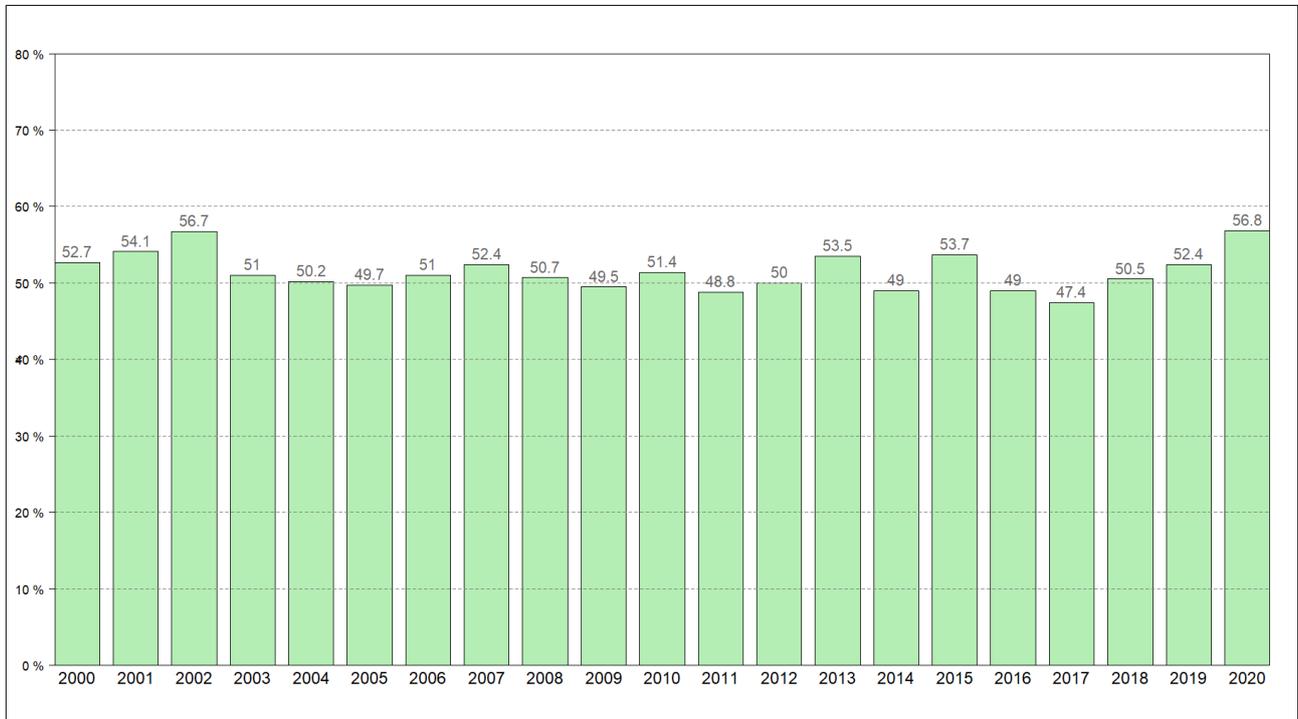


Illustration 5.5 : Facteurs de charge annuels sur la période 2000-2020 au niveau 100 m

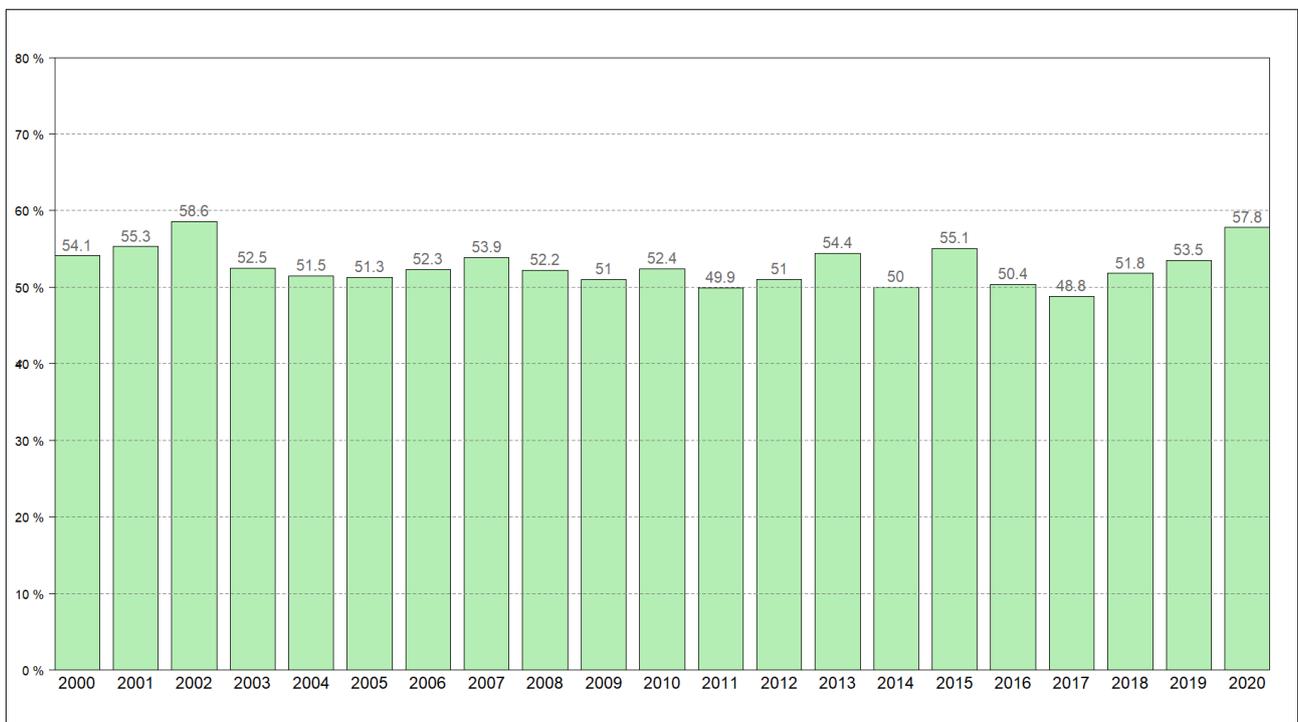


Illustration 5.6 : Facteurs de charge annuels sur la période 2000-2020 au niveau 140 m

La variabilité annuelle du facteur de charge est assez faible : il varie entre 47 et 50 % les années les plus défavorables (2011, 2014, 2016, 2017) et entre 57 à 59 % les années les plus ventées (2002 et 2020).

### 5.2.2 Point AROME Lidar Sud

Sur la période 2000-2020, le facteur de charge moyen de ce point s'élève à 51,5 % pour le niveau 100 m et 52,8 % pour le niveau 140 m.

Pour cette étude statistique, le pourcentage de vitesses manquantes de vent AROME est de 0.13 % pour chaque niveau considéré.

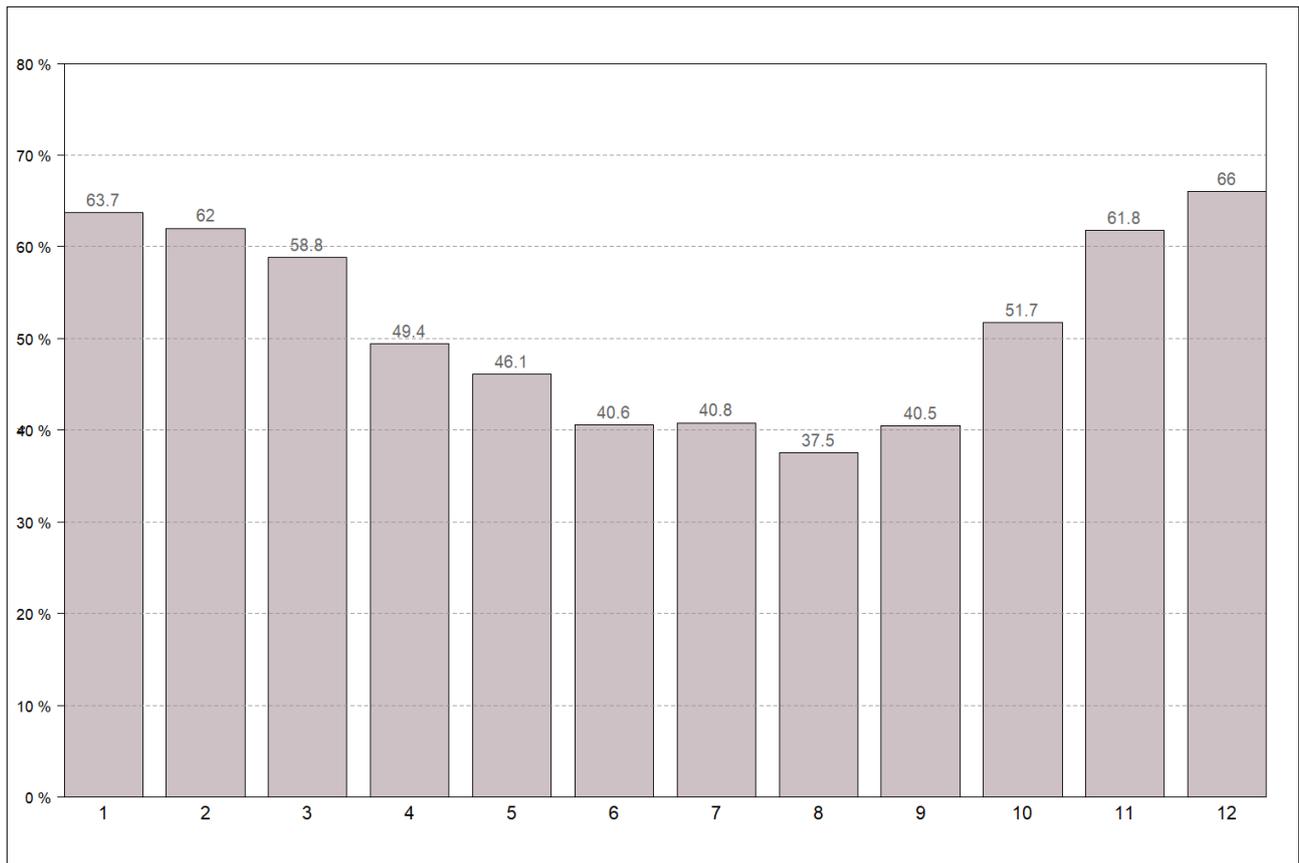


Illustration 5.7 : Facteurs de charge mensuels sur la période 2000-2020 au niveau 100 m

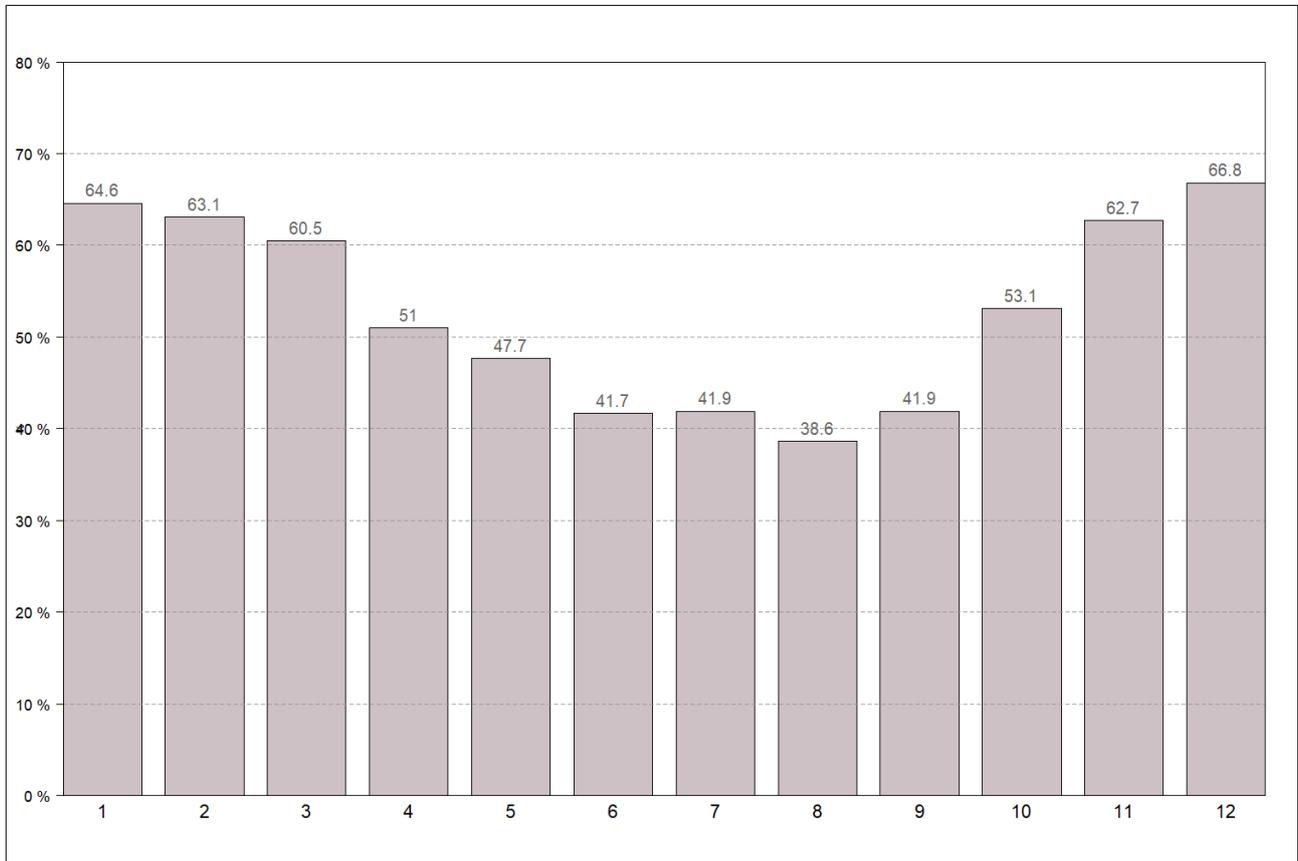


Illustration 5.8 : Facteurs de charge mensuels sur la période 2000-2020 au niveau 140 m

Les figures au-dessus montrent la variabilité mensuelle du facteur de charge avec des périodes plus favorables les mois d'hiver (de 60 à 69 %) que l'été (de 38 à 42 %).

## 5 Estimation du potentiel éolien

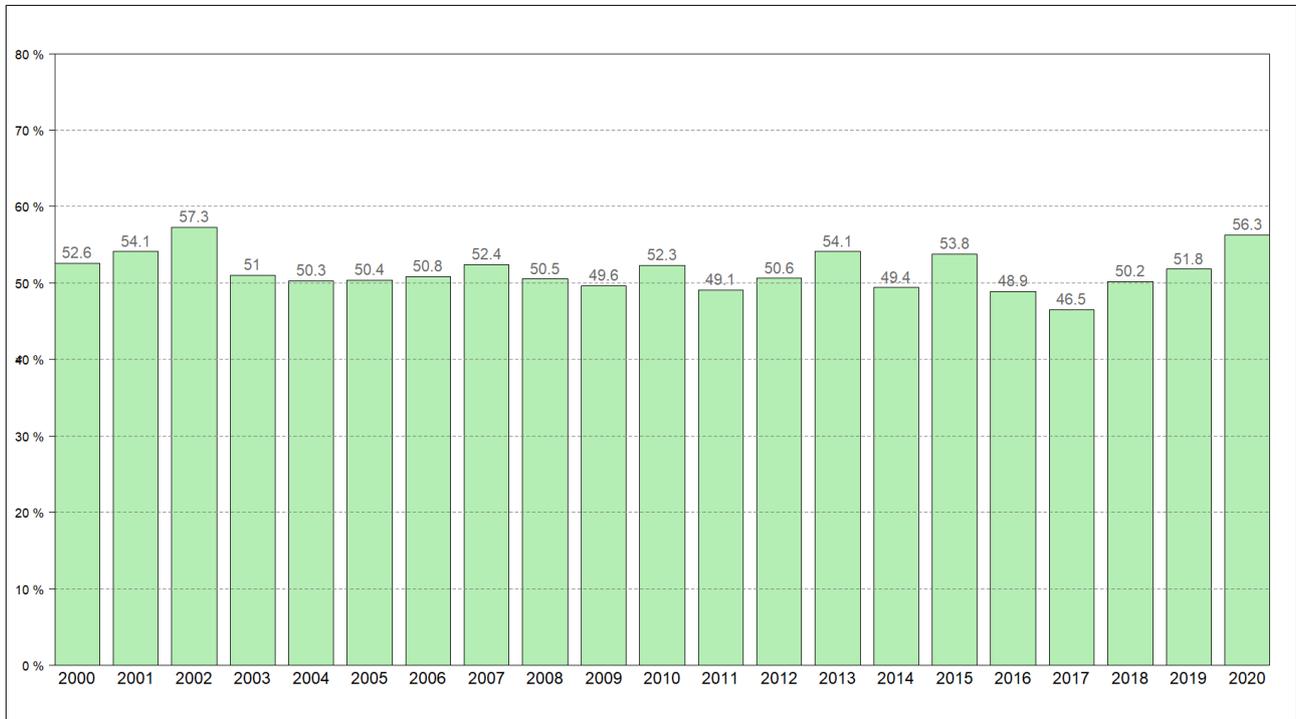


Illustration 5.9 : Facteurs de charge annuels sur la période 2000-2020 au niveau 100 m

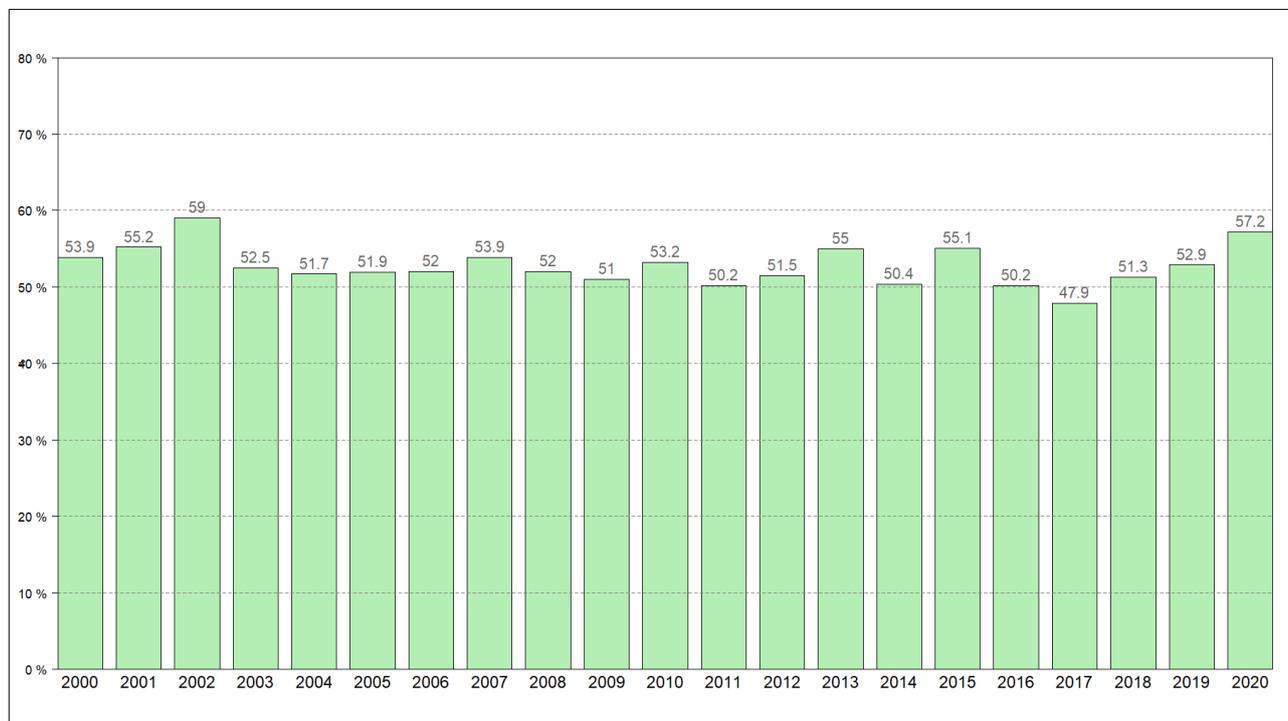


Illustration 5.10 : Facteurs de charge annuels sur la période 2000-2020 au niveau 140 m

La variabilité annuelle du facteur de charge est assez faible: il varie entre 47 et 56 % les années les plus défavorables (2011, 2014, 2017, 2018) et entre 57 à 59 % les années les plus ventées (2002 et 2020).

### Conclusion :

Les valeurs de facteur de charge obtenues pour les 2 points AROME lidar, en utilisant la courbe de puissance explicitée précédemment, sont très voisines.

## 6 Durées de retour des vents forts

L'objectif est de caractériser la fréquence de retour des vents moyens forts.

Les calculs de durées de retour se font à partir des valeurs maximales quotidiennes du vent issues des données AROME disponibles au pas de temps horaire, et représentatives du vent moyen 10 minutes.

Les données de vitesse de vent sont disponibles de 2000 à 2020, soit une période de 21 ans qui permet d'utiliser la méthode de renouvellement avec la loi Pareto (voir Annexe 3). En raison des hypothèses relatives au calcul des durées de retour, **il n'est pas possible d'obtenir des résultats pour tous les secteurs de vent étudiés.**

5 points du modèle AROME ont été retenus pour cette étude :

Nom	Coordonnées géographiques	
Point NE	47,475° Nord	-3,450° Est
Point N	47,525° Nord	-3,700° Est
Point W	47,375° Nord	-3,875° Est
Point C	47,325° Nord	-3,725° Est
Point S	47,150° Nord	-3,725° Est

Tableau 6.1 : Points AROME « durée de retour »

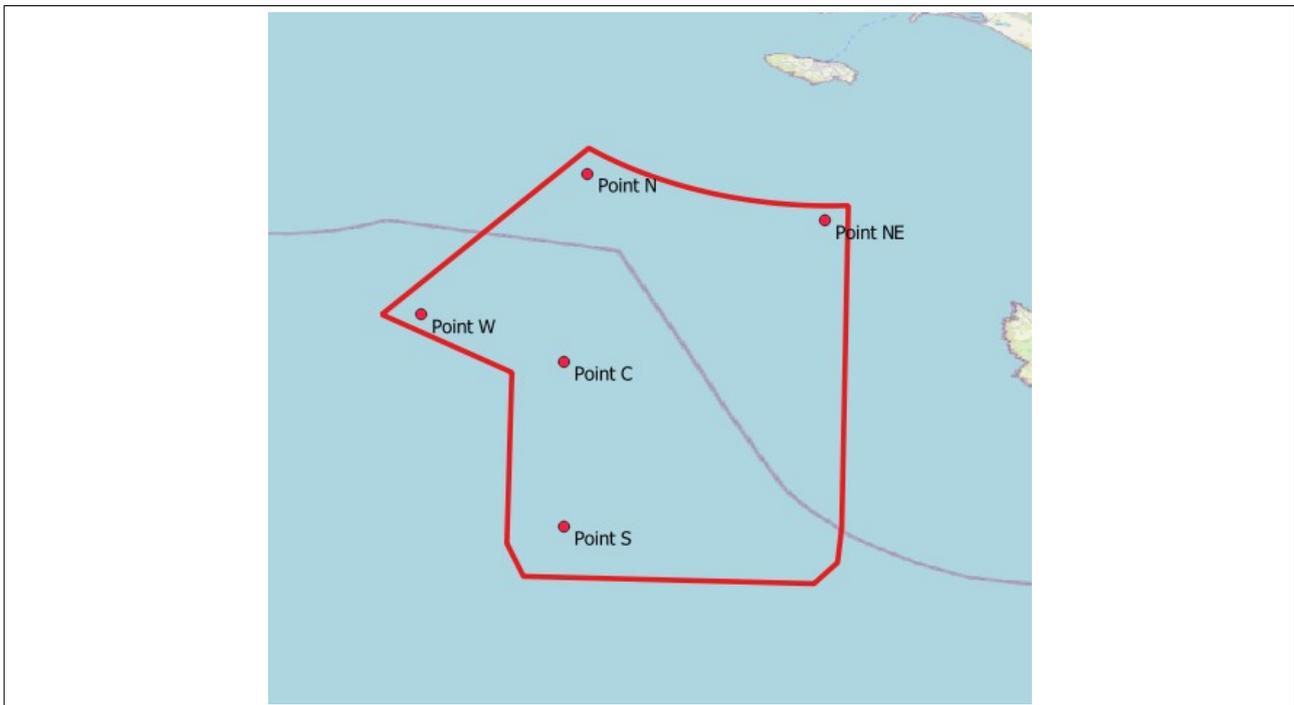


Illustration 6.1 : Carte des points AROME « durée de retour »

Pour ces 5 points, 2 niveaux sont considérés : 10 et 100 m.

Seul le Point C (central) est traité en détail dans ce rapport ; les résultats relatifs aux autres points sont intégrés aux données « livrables ».

### 6.1.1 Durées de retour pour le niveau 10 m

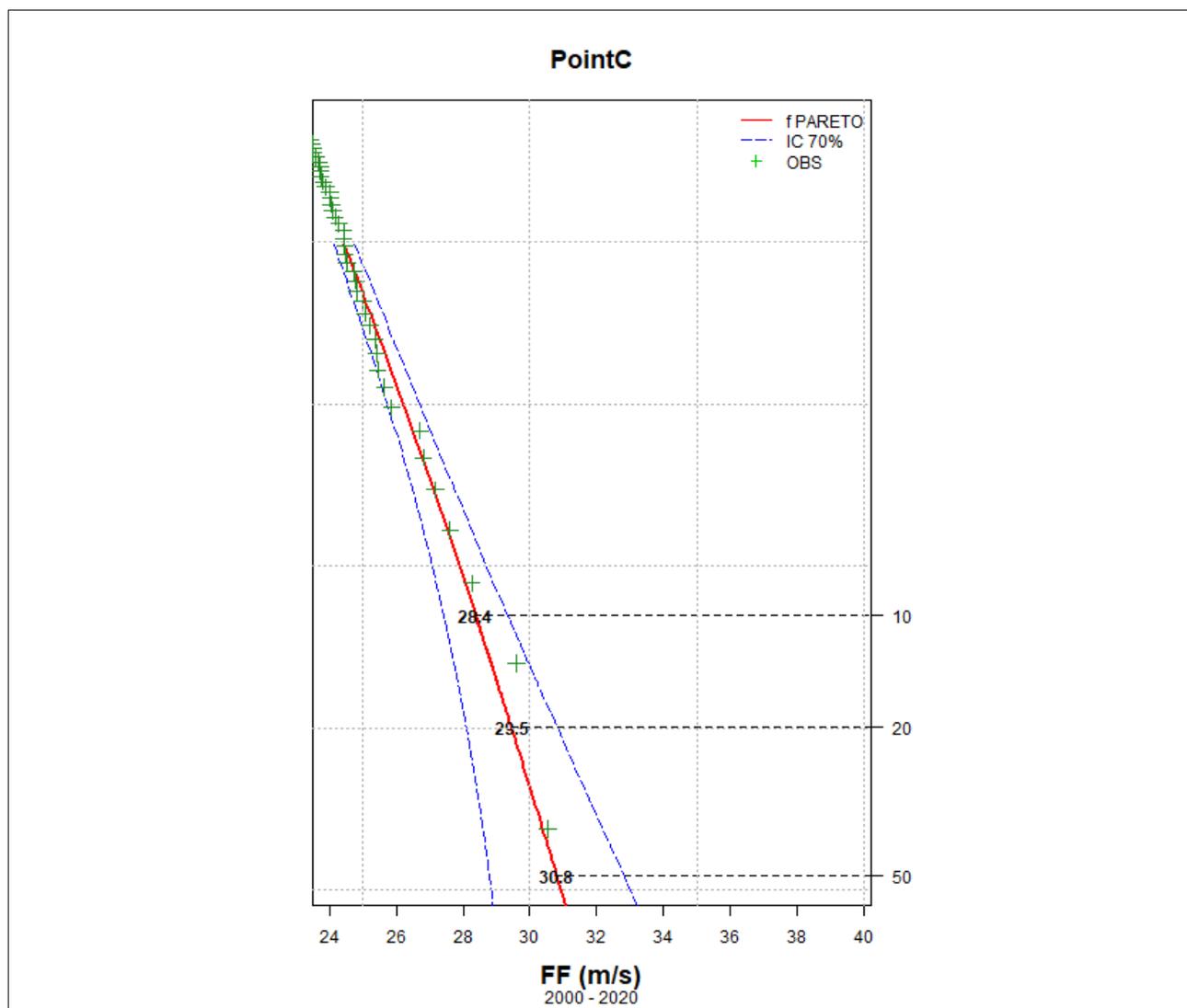


Illustration 6.2 : graphique des durées de retour (10, 20 et 50 ans) du vent pour le point C à 10 m.

L'intervalle de confiance des forces du vent pour les durées de retour considérées est de 70 %. Les forces aux bornes de cet intervalle, par secteur (« DD bin ») et pour tous secteurs (« all »), sont indiquées dans les tableaux qui suivent sous « FF\_ICmin » et « FF\_ICsup ».

## 6 Durées de retour des vents forts



DD bin (dg)	FF_ICmin (m/s)	FF (m/s)	FF_ICmax (m/s)
30	17.4	18.1	18.7
120	16.7	17.2	17.8
150	18.7	19.5	20.3
180	22.3	22.9	23.6
210	24.0	24.9	25.8
240	25.4	26.8	28.3
270	25.4	26.3	27.1
300	25.3	26.1	27.0
330	22.8	24.4	26.0
360	19.0	20.2	21.5
all	27.4	28.4	29.3

Tableau 6.2 : Tableau des forces du vent pour une durée de retour de 10 ans du Point C à 10 m.

DD bin (dg)	FF_ICmin (m/s)	FF (m/s)	FF_ICmax (m/s)
30	17.8	18.8	19.7
120	16.9	17.6	18.3
150	19.2	20.3	21.4
180	22.7	23.6	24.5
210	24.6	25.9	27.2
240	26.4	28.7	31.0
270	25.9	27.0	28.2
300	25.8	26.9	28.0
330	23.9	26.5	29.2
360	19.9	21.8	23.7
all	28.1	29.5	30.8

Tableau 6.3 : Tableau des forces du vent pour une durée de retour de 20 ans du Point C à 10 m.

DD bin (dg)	FF_ICmin (m/s)	FF (m/s)	FF_ICmax (m/s)
30	18.3	19.7	21.1
120	17.1	18.0	18.9
150	19.7	21.3	22.9
180	23.0	24.3	25.6
210	25.3	27.2	29.2
240	27.4	31.5	35.6
270	26.3	27.8	29.4
300	26.1	27.7	29.2
330	25.0	29.7	34.4
360	20.9	24.1	27.2
all	28.8	30.8	32.8

Tableau 6.4 : Tableau des forces du vent pour une durée de retour de 50 ans du Point C à 10 m.

Les valeurs de vent de durée de retour présentent les mêmes tendances par secteur, quelle que soit la durée de retour : avec un secteur est-sud-est (120°) présentant la plus faible valeur, et un secteur ouest-sud-ouest (240°) présentant la plus forte valeur.

6.1.2 Durées de retour pour le niveau 100 m

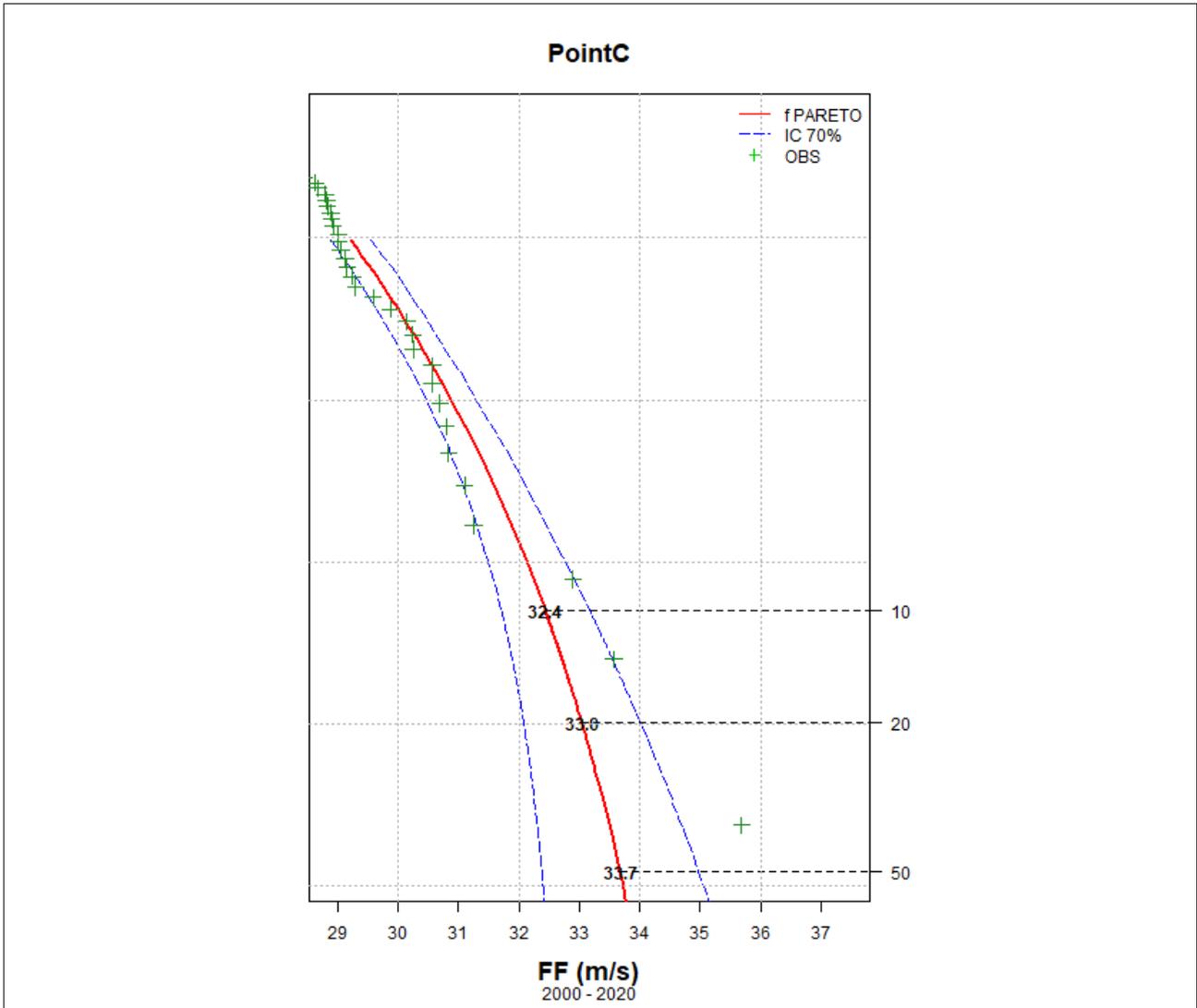


Illustration 6.3 : graphique des durées de retour (10, 20 et 50 ans) du vent pour le point C à 100 m.

Le graphique ci-dessus montre une limite à l'ajustement proposé par la méthode de renouvellement avec un intervalle de confiance à 70 % (un point d'observation en dehors de l'intervalle de confiance).

Comme pour le niveau 10 m, l'intervalle de confiance des forces du vent pour les durées de retour considérées est de 70 %. Les forces aux bornes de cet intervalle sont indiquées dans les tableaux qui suivent sous « FF\_ICmin » et « FF\_ICsup ».

DD bin (dg)	FF_ICmin (m/s)	FF (m/s)	FF_ICmax (m/s)
30	20.0	20.8	21.5
60	20.3	21.2	22.1
90	19.5	20.0	20.6
120	20.1	20.9	21.7
150	22.0	22.8	23.5
180	26.2	27.0	27.9
210	29.4	30.4	31.5
240	30.1	31.2	32.2
270	30.0	31.0	32.0
300	29.7	30.9	32.1
330	26.7	28.2	29.8
360	22.6	24.4	26.2
all	31.7	32.4	33.2

Tableau 6.5 : Tableau des forces du vent pour une durée de retour de 10 ans du Point C à 100 m.

## 6 Durées de retour des vents forts



DD bin (dg)	FF_ICmin (m/s)	FF (m/s)	FF_ICmax (m/s)
30	20.4	21.4	22.4
60	21.0	22.2	23.5
90	19.8	20.6	21.4
120	20.6	21.7	22.8
150	22.5	23.5	24.5
180	26.6	27.8	29.0
210	30.0	31.5	32.9
240	30.7	32.1	33.5
270	30.6	31.9	33.2
300	30.4	32.0	33.7
330	27.8	30.2	32.6
360	23.9	26.7	29.4
all	32.1	33.1	34.0

Tableau 6.6 : Tableau des forces du vent pour une durée de retour de 20 ans du Point C à 100 m.

DD bin (dg)	FF_ICmin (m/s)	FF (m/s)	FF_ICmax (m/s)
30	20.8	22.2	23.5
60	21.6	23.4	25.3
90	20.1	21.2	22.3
120	21.0	22.6	24.2
150	22.8	24.3	25.7
180	27.0	28.7	30.3
210	30.7	32.8	34.8
240	31.3	33.2	35.2
270	31.0	32.8	34.7
300	31.0	33.4	35.7
330	28.9	33.0	37.1
360	25.5	30.0	34.5
all	32.4	33.7	35.0

Tableau 6.7 : Tableau des forces du vent pour une durée de retour de 50 ans du Point C à 100 m.

Les valeurs de vent de durée de retour présentent les mêmes tendances par secteur, quelle que soit la durée de retour, avec un secteur est (90°) présentant la plus faible valeur, et un secteur ouest-sud-ouest (240°) présentant la plus forte valeur.

### 6.1.3 Durée de retour sur la zone

Point	Backoff time (years)	FF_ICmin (m/s)	FF (m/s)	FF_ICmax (m/s)
Point C	10	28.4	27.4	29.3
Point N	10	27.2	26.4	28.0
Point NE	10	27.4	26.5	28.3
Point S	10	27.2	26.4	28.0
Point W	10	28.0	27.2	28.7
Point C	20	29.5	28.1	30.8
Point N	20	28.1	26.9	29.2
Point NE	20	28.5	27.2	29.9
Point S	20	28.1	27.0	29.2
Point W	20	28.7	27.6	29.7
Point C	50	30.8	28.8	32.8
Point N	50	29.1	27.5	30.8
Point NE	50	30.0	27.9	32.1
Point S	50	29.1	27.5	30.7
Point W	50	29.5	28.0	31.0

Tableau 6.8 : Tableau récapitulatif des durées de retour des points AROME étudiés au niveau 10 m

Les valeurs de vent fort au niveau 10 m sont comprises entre 26,4 et 27,2 m/s pour le risque décennal, 26,9 et 28,1 m/s pour le risque vingtennal et 27,5 et 28,9 m/s pour le risque cinquantennal ; ces valeurs sont associées à des incertitudes (intervalle de confiance 70 %).

Point	Backoff time (years)	FF_ICmin (m/s)	FF (m/s)	FF_ICmax (m/s)
Point C	10	31.7	32.4	33.2
Point N	10	31.5	32.4	33.4
Point NE	10	32.2	33.4	34.7
Point S	10	31.6	32.5	33.5
Point W	10	32.5	33.6	34.6
Point C	20	32.1	33.1	34.0
Point N	20	32.1	33.4	34.6
Point NE	20	33.1	34.9	36.6
Point S	20	32.3	33.7	35.0
Point W	20	33.2	34.6	36.1
Point C	50	32.4	33.7	35.0
Point N	50	32.7	34.4	36.2
Point NE	50	34.0	36.7	39.3
Point S	50	33.0	35.1	37.3
Point W	50	33.8	35.9	38.0

Tableau 6.9 : Tableau récapitulatif des durées de retour des points AROME étudiés au niveau 100 m

Les valeurs de vent fort au niveau 100 m sont comprises entre 32,4 et 33,6 m/s pour le risque décennal, 33,0 et 34,9 m/s pour le risque vingtennal et 33,7 et 35,9 m/s pour le risque cinquantennal ; ces valeurs sont associées à des incertitudes (intervalle de confiance 70 %).

### Conclusion :

Pour le vent fort décennal, vingtennal et cinquantennal de la zone étudiée, les valeurs les plus élevées se situent pour le niveau 10 m sur l'ouest et le centre de la zone et pour le niveau 100 m, sur l'ouest et le centre.

Les valeurs de ce vent fort dépassent, au niveau 10 m, 26 m/s pour le risque décennal et 27 m/s pour le risque cinquantennal, et au niveau 100 m, 32 m/s pour le risque décennal et 35 m/s pour le risque cinquantennal.

## 7 Conclusion

Dans cette étude sont utilisées les données échantillonnées au pas de temps horaire du vent moyen 10 minutes ; elles comprennent des données observées ainsi que celles du modèle AROME sur la période de 2000 à 2020.

Les durées de retour sont calculées à partir de la série de valeurs maximales quotidiennes des données de vent moyen du modèle AROME, en vérifiant les hypothèses pour l'ajustement de la loi de Pareto (GPD – Generalized Pareto Distribution).

La zone étudiée est une région ventée. Sous l'influence des côtes et de la proximité de la dépression d'Islande et de hautes pressions, deux secteurs de direction de vent dominant :

- un large secteur ouest,
- un secteur est à nord-est.

Les vents les plus forts sont majoritairement associés à une direction de sud-ouest.

Les roses des vents issues des données du modèle AROME présentent de grandes similitudes avec celles observées et en valide la consistance.

Les cartes de vents modélisés montrent que la zone étudiée affiche une moyenne du vent sur 20 ans homogène quelle que soit l'altitude.

Sur cette même période, concernant le potentiel éolien, prenant appui sur une courbe de puissance donnée sélectionnée pour ce rapport, le facteur de charge moyen des points Lidar Nord et Lidar Sud s'élève à 51.5 % pour le niveau 100 m et 52.8 % pour le niveau 140 m.

La vitesse de vent de durée de retour du Point C, avec la méthode précédemment nommée, varie:

- à 10 m : de 28,4 m/s pour le risque décennal à 30,8 m/s pour le risque cinquantennal,
- à 100 m : de 32,4 m/s pour le risque décennal à 33,7 m/s pour le risque cinquantennal.

Pour toutes les durées de retour étudiées, les valeurs de vitesse de vent les plus élevées se situent sur l'ouest et le centre de la zone au niveau 10 m et sur l'ouest et nord-est de la zone au niveau 100 m.

---

**FIN DE DOCUMENT**

---

## Annexes

### Table des annexes

Annexe 1 : Le modèle AROME.....	79
Annexe 2 : Détails sur la climatologie AROME.....	83
Annexe 3 : Calcul des durées de retour.....	87

### Annexe 1 : Le modèle AROME

#### Généralités

AROME a été construit à partir de fonctionnalités de plusieurs modèles de prévision numérique du temps. Les fonctionnalités sont développées depuis plus de dix ans au sein de coopérations internationales et nationales. Il s'agit du noyau dynamique ALADIN-NH développé par des chercheurs du consortium ALADIN, d'une partie de la physique du modèle communautaire Méso-NH, développée par des chercheurs du CNRS et de Météo-France et pour l'assimilation d'une capitalisation des développements d'ARPEGE-IFS et d'ALADIN. Cependant, on peut néanmoins parler d'un modèle d'une nouvelle génération si l'on tient compte du contexte scientifique que l'on met en place pour utiliser ce modèle en opérationnel.

La résolution horizontale d'AROME utilisée est 2,5 km. La résolution verticale est variable : le premier niveau est à 10 mètres, et on compte en tout 60 niveaux.

Se placer d'emblée à cette résolution signifie d'un point de vue modélisation que l'on se situe dans une gamme d'échelles spatiales où les mouvements verticaux associés aux phénomènes convectifs sont traités explicitement par la dynamique du modèle. Ce qui signifie que la convection profonde n'est pas une paramétrisation de la physique du modèle. Cela signifie encore que la notion de pluie sous-maille ou pluie convective n'a pas de sens pour AROME. À ces échelles spatiales, on utilise une « physique pronostique ». C'est-à-dire par exemple qu'un nuage n'est pas issu d'un diagnostic faisant intervenir les différentes variables d'état du modèle (telles que la température, l'humidité) mais que ses différentes composantes (telles que l'eau nuageuse, la glace, la neige...) sont elles-mêmes des variables d'état du modèle avançant à chaque pas de temps au même titre que la pression ou la température.

Les différents changements d'état de l'eau au sein du nuage sont pris en compte au travers de la paramétrisation microphysique qui « remplace » les paramétrisations de la convection profonde et des précipitations de grande échelle.

Toujours en raison de l'échelle spatiale, la description détaillée des différents types de surface devient importante pour modéliser finement les interactions entre la surface et l'atmosphère. Ainsi, le modèle AROME utilise le module de surface SURFEX, ce qui lui permet d'utiliser en particulier un atlas géographique détaillé.

### **Résolution**

Se placer à une échelle spatiale de l'ordre du kilomètre se traduit par un abandon de diverses hypothèses que l'on peut faire à grande échelle (typiquement au-dessus de 10 kilomètres). Cela a donc des implications en termes de modélisation numérique à la fois pour la dynamique et la physique du modèle. En particulier, avec des valeurs moyennées sur une maille de 2,5 km de côté, l'équilibre entre le poids et la force verticale de pression (Archimède) n'est plus bien vérifié, ce qui revient à abandonner l'hypothèse hydrostatique et à calculer explicitement les fortes accélérations verticales. De même, la physique du modèle doit elle aussi être adaptée à l'échelle des processus résolus par la dynamique.

### **La dynamique**

La dynamique du modèle AROME est importée du modèle ALADIN dans sa version non hydrostatique.

L'abandon de l'hypothèse hydrostatique permet de rajouter du réalisme dans la prévision des champs météorologiques. AROME a été le premier modèle utilisé en opérationnel par Météo-France à faire cette petite révolution. Les différences entre hydrostatisme et nonhydrostatisme se concentrent sur ce qui se passe sur la verticale. L'hypothèse hydrostatique consiste en gros à considérer que les mouvements violents sur la verticale ne se « voient » qu'à petite échelle. À l'échelle d'AROME, en particulier lors d'épisodes convectifs intenses ou bien près de reliefs pentus, on a des accélérations verticales des particules d'air non négligeables par rapport à la force de gravité.

Le modèle a donc deux variables supplémentaires qui sont :

- l'écart à la pression hydrostatique,
- la divergence verticale (variation verticale de la vitesse verticale).

Ainsi, la vitesse verticale, reliée à la divergence verticale, est une « vraie » vitesse verticale.

À comparer avec la vitesse verticale utilisée couramment, diagnostiquée en gros à partir de la divergence du vent horizontal (vitesse Omega). On peut donc voir avec AROME, par

exemple des ascendances convectives fortes sur les champs de vitesse verticale, ce qui n'est pas le cas à l'échelle d'ALADIN (par exemple il n'est pas rare que les vitesses verticales puissent atteindre localement des valeurs fortes, supérieures à la dizaine de m/s).

### **La physique**

La physique du modèle AROME provient directement d'un sous-ensemble des paramétrisations disponibles dans le modèle Mésos-NH.

Le modèle possède quatre paramétrisations différentes : le rayonnement, la microphysique, la convection peu profonde ou non précipitante et la turbulence.

Le module de rayonnement utilisé dans AROME est le même que celui du Centre Européen et d'ARPEGE, donc pas de spécificité sur ce thème, si ce n'est que le module de rayonnement est appelé plus fréquemment que dans les modèles de grande échelle pour tenir compte des interactions avec les nuages (tous les quarts d'heure). Le fait d'avoir une bonne description de la dynamique dans les nuages (en particulier des vitesses verticales) nécessite d'avoir une paramétrisation des changements de phase de l'eau qui soit suffisamment complète pour que les processus de microphysique nuageuse soient également décrits finement (et cela d'autant plus que ceux-ci interagissent avec la dynamique du modèle : poids des hydrométéores, évaporation des pluies, microphysique de la glace, etc.). La microphysique utilisée dans AROME est le schéma ICE3 (pour 3 espèces de glace) qui calcule à chaque pas de temps les rapports de mélange de cinq types d'hydrométéore, qui sont ainsi des variables 3D d'état du modèle :

- l'eau nuageuse,
- l'eau de pluie,
- la glace nuageuse,
- la neige,
- la neige roulée (« graupel »).

Même à la résolution de 2,5 km, hors rayonnement et interaction avec la surface, il reste un ensemble de processus sous maille qui nécessitent toujours d'être paramétrés. Il s'agit en particulier du mélange turbulent dans la couche limite, des nuages de petite extension horizontale (cumulus) et verticale (sommet des stratocumulus).

### **Le traitement des surfaces**

Le modèle AROME utilise le module de surface dit SURFEX. L'atmosphère dialogue avec le module de surface au moyen d'une interface générique. Ainsi, le modèle AROME inclut de fait tous les développements nouveaux de SURFEX. La maille du modèle est divisée



## Projet de parc éolien off-shore en Bretagne Sud

### *Lot 1 - AO5 Bretagne*

---

en quatre types de sol qui font chacun appel à des schémas différents. Il s'agit de la mer, des lacs, de la ville (schéma TEB) et de la nature (schéma ISBA). La détermination du type de sol s'appuie sur une base de données de résolution 1 km (ECOCLIMAP) permettant de prendre en compte 215 écosystèmes différents. Le module de surface SURFEX possède ses propres diagnostics.

AROME est utilisé en opérationnel à Météo-France sur la France métropolitaine depuis 2008.

## **Annexe 2 : Détails sur la climatologie AROME**

Informations sur la base de données issue de la modélisation avec AROME

### **Contexte**

Sur la France métropolitaine, les bases de données observées existantes ne permettent pas de disposer d'une information spatialisée et les bases de données numériques spatialisées disponibles ont une résolution spatiale (ex : 80 km de résolution pour ERA Interim) et temporelle (ex : toutes les 6 heures pour ERA-INTERIM) trop lâche pour les besoins liés à l'éolien.

Un calcul intensif a été mené pour constituer une base de données de climatologie modèle spatialisée et à haute résolution.

L'objectif de ce calcul massif est de constituer une base de données spatialisées, horaires de paramètres liés au potentiel éolien (P, T, Hu, DD et FF) à des niveaux hauteurs proches du sol (de 20 m à 200 m par pas de 20 mètres et 250 m) complétée d'autres paramètres et niveaux classiques à la meilleure résolution possible et la plus proche possible des observations.

Pour des raisons de coûts de calcul, il a été choisi de limiter la période de reconstitution à 10 ans (2000 – 2009) et de la compléter ensuite avec l'archive opérationnelle du même modèle sur la période 2009 à 2019. L'année commune aux deux sources, 2009, permet de s'assurer de l'homogénéité des séries constituées.

### **Choix du modèle et technique de descente d'échelle**

Un choix d'importance et impactant fortement la qualité des données de vent produites est le choix de la résolution du modèle numérique à utiliser. En se plaçant à 2,5 km de résolution, en plus d'une meilleure représentation du relief qui mécaniquement permet de représenter de façon réaliste l'écoulement du fluide atmosphérique autour des massifs, le modèle de prévision numérique utilisé doit permettre d'appréhender les phénomènes tels que la convection et la brise, typiques de cette échelle avec notamment une meilleure précision dans la description des surfaces composant chaque maille du modèle.

Le choix du modèle non hydrostatique AROME avec une résolution horizontale de 2,5 km et une résolution verticale fine constituée de 60 niveaux a pour objectif de bien décrire localement le vent pour la problématique éolienne. Ce choix provient aussi de la disponibilité (dans la base de données d'archive des runs de prévision) des données AROME utilisées en opérationnel à Météo-France depuis 2008 et dont les principales caractéristiques de configuration sont identiques (notamment les résolutions). Réaliser 10 ans de simulation de 2000 à 2009 permet ainsi de créer une base de données AROME mixte (rejeu et opérationnel) de 2000 à 2019 sur la France métropolitaine.

AROME est un modèle à aire limitée qui nécessite pour fonctionner d'être initialisé et de disposer sur les bords de son domaine de données de couplage tout au long de la simulation.

ERA-INTERIM est une base de données de ré-analyses globales du modèle de prévision numérique IFS du centre européen. Une ré-analyse donne une description numérique d'un climat récent, produit par la combinaison de modèles et d'un très grand nombre d'observations (sol, satellite, altitude). ERA-INTERIM est une base de données de réanalyse contenant une chronique de données homogènes débutant en 1979 et qui est continuellement mise à jour. La résolution spatiale de ces données de ré-analyse est de 80 km approximativement horizontalement et elles sont disponibles sur 60 niveaux. Cette base de données est la candidate idéale pour initialiser et coupler un modèle de prévision numérique à aire limitée sur une longue période. Néanmoins, sa résolution initiale (80 km) est considérée comme trop lâche pour pouvoir être utilisée directement pour coupler AROME (2,5 km). Pour éviter un trop grand saut en résolution un modèle intermédiaire a été intercalé entre AROME et ERA-INTERIM : le modèle hydrostatique ALADIN à 15 km de résolution.

La descente d'échelle dynamique finalement retenue est ERA-INTERIM (80 km) # ALADIN (15 km) # AROME (2,5 km) sur la période allant du 1<sup>er</sup> janvier 2000 au 31 décembre 2009 (cf. domaines la figure associée).

Cette méthodologie et la taille des domaines permettent d'assurer la liberté nécessaire à chaque modèle pour représenter correctement les processus dynamiques et physiques pour lesquels ils sont utilisés mais aussi de contraindre suffisamment ceux-ci pour qu'ils soient pilotés par la ré-analyse ERA-INTERIM.

Les données utiles de la base de données ERA-INTERIM sont :

- les réanalyses sexti-horaires (00 h, 06 h, 12 h et 18 h UTC),
- les guess (prévisions à court terme) à 3 et 9 heures des analyses à 0 et 12 heures UTC.

Ces données constituent un jeu de fichiers disponibles toutes les 3 heures, de 2000 à 2009 utiles au couplage et à l'initialisation des simulations ALADIN.

L'utilisation de données issues du modèle IFS (le modèle utilisé pour constituer ERAINTERIM) et notamment de son module de surface HTESSSEL comme données d'initialisation de la surface dans SURFEX (ALADIN) est problématique. Par construction, HTESSSEL et SURFEX sont très différents et les équilibres qu'ils entretiennent avec l'atmosphère aussi. Ainsi, l'initialisation de SURFEX avec des données HTESSSEL, même avec des méthodes complexes, peut avoir de fâcheuses conséquences sur les

paramètres liés au flux d'humidité à la surface (humidité et température de l'air à 2 m). Même si cet impact est limité pour le paramètre vent, et pour garantir une utilisation la plus large possible de la future base de données de 10 ans, un cycle d'analyse de surface a été mis en œuvre dans la chaîne de production ALADIN pour pallier ce problème. Cette analyse de surface consiste en la prise en compte des observations de vent, température et humidité des stations terrestres comprises dans le domaine de modélisation. Elle ne considère que les surfaces terrestres, le problème d'initialisation n'existant pas sur mer (les SST utilisées dans la descente d'échelle dynamique sont celles analysées dans ERA-INTERIM).

On réalise une simulation par jour J. La simulation débute J-1 à 18 h UTC et se poursuit jusqu'à J+1 à 00 h UTC. On ne garde que les 24 dernières heures pour constituer la base de données (on laisse le temps au modèle de créer ses propres structures dans les 6 premières heures de simulation : spin-up). On initialise l'atmosphère à l'aide des données ERAINTERIM, et on utilise un fichier de couplage toutes les 3 heures provenant d'ERA-INTERIM pendant les 30 heures de simulations. Parallèlement on réalise un cycle d'analyses de surface toutes les 6 heures.

Le calcul de scores sur ces simulations ALADIN pour les humidités et températures à 2 mètres par rapport aux observations a montré une nette amélioration par rapport à une chaîne de descente d'échelle sans cycle d'analyse et un effet quasi neutre sur le vent à 10 mètres.

Dans la foulée des simulations ALADIN, on réalise les simulations AROME en débutant la simulation J-1 à 18 h UTC jusqu'à J+1 à 00 h UTC. On ne garde que les 24 dernières heures pour constituer la base de données (spin-up de 6 heures). On initialise l'atmosphère et la surface à l'aide des données ALADIN, et on utilise un fichier de couplage toutes les heures provenant d'ALADIN pendant les 30 heures de simulations. On réalise une analyse de surface après 6 heures de simulation.

### **Concaténation avec l'archive opérationnelle**

Pour compléter la chronique de données horaires spatialisées sur 10 ans (de 2000 à 2009), l'archive du modèle AROME utilisé pour la prévision numérique depuis 2009 jusqu'à aujourd'hui a été exploitée. L'homogénéité des deux jeux de données (le rejeu d'une part, l'archive opérationnelle d'autre part) a pu être vérifiée pour l'ensemble de l'année 2009 et a montré des résultats très proches en particulier pour le paramètre vent.

Les quantiles de la force du vent à 10 m des simulations AROME (rejeu et archive opérationnelle) sont proches de ceux des observations avec un avantage au rejeu à 00 h et 06 h UTC qui surestiment moins les vents faibles.

La simulation physique et la base de données utilisées dans cette étude permettent des analyses complémentaires et notamment des comparaisons directes de chroniques de données horaires de vent à différentes hauteurs sur toute la profondeur de l'archive.

Cette nouvelle base de données pour l'éolien qui montre de très bons résultats voire d'excellents en milieu marin où le relief comme la rugosité ne sont pas des limites à la représentation à 2,5 km du modèle.

La démarche de constitution de la base climatologique AROME synthétisée dans cette annexe, est décrite dans l'article *Évaluation de la ressource éolienne terrestre en France*<sup>3</sup>.

---

3 Pouponneau Béatrice, Pourret Vivien, Faucou, Étienne, Mestre Olivier, Sorel Matthieu, Bellini Robert, Barthod Morgane, Dubois Corinne, Martinoni-Lapierre Sophie. (2017). *Évaluation de la ressource éolienne terrestre en France*. La Météorologie. 28. 10.4267/2042/62457.

### Annexe 3 : Calcul des durées de retour

Un des problèmes fréquemment posé par les professionnels est la connaissance de la valeur extrême d'un paramètre en un point donné.

Une réponse à cette question peut s'appuyer sur la connaissance d'un record, portant sur une série de mesures plus ou moins longue. Mais un record est par définition toujours susceptible d'être dépassé.

De plus si nous disposons de séries très longues pour certains paramètres (précipitations et températures extrêmes quotidiennes), c'est loin d'être le cas pour tous (rafales de vent notamment). Dans ce cas, la représentativité d'un record est très limitée.

On préfère ainsi se référer à une notion de **durée de retour d'une valeur extrême** correspondant à l'intervalle de temps moyen séparant 2 réalisations de cet événement ou la probabilité qu'il se produise une année donnée.

La rareté des données traitées, combinée au fait que les séries de mesures ne sont pas toujours très longues, nous oblige à mettre en œuvre des lois statistiques adaptées à la modélisation de tels événements de façon à extrapoler au mieux leur comportement dans le temps.

La détermination des durées de retour de vents forts moyen 10 minutes consiste alors à calculer quelles sont les valeurs de force de vent moyen 10 minutes susceptibles d'être dépassées en moyenne une fois tous les 5, 10, 20, 30, ou 50 ans...

Les estimations obtenues sont toujours accompagnées d'un intervalle de confiance.<sup>4</sup>

Pour cela, plusieurs lois statistiques sont à notre disposition :

- des méthodes utilisant les maxima annuels (**GEV, loi généralisée des valeurs extrêmes**, dont la loi de Gumbel est un cas particulier) et dans ce cas, un minimum de 25 ans de données est souhaitable pour des résultats fiables (l'estimateur GEV pour une loi asymptotique est efficace si l'échantillon tend vers l'infini),
- des méthodes « à seuil » utilisant toutes les observations supérieures à un seuil fixé (**méthode du renouvellement**) ; ces méthodes permettent de travailler sur des données ayant une profondeur moindre.

Les durées de retour calculées sur l'historique de vent modèle AROME (2000-2019), ne permet pas d'appliquer, les méthodes utilisant les maxima annuels. **Les durées de retour de vents forts AROME 2000-2019 sont donc estimées par la méthode du renouvellement.**

<sup>4</sup> Martinoni-Lapierre Sophie. (2015) Atlas éolien de l'ADEME.

Remarques :

- En aucun cas on ne calcule des durées de retour à partir d'une série inférieure à 10 ans.
- En général, on admet qu'il n'est pas raisonnable d'évaluer des quantiles de durée de retour supérieure à 4 fois la durée de l'échantillon. Ils pourraient être calculés, mais l'utilisateur devrait être conscient des restrictions inhérentes aux calculs statistiques à partir de petits échantillons. C'est pourquoi dans le cas des vents forts, les quantiles ne sont pas estimés au-delà d'une durée de retour de 50 ans.
- On insiste sur l'importance de l'intervalle de confiance associé aux valeurs estimées.

**Méthode de Renouvellement**

Cette méthode permet d'évaluer les événements exceptionnels (se produisant en moyenne une fois tous les 5, 10, 20, 30, 50 et 100 ans) pour des séries disposant d'au moins 10 ans de données.

On sélectionne tous les événements supérieurs à un seuil ce qui permet de conserver en général plus d'un événement par an.

**Principe**

On effectue si possible l'ajustement des forces de vent dépassant un certain seuil à une loi de Pareto généralisée, puis on choisit la loi d'ajustement des nombres annuels de dépassements.

La loi de Pareto généralisée dépend de deux paramètres (paramètres d'échelle et de forme). La fonction de répartition de la loi s'énonce, pour les valeurs de  $x$  supérieures à un seuil  $s_0$  :

- Pour  $k \neq 0$  :

$$\text{densité : } f(x) = \frac{1}{\sigma} \left( 1 - \frac{k(x-s_0)}{\sigma} \right)^{\frac{1}{k}-1} \text{ avec } \sigma > 0$$

$$\text{fonction de répartition : } F(x) = 1 - \left( 1 - \frac{k(x-s_0)}{\sigma} \right)^{\frac{1}{k}}$$

- Pour  $k = 0$  :

$$\text{densité : } f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{x-s_0}{\sigma}\right) \text{ avec } \sigma > 0$$

$$\text{fonction de répartition : } F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x-s_0}{\sigma}\right)$$

où  $\sigma$  est le paramètre d'échelle et  $k$  le paramètre de forme.

La loi exponentielle est un cas particulier de la loi de PARETO lorsque  $k = 0$ .

### **Mise en œuvre**

#### *1 – Choix de l'échantillon de dépassements de seuil à utiliser :*

On sélectionne dans un premier temps tous les événements de vent maximum quotidien supérieurs à un seuil. Ceci permet de conserver en général plus d'un événement par an. Pour garantir l'hypothèse d'indépendance des données, un temps de séparation de plus de 1 jour et 6 heures est ensuite requis entre deux événements sélectionnés.

#### *2 – Ajustement des hauteurs de dépassement de seuil :*

Afin de retenir le seuil pour lequel les ajustements sont les meilleurs, on utilise une procédure automatique. Pour rester dans le cadre de la théorie des valeurs extrêmes, et donc ne pas conserver trop d'événements, le nombre total de valeurs retenues sera choisi entre 2 et 4 par année. Le seuil est alors déterminé de façon à ce que la moyenne des écarts au seuil des observations qui lui sont supérieures en soit une fonction linéaire, ce qui est une caractéristique de la loi de Pareto.

#### *3 – Ajustement des nombres annuels de dépassements :*

Dans le cas de la force du vent maximal moyen (ou du vent maximal instantané), le calcul des durées de retour porte sur la période démarrant en 2000. Le nombre d'années ne permet pas l'utilisation du test du  $\chi^2$  pour le choix de la loi. On n'utilise alors ni la loi de Poisson, ni la loi binomiale négative pour ajuster les nombres annuels de dépassements du seuil, mais une loi asymptotique.

### **Restriction**

Au-delà de 4 fois la longueur de la série de données, les valeurs fournies sont à prendre avec précaution. Il faut bien garder à l'esprit que ces valeurs sont des estimations qui dépendent des informations disponibles au moment de leur évaluation. Un événement ultérieur est toujours susceptible de les contredire.

### **Échelles du diagramme d'ajustement**

En abscisses : les valeurs du paramètre dans l'unité précisée suivant une échelle linéaire.

En ordonnées : les durées de retour en années suivant une échelle logarithmique.

On rappelle la correspondance entre fréquence cumulée (%) et durée de retour (années) :  
 $\text{durée} = 1/(1 - F/100)$ .

La fonction  $F(x)$  est une fonction de répartition. Elle indique, pour la valeur donnée prise par une variable aléatoire  $X$ , un cumul de probabilités:  $F(x) = P(X \leq x)$ .

Lorsque l'on étudie des grandeurs dans un contexte d'analyse de risque, on cherche à déterminer la probabilité pour qu'une intensité  $i$  ne soit pas atteinte ou dépassée (i.e. soit inférieure ou égale à une valeur  $x_j$ ).

Cette probabilité est donnée, si  $i$  représente une variable aléatoire, par la relation suivante :

$$F(x_j) = P(i \leq x_j)$$

où  $F(x)$  est la fonction de répartition du paramètre considéré. On nomme cette probabilité fréquence de non-dépassement ou probabilité de non-dépassement. Son complément à l'unité  $1 - F(x_j)$  est appelé probabilité de dépassement, fréquence de dépassement ou encore fréquence d'apparition.

On définit alors la durée de retour  $T$  (Moyenne à long terme du temps ou du nombre d'années séparant un événement de grandeur donnée d'un second événement d'une grandeur égale ou supérieure) d'un événement comme étant l'inverse de la fréquence d'apparition de l'événement. Soit :

$$T = \frac{1}{1 - F(x_j)}$$



Exemple : Ajustement de la méthode de renouvellement de la série de vent moyen AROME au point de grille Point C à 10 m de hauteur

