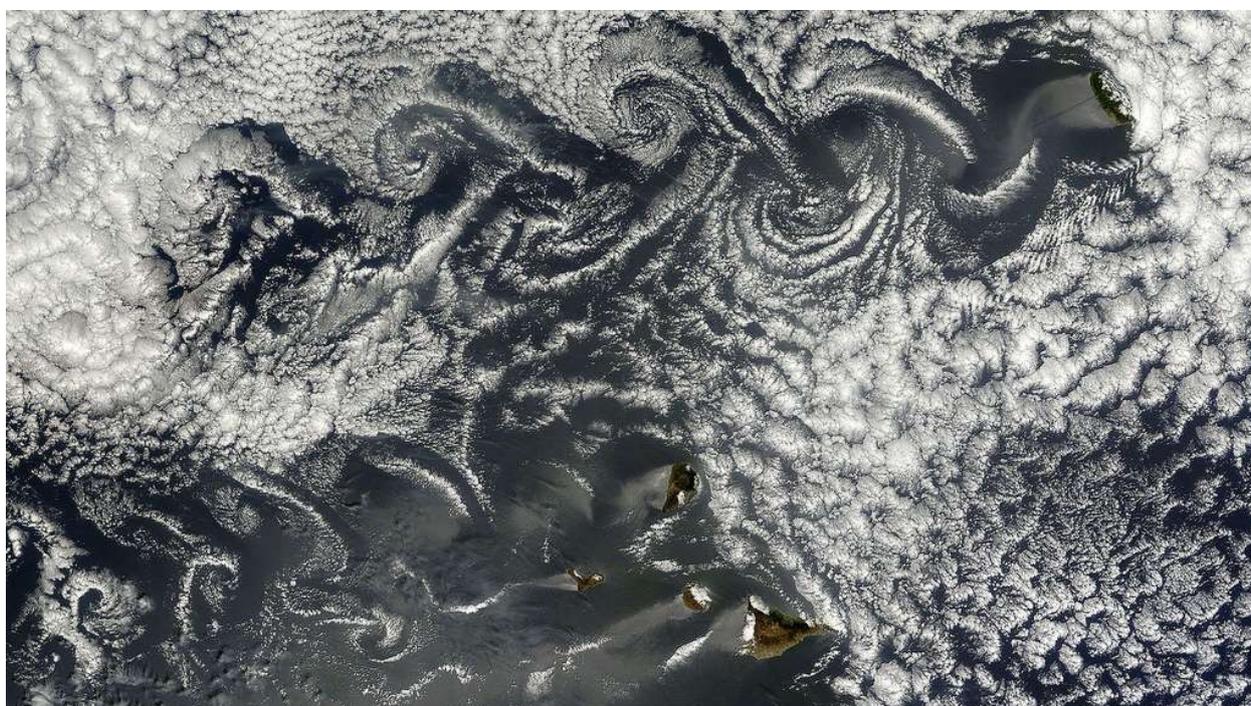


# Analyse des risques de turbulence atmosphérique

*Lot 3 - AO5 Bretagne Sud*



Version 1.0 du 31/03/2021

<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>Chargé d'affaire :</b> Météo-France D2C Toulouse	<a href="mailto:christophe.jacolin@meteo.fr">christophe.jacolin@meteo.fr</a> +33 5 61 07 86 85	
<b>Chef de projet :</b> Météo-France DSM/CS/DC	@ <a href="mailto:raphael.legrand@meteo.fr">raphael.legrand@meteo.fr</a> ☎ +33 5 61 07 86 11	

— page laissée intentionnellement vide -

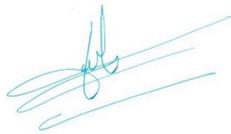
## Documents de référence antérieurs

	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_Lot3_Rapport_Bretagne_V1	16/02/2021	V0	Création

## Signatures

	Nom	Service	Signature	
Rédacteur(s)	Valentine Chatel Olivier Roulle	DSM/CS/DC		
Relecteur(s)	Olivier Roulle Valentine Chatel	DSM/CS/DC		
	Béatrice Pouponneau Raphaël Legrand	DSM/CS/DC		
Approbateur(s)	Christophe Jacolin	D2C/DV/PRO		

## RÉSUMÉ

L'objectif de ce lot 3 est d'étudier la **turbulence atmosphérique** dans le cadre d'une problématique d'éolien off-shore. Elle vise à minimiser les risques économiques liés aux conditions météorologiques turbulentes et vents extrêmes (rafales) sur la zone Bretagne.

L'effet de sillage de parc éolien n'entre pas dans le périmètre de ces travaux. L'étude de la turbulence atmosphérique est réalisée dans la couche verticale qui sera balayée par les pales des éoliennes, à savoir entre **40 et 200 m**, zone se situant dans la Couche Limite Atmosphérique.

Les diagnostics les plus adaptés à l'évaluation de la turbulence atmosphérique ont été identifiés lors de précédentes études pour la DGEC. Ces **indicateurs de turbulence** sont **l'intensité de turbulence, la rafale (représentative des rafales 3 secondes)** ainsi que **l'exposant  $\alpha$  du cisaillement de vent**.

Ces **diagnostics de la turbulence fournis** dans le cadre de ce lot sont **calculés à partir de données horaires du modèle météorologique AROME à la résolution horizontale 0,025°** (environ 2,5 km) sur la période **2000-2019**, permettant de disposer d'un jeu de données dense sur la zone étudiée.

Pour l'intensité de la turbulence et la rafale, des travaux **préliminaires** ont été conduits pour vérifier sur mer et à des altitudes supérieures à 160 mètres, **les formules** permettant de calculer à partir des données AROME des diagnostics comparables pour ces grandeurs à ceux issus de données observées. Les résultats de cette étude sont donnés en annexe.

Cette étude analyse les indicateurs suivants :

Type de données	Paramètres
Données traitées (statistiques) du modèle AROME : <ul style="list-style-type: none"> <li>Période : 2000 – 2019</li> <li>Localisation : zone d'intérêt</li> <li>niveaux 40, 100 et 160 m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>intensité de la turbulence tous secteurs confondus : moyenne et Q70,</li> <li>intensité de la turbulence par direction de 30° : moyenne et Q70,</li> <li>exposant alpha de cisaillement vertical de la force du vent, avec différenciation jour/nuit et par direction de 30° pour les couches 40 – 100 m, 100 – 160 m et 40 – 160 m,</li> <li>vent en rafale (force et direction) : quantiles des durées de retour 50 ans de la force de rafale, bornes inférieures et supérieures pour l'intervalle de confiance à 70 %, et analyse fréquentielle par secteur de 30°.</li> </ul>
Analyse fréquentielle AROME : <ul style="list-style-type: none"> <li>Période : 2000 – 2019</li> <li>Localisation : zone d'intérêt</li> <li>niveaux 40, 100 et 160 m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>l'intensité moyenne de la turbulence par bin de vent moyen de 1 m/s ;</li> <li>Q70 de la turbulence par bin de vent moyen de 1 m/s (permettant d'établir le Iref de la Norme IEC – 61400-1 – 2019)</li> <li>l'écart-type de l'intensité de turbulence par bin de vent moyen de 1 m/s ;</li> <li>l'intensité de turbulence extrême, avec une période de récurrence de 50 ans, par bin de vent moyen de 1 m/s</li> <li>la valeur moyenne de l'exposant alpha de cisaillement du vent, par bin de vent moyen 1 m/s</li> <li>la moyenne globale de l'exposant alpha de cisaillement du vent (tous bins confondus).</li> </ul>

Des informations relatives à la turbulence atmosphérique et aux données AROME utilisées pour calculer les indicateurs de turbulence retenus sont fournies. Une fois rappelée la méthodologie à appliquer pour le calcul des indicateurs de turbulence, les principaux résultats obtenus sont présentés sous forme cartographique et suivis d'éléments sur les incertitudes associées aux données fournies.

À noter que les données livrées en complément de ce rapport, contiennent les séries horaires de rafales (force et direction) à 200 m, en plus des niveaux 40, 100 et 160 m.

Les principales conclusions sont les suivantes :

La moyenne et le quantile Q70 des intensités de turbulence aux niveaux 40, 100 et 160 m sont calculés tous secteurs confondus et par secteurs de direction de 30°. Ces intensités sont aussi calculées par bin de vent moyen de 1 m/s.

Pour la zone de Bretagne, nous avons constaté une **diminution de cette intensité de turbulence avec l'altitude**, et une **turbulence plus forte avec les vents de secteur nord**. D'autre part, l'analyse des sorties par bin montre que **l'intensité est maximale pour les vents très faibles et diminue rapidement avec la force du vent, puis remonte faiblement**.

Les **exposants du cisaillement vertical du vent** (coefficient  $\alpha$ ) tous secteurs confondus et par secteurs de direction de 30° avec une différenciation jour-nuit sont calculés sur la zone d'intérêt. De même, ce calcul a été également réalisé par intervalles (bins) de vent moyen au pas de 1 m/s, avec là encore une différenciation jour-nuit.

Pour la zone Bretagne, nous constatons une **diminution du coefficient de cisaillement avec l'altitude, et des coefficients plus élevés par vent de secteur sud**. L'analyse des bins montre que **le coefficient augmente avec la force du vent**. La différenciation jour-nuit permet de constater que **les coefficients sont plus élevés la nuit que le jour, sauf pour les vents de 3 m/s**.

Quel que soit le niveau considéré, les roses de vent de rafales sont spatialement assez **homogènes en force** bien que les vents soient un peu moins soutenus sur la partie nord-nord-est de la zone ; la direction dominante est nord-ouest à sud-ouest. En termes de rafale cinquantennale, **les valeurs les plus élevées se situent essentiellement dans la partie nord de la zone**, pouvant dépasser les 50 m/s au-dessus de 100 m, associé à des incertitudes (intervalle de confiance 70 %) de l'ordre de  $\pm 10$  à 13 % selon les niveaux.

Les indicateurs de turbulence mis à disposition, que ce soit l'intensité de turbulence, les rafales, l'exposant du cisaillement de vent, permettent ainsi d'accéder à une estimation et une climatologie de la turbulence atmosphérique sur le domaine couvert par cette étude.

## Table des matières

1	Contexte de l'étude	1
2	Notions de turbulence atmosphérique	2
2.1	Qu'est-ce que la turbulence ?	2
2.2	L'atmosphère : un milieu turbulent	2
2.3	La Couche Limite Atmosphérique	3
2.3.1	Mécanisme de la Couche Limite Atmosphérique	3
2.3.2	Évolution diurne de la Couche Limite Atmosphérique	4
2.4	Le vent dans la CLA	5
2.4.1	Analyse spectrale de la force du vent	5
2.4.2	Profil vertical du vent moyen	6
2.5	L'énergie cinétique turbulente	7
3	Utilisation de données AROME pour diagnostiquer la turbulence	8
3.1	La base de données issues d'AROME	8
3.2	Le schéma de turbulence dans AROME	10
3.3	La TKE dans AROME	11
3.3.1	Calcul et évaluation de la TKE	11
3.3.2	La TKE sur mer	12
3.4	Le vent dans AROME	13
3.4.1	Évaluation du vent moyen dans AROME	13
3.4.2	La rafale de vent dans AROME	13
4	Diagnostiques de la turbulence et méthodologie de calculs	14
4.1	Rafale	15
4.1.1	Formule d'estimation de la rafale	15
4.1.2	Rafale cinquantennale	15
4.2	Intensité de turbulence	16
4.2.1	Formule d'estimation de la turbulence	16
4.2.2	Intensité de turbulence cinquantennale	17
4.3	Exposant du cisaillement de vent ( $\alpha$ )	17
5	Résultats des diagnostics de la turbulence	18
5.1	Intensité de turbulence	19
5.1.1	Intensité de turbulence tous secteurs et tous bins confondus	20
5.1.2	Intensité de turbulence par secteur de direction de vent	22
5.1.3	Intensité de turbulence par bin de force de vent	35
5.1.4	Durée de retour cinquantennale	39
5.2	Rafale	40
5.2.1	Rafales modélisées à 40 m	41
5.2.2	Rafales modélisées à 100 m	43
5.2.3	Rafales modélisées à 160 m	45
5.2.4	Rafales cinquantennales	47
5.3	Exposant du cisaillement de vent ( $\alpha$ )	62
5.3.1	Coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent tous secteurs confondus	63
5.3.2	Coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent par secteur	64
5.3.3	Coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent par bin de 1 m/s	71



---

6	Incertitudes associées aux données fournies	73
6.1	Incertitude sur les intensités de turbulence estimées	73
6.2	Incertitude sur l'estimation des rafales	74
6.3	Limites du calcul des durées de retour des rafales cinquantennales	75
6.4	Incertitudes associées au coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent	75
7	Conclusions	76
8	Bibliographie	77
	Annexes	79

## Liste des illustrations

Illustration 2.1: décomposition d'un écoulement turbulent (source Seigneur C., Cours SGE, Modélisation de la pollution atmosphérique, Dynamique, Cerea)	3
Illustration 2.2 : profil moyen journalier de hauteurs de couche limite atmosphérique calculées à partir d'AROME réseau 00H pour le site de Bordeaux-Mérignac, sur la période du 01/07/2012 au 30/07/2013, source CNRM, Météo-France. Le calcul est issu d'une méthode basée sur le dépassement d'une valeur critique du nombre « bulk » de Richardson afin d'en déduire des hauteurs de la couche limite. C'est la même méthode qui est appliquée pour les données modèle et les données d'observation du radiosondage.	5
Illustration 2.3 : spectre de densité de puissance représentative de la vitesse horizontale du vent à 100 m au-dessus du sol d'après Van der Hoven (1957)	6
Illustration 2.4 : schéma de la cascade d'énergie	7
Illustration 3.1 : domaine France couvert par AROME	9
Illustration 3.2 : profils verticaux de l'énergie cinétique turbulente issue d'AROME (lignes pleines) et d'ARPEGE (lignes en pointillés) de 1200 à 1800 UTC avec observations disponibles, source article « Boundary-layer turbulent processes and mesoscale variability represented by Numerical Weather Prediction models during the BLLAST campaign », Couvreur et al.	12
Illustration 5.1 : cartes des moyennes et Q70 de l'intensité de turbulence (notée IT dans cette étude) aux niveaux 40 m, 100 m, 160 m tous secteurs confondus pour la zone Bretagne, calculées à partir des données AROME (2000-2019)	21
Illustration 5.2 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par secteur de direction de 30° pour la zone Bretagne, calculées à partir des données AROME (2000-2019)	24
Illustration 5.3 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par secteur de direction de 30° pour la zone Bretagne, calculés à partir des données AROME (2000-2019)	26
Illustration 5.4 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par secteur de direction de 30° pour la zone Bretagne, calculées à partir des données AROME (2000-2019)	28
Illustration 5.5 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par secteur de direction de 30° pour la zone Bretagne, calculés à partir des données AROME (2000-2019)	30
Illustration 5.6 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par secteur de direction de 30° pour la zone Bretagne, calculées à partir des données AROME (2000-2019)	32
Illustration 5.7 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par secteur de direction de 30° pour la zone Bretagne, calculés à partir des données AROME (2000-2019)	34
Illustration 5.8: cartes des moyennes (ligne 1) et du Q70 (ligne 2) de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par bin de 1 m/s pour la zone Bretagne, calculées à partir des données AROME (2000-2019)	36
Illustration 5.9: cartes des moyennes (ligne 1) et du Q70 (ligne 2) de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par bin de 1 m/s pour la zone Bretagne, calculées à partir des données AROME (2000-2019)	37
Illustration 5.10: cartes des moyennes (ligne 1) et du Q70 (ligne 2) de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par bin de 1 m/s pour la zone Bretagne, calculées à partir des données AROME (2000-2019)	38
Illustration 5.11: Moyenne sur la zone d'intérêt Bretagne de la moyenne de l'intensité de turbulence, en fonction de la force du vent (m/s) en abscisse. Période 2000-2019, 100 mètres	39
Illustration 5.12: Quantiles d'intensité de turbulence pour une durée de retour de 50 ans. En haut valeurs des bornes inférieure (à gauche) et supérieure (à droite) de l'intervalle de confiance à	

70 %. Au-dessous, à gauche durée de retour centrale et à droite qualité de l'ajustement (correct en vert, douteux en jaune, orange, rouge et violet).	40
Illustration 5.13: Forces moyennes du vent de rafale sur la zone <i>Bretagne</i> au niveau 40 m sur la période 2000-2019	41
Illustration 5.14: Roses des vents de rafales estimées à 40 m sur la zone <i>Bretagne</i> sur la période 2000-2019	42
Illustration 5.15: Forces moyennes du vent de rafale sur la zone <i>Bretagne</i> au niveau 100 m sur la période 2000-2019	43
Illustration 5.16: Roses des vents de rafales estimées à 100 m sur la période 2000-2019	44
Illustration 5.17: Forces moyennes du vent de rafale sur la zone <i>Bretagne</i> au niveau 160 m sur la période 2000-2019	45
Illustration 5.18: Roses des vents de rafales estimées à 160 m sur la période 2000-2019	46
Illustration 5.19: carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 40 m pour la zone <i>Bretagne</i> , calculés à partir des données AROME (2000-2019)	50
Illustration 5.20 Courbes des quantiles de rafales à 40 m – à gauche, pour le point 40, point de grille le plus proche du LIDAR Nord et à droite pour le point 150, point de grille le plus proche du LIDAR Sud.	51
Illustration 5.21: Cartes des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 100 m pour la zone <i>Bretagne</i> , calculés à partir des données AROME (2000-2019)	55
Illustration 5.22: Courbes des quantiles de rafales à 40 m – à gauche, pour le point 40, point de grille le plus proche du LIDAR Nord et à droite pour le point 150, point de grille le plus proche du LIDAR Sud	56
Illustration 5.23: carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 160 m pour la zone <i>Bretagne</i> , calculés à partir des données AROME (2000-2019)	60
Illustration 5.24: Courbes des quantiles de rafales à 40 m – à gauche, pour le point 40, point de grille le plus proche du LIDAR Nord et à droite pour le point 150, point de grille le plus proche du LIDAR Sud	61
Illustration 5.25 : cartes du coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent pour les couches 40-160 m, 40-100 m, 100-160 m tous secteurs confondus pour la zone <i>Bretagne</i> , calculé à partir des forces du vent AROME (2000-2019)	63
Illustration 5.26 : cartes du coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent pour la couche 40-160 m par secteur de direction de 30° pour la zone <i>Bretagne</i> , calculé à partir du vent AROME (2000-2019)	65
Illustration 5.27 : cartes du coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent pour la couche 40-100 m par secteur de direction de 30° pour la zone <i>Bretagne</i> , calculé à partir du vent AROME (2000-2019)	67
Illustration 5.28 : cartes du coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent pour la couche 100-160 m par secteur de direction de 30° pour la zone <i>Bretagne</i> , calculé à partir du vent AROME (2000-2019)	69
Illustration 5.29: Coefficient $\alpha$ du cisaillement moyen du vent sur la couche 40-160 mètres pour les bins 2,5-3,5, 7,5-8,5 et 14,5-15,5 m/s avec différenciation jour/nuit sur la zone <i>Bretagne</i>	72

## Index des tableaux

Tableau 3.1 : coordonnées du domaine et résolution de la grille pour le domaine France couvert par AROME.....	9
Tableau 4.1 : valeurs de l'exposant $\alpha$ en fonction de la nature du terrain (source <a href="http://eolienne.f4jr.org/vent">http://eolienne.f4jr.org/vent</a> ).....	18

*Tableau 5.1 : plage (borne minimale et borne maximale établies à partir de l'ensemble des points de la zone d'intérêt) des moyennes et quantiles Q70 de l'intensité de turbulence pour les niveaux 40, 100, 160 m par secteurs de direction de 30° du vent pris respectivement au niveau 40 ou 100 ou 160 m.....* 35

*Tableau 5.2 : plage (borne minimale et borne maximale établies à partir des points de la zone d'intérêt Bretagne) des moyennes du coefficient  $\alpha$  pour chacune des trois couches (40-160, 40-100, 100-160 m) par secteurs de direction de 30° du vent au niveau 100 m, sans distinction jour-nuit.....* 70

*Tableau 5.3 : minimum, maximum et moyenne du coefficient  $\alpha$ , obtenus à partir des valeurs  $\alpha$  de l'ensemble des points de grille de la zone d'intérêt de Bretagne fournies pour la couche 40-160 m par secteurs de direction de 30° du vent au niveau 100 m.....* 71

*Tableau 5.4 : Moyenne sur la zone d'intérêt Bretagne du coefficient  $\alpha$  pour les bins de 3, 8 et 15 m/s avec différenciation jour-nuit, dans la couche 40-160 m.....* 73

## Glossaire

Abréviation	Signification
CLA	Couche Limite Atmosphérique
GPD	Generalized Pareto Distribution
TKE	Turbulent Kinetic Energy

# 1 Contexte de l'étude

Cette étude s'intéresse à **la turbulence atmosphérique**, via les propriétés physiques du vent. L'effet de sillage de parc éolien n'entre pas dans le périmètre de cette étude.

Le **domaine couvert** par cette étude est **la zone Bretagne**, zone sur laquelle un projet d'implantation d'éoliennes off-shore est prévu.

L'objectif des travaux de ce lot est de disposer d'éléments de diagnostics de la turbulence atmosphérique afin de minimiser les risques économiques liés aux conditions météorologiques turbulentes sur la zone.

Une précédente étude sur le site de Dunkerque avait permis d'identifier les diagnostics les plus adaptés à l'évaluation de la turbulence atmosphérique dans le contexte de parc éolien off-shore. Ces diagnostics ont été utilisés et complétés dans le cadre de l'AO4-Normandie.

Les **diagnostics de la turbulence fournis** dans le cadre de cette étude sont **calculés à partir de données horaires du modèle météorologique AROME à la résolution horizontale 0,025°** (environ 2,5 km) **sur la période 2000-2019** (profondeur de 20 ans).

Les **formules pour le calcul de ces indicateurs de turbulence** ont été déterminées lors de la préparation de l'étude sur Dunkerque. Ils ont été consolidés dans le cadre de l'étude amont de l'AO4-Normandie, à niveaux supérieurs (180 ou 200 m), grâce aux données de LIDAR sur mer à Dunkerque et Oléron. Cette vérification des formules a fait l'objet d'un rapport qui est de nouveau fourni en annexe I.

Dans une première partie, nous présentons rapidement des informations générales sur la turbulence atmosphérique, les données AROME utilisées pour calculer les indicateurs de turbulence retenus, et enfin les éléments de méthodologie pour le calcul des indicateurs de turbulence.

Puis les principaux résultats obtenus sont présentés sous forme cartographique ainsi que d'éléments sur les incertitudes associées aux données fournies. En complément de ce présent rapport, un ensemble de fichiers au format csv, png ou pdf est fourni contenant les données des diagnostics de turbulence calculés.

## 2 Notions de turbulence atmosphérique

### 2.1 Qu'est-ce que la turbulence ?

La **turbulence** correspond à **des variations de très petite échelle spatiale et temporelle du vent**. Elle prend la forme de **tourbillons et autres mouvements chaotiques** dus à la présence d'obstacles ou à la chaleur dégagée par le sol et la mer. Ces tourbillons ont des **tailles caractéristiques** variant **du millimètre au kilomètre**.

La **turbulence est produite à l'échelle de l'épaisseur de la couche limite** (voir paragraphe 2.3 pour plus de détails sur la notion de couche limite) et **l'origine de sa production est double** ; elle peut être **mécanique** par la variation spatiale du vent (cisaillement du vent) et également **thermique** en raison de l'instabilité thermique de l'atmosphère.

Le cisaillement de vent produit de la turbulence, proportionnellement au gradient vertical de la vitesse du vent. Les inhomogénéités de chaleur ou de densité peuvent contribuer à augmenter ou diminuer la turbulence. La turbulence peut se transporter elle-même.

**En journée, les masses d'air sont plus turbulentes que la nuit** et tendent à changer de direction plus fréquemment.

### 2.2 L'atmosphère : un milieu turbulent

L'observation des écoulements des fluides montre qu'il est possible de distinguer deux grands régimes qui sont, d'une part, le régime d'écoulement non turbulent ou laminaire et, d'autre part, le **régime d'écoulement turbulent**. Ces deux régimes ont été mis en évidence de façon spectaculaire dans l'expérience de Reynolds (1884).

**L'atmosphère est un milieu avec un écoulement turbulent**. Dans un écoulement turbulent, on a coutume de découper la variable, par exemple la vitesse du vent notée ici  $U$ , en deux composantes qui sont les suivantes (voir illustration 2.1) :

- une composante moyenne  $\bar{U}$ ,
- une composante  $U'$  qui représente la fluctuation autour de cette moyenne (la moyenne sur une longue période de cette composante fluctuation est nulle).

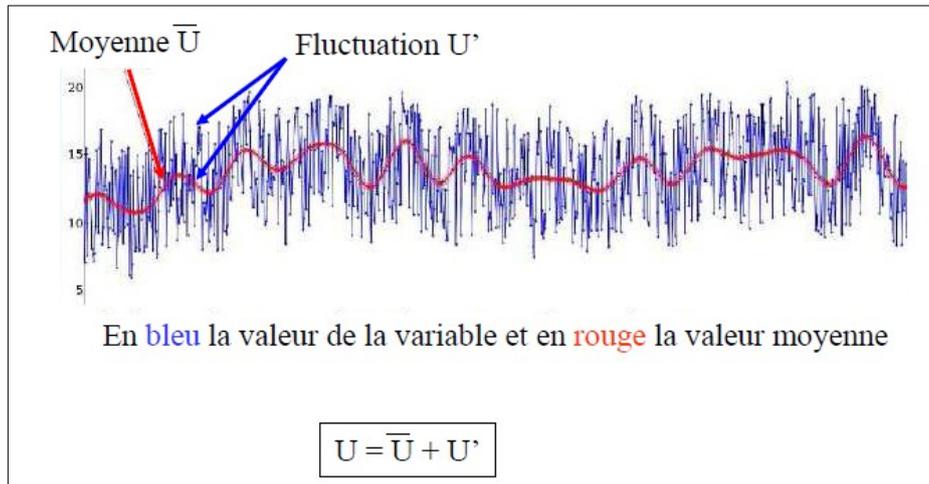


Illustration 2.1: décomposition d'un écoulement turbulent (source Seigneur C., Cours SGE, Modélisation de la pollution atmosphérique, Dynamique, Cerea)

Ainsi, **le mouvement instantané** se décompose comme **la somme d'un mouvement moyen et d'un terme de fluctuation**.

Il est à mentionner également que l'atmosphère peut présenter différentes classes de stabilité. En effet, elle peut être stable, instable ou neutre. La connaissance de ces différents états de stabilité est importante à connaître du fait que la **stabilité atmosphérique intervient dans les processus turbulents** ; elle influence l'évolution du vent sur la verticale ainsi que l'évolution de la turbulence. Une **atmosphère stable limite les mouvements** tandis qu'une **atmosphère instable les renforce**.

**La problématique de cette étude est de s'intéresser à la turbulence atmosphérique dans la couche où se situeront les pales des éoliennes, soit entre 40 et 160 m. Cette couche verticale entre 40 et 160 m se situe dans ce qu'on appelle la Couche Limite Atmosphérique (CLA).**

La Couche Limite Atmosphérique est détaillée dans le paragraphe suivant.

## 2.3 La Couche Limite Atmosphérique

### 2.3.1 Mécanisme de la Couche Limite Atmosphérique

La Couche Limite Atmosphérique (CLA) est en contact avec la surface terrestre.

D'un point de vue dynamique, la **Couche Limite Atmosphérique** est définie comme étant la **zone de l'atmosphère dans laquelle l'écoulement du fluide est influencé directement par l'interaction avec la surface terrestre**. Le temps de réponse à un forçage (qui peut être dû à la rugosité, au relief, à l'évaporation, au transfert de chaleur, etc.) est court, de l'ordre de l'heure.

D'un point de vue thermique, la Couche Limite Atmosphérique est la zone de l'atmosphère au voisinage de la surface terrestre dans laquelle la variation diurne du rayonnement solaire est directement perceptible [Stull, 1988].

Alors que dans l'atmosphère libre, la turbulence est négligeable, **dans la Couche Limite Atmosphérique, la turbulence y est omniprésente** [De Moor, 2000]. À proximité du sol, les forces de frottement sont très importantes, la vitesse moyenne du vent est faible et la turbulence y est élevée. **Avec l'altitude, la vitesse moyenne du vent croît alors que la turbulence diminue.**

Dans la Couche Limite Atmosphérique, l'**influence de la surface est dynamique** et également **convective**. L'influence dynamique correspond à l'effet du frottement lié aux gradients verticaux de vitesse air/surface alors que l'influence convective est liée à l'effet du champ de pesanteur sur le profil de la masse volumique lié aux gradients verticaux de température ou d'humidité air/surface. Ces deux effets produisent de la turbulence.

Au voisinage de la surface terrestre, le mouvement de l'air présente le plus souvent un caractère turbulent.

### 2.3.2 Évolution diurne de la Couche Limite Atmosphérique

**L'épaisseur de la CLA varie dans le temps et l'espace.** Son ordre de grandeur est de l'ordre du kilomètre et varie de quelques mètres à environ 4 000 m. Cette épaisseur de la CLA est souvent nommée hauteur de la couche limite. En théorie, elle correspond donc à la hauteur à partir de laquelle l'atmosphère n'est plus directement influencée par les interactions avec le sol.

**La hauteur de la CLA présente une évolution diurne** (voir illustration 2.2). En journée, le sol réchauffe la CLA par transfert turbulent, provoquant un épaissement de la CLA l'après-midi. Le soir, avec le refroidissement du sol, il y a destruction de la turbulence d'origine thermique. La nuit, le mélange turbulent est faible et la CLA diminue et devient mince (stratification stable).

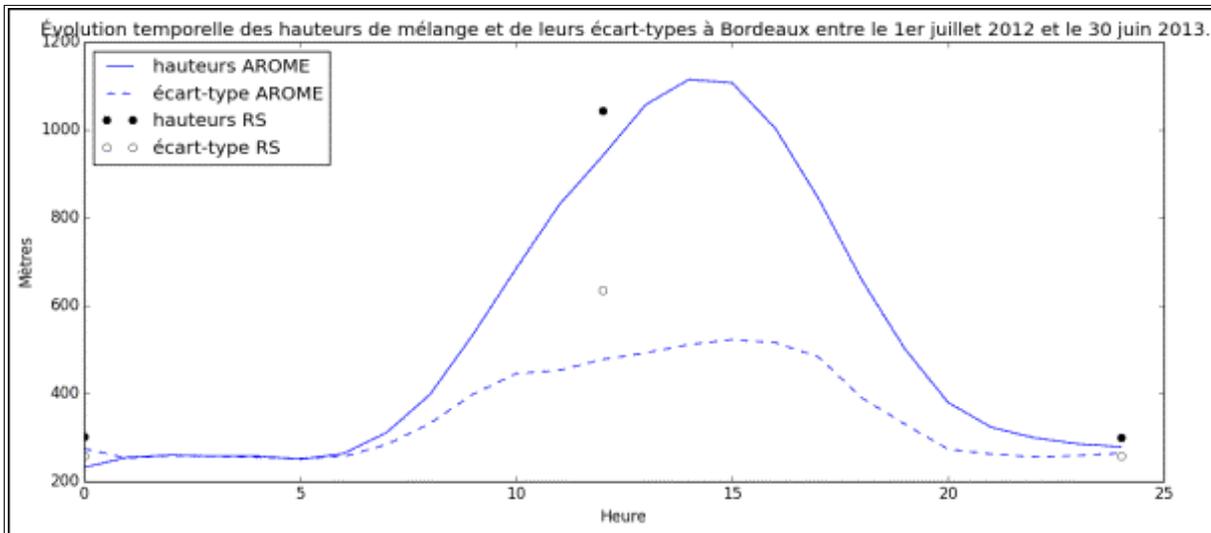


Illustration 2.2 : profil moyen journalier de hauteurs de couche limite atmosphérique calculées à partir d'AROME réseau 00H pour le site de Bordeaux-Mérignac, sur la période du 01/07/2012 au 30/07/2013, source CNRM, Météo-France. Le calcul est issu d'une méthode basée sur le dépassement d'une valeur critique du nombre « bulk » de Richardson afin d'en déduire des hauteurs de la couche limite. C'est la même méthode qui est appliquée pour les données modèle et les données d'observation du radiosondage.

**Sur mer, la hauteur de la couche limite atmosphérique est plus réduite que sur terre**, avec une altitude moyenne de 200-300 m et une altitude maximale vers 400 m. Elle est **globalement constante** en présentant **peu de fluctuation verticale dans le temps** : il y a peu d'évolution diurne de la hauteur de la couche limite en mer, du fait du cycle diurne de la température moins marqué que sur terre.

## 2.4 Le vent dans la CLA

### 2.4.1 Analyse spectrale de la force du vent

Dans la Couche Limite Atmosphérique, l'analyse spectrale de la vitesse du vent permet de mettre en évidence plusieurs échelles temporelles de fluctuation (voir illustration 2.3).

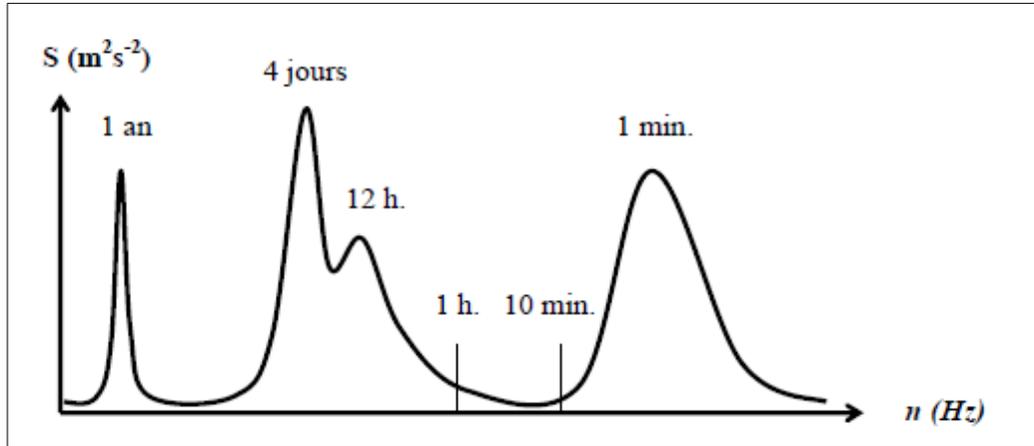


Illustration 2.3 : spectre de densité de puissance représentative de la vitesse horizontale du vent à 100 m au-dessus du sol d'après Van der Hoven (1957)

Cette distribution montre qu'une **partie importante de l'énergie est concentrée sur une période de l'ordre de la minute**, qui correspond à l'échelle des mouvements turbulents. Pour les **périodes comprises entre 10 minutes et 1 heure**, un creux d'énergie est observé, ce qui permet sur cette période de considérer la **vitesse du vent** comme un **processus stationnaire** et comme une somme d'une composante moyenne et d'une composante fluctuante (cf paragraphe 2.2).

## 2.4.2 Profil vertical du vent moyen

La **vitesse moyenne du vent varie avec la hauteur, la rugosité du sol et la topographie du site considéré**.

Pour décrire la variation de la vitesse moyenne avec l'altitude, différentes lois de variation, empiriques ou théoriques, sont utilisées et sont valables lorsque la stabilité de l'atmosphère est neutre.

Parmi elles, citons la **loi logarithmique** qui indique que :

$$\bar{U}(z) = k_T U_{ref} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

avec  $Z$  la hauteur du point considéré au-dessus du sol,  $Z_0$  le paramètre de rugosité en m,  $k_T$  un coefficient sans dimension fonction de la rugosité et  $U_{ref}$  la vitesse de référence. Cette formule est applicable pour une altitude  $Z > 20 * Z_0$ .

La **loi puissance** est une loi aussi souvent utilisée et prend la forme suivante :

$$\bar{U}(z) = U_{ref} \left( \frac{z}{Z_{ref}} \right)^\alpha$$

avec  $U_{ref}$  la vitesse à la hauteur  $Z_{ref}$ , du point considéré au-dessus du sol,  $\alpha$  un nombre sans dimension fonction de la rugosité du site.

Cette **grandeur  $\alpha$**  correspond au **coefficient de cisaillement vertical de la force du vent**. Il peut être utilisé comme un indicateur de la turbulence atmosphérique.

**Alors que la vitesse moyenne du vent varie avec la hauteur, la rugosité du sol et la topographie du site considéré, la turbulence, elle, est principalement fonction de la rugosité du site et varie sur la verticale dans la couche limite.** On peut caractériser ces variations de la turbulence avec celles des coefficients d'échange ; ces coefficients d'échange dépendent de l'énergie cinétique turbulente (grandeur qui est expliquée dans le paragraphe suivant), de la longueur de mélange et de fonctions de stabilité, ces trois termes variant avec l'altitude.

## 2.5 L'énergie cinétique turbulente

**L'énergie cinétique turbulente provient de l'énergie cinétique du mouvement moyen.** Le transfert de l'énergie cinétique dans un écoulement turbulent se fait de l'écoulement moyen vers les mouvements turbulents (tourbillons ou « eddies »). Ce **transfert d'énergie** se fait via une **cascade d'énergie des grands ou gros tourbillons (fluctuations) vers les plus petits tourbillons**, jusqu'à dissipation de l'énergie cinétique turbulente en chaleur (énergie cinétique moléculaire). Cette cascade de l'énergie (voir illustration 2.4) est ainsi décrite par L.F. Richardson en ces termes en 1922 : « Big whirls have little whirls that feed on their velocity and little whirls have lessler whirls and so on to viscosity in the molecular sense. »

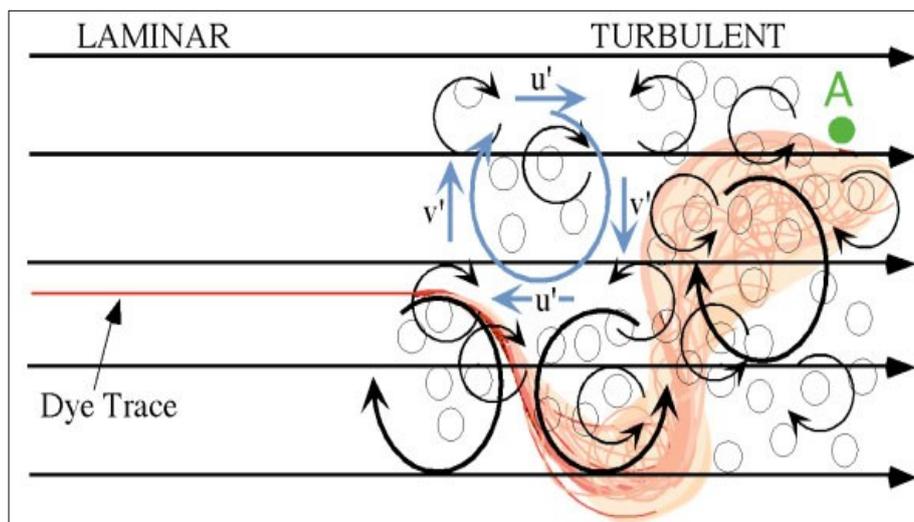


Illustration 2.4 : schéma de la cascade d'énergie

L'unité de la TKE (Turbulent Kinetic Energy ou Énergie Cinétique Turbulente) est le  $m^2 s^{-2}$ , ce qui correspond bien à une énergie massique.

**L'énergie cinétique turbulente donne une indication sur la turbulence.**

La turbulence est directement responsable du transport de chaleur, humidité et quantité de mouvement dans la Couche Limite Atmosphérique.

**La TKE est un indicateur de l'état de turbulence** : ainsi, **si la TKE est importante, la couche est fortement turbulente** alors que **si la TKE est faible, la couche est moins turbulente** et se rapproche de l'état laminaire.

**La TKE augmente ou diminue selon certains processus.** Ces processus correspondent à de l'advection de la turbulence par le vent moyen, de la production dynamique ou thermique, du transport par les mouvements turbulents, par les perturbations de pression et par dissipation de l'énergie.

Le vent transporte de la TKE d'un endroit à un autre. Ainsi, la turbulence peut diminuer ou augmenter localement si le vent apporte de l'air provenant respectivement de régions moins ou plus turbulentes. Les sources principales de l'énergie cinétique turbulente dans la CLA sont le cisaillement de vent et la convection [Wichers Schreur B., Geertsema G., article [Theory for a TKE based parameterization of wind gusts](#)].

**La TKE est calculée à partir des écarts-types des trois composantes du vent notées u, v, w.** La formule permettant d'accéder à la TKE à partir des trois composantes du vent est la suivante :

$$TKE = 0,5 \left[ \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right] = 0,5 \left[ \sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2 \right]$$

**Dans un modèle météorologique** comme **AROME**, la **TKE** est un **paramètre pronostique** (variable pour laquelle l'évolution temporelle est explicitement calculée par le modèle) qui représente l'énergie cinétique des mouvements qui ne sont pas décrits explicitement par les modèles atmosphériques, car étant d'échelle très inférieure à la maille de ces modèles.

## 3 Utilisation de données AROME pour diagnostiquer la turbulence

### 3.1 La base de données issues d'AROME

L'analyse de la turbulence réalisée dans le cadre de cette étude s'appuie sur une évaluation de la turbulence atmosphérique à partir de données modélisées par AROME à la résolution horizontale  $0,025^\circ$  (2,5 km) au pas de temps horaire sur une profondeur de 20 ans (période 2000-2019).

**AROME est un système de prévision numérique atmosphérique à aire limitée** composé de :

- un système d'assimilation de données qui permet de fournir à partir des dernières observations le meilleur état initial possible au modèle de prévision,
- un modèle de prévision qui, en utilisant des paramétrisations physiques, à partir d'un état initial, calcule l'évolution de variables atmosphériques (température, vent, humidité, etc.) jusqu'à une échéance de quelques jours. Les paramétrisations physiques servent à représenter des phénomènes qui se passent à une échelle plus petite que la maille du modèle, comme la turbulence.

AROME est opérationnel depuis décembre 2008 à Météo-France pour la prévision à courte échéance. Ce modèle peut être utilisé pour des applications opérationnelles ainsi que pour des besoins scientifiques d'étude de paramètres météorologiques.

La base de données AROME de 20 ans (2000-2019) est disponible sur le domaine France élargie (voir tableau 3.1 et illustration 3.1) au pas de temps horaire. Cette base de données a été constituée à partir d'un rejeu du modèle sur la période 2000-2009 et complétée par les données de la production opérationnelle AROME sur la période 2010-2019. La partie rejeu a été construite par descente dynamique d'échelle à partir de la réanalyse ERA-INTERIM du Centre Européen de Prévision et d'un modèle intermédiaire (ALADIN à la résolution horizontale de 15 km) avec application d'une analyse de surface intégrant des observations de surface. Lors de la constitution de cette base de données, une phase de vérification d'absence de rupture d'homogénéité liée à l'usage de ces deux sources différentes a été effectuée et les données de vent issues d'AROME (rejeu + partie opérationnelle) ont été comparées à des données de sodar sur terre aux niveaux verticaux 50, 100, 150 m avec calculs des critères des roses de vent.

Grille	Nb de lignes	Nb de colonnes	Latitude minimale	Longitude minimale	Latitude maximale	Longitude maximale	Pas en latitude	Pas en longitude
FRANGP0025	421	661	41°N	6°W	51,5°N	10,5°E	0,025°	0,025°

Tableau 3.1 : coordonnées du domaine et résolution de la grille pour le domaine France couvert par AROME

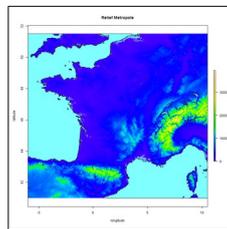


Illustration 3.1 : domaine France couvert par AROME

Le pas de temps de calcul d'AROME est de l'ordre de la minute et ses sorties sont stockées au pas de temps horaire.

Concernant la sortie horaire du vent, elle correspond à la valeur du vent sur le dernier pas de temps du modèle précédant l'heure HH ; le vent à HH correspond au vent entre HH-Xs (X secondes étant le pas de temps du modèle AROME) et HH. Ceci étant, comme la maille du modèle est de 2,5 km, **ce vent est plutôt représentatif d'un vent moyen 10 minutes** : il faut environ 10 minutes à une particule d'air pour traverser la maille avec un vent de 4 m/s constant sur toute la maille.

Pour la sortie horaire de la rafale dans AROME, il faut préciser que c'est une rafale calculée sur une période d'une heure ; elle est issue d'un diagnostic calculé à chaque pas de temps du modèle, dont on cherche le maximum sur une heure. **La rafale AROME est représentative d'une rafale 3 secondes.**

## 3.2 Le schéma de turbulence dans AROME

La physique du modèle AROME est décrite dans l'article de Seity Y et al. (2011) intitulé « The AROME-France Convective-Scale Operational Model » avec notamment son schéma de turbulence ainsi que dans l'article de Cuxart et al. (2000).

Pour paramétrer la turbulence, AROME à 2,5 km de résolution horizontale utilise un **schéma de turbulence 1D** ; cela signifie que, dans AROME, le schéma repose sur l'hypothèse que les échanges se font verticalement et donc par simplification uniquement en 1D sur la colonne verticale et que les flux turbulents horizontaux sont négligés.

En dessous de 500 m de résolution, un schéma 3D est recommandé (Honnert R. et Masson V., 2014). Pour une résolution entre 2 km et 500 m, on est dans ce qu'on appelle la zone grise de la turbulence. La zone grise correspond à la frontière entre une turbulence entièrement paramétrée (comme dans AROME) et une turbulence très majoritairement résolue (comme dans des modèles d'échelle fine dits LES pour Large-Eddy Simulations) : une partie de la turbulence est résolue et une partie doit être paramétrée ; la partie dynamique résout des termes explicitement, mais on a encore besoin de paramétrisation. Au vu des caractéristiques de la couche limite marine considérée dans cette étude, le modèle AROME à 2,5 km de résolution horizontale se situe en dehors de la zone grise de la turbulence et sa paramétrisation de la turbulence est adaptée (Honnert R. et al., 2011).

Le schéma de turbulence d'AROME est dans l'état de l'art de ce qu'il est possible de faire aujourd'hui. Il présente certaines faiblesses dans les cas stables dans lesquels le vent est relativement faible. Sur mer, AROME utilise un schéma spécifique dénommé ECUME (schéma de surface pour l'atmosphère au-dessus des océans) permettant une différenciation des coefficients d'échange turbulents pour le vent, la chaleur et l'humidité en fonction du vent. Sur les lacs, la formule de Charnock est utilisée, faisant ainsi varier la longueur de rugosité sur cette surface en fonction de la vitesse de frottement  $u^*$ , et donc en fonction de l'intensité de la turbulence, ceci afin d'introduire l'effet dû à la formation de vagues par vent fort avec l'augmentation de la vitesse de frottement et de la rugosité  $z_0$ . Hormis la prise en compte d'une longueur de rugosité spécifique

selon le milieu, le schéma de turbulence d'AROME ne fait pas de différence entre les zones terrestres ou maritimes.

Les échelles spatiales (résolution effective) pleinement résolues par le modèle AROME 2,5 km correspondent à des échelles au moins égales à six à neuf fois la taille de la résolution de la maille [Ricard et al., 2013], AROME étant un modèle spectral avec advection semi-lagrangienne. Le schéma de turbulence permet de représenter de façon paramétrique (1D) la turbulence non résolue d'échelle inférieure (représentation dite sous-maille).

## 3.3 La TKE dans AROME

### 3.3.1 Calcul et évaluation de la TKE

**Dans le modèle AROME, la variable TKE correspond à l'énergie cinétique turbulente moyenne calculée sur le pas de temps du modèle qui est d'une minute.** Le calcul de la physique est appliqué à chaque pas de temps. De ce calcul, les variances des trois composantes du vent (u, v et w) en sont déduites et par conséquent, la grandeur TKE, selon la formule :

$$TKE = 0,5 \left[ \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right] = 0,5 \left[ \sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2 \right]$$

La TKE est transportée, ce transport étant réalisé par le schéma d'advection semi-lagrangien [Seity et al., 2011].

**La TKE prend bien en compte la contribution thermique et également dynamique et est ainsi un indicateur pertinent pour le diagnostic de la turbulence atmosphérique.**

La TKE est disponible en sortie d'AROME à différents niveaux hauteurs.

À ce jour, des évaluations pour les champs relatifs à la couche limite d'AROME ont été réalisées pour le domaine terrestre, mais on ne dispose pas d'évaluation spécifique sur le domaine maritime, en raison de la faible disponibilité d'observations sur ces zones. Couvreur et al., 2016 fournit des éléments sur ces évaluations. Dans cet article ils évaluent la capacité de trois modèles opérationnels (AROME, ARPEGE et le modèle du CEPMMT) à prévoir les processus turbulents de la couche limite atmosphérique et les variations de petite échelle observées durant la campagne de mesures BLLAST (Boundary Layer Late-Afternoon and Sunset Turbulence) : cette campagne a eu lieu en juin et juillet 2011 à Lannemezan au pied des Pyrénées. Dans cet article, pour la première fois, la TKE, variable centrale dans le schéma de turbulence d'AROME, est évaluée en la confrontant à des observations et montre qu'**AROME fournit une bonne simulation de la variabilité diurne de la TKE.**

La **TKE est surtout active la journée** avec une décroissance de la TKE au fur et à mesure de l'après-midi (voir illustration 3.2 suite à la campagne BLLAST).

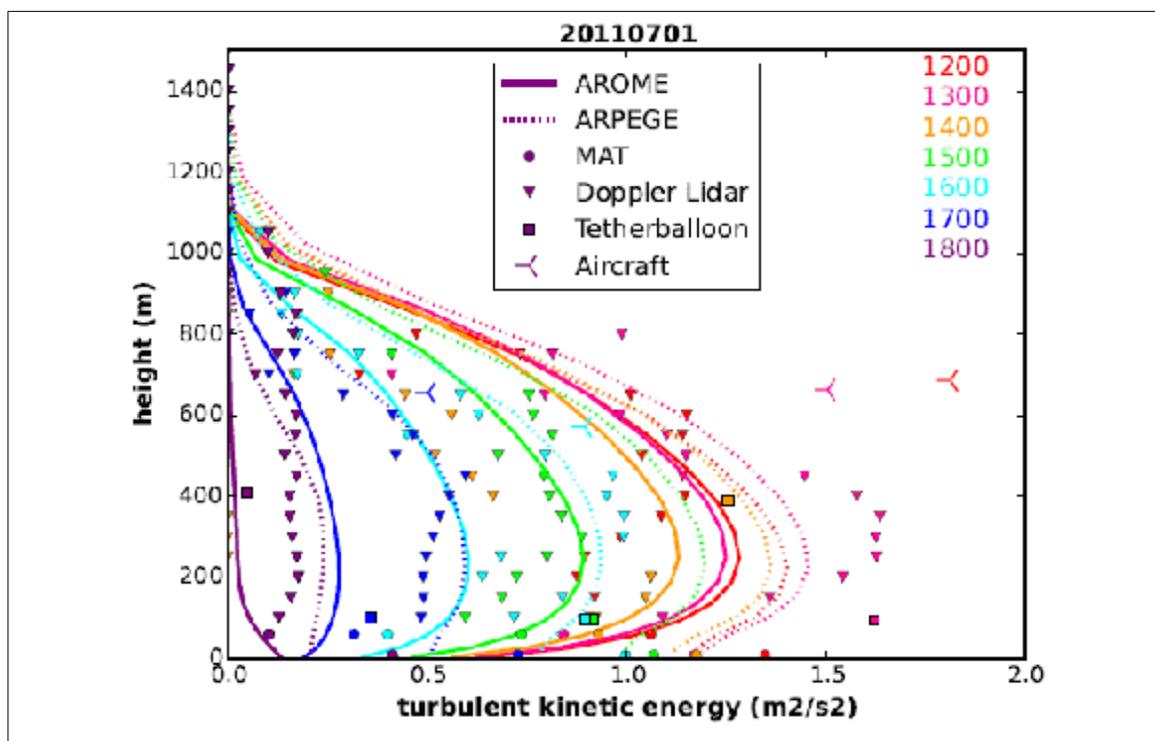


Illustration 3.2 : profils verticaux de l'énergie cinétique turbulente issue d'AROME (lignes pleines) et d'ARPEGE (lignes en pointillés) de 1200 à 1800 UTC avec observations disponibles, source article « Boundary-layer turbulent processes and mesoscale variability represented by Numerical Weather Prediction models during the BLLAST campaign », Couvreur et al.

### 3.3.2 La TKE sur mer

La problématique de la turbulence sur mer est spécifique par rapport à celle sur terre, dans le sens où **sur mer, il y a moins de frottement** ; ainsi, la couche limite est moins développée verticalement que sur terre (se situant plutôt dans les 400 m au-dessus de la mer). Autrement dit, la hauteur de la CLA (point d'annulation des courbes de TKE, visible sur la figure 3.2 à l'intersection avec l'axe des ordonnées) sera plus basse. Sur mer, **la TKE est globalement moins forte que sur terre** (les courbes sur la figure 3.2 seraient ainsi plus décalées vers la gauche dans le cas de profils sur mer) et **le cycle diurne de la TKE est moins marqué**.

Pour rappel, la paramétrisation du schéma de turbulence d'AROME est la même sur terre que sur mer. Par contre, les ordres de grandeur de la TKE sont différents, avec des valeurs de TKE plus importantes sur terre que sur mer, dues aux frottements plus nombreux et plus importants sur terre que sur mer.

## 3.4 Le vent dans AROME

### 3.4.1 Évaluation du vent moyen dans AROME

L'expertise des modélisateurs constate généralement une meilleure qualité des vents dès lors que l'on s'éloigne du sol et des impacts d'une rugosité ou d'un relief local vus de manière simplifiée dans le modèle.

**La modélisation avec AROME**, qu'elle concerne le rejeu en descente dynamique d'échelle ou la période opérationnelle, **montre une très bonne aptitude à reproduire les données de vents observés sur les points de comparaison**. Le modèle AROME s'avère particulièrement bon lorsque l'on considère des hauteurs de 100 et 150 m ou des sites de plaine. Il montre aussi d'excellentes aptitudes à restituer les phénomènes littoraux [Dubois et al., 2015].

Actuellement, une surestimation du vent dans les basses couches est observée lors de phénomènes de convection avec un air très sec près de la surface alors qu'en situation d'Autan ou de Mistral, AROME a tendance à sous-estimer les rafales. Les brises côtières sont assez bien vues par AROME avec la prise en compte des contrastes thermiques. La bonne représentation des brises côtières par AROME est à mentionner ici d'autant plus que la zone Bretagne concernée par cette présente étude est soumise à ce régime de brise (voir rapport du Lot 1 sur la zone Bretagne paragraphe 3.6 sur le phénomène de brise).

### 3.4.2 La rafale de vent dans AROME

Avant de s'intéresser à la modélisation de la rafale dans AROME, donnons tout d'abord une définition de la **rafale**. Une rafale est un **renforcement brutal et passager du vent** ; elle se traduit par une hausse brève et soudaine de la vitesse instantanée du vent en comparaison de la valeur alors acquise par sa vitesse moyenne sur une plage de temps définie. La rafale correspond à une **manifestation stochastique**, c'est-à-dire **aléatoire**. Les rafales peuvent avoir des extensions maximales jusqu'à des échelles de l'ordre du kilomètre et leur durée peut varier d'une fraction de seconde à quelques minutes.

Il existe deux types principaux de rafales : les **rafales turbulentes** et les **rafales convectives**.

- Les rafales turbulentes correspondant à des rafales dans la couche limite ou associées à des tempêtes sont les plus violentes. Dans AROME, le diagnostic de rafales se base sur la mécanique de couche limite créant ces rafales. Si elles sont bien représentées pour les vents modérés, AROME a tendance à les sous-estimer en cas de vent fort, dans les très basses couches (autour de 10 m de hauteur).
- Quant à la deuxième catégorie, les rafales convectives, elles sont liées aux orages et à la convection profonde. Elles sont renforcées par l'évaporation des précipitations sous l'orage. Le diagnostic de rafales d'AROME, basé sur une mécanique de couche limite, les

représente moins bien ; AROME a parfois tendance à les surestimer quand la CLA est très sèche (forte évaporation des précipitations).

La rafale dans AROME est une rafale calculée sur une période d'une heure. Elle est issue d'un diagnostic calculé à chaque pas de temps du modèle (une minute), dont on cherche le maximum sur une heure.

À ce jour, le modèle AROME ne dispose de données de rafales qu'au niveau 10 m. La rafale à 10 m est un paramètre diagnostique, c'est-à-dire qu'il est issu d'un calcul intégrant la valeur des variables pronostiques du modèle à un pas de temps donné sans mémoire du pas de temps précédent. La formule de calcul de la rafale dans AROME est la suivante :

$$RAF_{10m} = FF_{10m} + C * \sqrt{TKE_{20m}}$$

avec  $FF_{10m}$  le vent moyen à 10 m,  $TKE_{20m}$  l'énergie cinétique turbulente à 20 m.

La valeur du coefficient multiplicateur C (3,5 jusqu'au 04/12/2017, puis 3,8 ensuite, pour AROME) est adaptée au modèle météorologique de prévision.

La rafale AROME est représentative de la rafale 3 secondes.

## 4 Diagnostics de la turbulence et méthodologie de calculs

Le choix des algorithmes est réalisé en fonction de la qualité des résultats par rapport à des mesures à disposition (mâts, données lidar) et des orientations obtenues au cours de la recherche bibliographique.

Pour caractériser la turbulence à partir des données AROME, les diagnostics qui ont été retenus et calculés sont les suivants :

- rafale,
- intensité de turbulence,
- coefficient  $\alpha$  correspondant à l'exposant du cisaillement de vent.

Pour la zone Bretagne, l'intensité de turbulence et le coefficient  $\alpha$  sont calculés par classes de secteurs de 30° et par bin (intervalle) de 1 m/s. Le coefficient  $\alpha$  est également calculé pour les heures de jour et de nuit.

## 4.1 Rafale

### 4.1.1 Formule d'estimation de la rafale

Au-dessus de 10 m, le modèle AROME et a fortiori le rejeu AROME ne dispose pas de valeur de rafale.

Les rafales  $FX_z$  sont alors estimées à partir de la formule suivante, qui consiste à reporter l'incrément de rafale à 10 m ( $FX_{10m} - FF_{10m}$ ) au vent moyen  $FF_z$  du niveau hauteur  $z$  considéré du modèle AROME :

$$FX_z = FF_z + (FX_{10m} - FF_{10m})$$

Cet estimateur, établi pour des études précédentes, a fait l'objet d'une étude complémentaire (cf. annexe I), qui conclut qu'il s'agit du meilleur estimateur à disposition.

De même, au-dessus de 10 m, le rejeu AROME ne dispose pas de direction du vent au moment où sa vitesse est maximale dans l'heure. L'hypothèse retenue (cf. annexe I) consiste à dire que cette direction reste très proche de celle du vent moyen à l'heure ronde.

$$DX_z = DD_z$$

### 4.1.2 Rafale cinquantennale

Nous nous intéressons maintenant aux valeurs extrêmes des rafales à **40, 100 et 160 m**. Il s'agit ainsi de **quantifier la rafale à 40, 100 et 160 m associée à une durée de retour de 50 ans ainsi que les bornes de l'intervalle de confiance à 70 %**.

Pour la zone Bretagne, pour chaque point de grille, grâce à la formule retenue d'estimation de la rafale présentée dans le paragraphe précédent, nous disposons de séries chronologiques horaires de rafales de vent entre le 1<sup>er</sup> janvier 2000 et le 31 décembre 2019, soit une période de 20 ans. À partir de ces séries horaires de rafales estimées, pour chacun des 254 points de grille de cette zone, les **séries des valeurs maximales quotidiennes des rafales à 40, 100 m et 160 m ont été constituées sur la période 2000-2019**. La durée de cette période (20 ans) est supérieure à la durée de 10 ans minimale nécessaire pour appliquer la méthode de renouvellement utilisée ici, mais elle reste encore assez limitée et les résultats obtenus en termes de rafales cinquantennales doivent être pris par conséquent avec précaution.

De manière générale, à Météo-France, les durées de retour de vent sont estimées avec la théorie des valeurs extrêmes (TVE) dont la finalité est d'approximer la queue d'une distribution expérimentale par une loi théorique particulière, puis de réaliser des estimations à partir de cette dernière. La mise en application de telles lois repose sur trois hypothèses importantes qui sont les suivantes :

- la **stationnarité** : les séries sont supposées stationnaires (cela revient à faire l'hypothèse d'un régime climatique stable).
- l'**homogénéité** : les mesures sont issues de la même fonction de distribution.
- l'**indépendance** : les événements analysés doivent être indépendants les uns des autres.

Compte tenu de la taille de l'échantillon (inférieur à 30 ans), nous appliquons ici la **loi d'ajustement Pareto Généralisée** ou loi GPD (Generalized Pareto Distribution) qui fait partie des méthodes de renouvellement (aussi appelée méthode « à seuil » utilisant tous les individus supérieurs à un seuil fixé) et qui est décrite en annexe II.

**L'évaluation de l'incertitude** est une **composante essentielle dans l'analyse des valeurs extrêmes**. L'incertitude liée à l'échantillonnage peut être évaluée par la procédure classique de l'intervalle de confiance : l'estimation d'un événement de probabilité  $p$  est incertaine, mais il est possible de donner un intervalle tel qu'il y ait, par exemple, 70 % de chances que la vraie valeur s'y trouve. En pratique, la connaissance de l'intervalle de confiance, notamment via son amplitude, est absolument nécessaire et a autant d'importance que la valeur centrale.

Il faut également garder à l'esprit que les valeurs des quantiles associés à une durée de retour dépendent des informations disponibles au moment de leur évaluation. Un événement ultérieur (ou antérieur à 2000) est toujours susceptible de les contredire.

Pour chaque point de grille de la zone Bretagne, l'échantillon pour les calculs de durée de retour est constitué à partir de l'ensemble des événements de rafales quotidiennes supérieurs à un seuil donné. Ce seuil est variable selon le niveau hauteur considéré. Il est choisi de manière à, conserver en moyenne deux à cinq événements par an. Les calculs des durées de retour se font sur ces échantillons ainsi constitués par point de grille. Pour mettre en œuvre la loi de Pareto, l'échantillon de chaque point de grille est constitué de valeurs dépassant un certain seuil ; ce seuil correspond au seuil optimal au-dessus duquel la distribution relève de la théorie des valeurs extrêmes. Cette détection du seuil est effectuée de manière automatique selon la méthode « MRLP » (Mean Residual Life Plot – graphique de la valeur moyenne des restes) en recherchant à partir de quand ce graphe de la valeur moyenne des restes varie linéairement en fonction du seuil. Il est fait le choix ici d'utiliser un seuil unique par hauteur : il est pris à la médiane des seuils calculés pour chacun des points de la zone. Les quantiles associés à la durée de retour 50 ans sont ensuite calculés pour chaque point de grille par application de la loi d'ajustement Pareto ainsi que les bornes de l'intervalle de confiance à 70 %.

## 4.2 Intensité de turbulence

### 4.2.1 Formule d'estimation de la turbulence

L'intensité de turbulence est calculée avec les champs du modèle AROME selon la formule :

$$IT = \frac{\sqrt{4/3 TKE}}{FF}$$

où TKE est l'énergie cinétique de turbulence et FF la vitesse du vent moyen sur 10 minutes.

## 4.2.2 Intensité de turbulence cinquantennale

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux valeurs extrêmes de l'intensité de turbulence pour les séries temporelles par bin de 1 m/s en vent moyen, et ceci pour les niveaux de 40, 100 et 160 mètres.

Le principe est tout à fait similaire au calcul des valeurs de rafales de durée de retour 50 ans : nous partons d'une série horaire sur 20 années en chacun des 254 points de grille. Pour chaque série, nous calculons, lorsque c'est possible, la valeur d'intensité de turbulence de durée de retour 50 ans ainsi que les valeurs des bornes inférieures et supérieures de l'indice de confiance à 70 %, qui sont incontournables pour interpréter les résultats obtenus.

Les conditions d'application de la méthode GPD à ces séries d'intensité de turbulence sont identiques à celles nécessaires pour calculer les durées de retour sur des rafales de vent : disposer de plus de 10 années de données, ne conserver que les valeurs indépendantes et avoir pour résultat des valeurs cohérentes avec les valeurs présentes en queue de distribution. En plus des données de durée de retour 50 ans, des données de la borne supérieure et de la borne inférieure de l'intervalle de confiance, nous produisons un code qualité de l'ajustement qui permet de tracer les situations suivantes en chaque point :

**KO** : l'ajustement n'a pas convergé. Pas de valeur disponible

**0** : ajustement OK

**1** : 1 point observé hors de l'intervalle de confiance à 70 % (pour les durées de retour > 5 ans)

**2** : 2 points observés hors de l'intervalle de confiance à 70 % (pour les durées de retour > 5 ans)

**3** : 3 points observés hors de l'intervalle de confiance à 70 % (pour les durées de retour > 5 ans)

**>3** : plus de 3 points observés hors de l'intervalle de confiance à 70 % (pour les durées de retour > 5 ans)

## 4.3 Exposant du cisaillement de vent ( $\alpha$ )

Ce paramètre **exposant du cisaillement de vent** (appelé aussi wind shear) est plus facile à calculer à partir des données AROME que les diagnostics précédents (intensité de turbulence et rafale) car la formule appliquée aux mesures peut l'être directement aux paramètres correspondants du modèle.

Comme indiqué dans le livre intitulé « Wind Resource Assessment and Micro-siting » de Zhang page 18, le coefficient  $\alpha$  de cisaillement vertical de vent se définit ainsi sur la couche  $Z_1 - Z_2$  :

$$\alpha = \frac{\ln(F F_2 / F F_1)}{\ln(Z_2 / Z_1)}$$

avec  $FF_1$  la force du vent en m/s au niveau 1 (niveau bas),  $FF_2$  la force du vent en m/s au niveau 2 (niveau haut),  $Z_1$  l'altitude en m au niveau 1 (niveau bas),  $Z_2$  l'altitude en m au niveau 2 (niveau haut).

Le coefficient  $\alpha$  de cisaillement vertical de vent **dépend de la rugosité du sol**. C'est un nombre sans dimension qui varie selon la nature du terrain. Dans la littérature, des valeurs standards du coefficient  $\alpha$  sont proposées (voir tableau 4.1) mais sans que soit précisée la couche verticale associée.

Nature du terrain	Exposant $\alpha$
Plat : neige, glace, mer, marécages, herbes courtes	0,08 à 0,12
<b>Mer</b>	<b>0,13</b>
Peu accidenté : champs et pâturages, cultures	0,13 à 0,16
Rivage	0,16
Plaine	0,20
Accidenté : bois, zones peu habitées	0,20 à 0,23
Plaine boisée	0,24
Très accidenté : villes	0,25 à 0,4

Tableau 4.1 : valeurs de l'exposant  $\alpha$  en fonction de la nature du terrain (source <http://eolienne.f4jr.org/vent>)

Les sites les plus intéressants pour la production éolienne sont ceux pour lesquels l'exposant  $\alpha$  est faible ce qui est le cas en mer où les forces du vent près de la surface sont élevées et la variation de la vitesse de vent avec l'altitude est faible. Ainsi les forces de vent en haut et en bas des éoliennes diffèrent peu et les contraintes cycliques sur les pales des éoliennes sont moins fortes.

## 5 Résultats des diagnostics de la turbulence

La géographie physique et océanique de la zone Bretagne a été présentée en détail dans le livrable du lot 1.

La zone Bretagne étudiée couvre le domaine allant de 46,9875 °N, 4,0125 °O (coin sud-ouest du domaine) à 47,6625 °N, 3,3375 °O (coin nord-est du domaine) et est représentée par 254 points de grille AROME.

Pour cette zone spécifique, que ce soit pour l'intensité de turbulence, les rafales cinquantennales ou le coefficient  $\alpha$ , les résultats sont calculés et accessibles en points de grille. Des cartographies sont fournies par la suite dans ce rapport et dans les livrables. Il est à préciser que pour produire ces cartes il a fallu choisir des palettes de couleurs qui permettent de comparer les cartes entre elles tout en ayant une différenciation de couleurs pour une carte donnée. Nous avons choisi dans ce rapport une palette unique pour les intensités de turbulence hors bin, une palette différente pour les bins. Nous avons procédé de la même façon pour le coefficient  $\alpha$ . Il est également à noter que, sur ces cartes, figure en noir le périmètre de la zone Bretagne. De même, nous avons choisi une palette unique pour les cartes de durées de retour.

## 5.1 Intensité de turbulence

Pour les 254 points de grille AROME de la zone Bretagne, **les séries des intensités de turbulence sont calculées au pas de temps horaire à partir de données AROME à un niveau**

**donné selon la formule** 
$$IT_{AROME} = \frac{\sqrt{2 * (2/3) * TKE_{AROME}}}{FF_{AROME}}$$
 **et sont fournies pour les hauteurs 40, 100, 160 m** dans des fichiers csv qui font partie du livrable.

Chacun de ces fichiers comporte 2 colonnes qui sont pour la première la date au format AAAAMMJJHH (l'heure HH étant exprimée en UTC) et pour la deuxième l'intensité de turbulence (grandeur sans unité). Ces valeurs d'intensités de turbulence proviennent directement des calculs, ce qui explique le nombre important de décimales présents dans ces fichiers mais, bien entendu, toutes ces décimales ne sont pas significatives. Le séparateur de champs est la virgule et le caractère de décimale le point.

Pour chacun des points de grille de cette zone, la moyenne et les valeurs de Q70 de l'intensité de turbulence aux niveaux 40, 100 et 160 m sont calculés et fournis tous secteurs confondus ainsi que par secteur de direction de 30° et par bin de vent de 1 m/s. Les fichiers livrés correspondants contiennent tous 3 colonnes avec l'en-tête : Longitude, Latitude, et valeur de l'intensité de turbulence en ce point (sans unité).

Les cas où les forces du vent (FF) sont inférieures à 0.5 m/s peuvent conduire à de très fortes intensités de turbulence, non représentatives et impactant de manière significative la distribution des fortes valeurs et donc les Q70. Aussi, pour ces cas où les forces du vent sont inférieures à 0.5 m/s, les valeurs d'intensité de turbulence sont mises égales à zéro.

Pour les valeurs d'intensité de turbulence différenciées par secteurs, les directions prises en compte sont celles au niveau où est calculée l'intensité de turbulence.

### 5.1.1 Intensité de turbulence tous secteurs et tous bins confondus

Les cartes des moyennes et du Q70 de l'intensité de turbulence calculées à partir des données AROME pour les niveaux 40, 100, 160 m sont fournies ci-dessous (voir illustration 5.1).

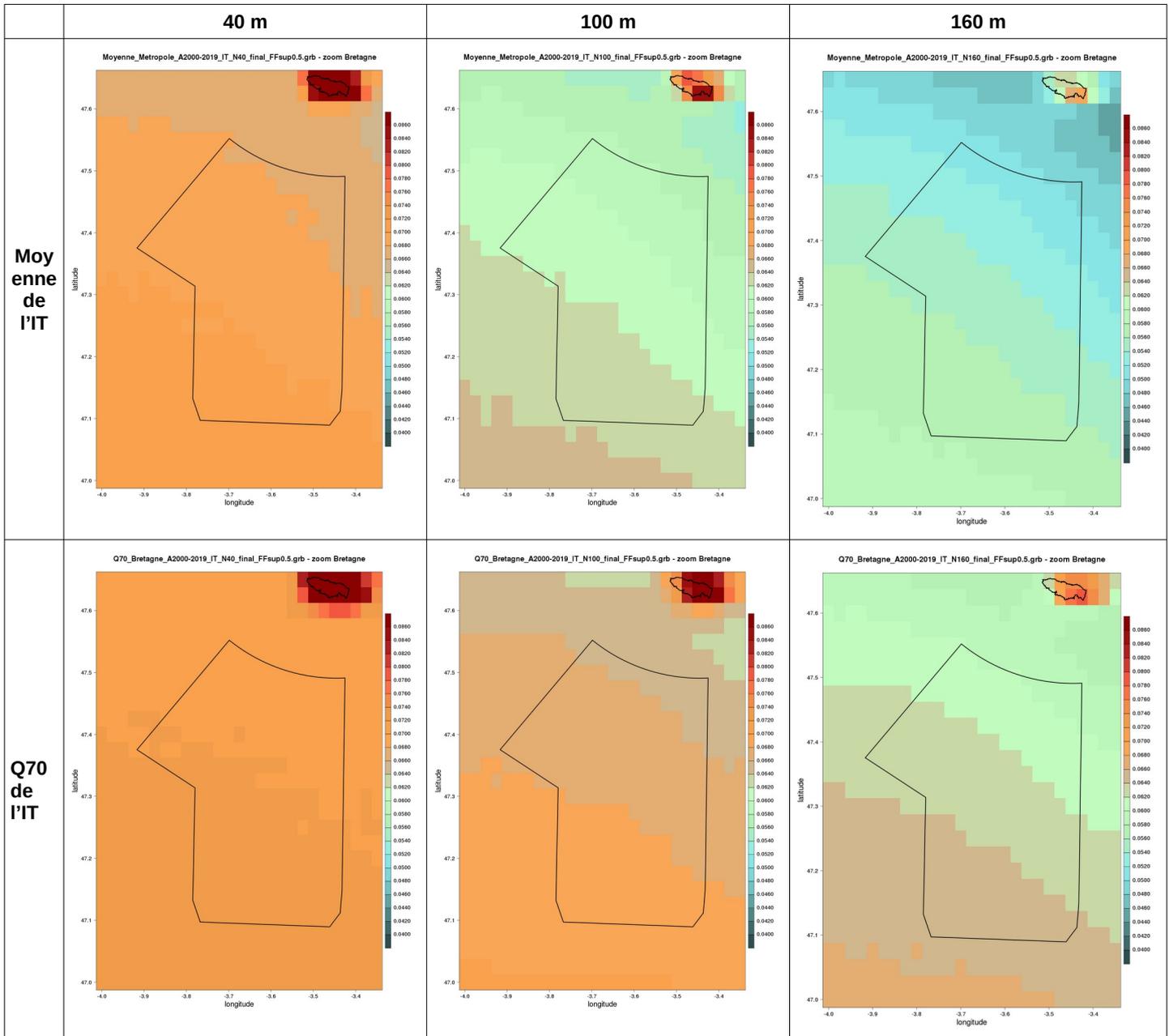


Illustration 5.1 : cartes des moyennes et Q70 de l'intensité de turbulence (notée IT dans cette étude) aux niveaux 40 m, 100 m, 160 m tous secteurs confondus pour la zone Bretagne, calculées à partir des données AROME (2000-2019)

L'analyse sommaire de ces cartes montre bien que, **pour un paramètre statistique donné (moyenne ou Q70), l'intensité de turbulence est plus importante à 40 m, qu'à 100 m et 160 m.** Ceci se voit bien sur les cartes avec des niveaux de couleur différents sur la zone d'intérêt. Ainsi, ces cartes illustrent bien la diminution de l'intensité de turbulence avec l'augmentation de

l'altitude ; les pales des éoliennes rencontreront des intensités de turbulence plus fortes à 40 m qu'à 160 m.

D'autre part, quel que soit le niveau considéré (40, 100, 160 m), ces cartes mettent bien aussi en évidence des **intensités de turbulence plus faibles en mer que sur terre, ici l'île de Groix** avec un noyau de forte intensité sur l'île.

Nous remarquons également un gradient général nord-est/sud-ouest, avec donc une accentuation de l'intensité de turbulence en pleine mer.

Pour l'ensemble de la zone d'implantation (délimitée en noir), la moyenne de l'intensité de turbulence est de l'ordre de 6,9 % à 40 m, de 6,1 % à 100 m, de 5,5 % à 160 m et à ces hauteurs, le Q70 de l'intensité de turbulence varie de 7,2 % à 40 m à 6,3 % à 160 m.

### 5.1.2 Intensité de turbulence par secteur de direction de vent

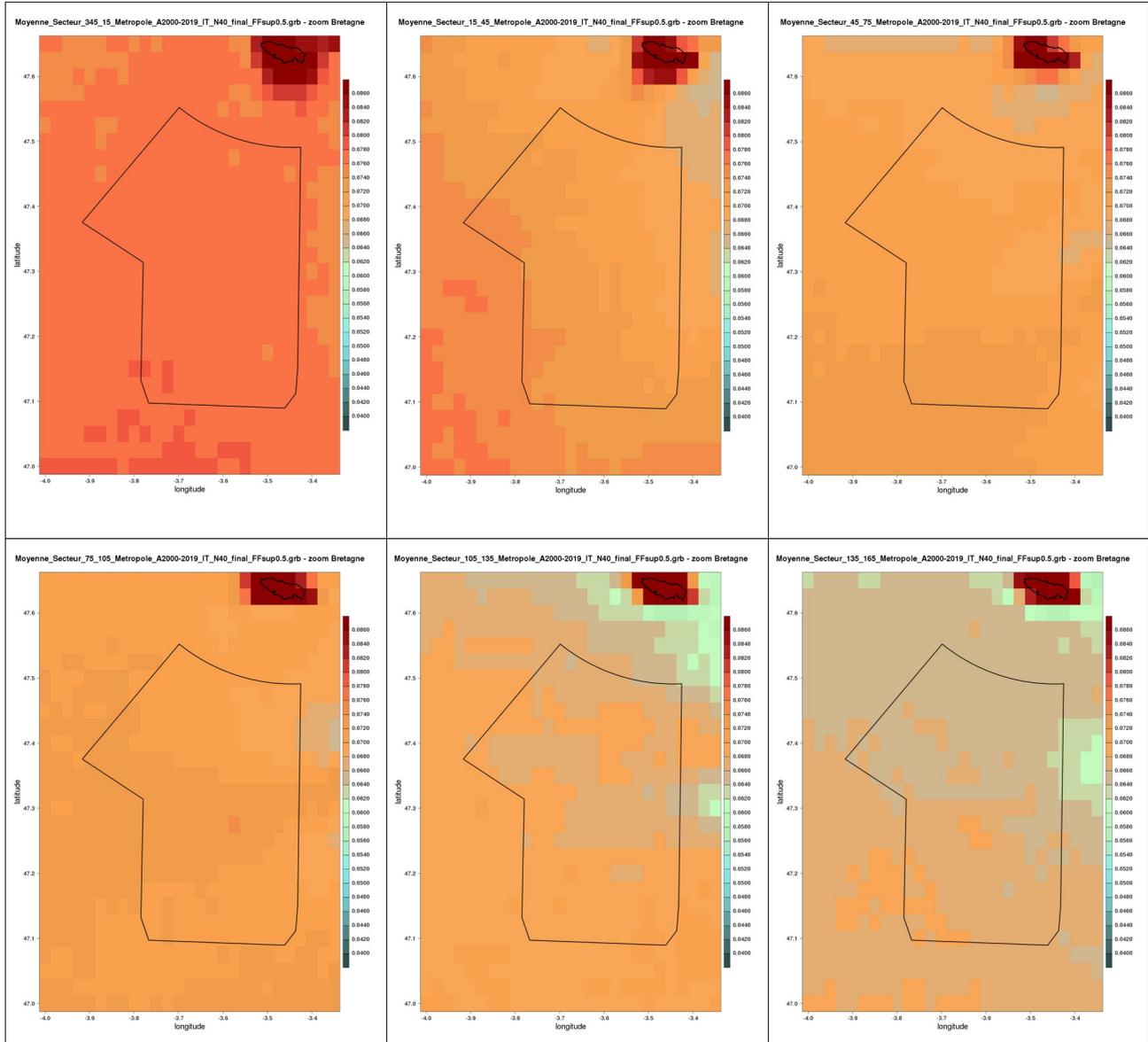
Les cartes des moyennes et du Q70 de l'intensité de turbulence par secteurs de direction calculées à partir des données AROME pour les niveaux 40, 100, 160 m sont fournies ci-dessous.

L'ordre des cartes est le suivant :

<b>N</b>	<b>N-N-E</b>	<b>E-N-E</b>
<b>E</b>	<b>E-S-E</b>	<b>S-S-E</b>

<b>S</b>	<b>S-S-O</b>	<b>O-S-O</b>
<b>O</b>	<b>O-N-O</b>	<b>N-N-O</b>

## 5 Résultats des diagnostics de la turbulence



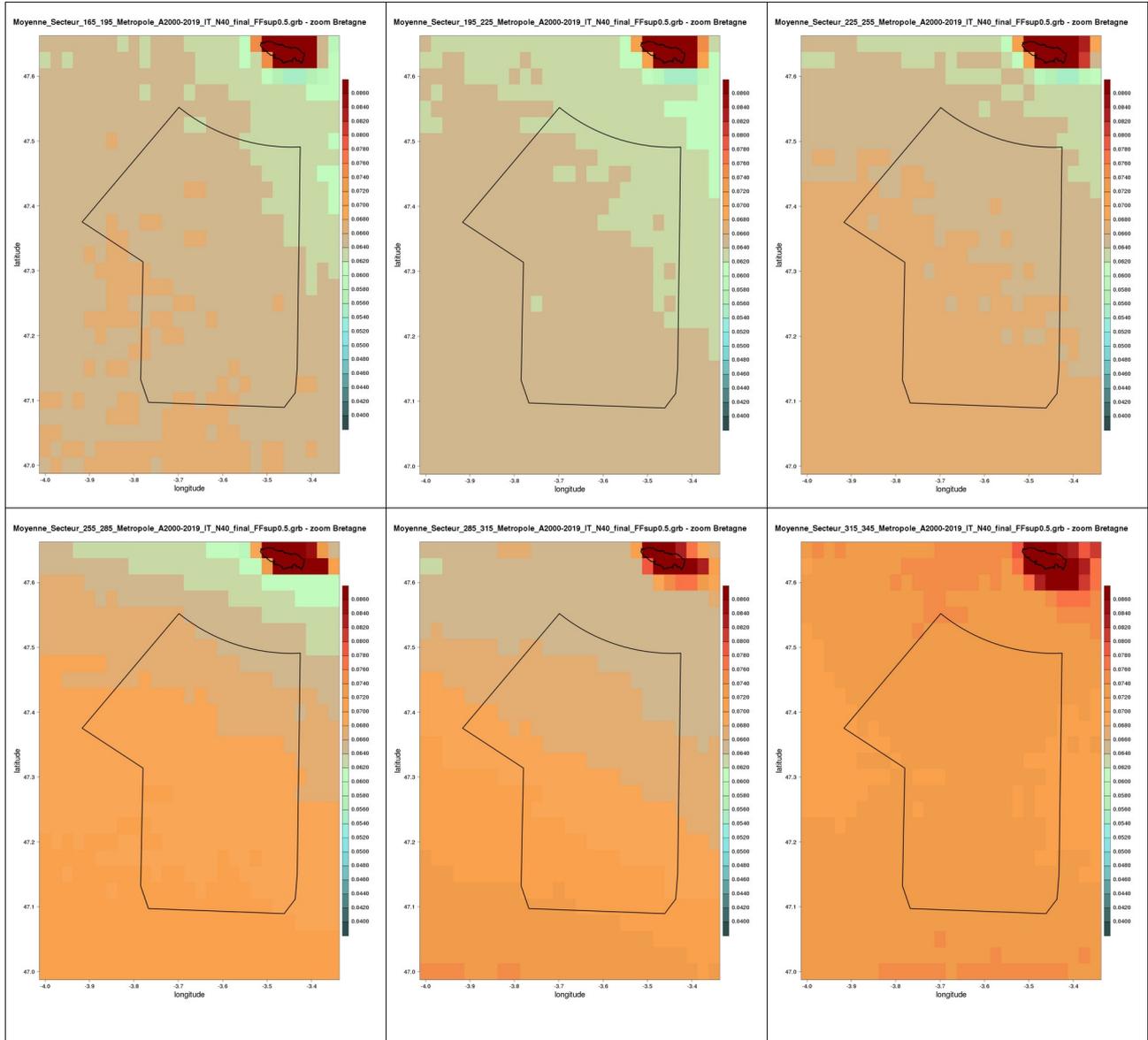
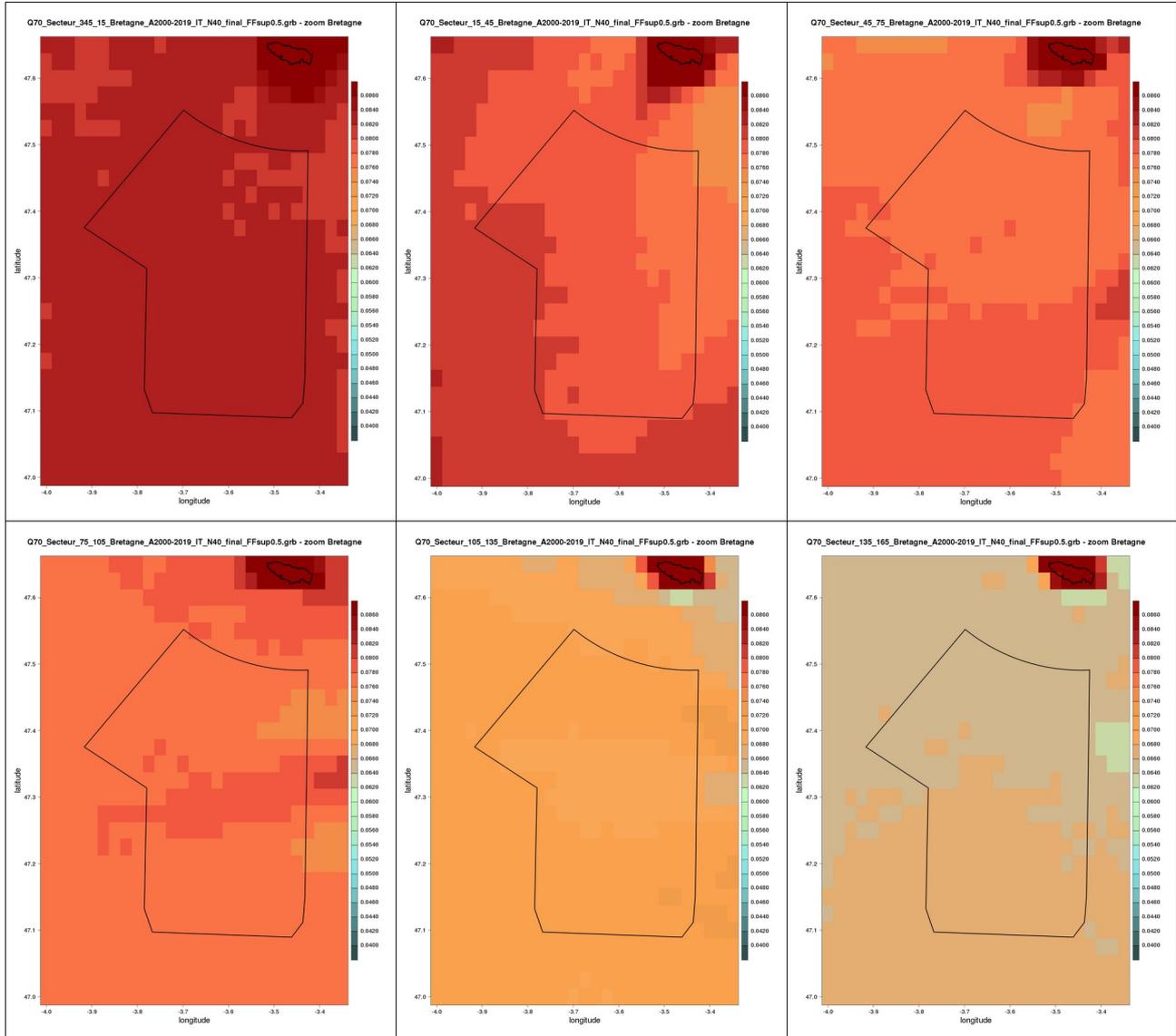


Illustration 5.2 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par secteur de direction de 30° pour la zone Bretagne, calculées à partir des données AROME (2000-2019)

## 5 Résultats des diagnostics de la turbulence



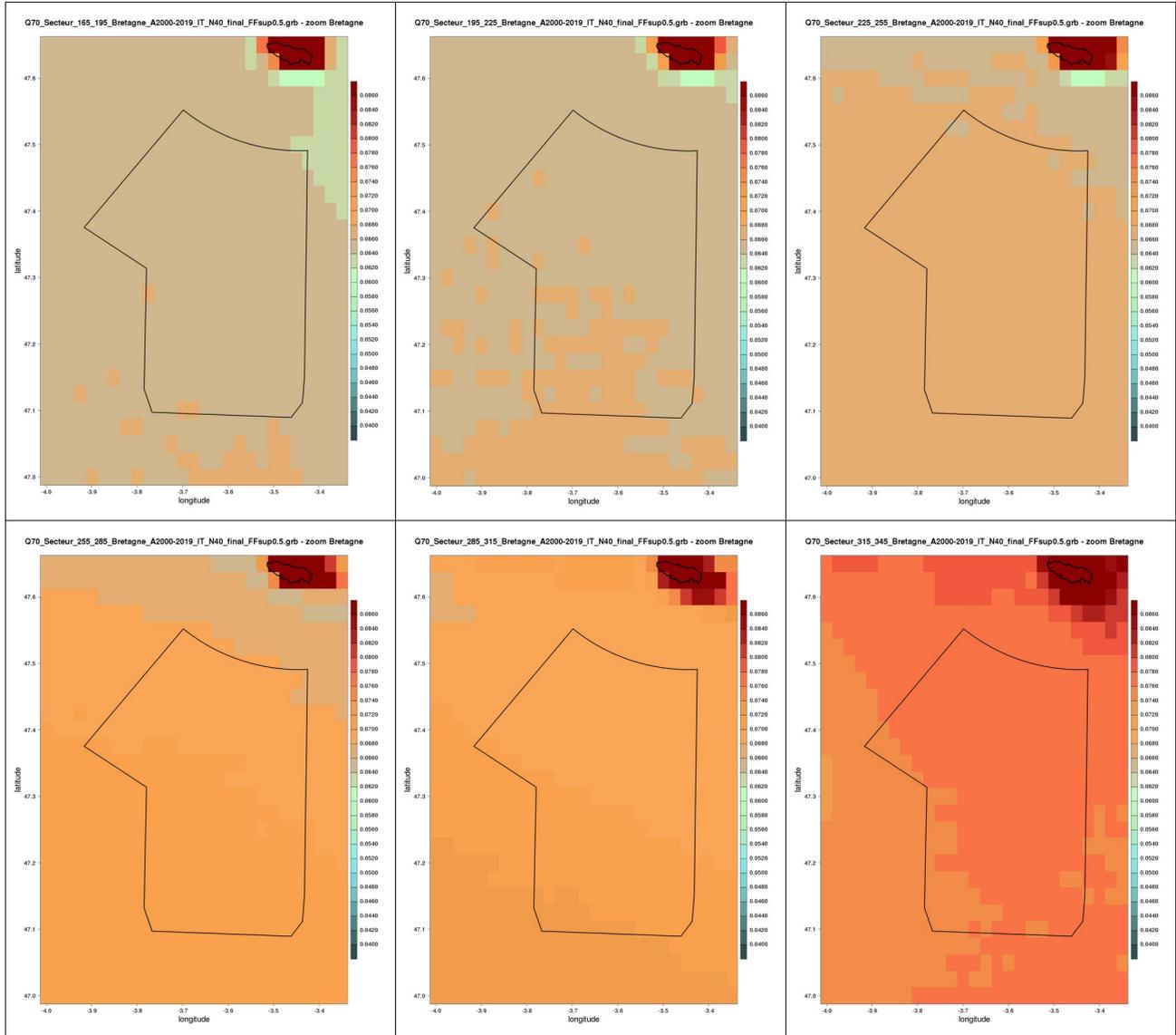
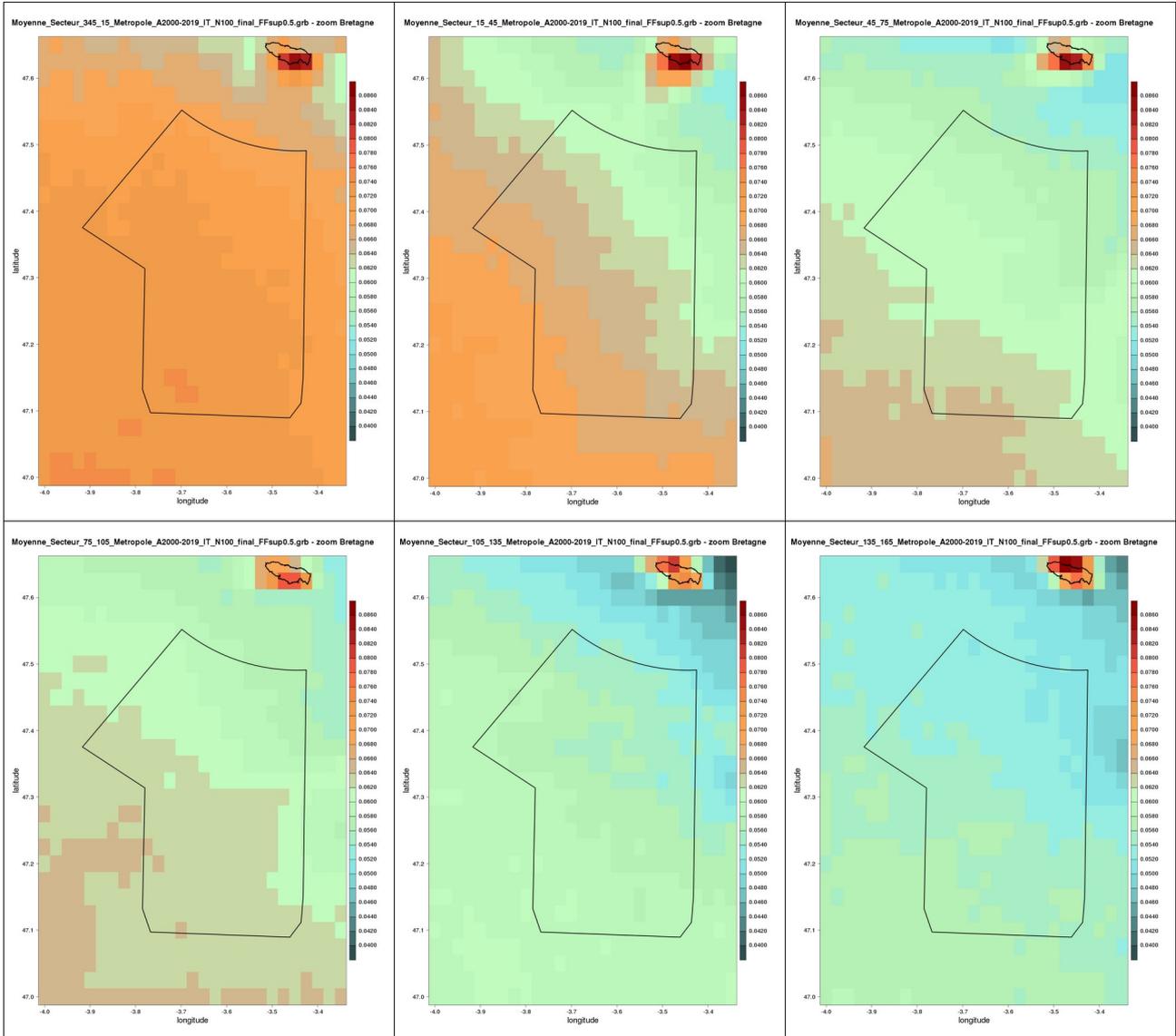


Illustration 5.3 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par secteur de direction de 30° pour la zone Bretagne, calculés à partir des données AROME (2000-2019)

## 5 Résultats des diagnostics de la turbulence



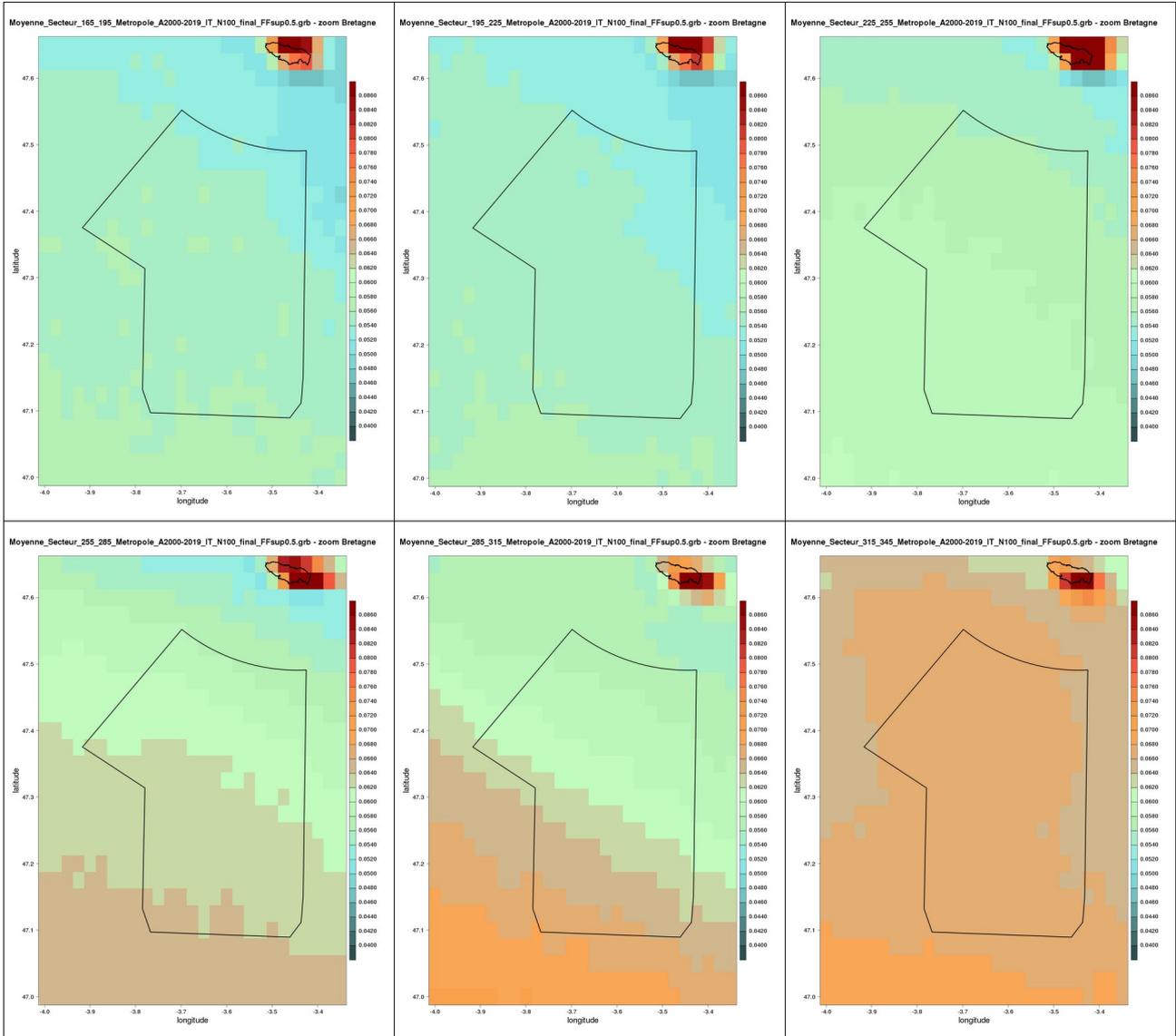
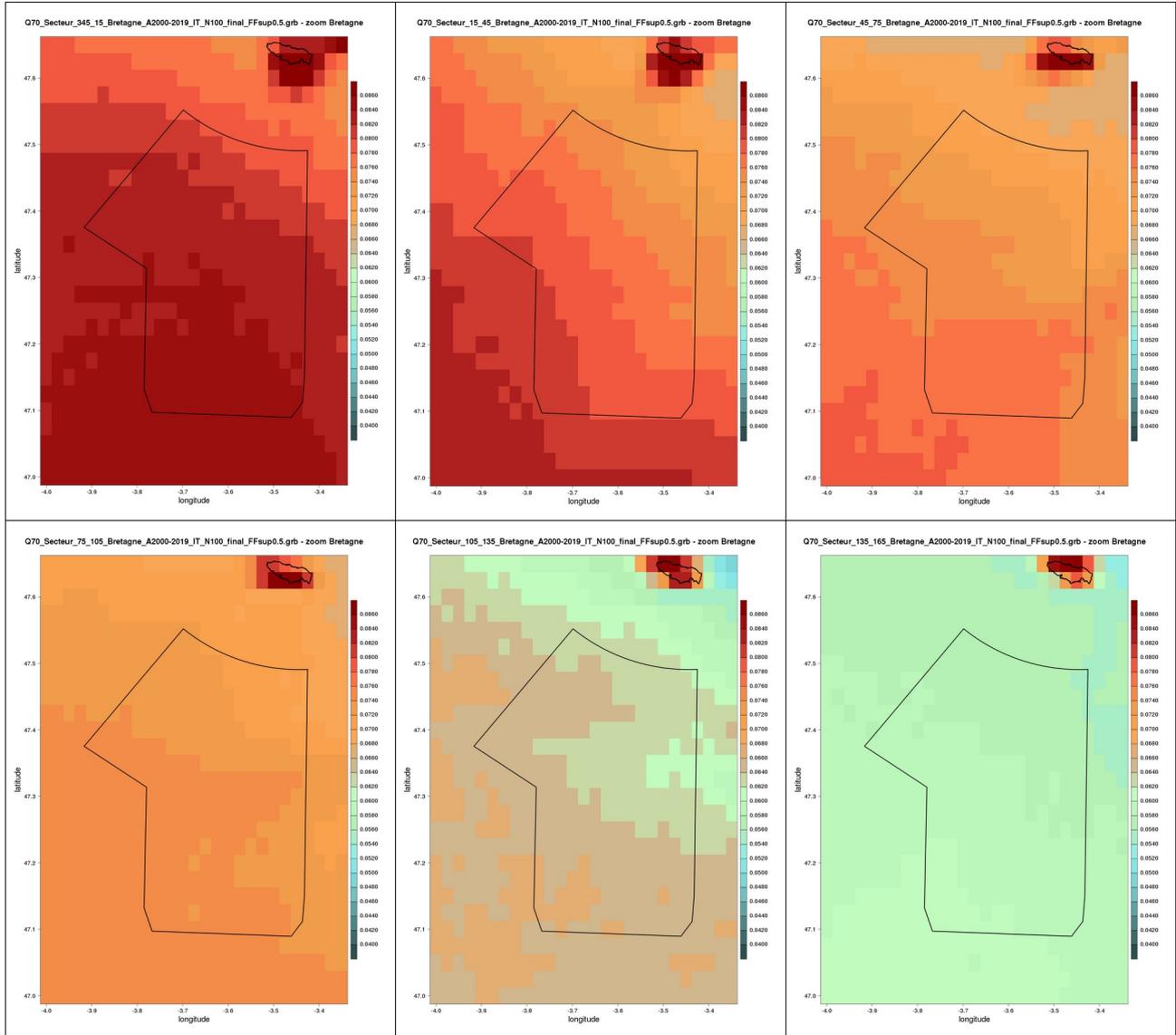


Illustration 5.4 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par secteur de direction de 30° pour la zone Bretagne, calculées à partir des données AROME (2000-2019)

## 5 Résultats des diagnostics de la turbulence



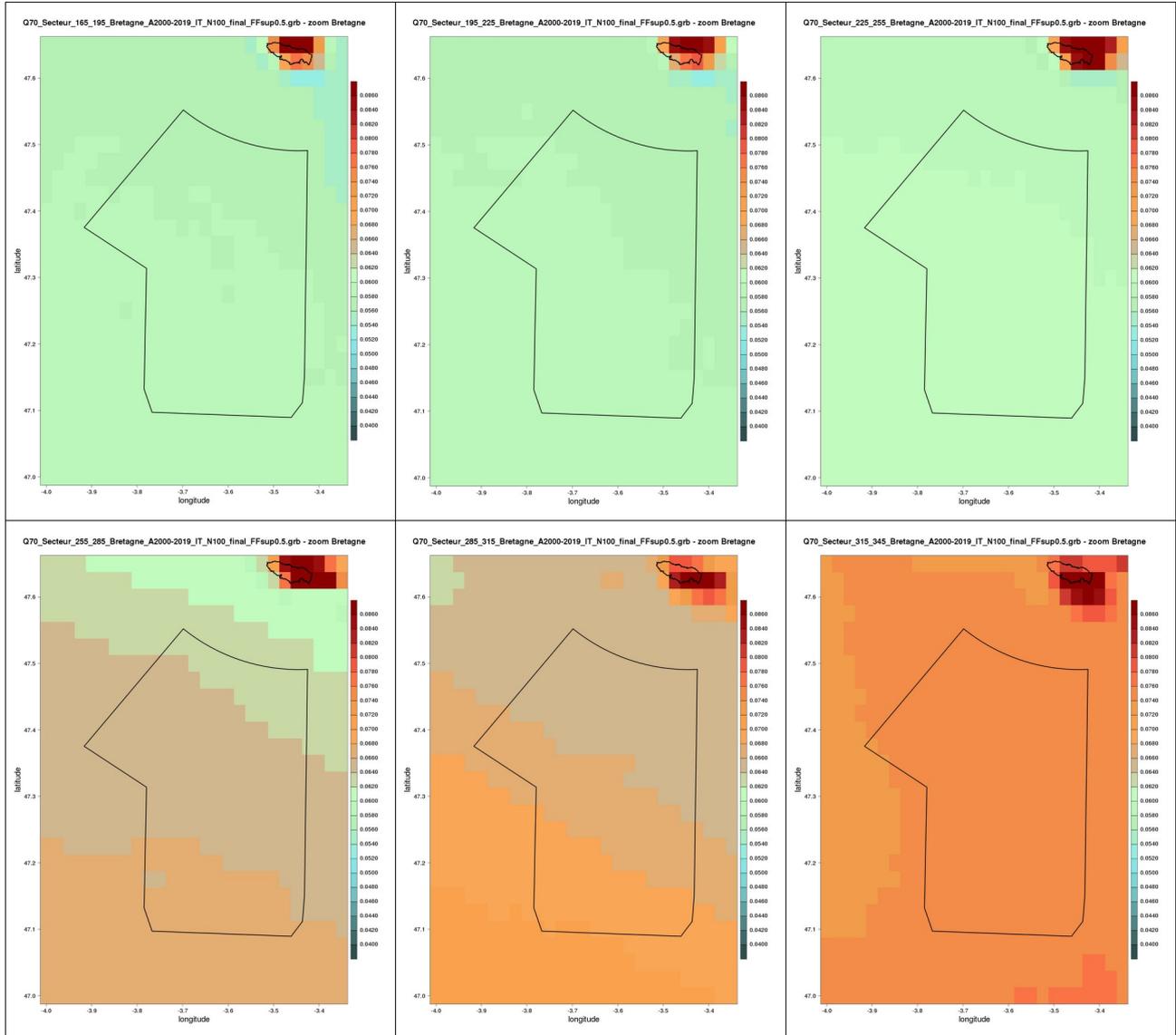
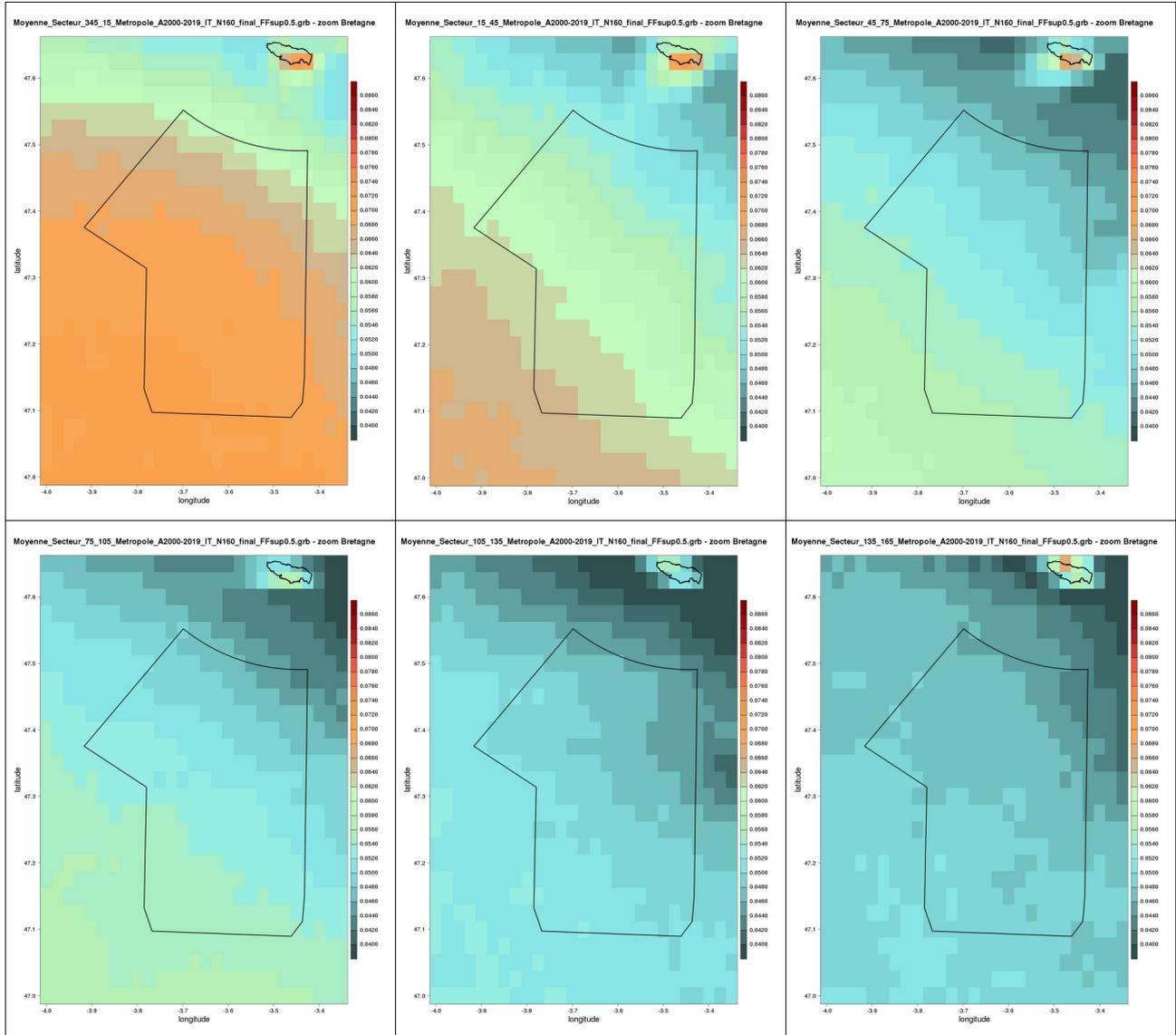


Illustration 5.5 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par secteur de direction de 30° pour la zone Bretagne, calculés à partir des données AROME (2000-2019)

## 5 Résultats des diagnostics de la turbulence



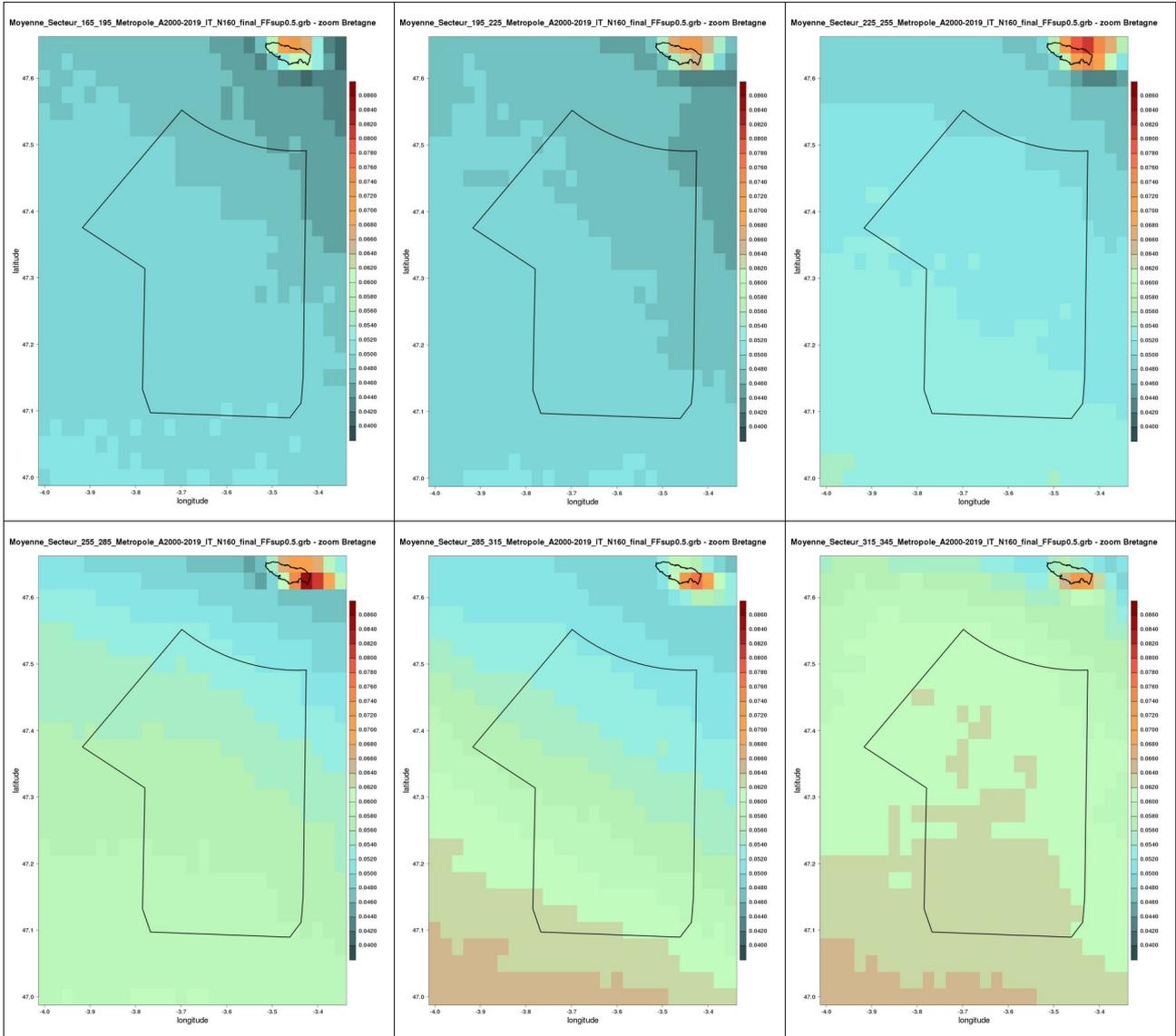
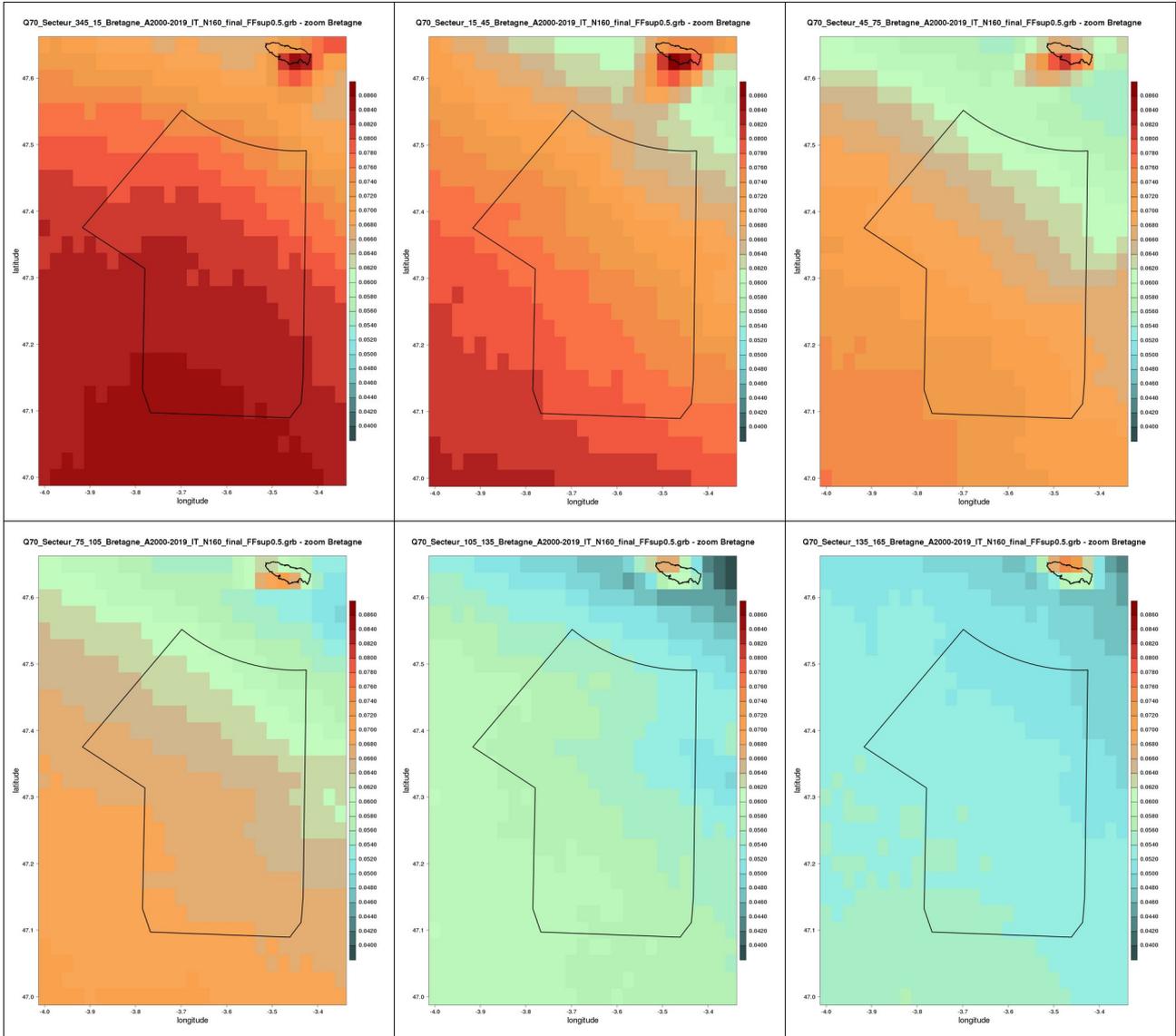


Illustration 5.6 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par secteur de direction de 30° pour la zone Bretagne, calculées à partir des données AROME (2000-2019)

## 5 Résultats des diagnostics de la turbulence



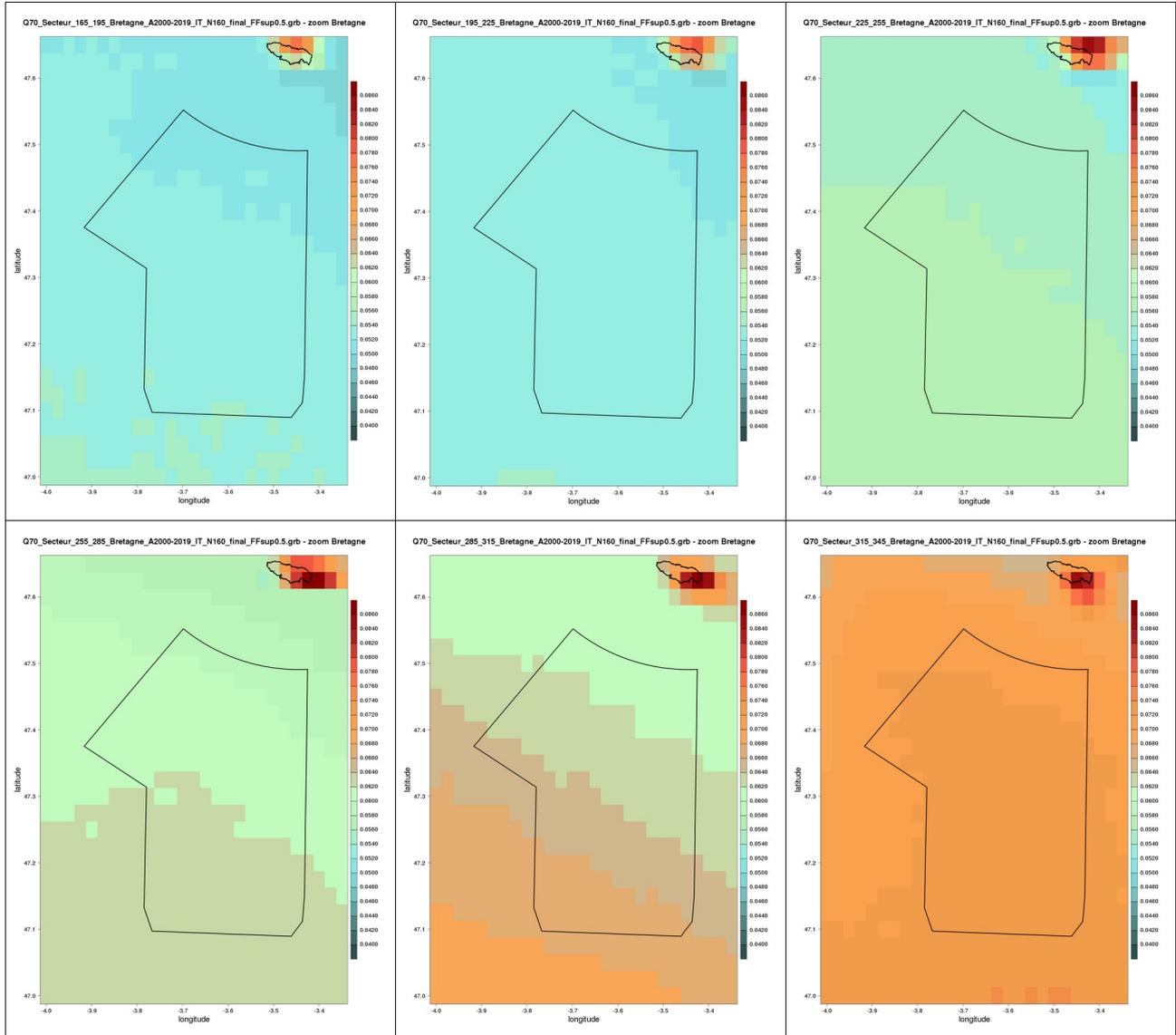


Illustration 5.7 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par secteur de direction de 30° pour la zone Bretagne, calculés à partir des données AROME (2000-2019)

Les cartes de moyenne et de Q70 de l'intensité de turbulence par secteurs montrent que, **pour un niveau d'altitude et un paramètre statistique donné, l'intensité de turbulence est plus ou moins importante selon certaines classes de directions du vent.**

Un tableau de synthèse de l'intensité de turbulence par niveau et par secteur de 30° sur la zone Bretagne est réalisé et fourni (voir tableau 5.1).

		dd000	dd030	dd060	dd090	dd120	dd150	dd180	dd210	dd240	dd270	dd300	dd330
40 m	Moy	<b>0,076</b>	0,068	0,068	0,068	0,066	0,064	0,063	<b>0,062</b>	0,064	0,065	0,065	0,072
	IT	<b>0,078</b>	0,075	0,074	0,074	0,070	0,069	0,067	<b>0,065</b>	0,067	0,071	0,072	0,074
40 m	Q70	<b>0,082</b>	0,076	0,076	0,075	0,068	0,065	<b>0,064</b>	0,065	0,066	0,068	0,069	0,075
	IT	<b>0,083</b>	0,081	0,08	0,08	0,072	0,067	<b>0,066</b>	0,066	0,068	0,071	0,073	0,078
100 m	Moy	<b>0,069</b>	0,057	0,056	0,057	0,053	<b>0,050</b>	0,052	0,052	0,056	0,058	0,057	0,065
	IT	<b>0,074</b>	0,069	0,065	0,064	0,061	<b>0,058</b>	0,057	0,056	0,059	0,065	0,068	0,068
100 m	Q70	<b>0,079</b>	0,071	0,069	0,070	0,061	0,056	0,057	<b>0,057</b>	0,059	0,063	0,065	0,074
	IT	<b>0,086</b>	0,082	0,078	0,076	0,067	0,061	0,059	<b>0,059</b>	0,061	0,067	0,070	0,076
160 m	Moy	<b>0,060</b>	0,050	0,045	0,044	0,044	<b>0,043</b>	0,046	0,046	0,049	0,052	0,051	0,059
	IT	<b>0,071</b>	0,065	0,057	0,056	0,052	<b>0,050</b>	0,050	0,050	0,053	0,059	0,063	0,063
160 m	Q70	<b>0,074</b>	0,064	0,059	0,057	0,052	<b>0,050</b>	<b>0,051</b>	0,052	0,055	0,059	0,061	0,071
	IT	<b>0,085</b>	0,080	0,074	0,069	0,059	<b>0,055</b>	<b>0,054</b>	0,054	0,057	0,063	0,068	0,074

Tableau 5.1 : plage (borne minimale et borne maximale établies à partir de l'ensemble des points de la zone d'intérêt) des moyennes et quantiles Q70 de l'intensité de turbulence pour les niveaux 40, 100, 160 m par secteurs de direction de 30° du vent pris respectivement au niveau 40 ou 100 ou 160 m.

Les directions prises en compte pour effectuer les calculs des moyennes et Q70 de l'intensité de turbulence sont les directions du vent au niveau où l'intensité de turbulence est calculée. Par secteurs de direction de 30°, les plages de moyennes des intensités de turbulence diminuent faiblement avec l'altitude. Les directions de plus faible intensité sont celles de vents de sud-sud-est à sud-sud-ouest, et c'est *a contrario* le vent de secteur nord qui s'accompagne des plus fortes intensités de turbulence.

Ainsi, sur la zone Bretagne, les intensités moyennes de turbulence ne dépassent pas 7,8 % et le Q70 de l'intensité de turbulence reste inférieur ou égal à 8,6 % et les plus fortes valeurs moyennes sont rencontrées à 40 m pour un vent de secteur nord.

### 5.1.3 Intensité de turbulence par bin de force de vent

Les cartes des moyennes et du Q70 de l'intensité de turbulence par bins de force de vent de 1 m/s calculées à partir des données AROME pour les niveaux 40, 100, 160 m sont tracées et font partie des données livrées. Il y a 25 intervalles de forces moyennes du vent prises en compte : 0-2,5 ; 2,5-3,5 ; 3,5-4,5 ... ; 23,5-24,5 ; 24,5-25,5 ; 25,5-100 m/s.

Dans ce rapport, nous nous limitons à présenter les cartes de 3 bins particuliers : le bin 2,5-3,5 m/s, le bin 7,5-8,5 m/s et le bin 14,5-15,5 m/s.

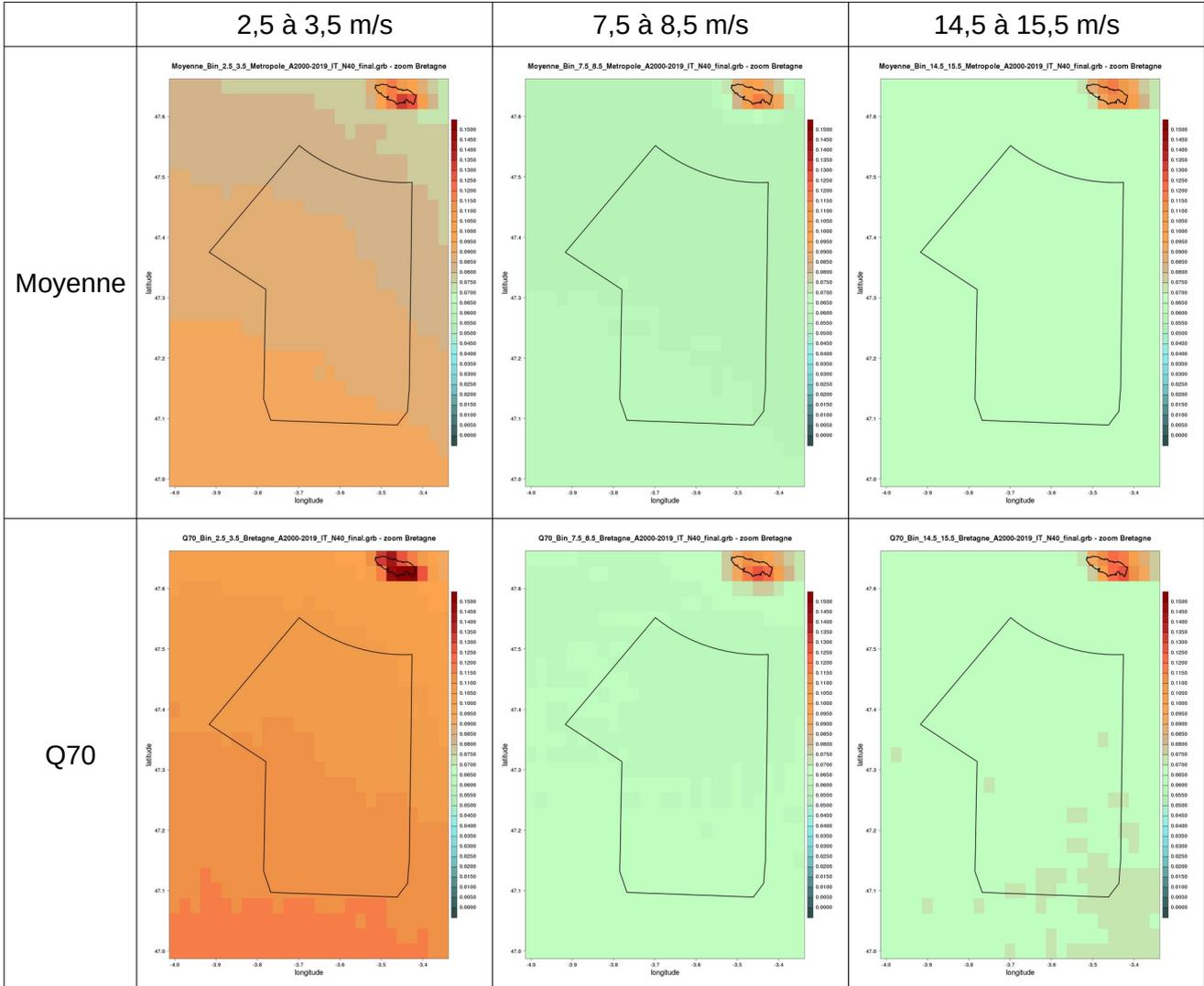


Illustration 5.8: cartes des moyennes (ligne 1) et du Q70 (ligne 2) de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par bin de 1 m/s pour la zone Bretagne, calculées à partir des données AROME (2000-2019)

## 5 Résultats des diagnostics de la turbulence

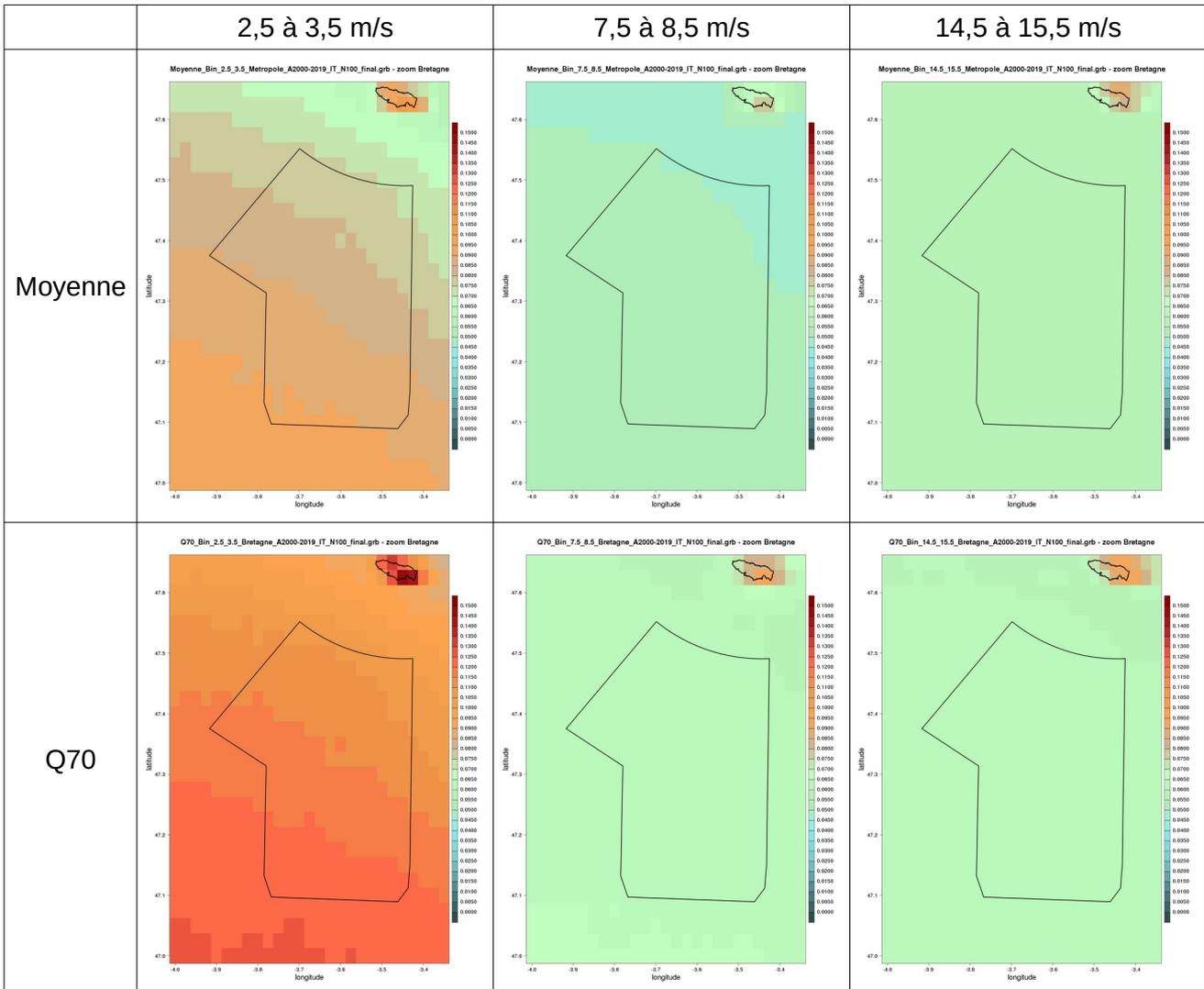


Illustration 5.9: cartes des moyennes (ligne 1) et du Q70 (ligne 2) de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par bin de 1 m/s pour la zone Bretagne, calculées à partir des données AROME (2000-2019)

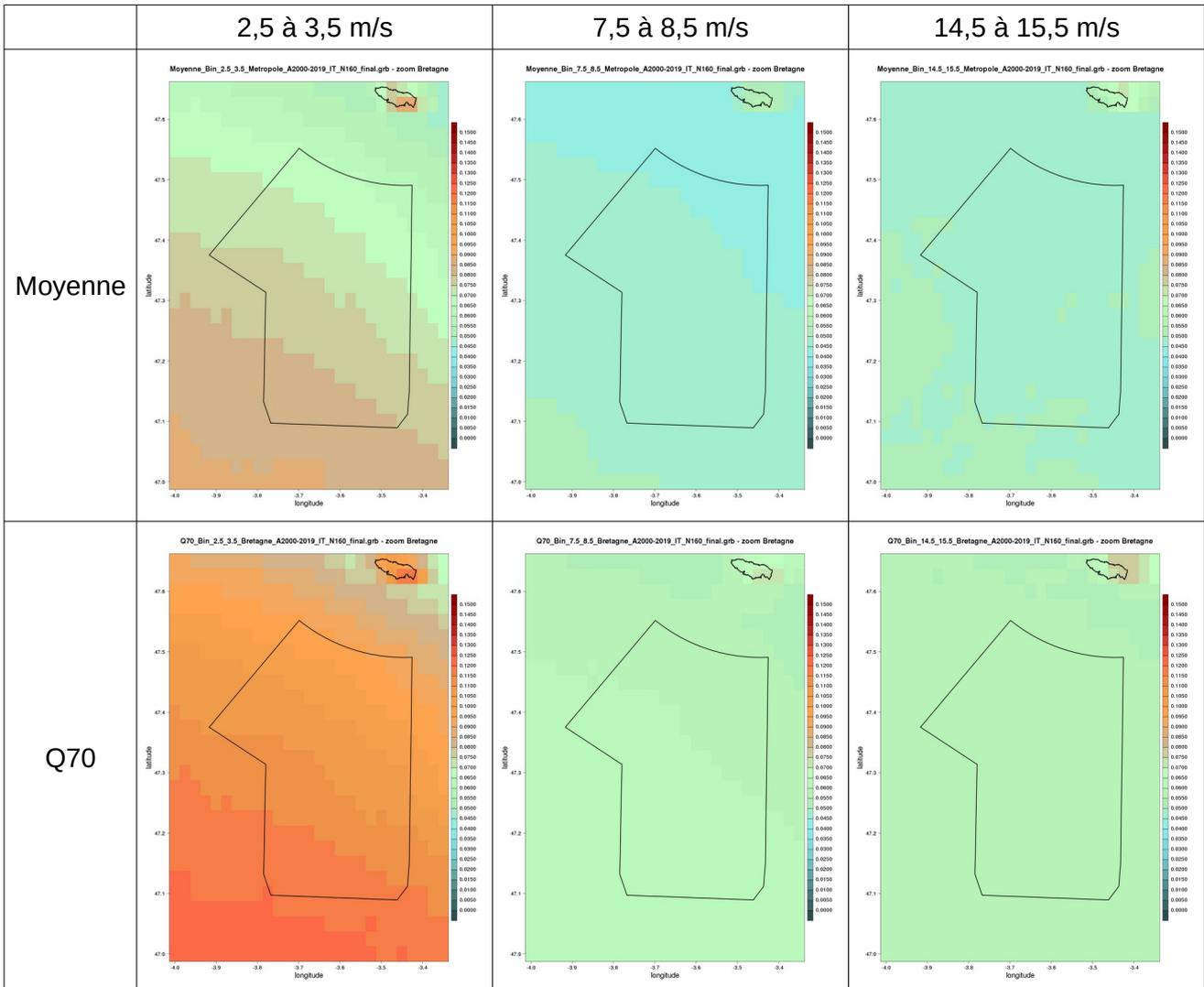


Illustration 5.10: cartes des moyennes (ligne 1) et du Q70 (ligne 2) de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par bin de 1 m/s pour la zone Bretagne, calculées à partir des données AROME (2000-2019)

L'étude des valeurs moyennes des intensités de turbulence par bin montre la présence d'un maximum dans les faibles valeurs de vent et une décroissance rapide de l'intensité de turbulence avec un minimum vers 8 ou 9 m/s puis à nouveau une hausse progressive.

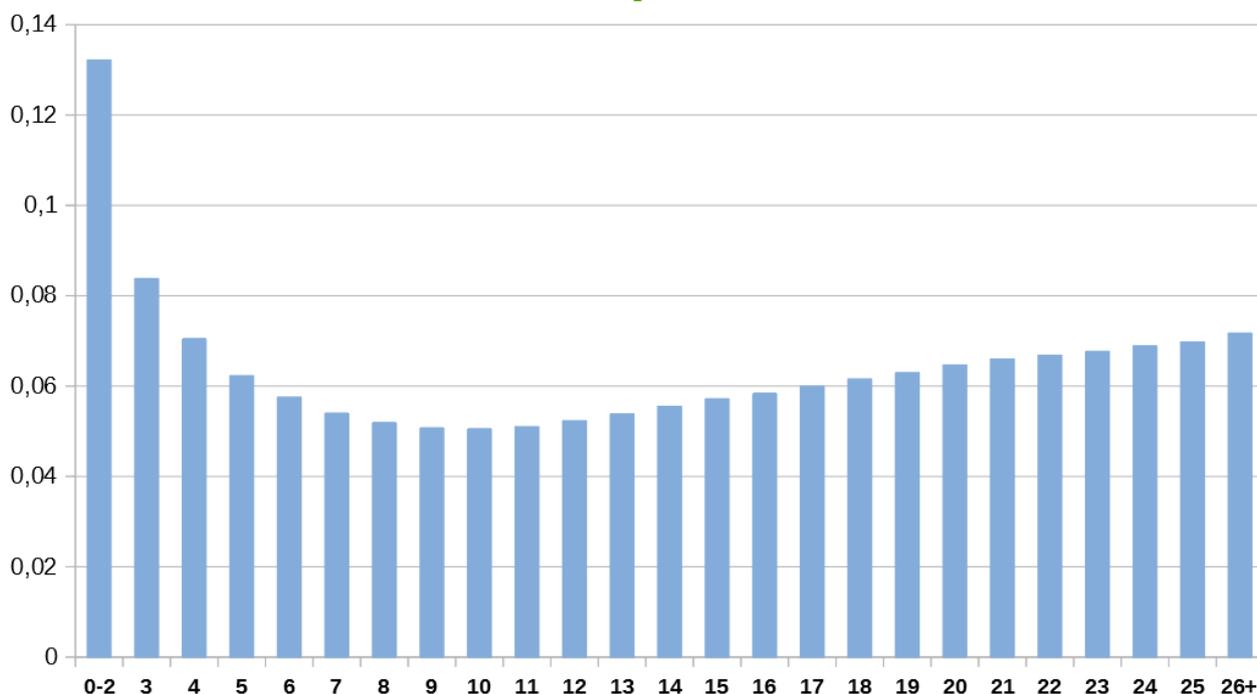


Illustration 5.11: Moyenne sur la zone d'intérêt Bretagne de la moyenne de l'intensité de turbulence, en fonction de la force du vent (m/s) en abscisse. Période 2000-2019, 100 mètres

### 5.1.4 Durée de retour cinquantennale

Les calculs n'ont été effectués que pour les bins de 1 m/s. Nous avons réalisé 4 cartes par bin et par niveau, soit un total de 300 cartes.

Toutefois, un nombre de cartes relativement important n'a pu être tracé. La raison est que lorsque les bins correspondent à des valeurs élevées, les données de la série temporelle correspondante comportent trop peu de valeurs pour que cette durée de retour puisse être calculée.

Nous nous limitons ici à donner les résultats pour la valeur du bin [14,5 ; 15,5] pour la hauteur 100 mètres.

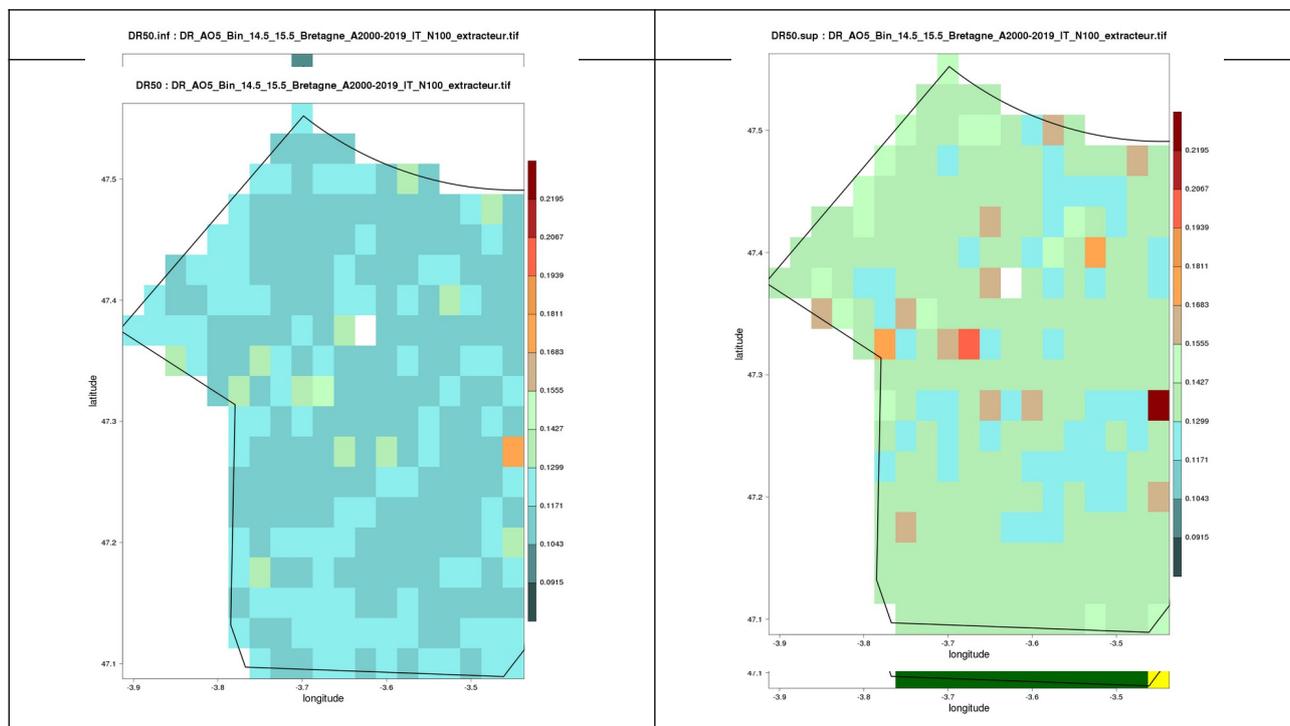


Illustration 5.12: Quantiles d'intensité de turbulence pour une durée de retour de 50 ans. En haut valeurs des bornes inférieure (à gauche) et supérieure (à droite) de l'intervalle de confiance à 70 %. Au-dessous, à gauche durée de retour centrale et à droite qualité de l'ajustement (correct en vert, douteux en jaune, orange, rouge et violet).

## 5.2 Rafale

Pour les 254 points de grille AROME de la zone Bretagne, les **séries chronologiques des rafales estimées (estDXFX) à 40, 100, 160 et 200 m** ont été **calculées au pas de temps horaire** selon les formules présentées au paragraphe 4.2.1. La liste et nomenclature des fichiers livrés sont tracées dans le livrable listant les fichiers mis à disposition.

Chacun de ces fichiers.csv comporte 3 colonnes qui sont pour la première la date au format AAAAMMDDHH (l'heure HH étant exprimée en UTC), pour la deuxième la force de la rafale (estFX) en m/s, puis la troisième la direction de rafale estDX exprimée en degré dans le repère météorologique (d'où vient le vent, compté dans le sens horaire à partir du 0 positionné au Nord). Les valeurs des rafales provenant de calculs numériques présentent un nombre important de décimales. Néanmoins, toutes ces décimales ne sont pas significatives. Le séparateur de champs est la virgule et le caractère de décimale est le point.

### 5.2.1 Rafales modélisées à 40 m

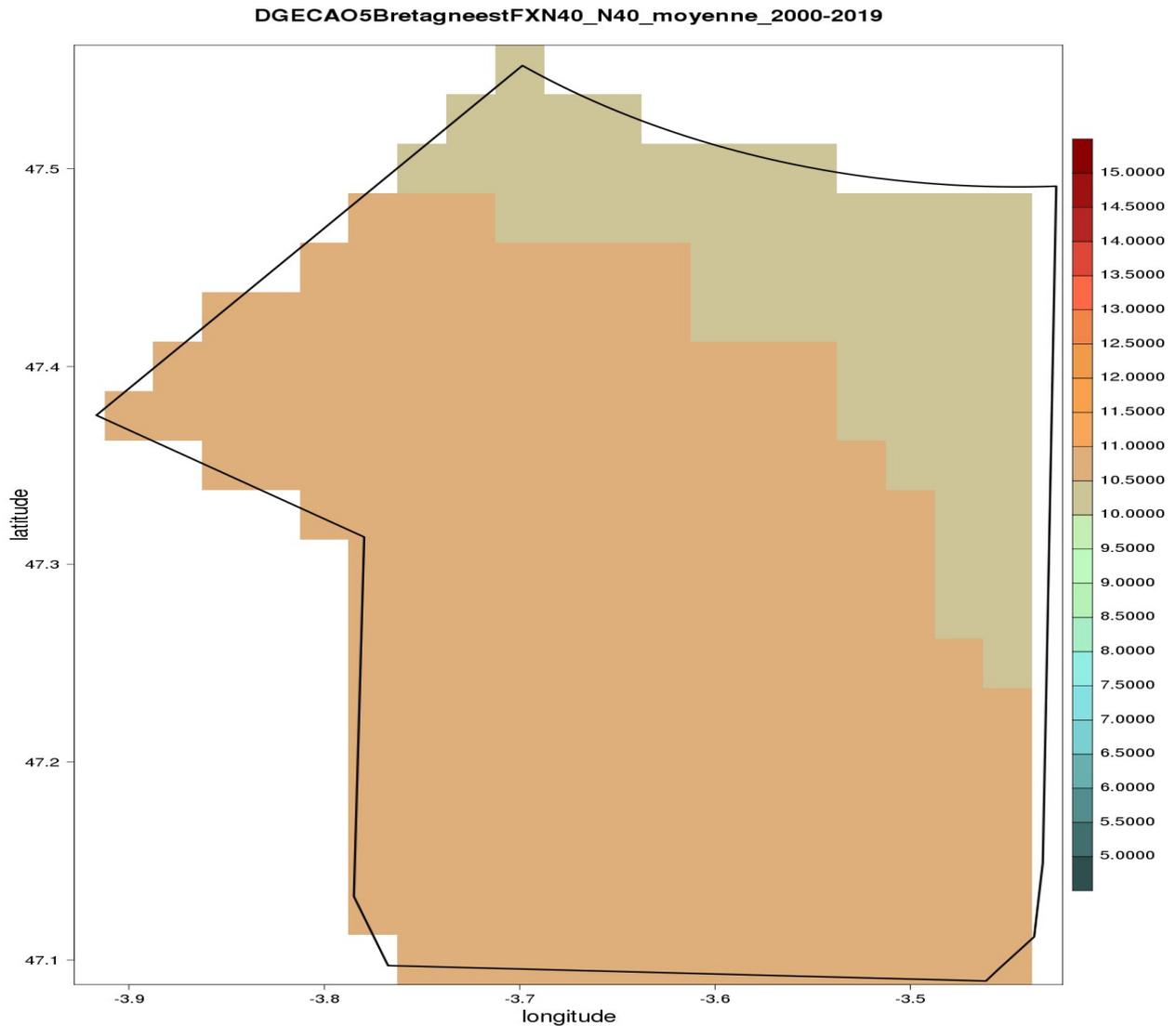


Illustration 5.13: Forces moyennes du vent de rafale sur la zone Bretagne au niveau 40 m sur la période 2000-2019

Les forces du vent de rafale moyennées sur la période 2000-2019 au niveau 40 mètres sont comprises principalement entre 10 et 11 m/s sur la zone Bretagne, avec des intensités plus faibles au nord-nord-est de la zone.

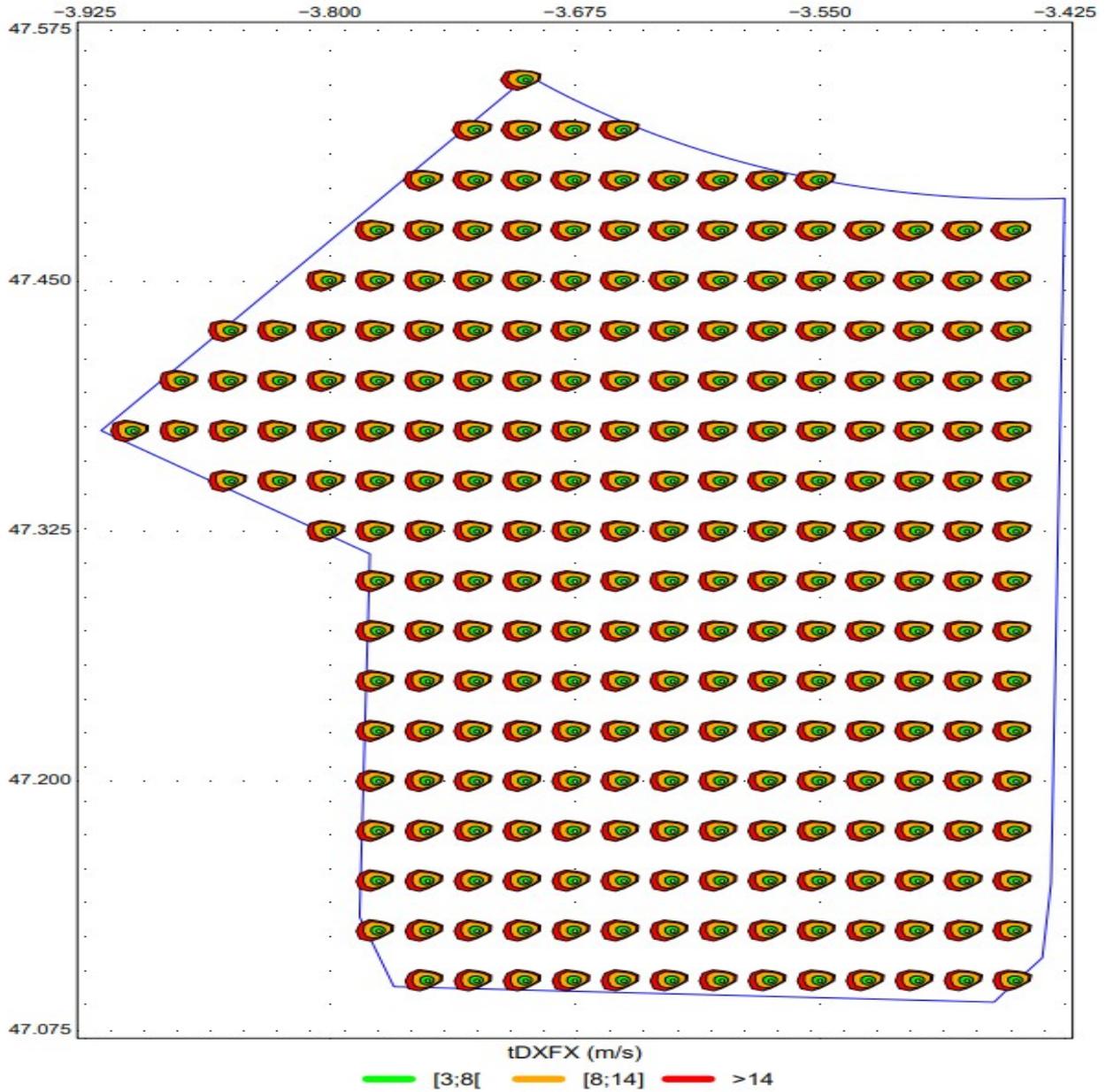


Illustration 5.14: Roses des vents de rafales estimées à 40 m sur la zone Bretagne sur la période 2000-2019

Les roses de vents de rafales à 40 m sont assez homogènes sur la zone Bretagne, avec une composante nord-ouest à sud-ouest développée.

## 5.2.2 Rafales modélisées à 100 m

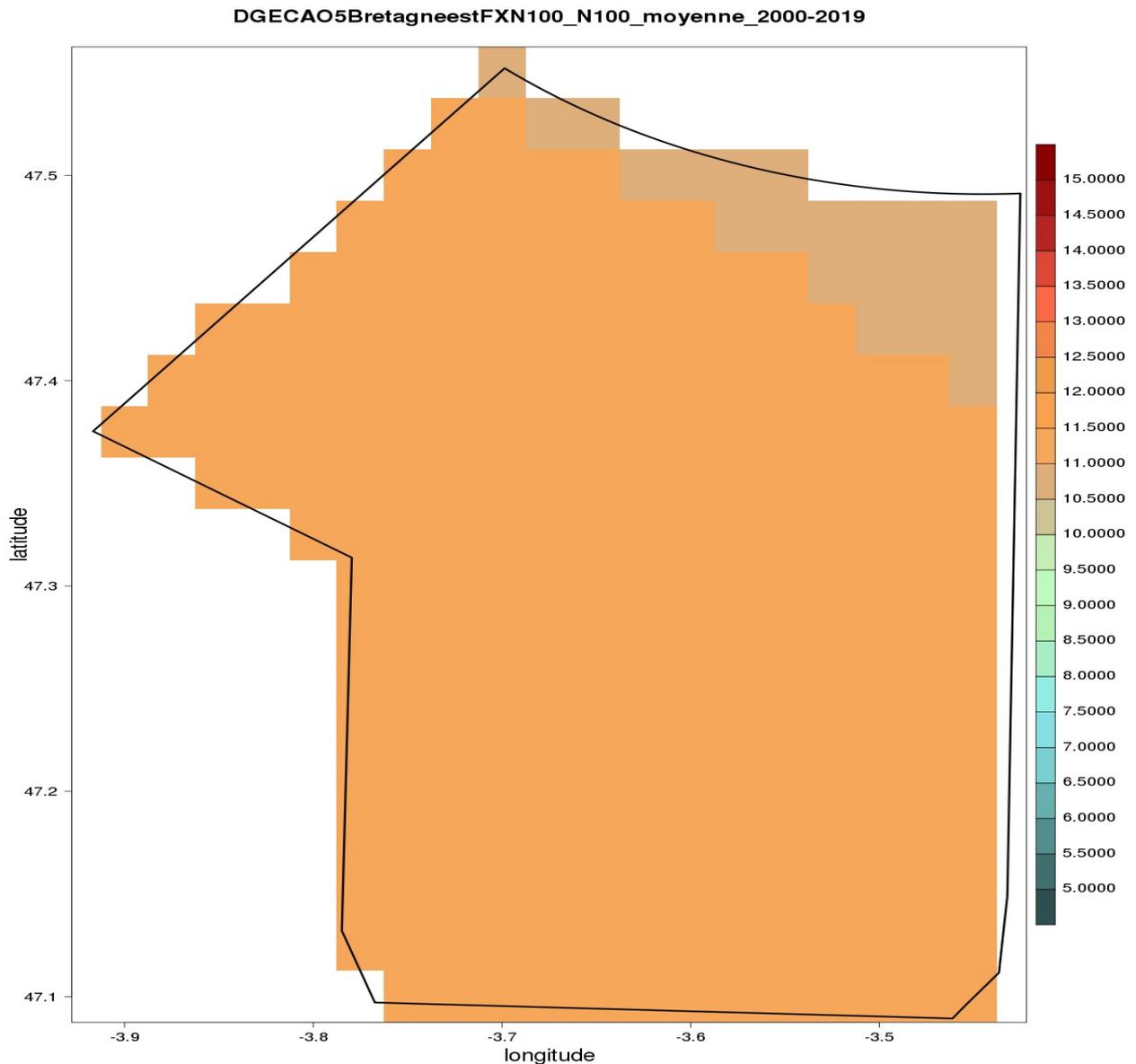


Illustration 5.15: Forces moyennes du vent de rafale sur la zone Bretagne au niveau 100 m sur la période 2000-2019

Les forces du vent de rafale moyennées sur la période 2000-2019 au niveau 100 mètres sont comprises principalement entre 10,5 et 11,5 m/s sur la zone Bretagne.

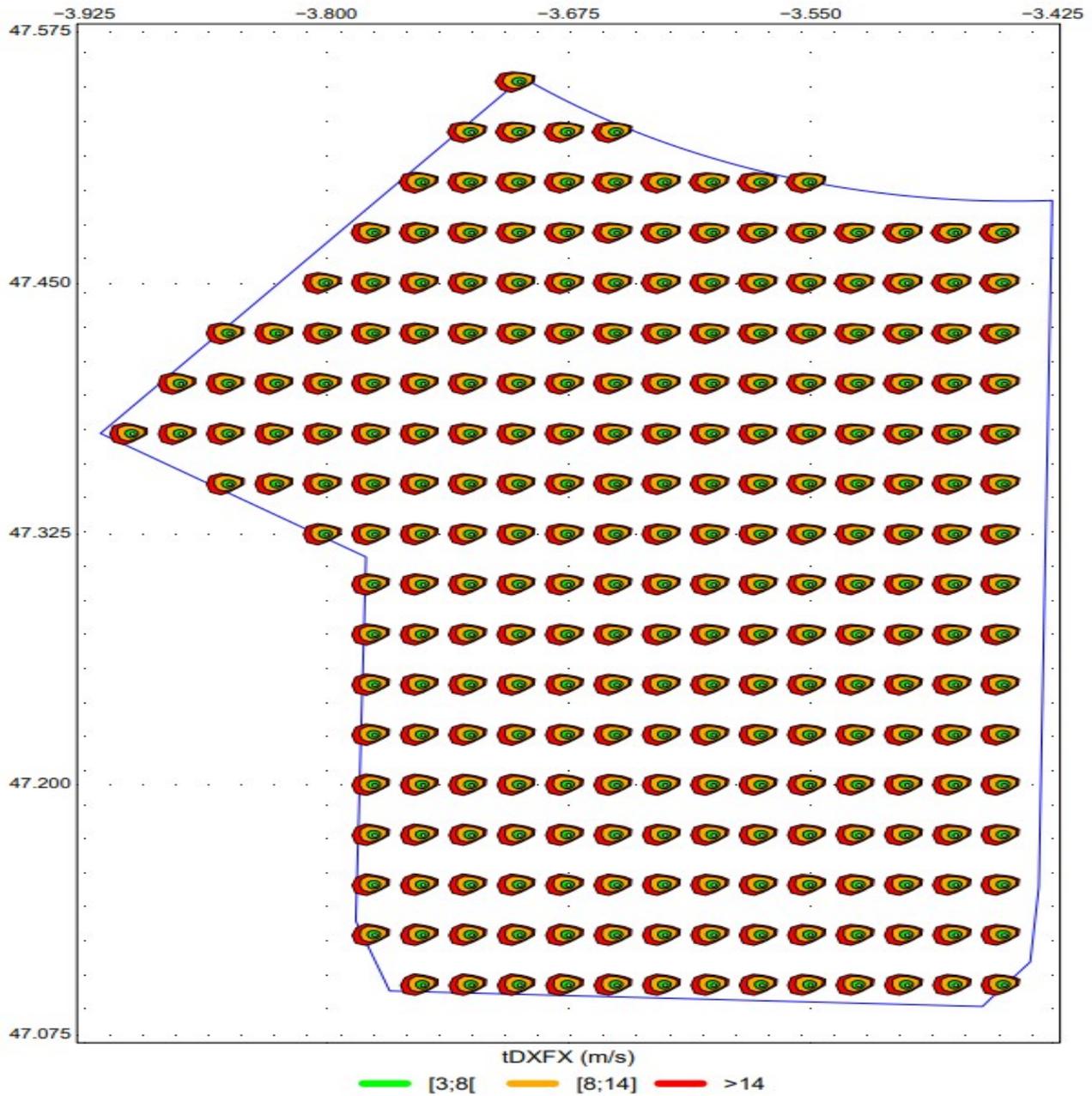


Illustration 5.16: Roses des vents de rafales estimées à 100 m sur la période 2000-2019

Les roses de vents de rafales à 100 m sont assez homogènes sur la zone Bretagne, avec une composante ouest-nord-ouest à ouest-sud-ouest développée.

### 5.2.3rafales modélisées à 160 m

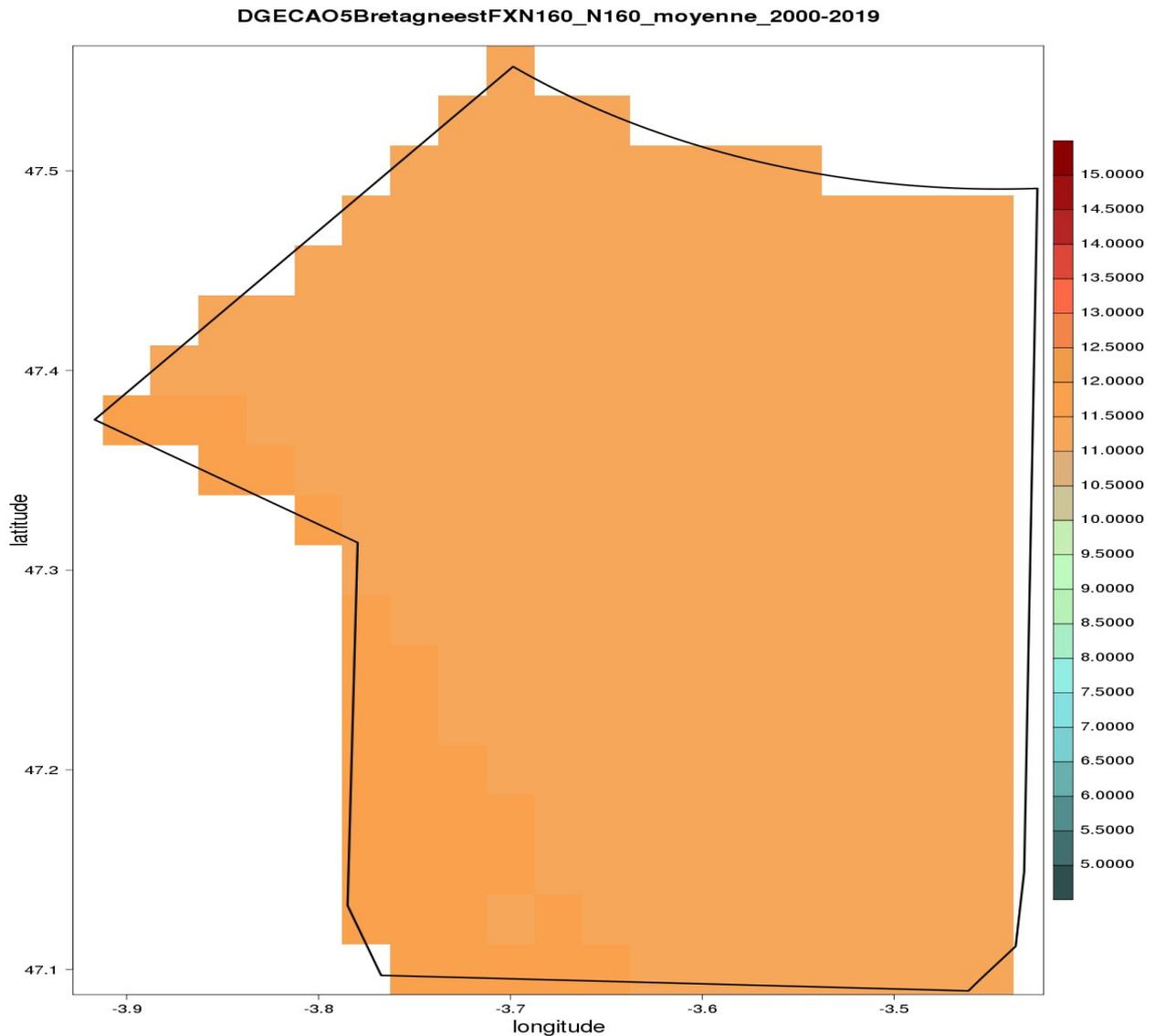


Illustration 5.17: Forces moyennes du vent de rafale sur la zone Bretagne au niveau 160 m sur la période 2000-2019

Les forces du vent de rafale moyennées sur la période 2000-2019 au niveau 160 mètres sont comprises principalement entre 11 et 12 m/s sur la zone Bretagne, avec des intensités plus élevées au sud-ouest de la zone.

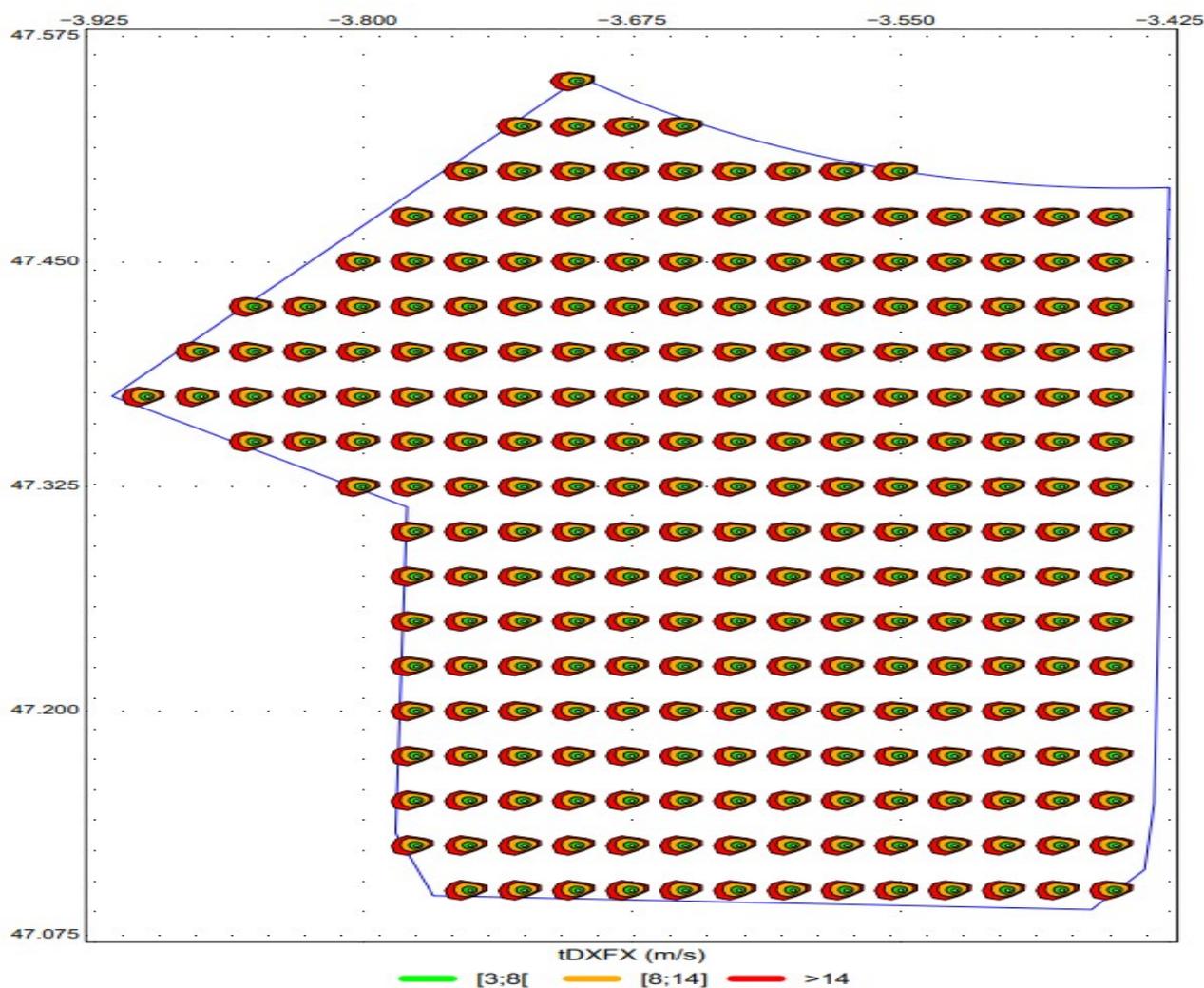


Illustration 5.18: Roses des vents de rafales estimées à 160 m sur la période 2000-2019

Les roses de vents de rafales à 160 m sont assez homogènes sur la zone Bretagne, avec une composante ouest développée (secteur dominant).

**Conclusion :**

Quel que soit le niveau considéré, les roses de vent de rafales sont assez homogènes en force bien que les vents soient un peu faibles sur la partie nord-est et plus soutenus sur la partie sud-ouest ; la direction dominante est l'ouest. L'intensité des rafales moyennes augmente avec la hauteur.

## 5.2.4 Rafales cinquantennales

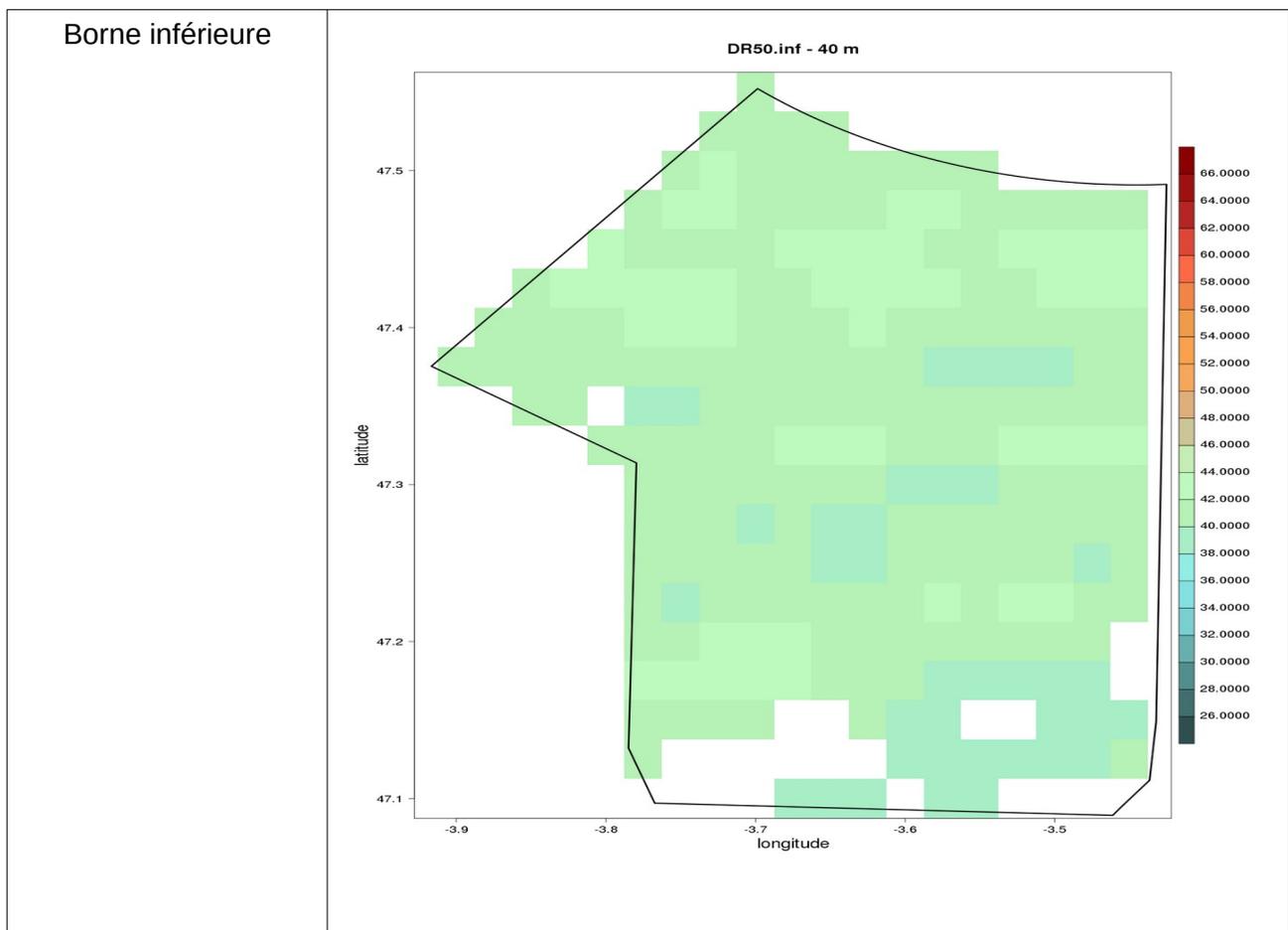
Pour l'ensemble des points de la zone Bretagne, les **quantiles des rafales à 40, 100 et 160 m associés à la durée de retour 50 ans** sont **calculés** et fournis ainsi que les **bornes inférieures et supérieures à l'intervalle de confiance de 70 % issues d'un ajustement des séries par la loi Pareto**, selon la méthodologie présentée en annexe II.

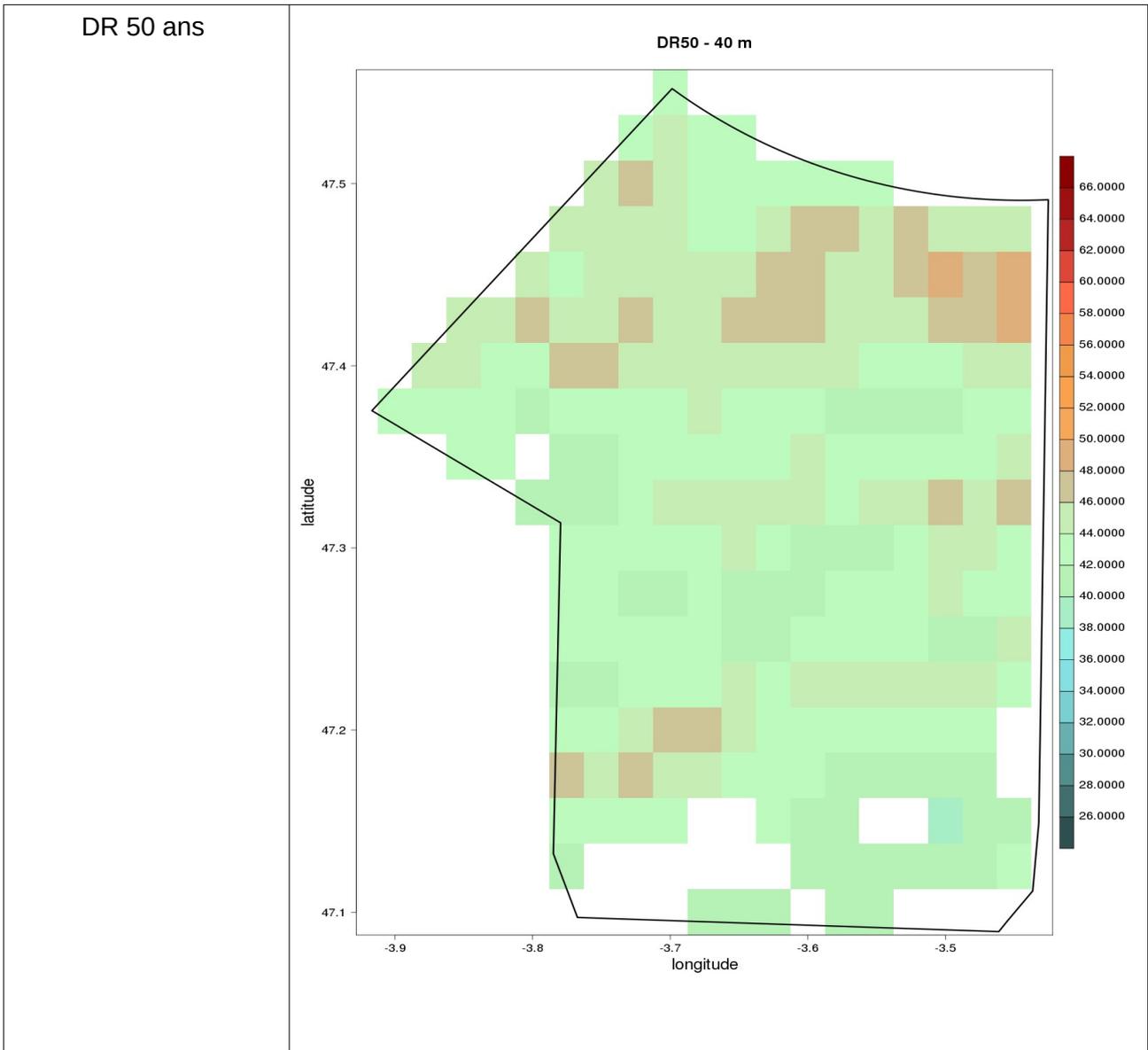
Le code qualité associé à l'ajustement en chaque point est identique à celui présenté pour les durées de retour de l'indice de turbulence (paragraphe 5.1.4).

Le seuil a été calculé en chaque point de grille par la méthode mlrp (cf. annexe II). Puis la médiane de l'ensemble de ces valeurs a été retenue pour être appliquée à l'ensemble des points de la zone.

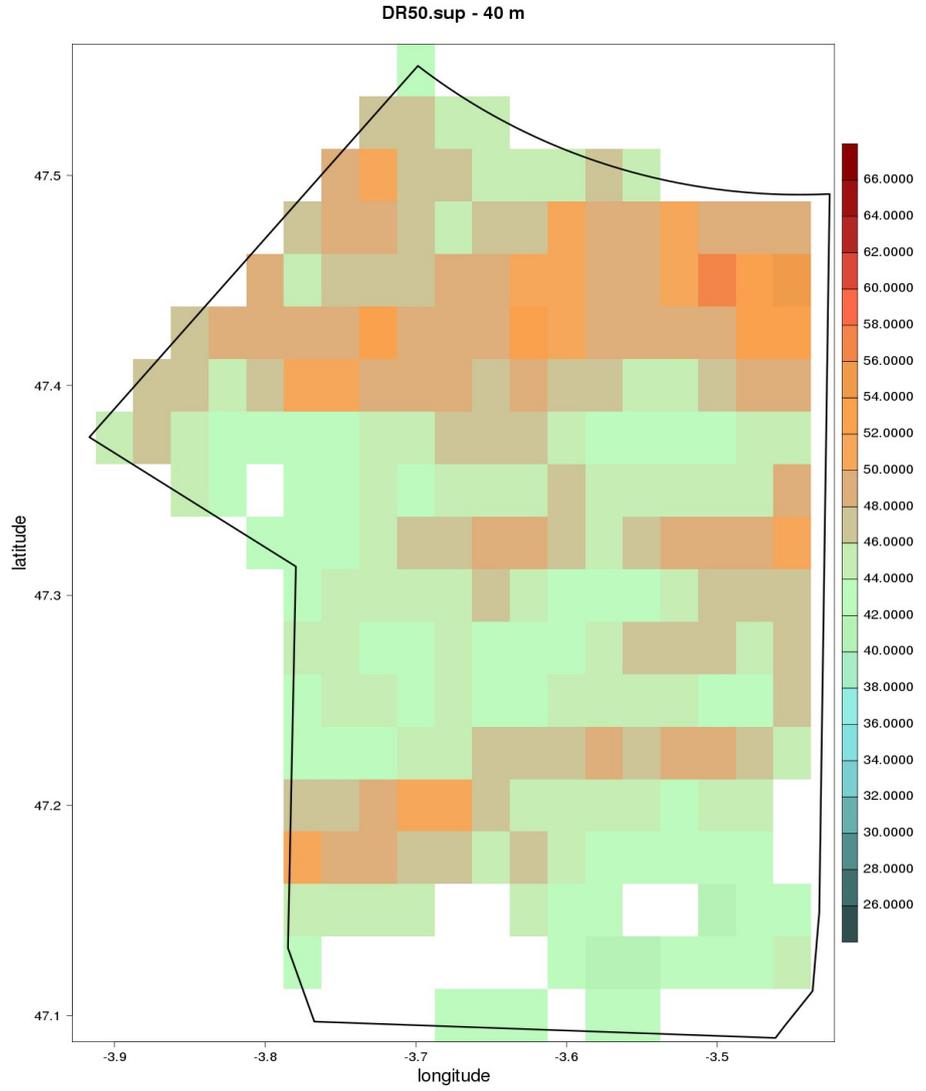
Les cartes obtenues des valeurs des quantiles, des bornes inférieures et supérieures des rafales de durée de retour 50 ans sont présentées ci-dessous.

A 40 m (seuil : 32 m/s) :





Borne supérieure



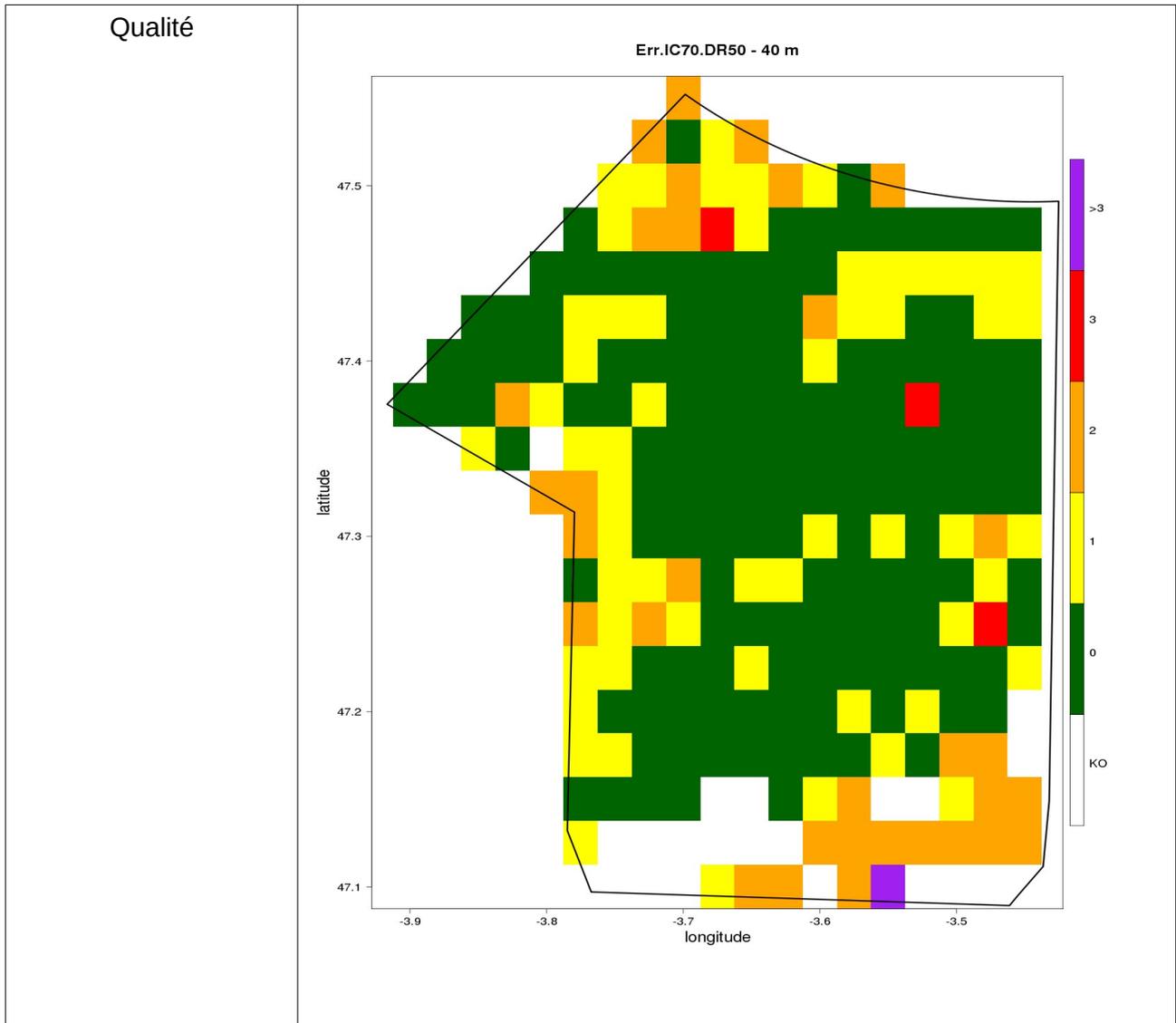


Illustration 5.19: carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 40 m pour la zone Bretagne, calculés à partir des données AROME (2000-2019)

Sur la zone, les durées de retour 50 ans varient entre 39,87 m/s [38,62 ; 41,11] (position 47,15 °N et -3,5°E) et 49,84 m/s [43,31 ; 56,37] (position 47,45°N et -3,5°E). Les valeurs les plus élevées se situent essentiellement dans la partie nord de la zone. Il y a 21 points point lesquels l'algorithme d'ajustement n'a pas convergé. De nombreux points ont un ajustement médiocre (observations pouvant sortir légèrement de l'intervalle de confiance à 70 %).

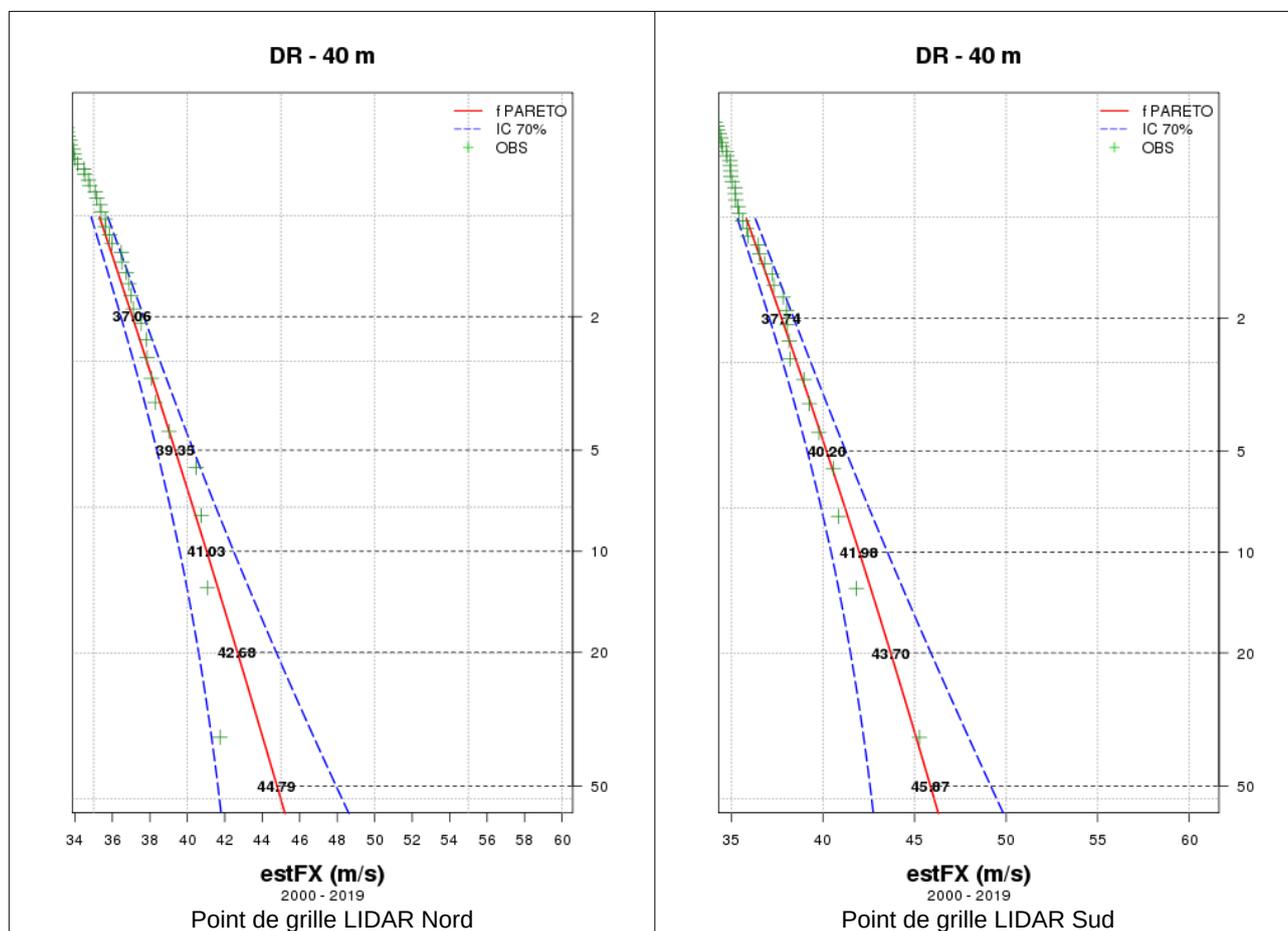
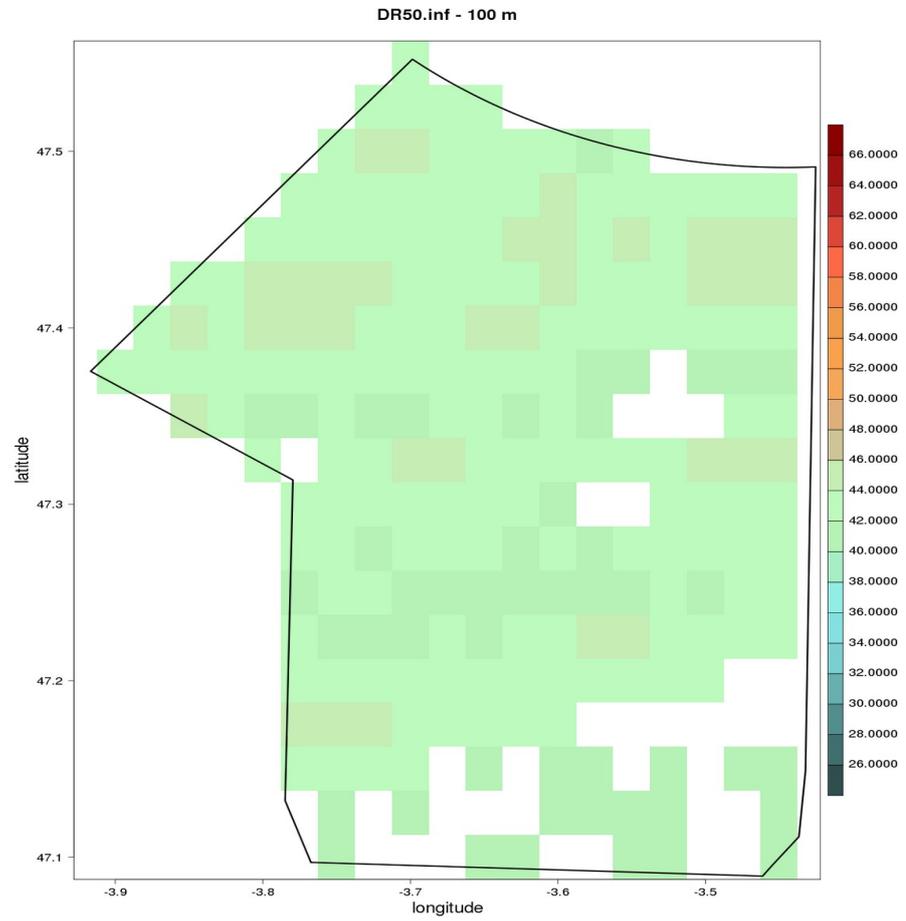
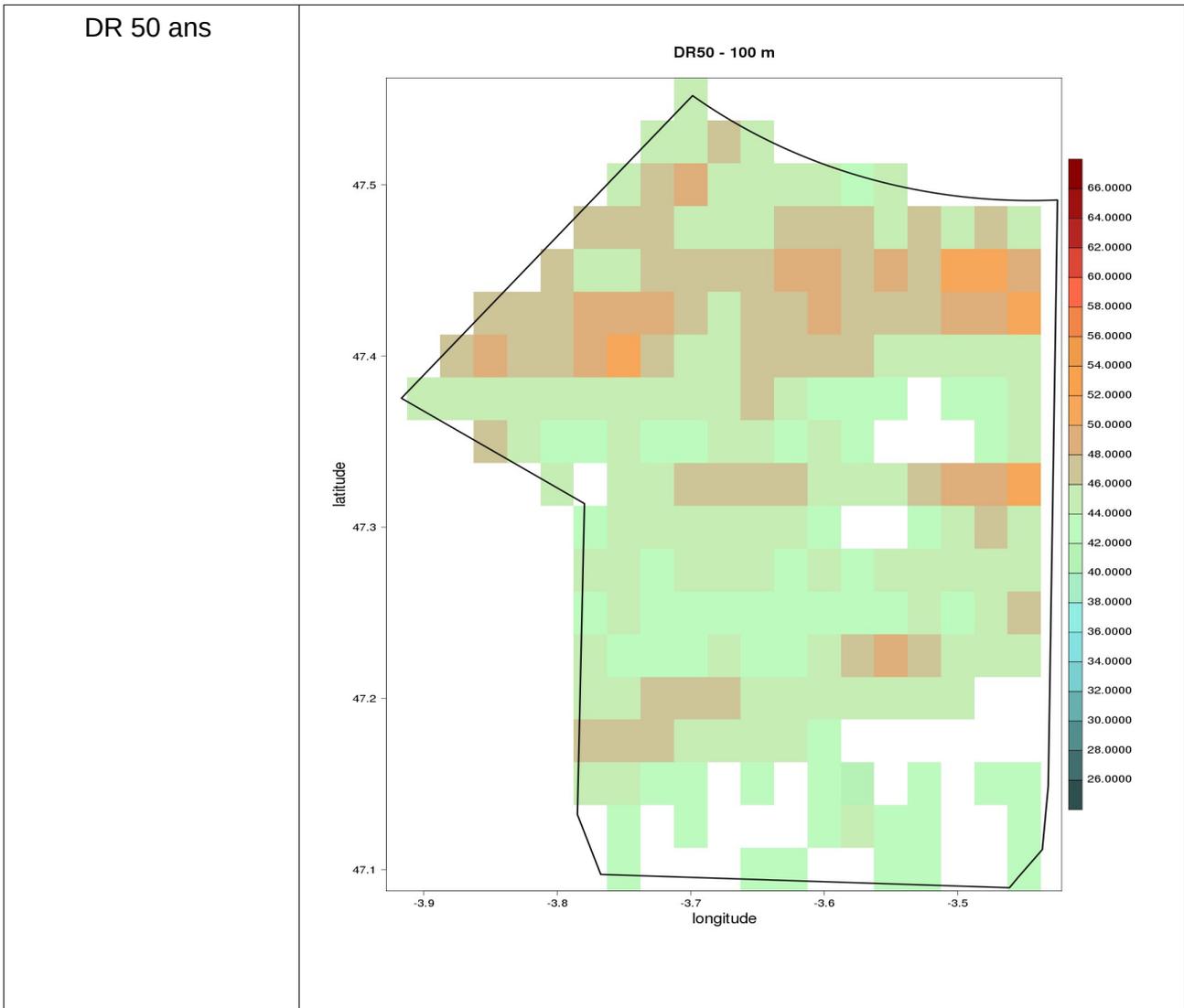


Illustration 5.20 Courbes des quantiles de rafales à 40 m – à gauche, pour le point 40, point de grille le plus proche du LIDAR Nord et à droite pour le point 150, point de grille le plus proche du LIDAR Sud.

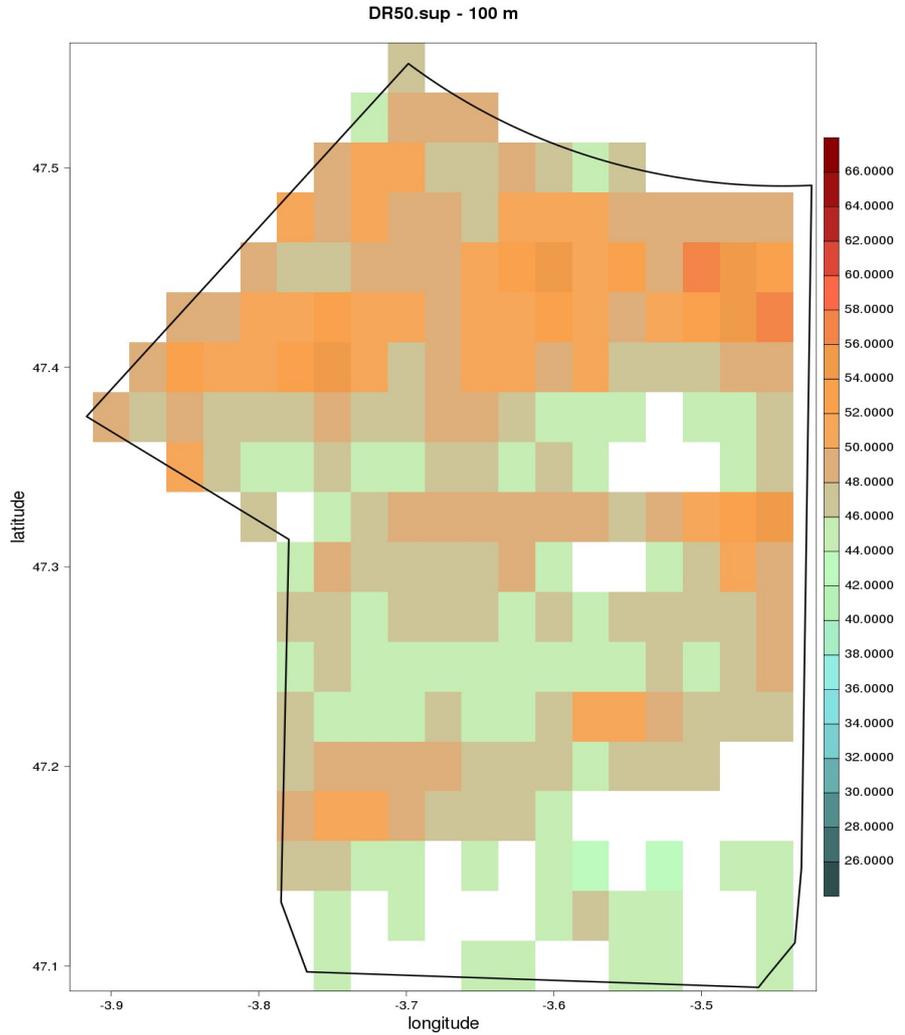
A 100 m (seuil 33.9 m/s) :

Borne inférieure





Borne supérieure



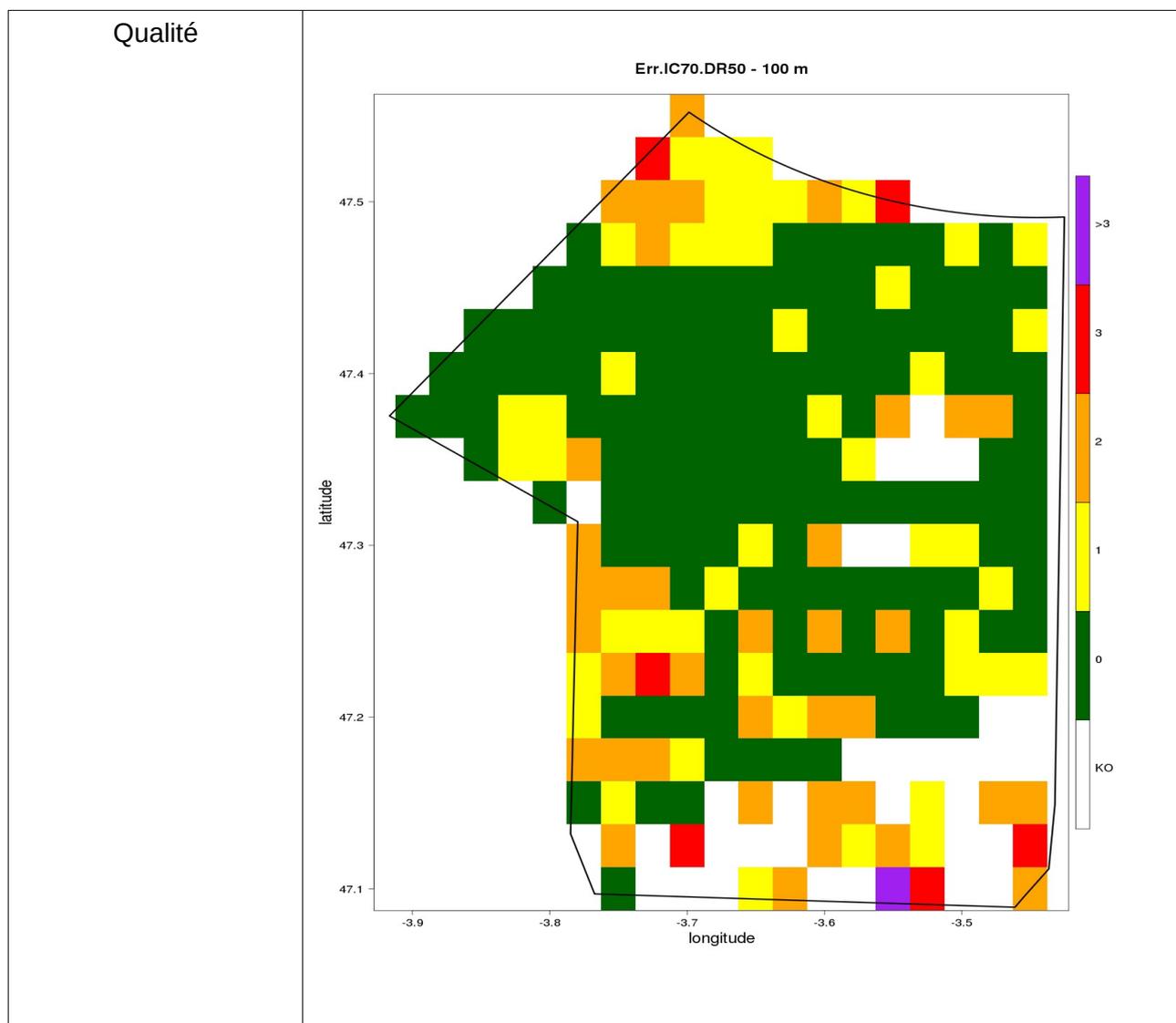


Illustration 5.21: Cartes des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 100 m pour la zone Bretagne, calculés à partir des données AROME (2000-2019)

Sur la zone, les durées de retour 50 ans varient entre 41,87 m/s [40,57 ; 43,18] (position 47,15 °N et -3,575°E) et 51,49 m/s [45,30 ; 57,68] (position 47,450°N et -3,5°E). Les valeurs les plus élevées se situent essentiellement dans la partie nord de la zone. Il y a 33 points point lesquels l'algorithme d'ajustement n'a pas convergé. De nombreux points ont un ajustement médiocre (observations pouvant sortir légèrement de l'intervalle de confiance à 70 %).

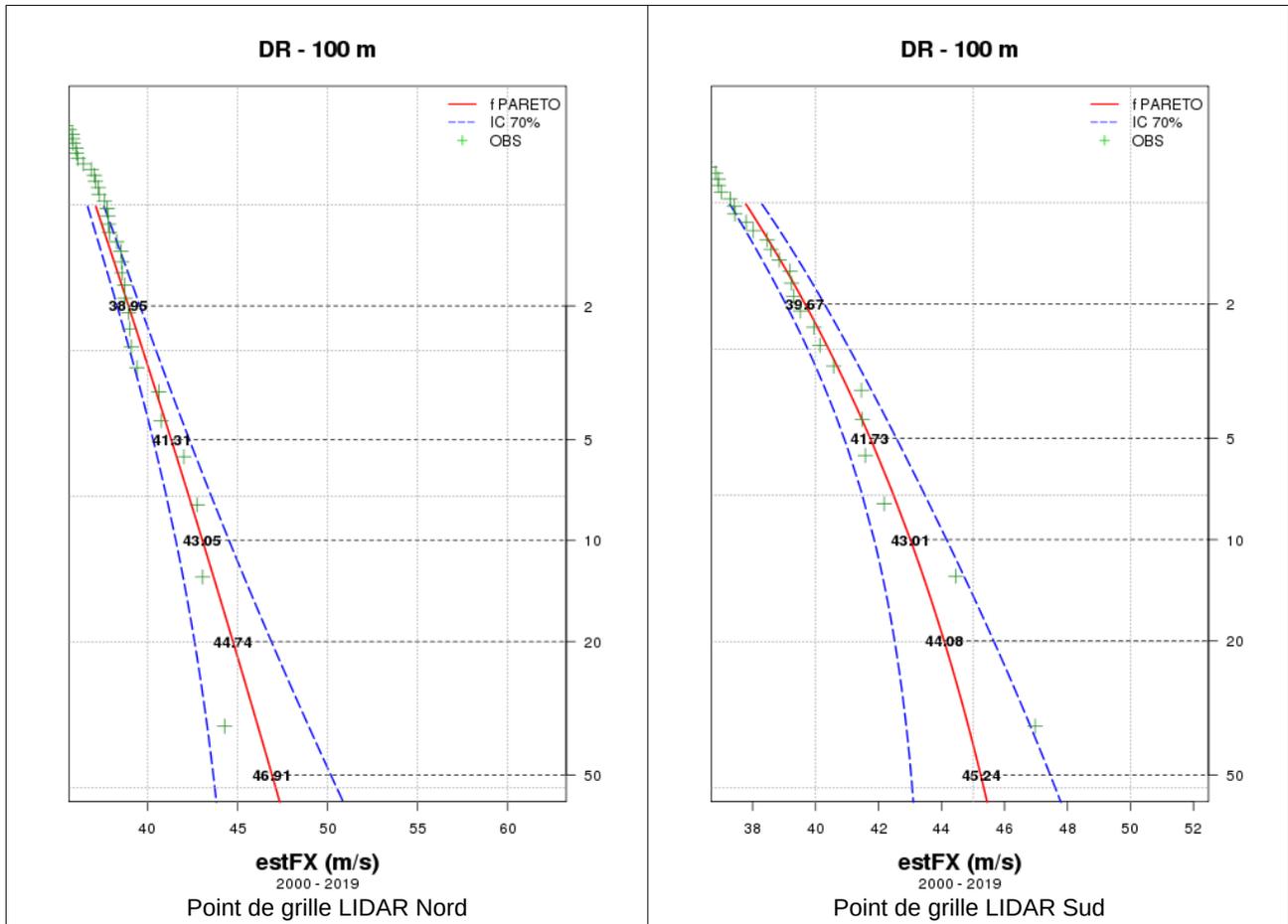
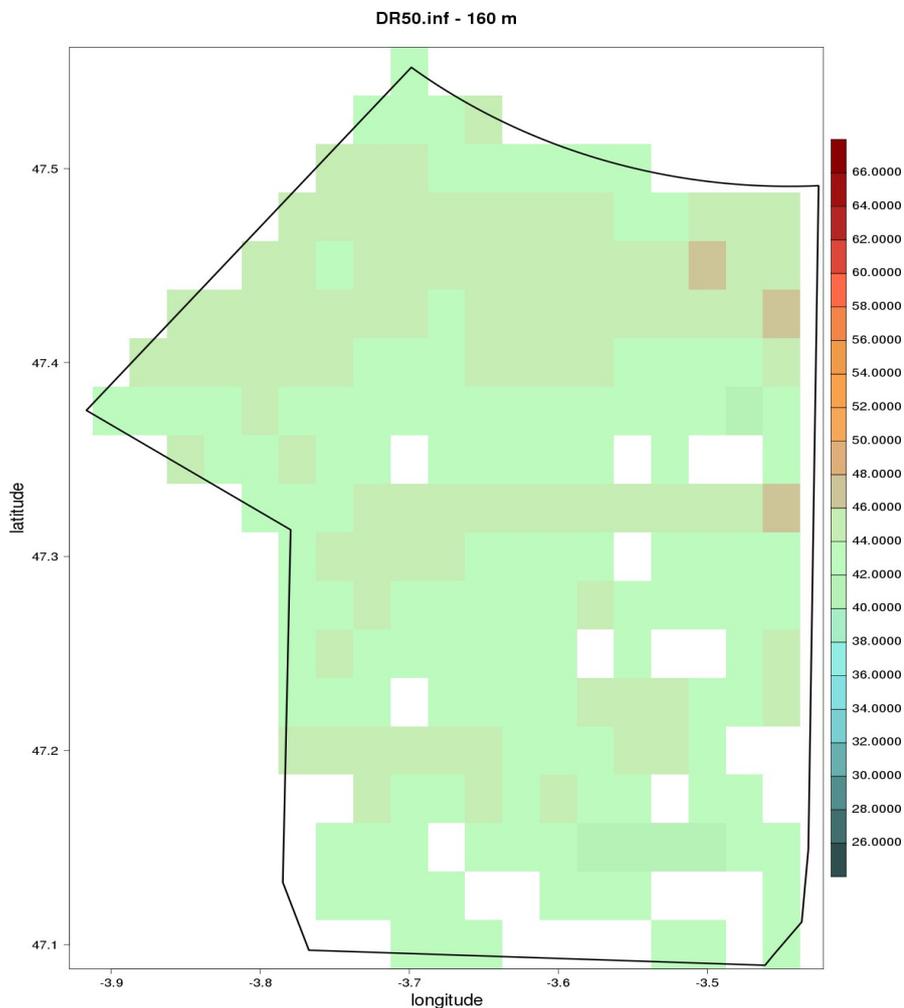


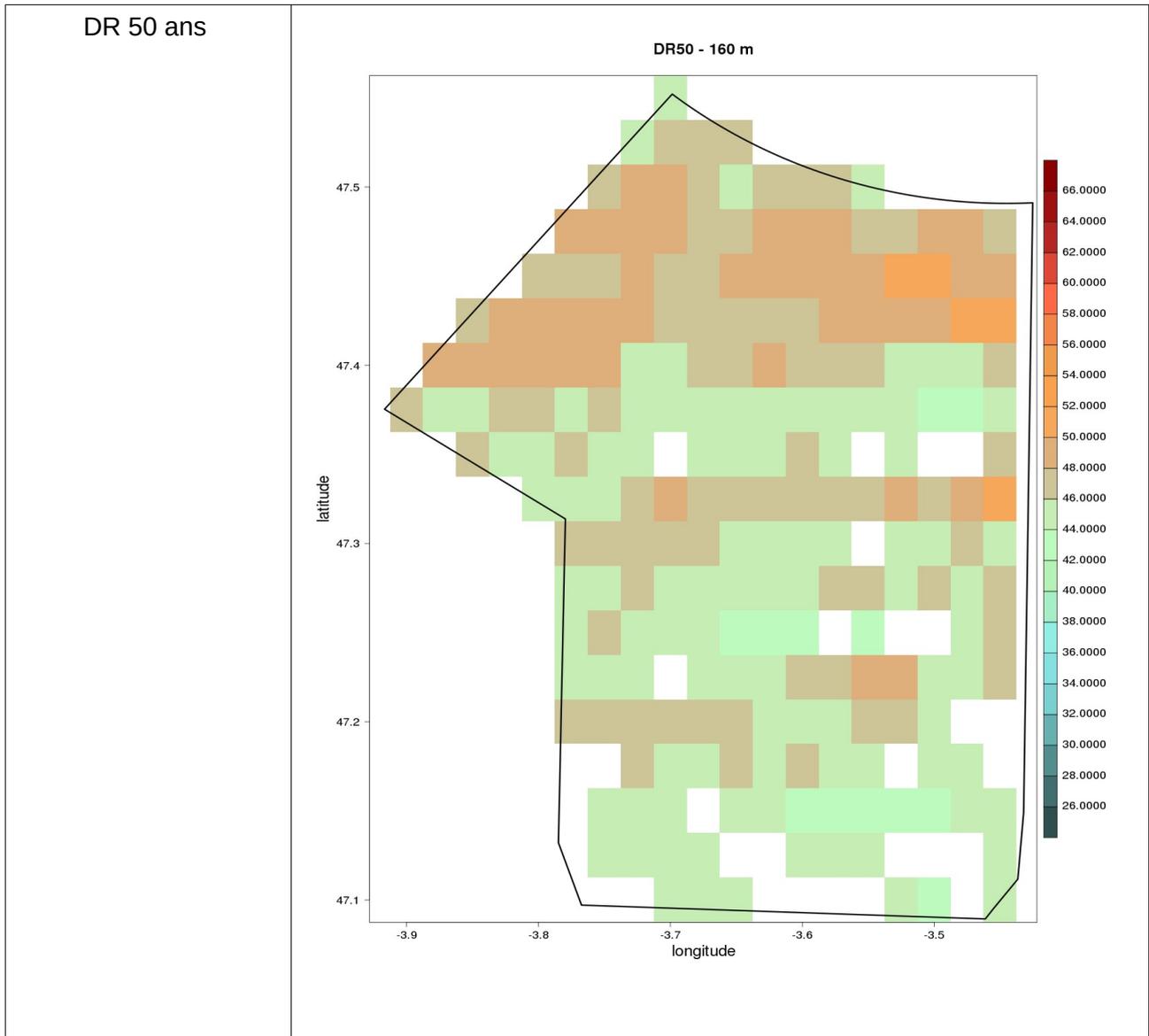
Illustration 5.22: Courbes des quantiles de rafales à 40 m – à gauche, pour le point 40, point de grille le plus proche du LIDAR Nord et à droite pour le point 150, point de grille le plus proche du LIDAR Sud

A 160 m (seuil 34,8 m/s) :

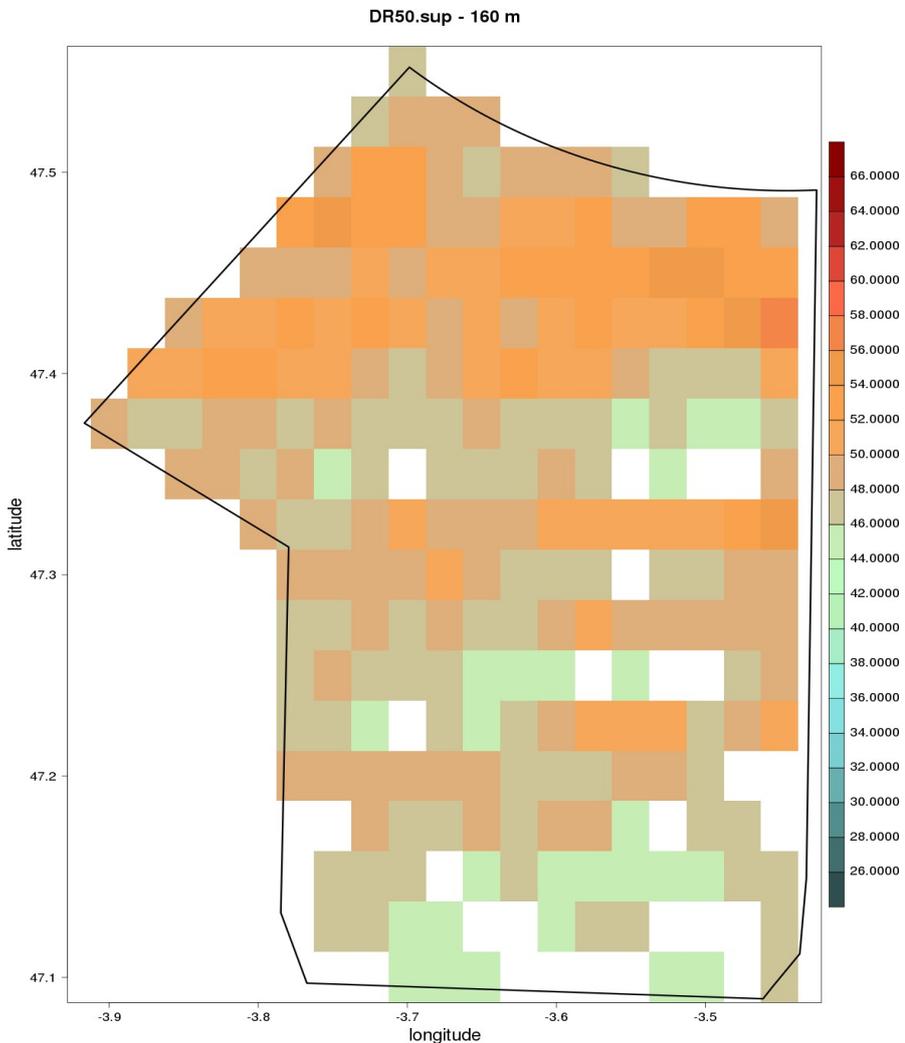


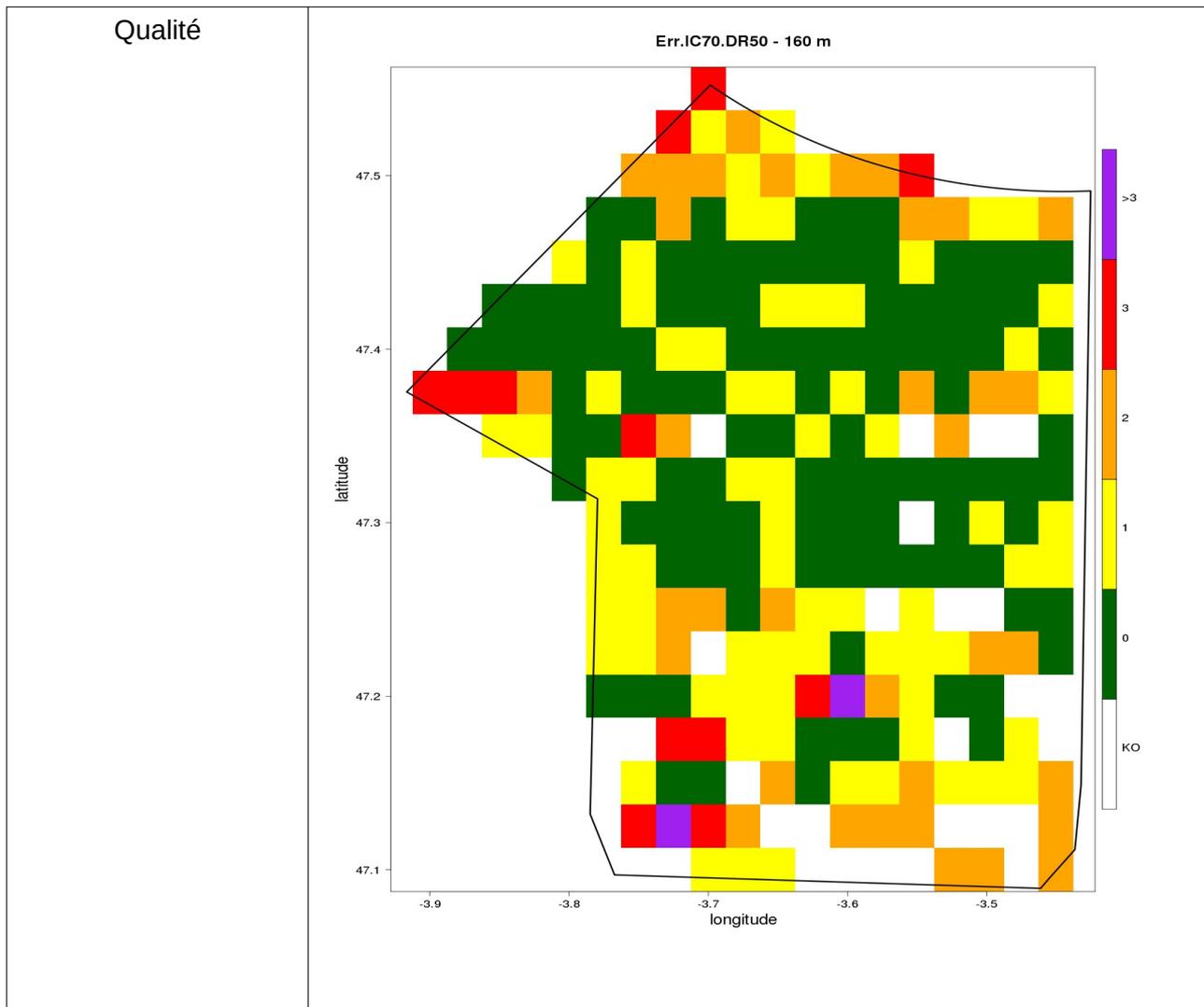
Borne inférieure





Borne supérieure





*Illustration 5.23: Cartes des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 160 m pour la zone Bretagne, calculés à partir des données AROME (2000-2019)*

Sur la zone, les durées de retour 50 ans varient entre 43,07 m/s [41,67 ; 44,47] (position 47,150 °N et -3,55°E) et 51,83 m/s [46,45 ; 57,22] (position 47,425°N et -3,450°E). Les valeurs les plus élevées se situent essentiellement dans la partie nord de la zone. Il y a 30 points point lesquels l’algorithme d’ajustement n’a pas convergé. De nombreux points ont un ajustement médiocre (observations pouvant sortir légèrement de l’intervalle de confiance à 70 %).

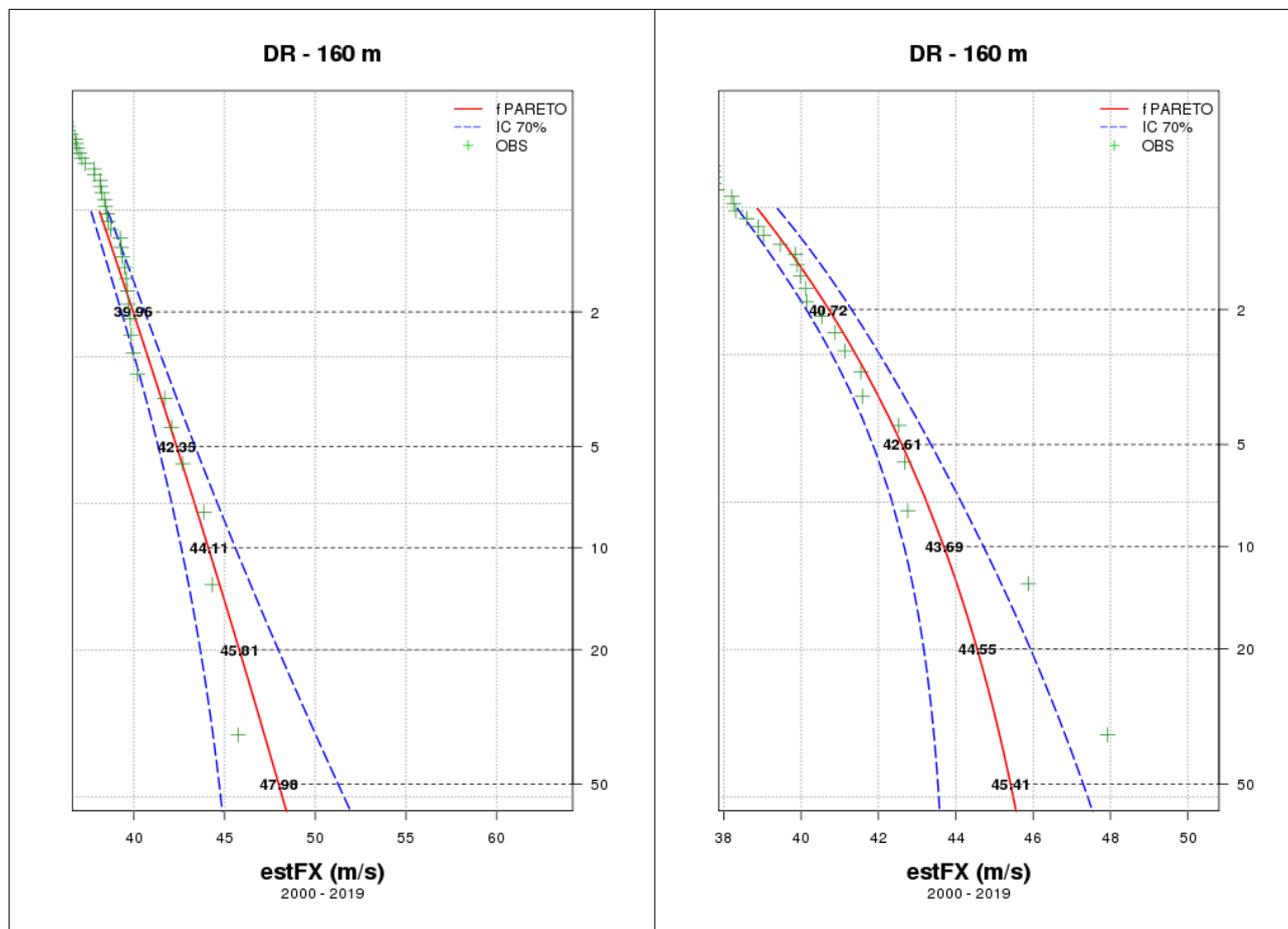


Illustration 5.24: Courbes des quantiles de rafales à 40 m – à gauche, pour le point 40, point de grille le plus proche du LIDAR Nord et à droite pour le point 150, point de grille le plus proche du LIDAR Sud

Conclusion :

Quel que soit le niveau considéré, les valeurs les plus élevées de rafale cinquantennale se situent essentiellement dans la partie nord de la zone, pouvant dépasser les 50 m/s au-dessus de 100 m, associé à des incertitudes (intervalle de confiance 70 %) de l'ordre de  $\pm 10$  à 13 % selon les niveaux.

Remarque :

La méthode utilisée ici pour le calcul des quantiles de durée de retour est une méthode appliquée point par point. La limite de cette méthode est de considérer chaque point de manière individuelle ; son intérêt est d'accéder à une première estimation de l'ordre de grandeur de la rafale cinquantennale sur la zone. L'analyse doit donc se faire pour la zone dans son ensemble et non point par point. La profondeur de l'échantillon (période 2000-2019) ne permet de capter qu'une partie de climat actuel, et n'intègre donc pas des événements extrêmes antérieurs à 2000 (dont la tempête de 1999 par exemple). Cet échantillon de 20 ans de données intègre une réalisation de trajectoires de vent extrême passées, qui du fait de la variabilité interne du climat peuvent être localement différentes hors de cette période, pour un même climat. Les résultats sont sensibles à la profondeur de l'échantillon, et doivent par conséquent être interprétés avec précaution.

## 5.3 Exposant du cisaillement de vent ( $\alpha$ )

Pour les 254 points de grille AROME de la zone Bretagne, à partir des séries des forces de vent sur 20 ans (période 2000-2019), les **coefficients de cisaillement vertical du vent** sont calculés pour **trois couches (40 m à 100 m, 100 m à 160 m et 40 à 160 m)** selon la formule :

$$\alpha = \frac{\ln(FF_2/FF_1)}{\ln(Z_2/Z_1)}$$

(avec  $FF_1$  la force du vent en m/s au niveau bas,  $FF_2$  la force du vent en m/s au niveau haut,  $Z_1$  l'altitude en m au niveau bas,  $Z_2$  l'altitude en m au niveau haut), **par secteur de 30°, par bin de vent moyen de 1 m/s et également tous secteurs et bins confondus. Le calcul des statistiques portera chaque fois sur l'ensemble des 24 heures quotidiennes, mais aussi sur des heures de jour et sur des heures de nuit.**

Les **coefficients de cisaillement** ont été calculés à **partir des données horaires de vent**. Toutefois, pour éviter de calculer un logarithme d'un nombre trop petit ou de diviser par un nombre proche de 0, toutes les valeurs inférieures à 0,5 m/s ont été ramenées à 0,5 m/s.

Les statistiques des coefficients de cisaillement  $\alpha$  sont calculées en distinguant le jour et la nuit ; la distinction jour/nuit est effectuée de la façon suivante : les données du jour sont celles correspondant aux données horaires allant de 07 h UTC à 18 h UTC et celles de la nuit correspondent aux données sur la plage 19 h UTC à 06 h UTC.

Pour le calcul des résultats par secteur ou par bin, quelle que soit l'une des trois couches considérées ici, les directions considérées sont celles du vent au niveau 100 m.

Ces données sont disponibles dans les fichiers qui font partie des livrables. Le séparateur de champs est la virgule, le caractère de décimale est le point.

### 5.3.1 Coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent tous secteurs confondus

Les cartes du coefficient  $\alpha$  de cisaillement de vent pour les couches 40-160 m, 40-100 m, 100-160 m tous secteurs confondus pour la zone Bretagne, calculé à partir des séries des forces du vent d'AROME sur la période 2000-2019, sont fournies ci-dessous.

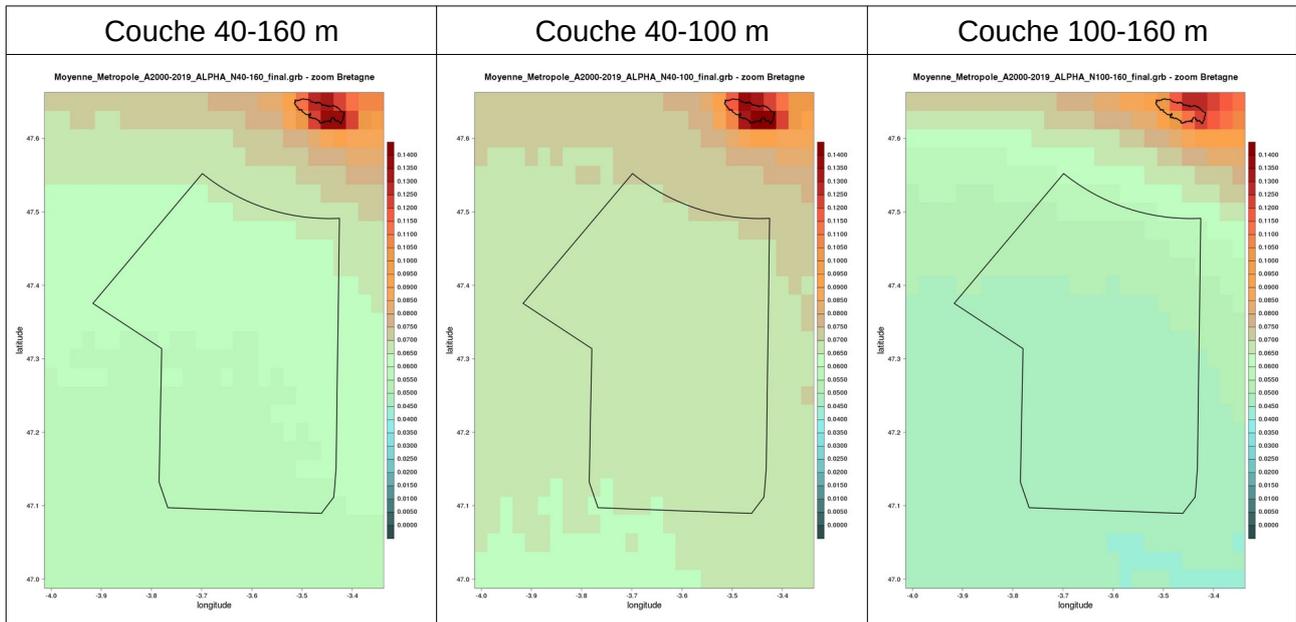


Illustration 5.25 : cartes du coefficient  $\alpha$  de cisaillement de vent pour les couches 40-160 m, 40-100 m, 100-160 m tous secteurs confondus pour la zone Bretagne, calculé à partir des forces du vent AROME (2000-2019)

L'analyse de ces cartes montre que les **coefficients  $\alpha$  de cisaillement vertical de la force du vent** sont **les plus importants pour la couche 40-100 m** parmi les trois couches étudiées. Ainsi, les pales des éoliennes rencontreront les coefficients  $\alpha$  de cisaillement vertical de la force du vent les plus forts surtout dans la partie basse de la couche balayée.

Sur la zone d'implantation prévue des éoliennes, matérialisée en noir, tous secteurs de vent confondus, le coefficient  $\alpha$  de cisaillement vertical de la force du vent varie en moyenne de 0,049 dans la couche 100-160 mètres à 0,067 dans la couche 40-100 m, lorsqu'on se rapproche de la surface.

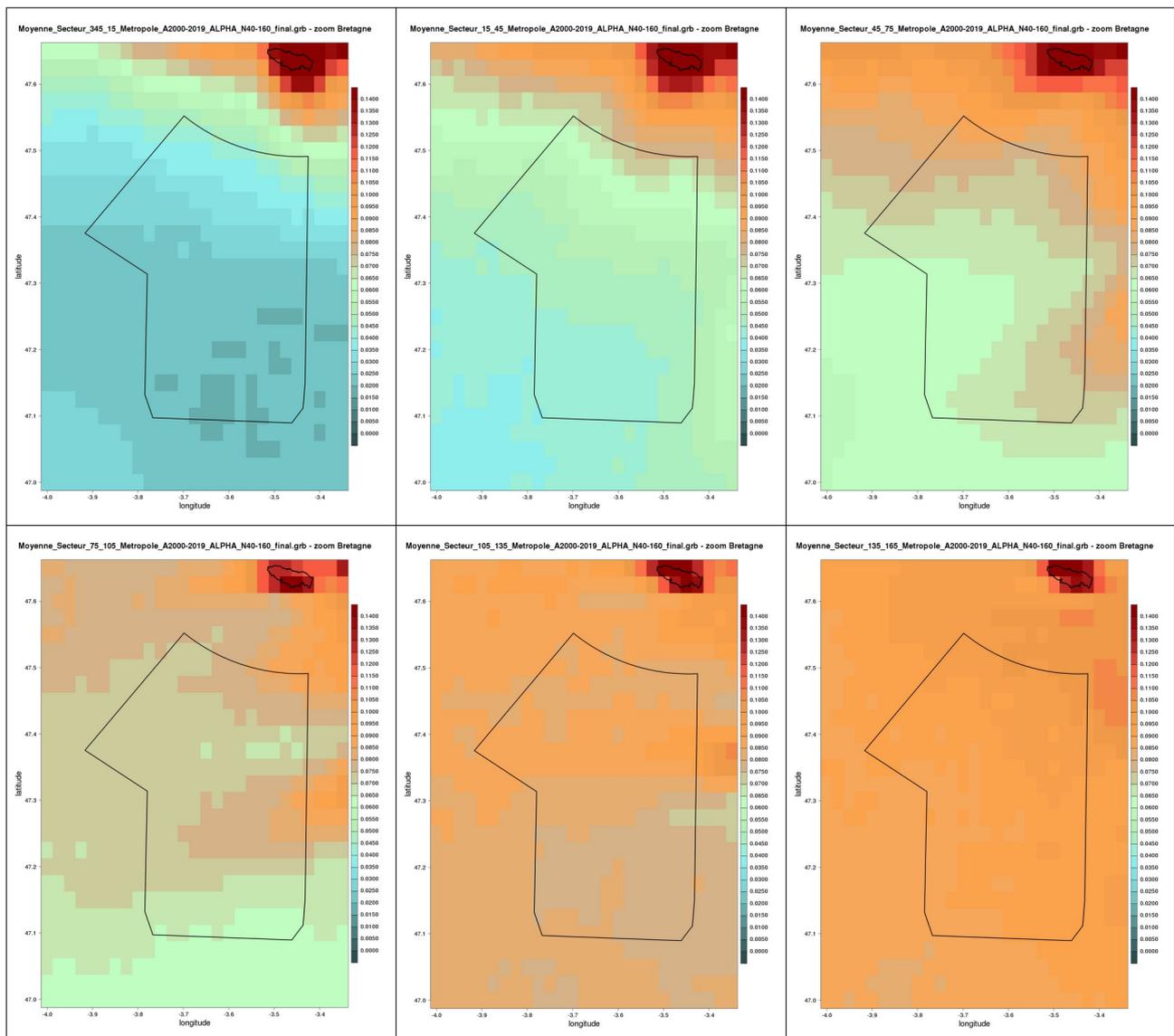
Sur cette zone d'implantation, se dessine un gradient nord-est / sud-ouest au niveau de chacune des couches, avec dans la couche 100-160 mètres des valeurs de l'ordre de 0,060 dans la partie nord-est et 0,045 dans la partie sud-ouest de la zone. Dans la couche la plus près de la surface

(40-100 mètres), on retrouve ce même type de gradient avec des valeurs de 0,071 au nord-est et 0,064 dans la partie sud-ouest.

D'autre part, quelle que soit la couche considérée ces cartes mettent bien également en évidence **des coefficients  $\alpha$  de cisaillement vertical de la force du vent moins élevés sur mer que sur l'île de Groix**, et ceci même dans la couche la plus élevée.

### 5.3.2 Coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent par secteur

Les cartes du coefficient  $\alpha$  de cisaillement de vent pour les couches 40-160 m, 40-100 m, 100-160 m par secteur de direction de 30° pour la zone Bretagne, calculé à partir des séries des forces du vent issues d'AROME sur la période 2000-2019, sont fournies ci-après.



## 5 Résultats des diagnostics de la turbulence

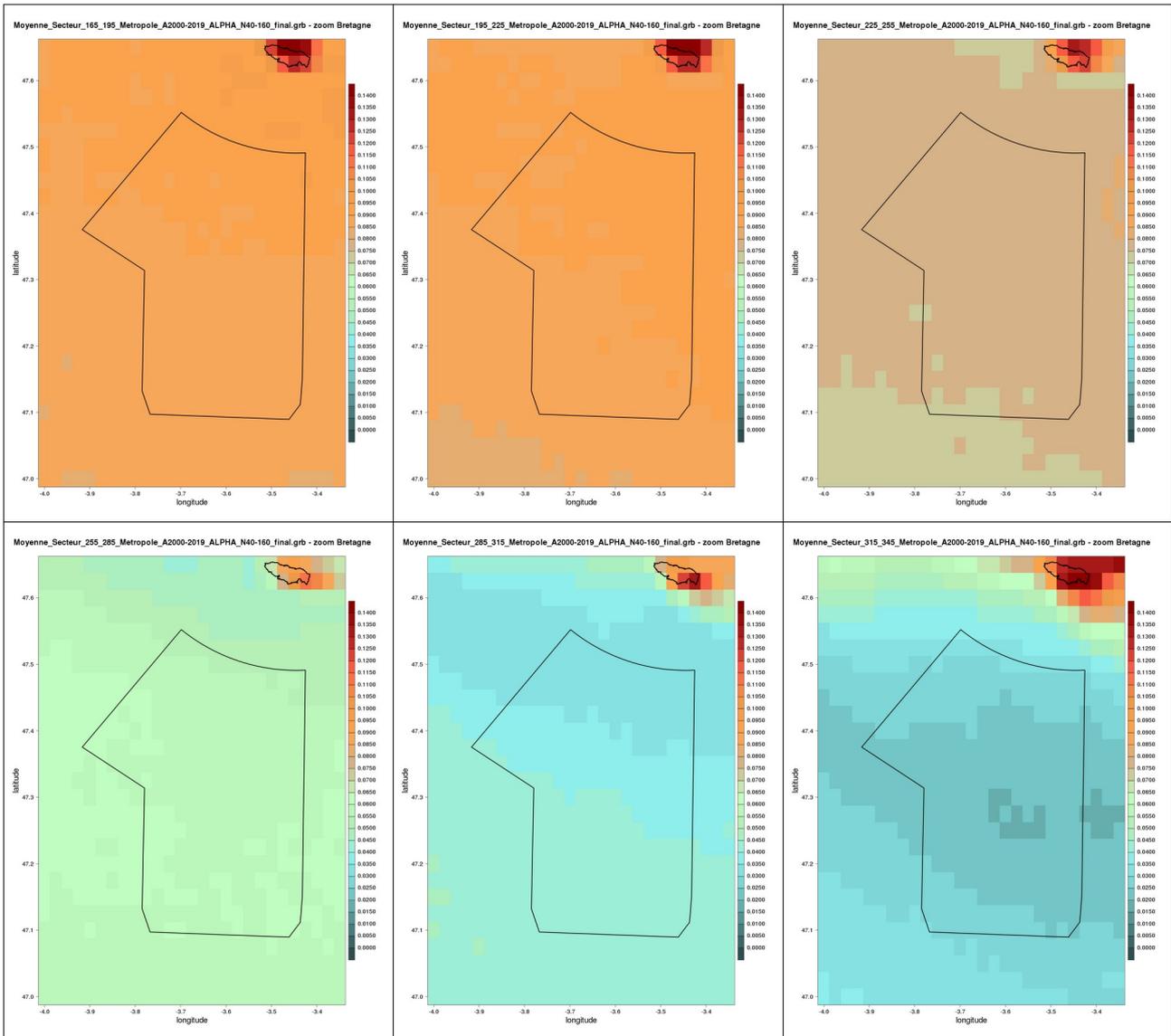
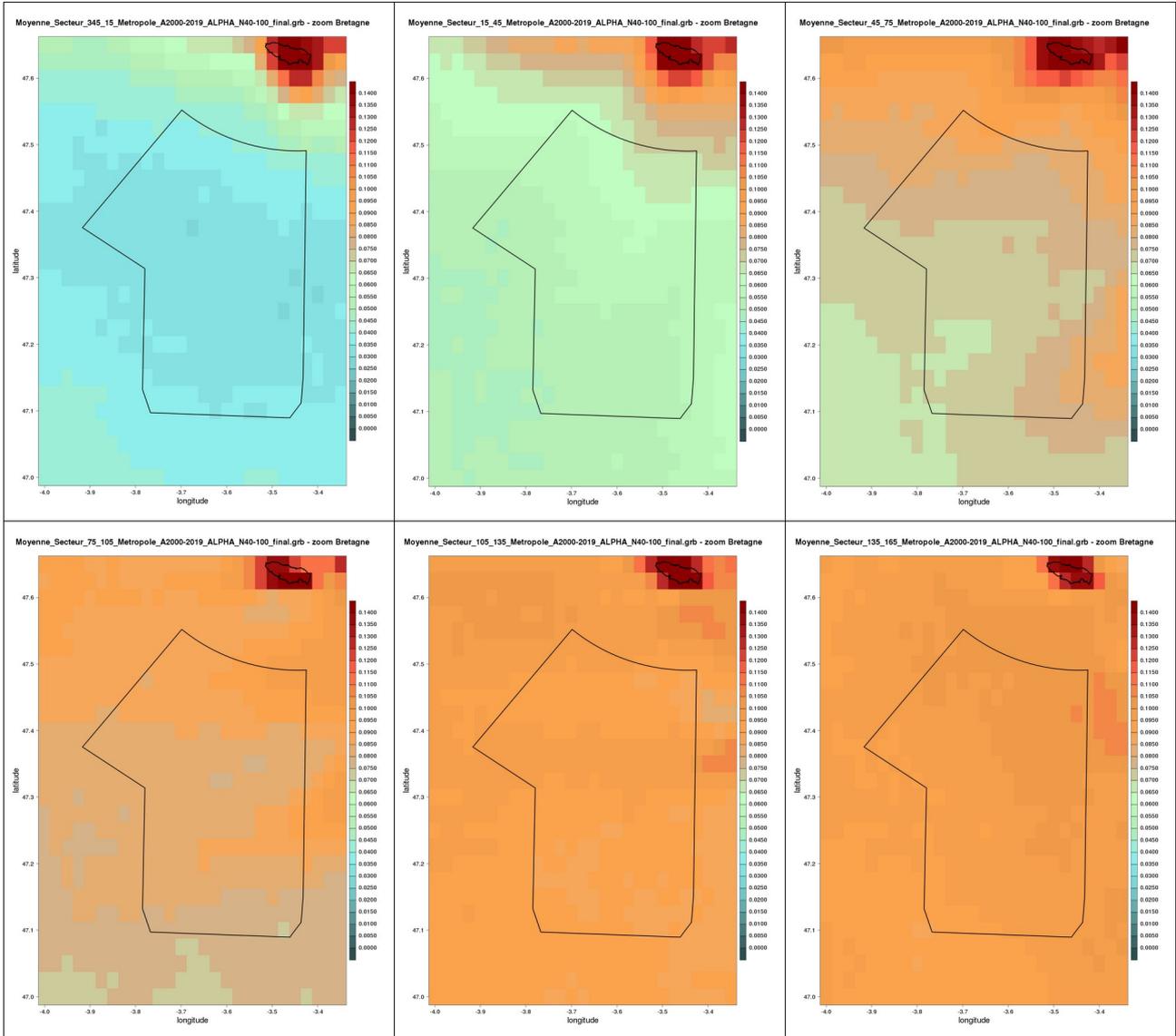


Illustration 5.26 : cartes du coefficient  $\alpha$  de cisaillement de vent pour la couche 40-160 m par secteur de direction de 30° pour la zone Bretagne, calculé à partir du vent AROME (2000-2019)



## 5 Résultats des diagnostics de la turbulence

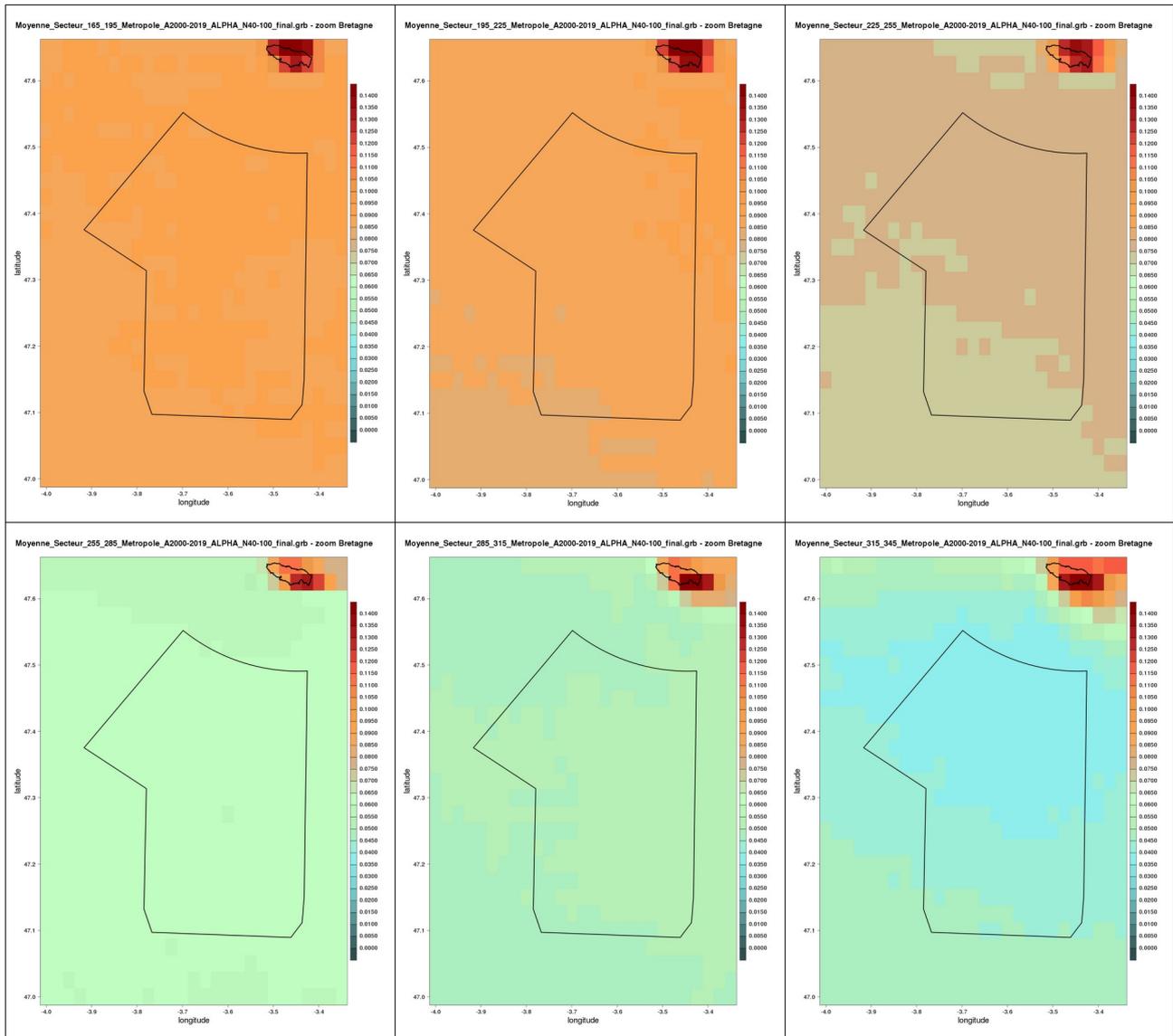
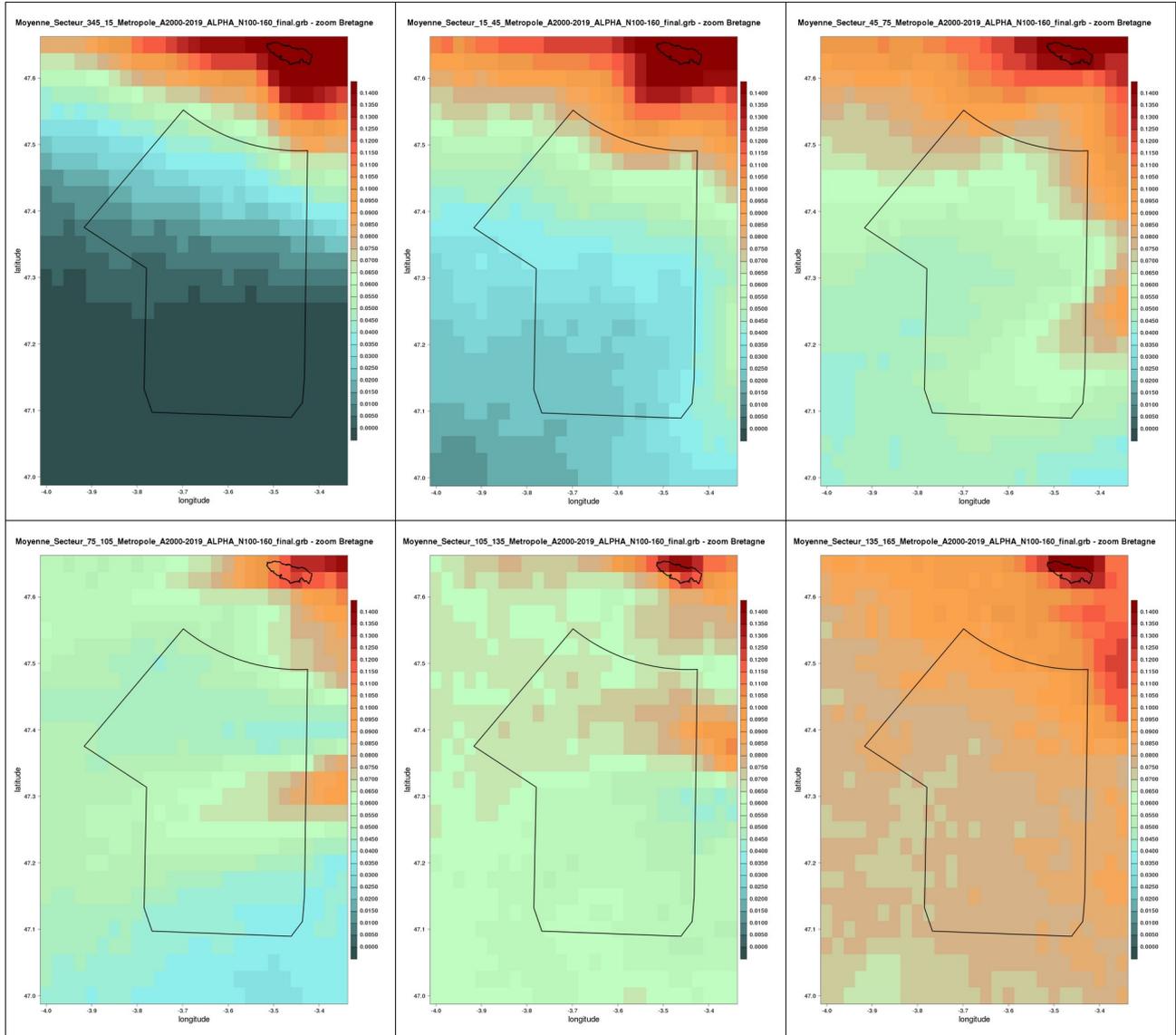


Illustration 5.27 : cartes du coefficient  $\alpha$  de cisaillement de vent pour la couche 40-100 m par secteur de direction de 30° pour la zone Bretagne, calculé à partir du vent AROME (2000-2019)



## 5 Résultats des diagnostics de la turbulence

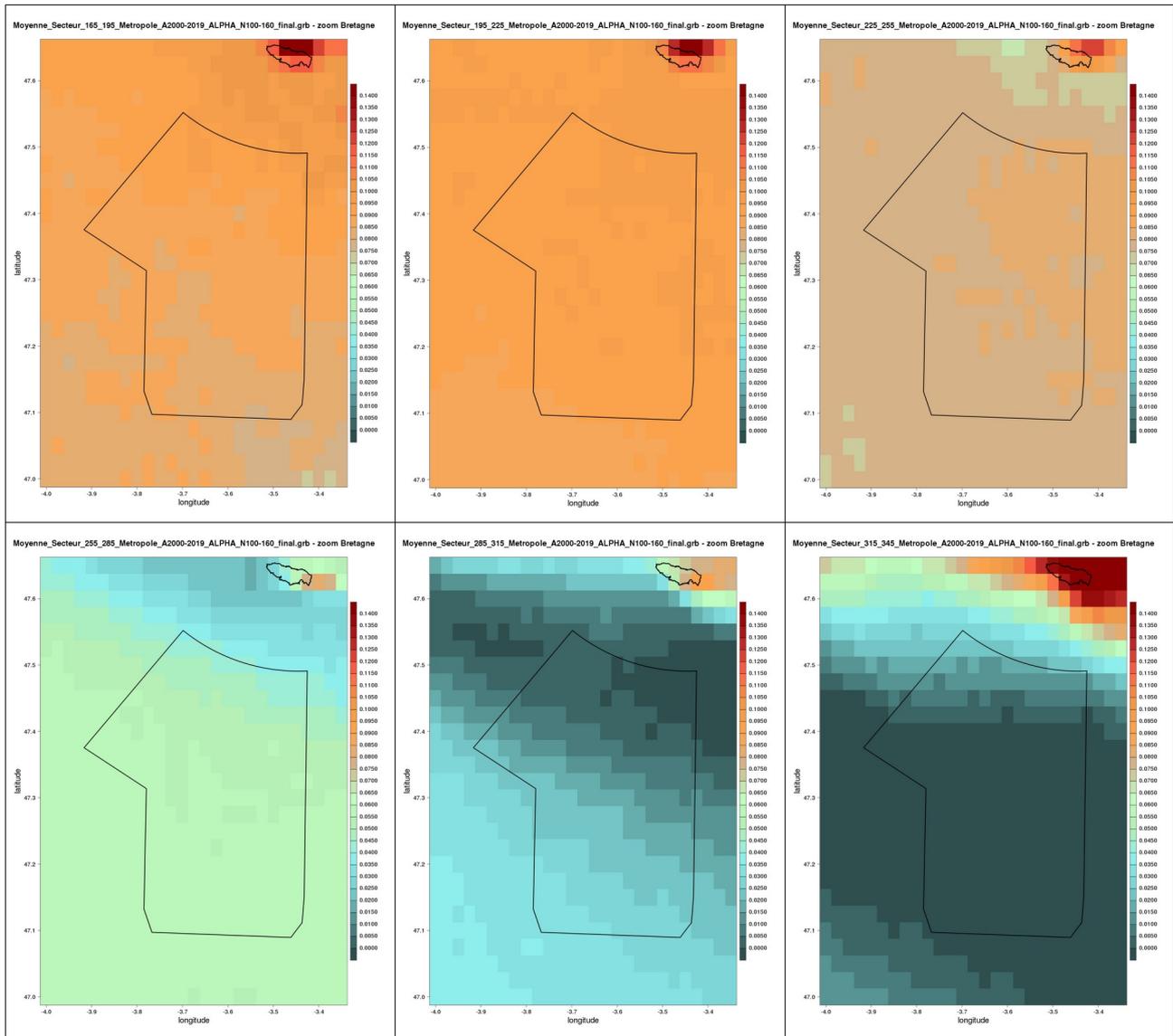


Illustration 5.28 : cartes du coefficient  $\alpha$  de cisaillement de vent pour la couche 100-160 m par secteur de direction de  $30^\circ$  pour la zone Bretagne, calculé à partir du vent AROME (2000-2019)

Ces cartes des coefficients  $\alpha$  de cisaillement du vent par secteur illustrent les variations de ce coefficient selon les secteurs de la direction du vent à 100 m.

Un tableau de synthèse des bornes du coefficient  $\alpha$  de cisaillement du vent par couche et par secteur sur la zone d'intérêt est réalisé et fourni (voir tableau 5.2).

Couche (m)	dd000	dd030	dd060	dd090	dd120	dd150	dd180	dd210	dd240	dd270	dd300	dd330
<b>40-160</b>	0,018	0,040	0,062	0,062	0,075	<b>0,086</b>	0,086	0,085	0,074	0,053	0,031	<b>0,018</b>
	0,052	0,076	0,090	0,086	0,092	<b>0,102</b>	0,094	0,093	0,080	0,061	0,044	<b>0,035</b>
<b>40-100</b>	<b>0,029</b>	0,049	0,069	0,075	0,087	<b>0,092</b>	0,087	0,084	0,073	0,060	0,048	0,035
	<b>0,044</b>	0,070	0,091	0,097	0,100	<b>0,105</b>	0,094	0,091	0,079	0,064	0,053	0,046
<b>100-160</b>	- 0,013	0,020	0,045	0,036	0,045	0,072	0,079	<b>0,087</b>	0,076	0,040	- 0,003	<b>- 0,021</b>
	0,068	0,088	0,094	0,080	0,087	0,098	0,099	<b>0,098</b>	0,083	0,060	0,033	<b>0,027</b>

Tableau 5.2 : plage (borne minimale et borne maximale établies à partir des points de la zone d'intérêt Bretagne) des moyennes du coefficient  $\alpha$  pour chacune des trois couches (40-160, 40-100, 100-160 m) par secteurs de direction de 30° du vent au niveau 100 m, sans distinction jour-nuit

Ces calculs du coefficient  $\alpha$  de cisaillement vertical de la force du vent par secteurs de direction du vent du niveau 100 m montrent des variations de ce coefficient entre -0,021 et 0,105.

Les cartes et le tableau montrent que les vents de nord sont associés à des coefficients de cisaillement faibles, parfois même négatifs dans la couche 100-160 mètres. À l'inverse ce sont les vents venant de sud-sud-est à sud-sud-ouest qui apportent les plus forts cisaillements de vent horizontal.

Une synthèse du cisaillement sur la zone pour le jour et pour la nuit est réalisée pour la couche 40-160 m et est fournie ci-dessous (voir tableau 5.3).

	jour			nuit			sans distinction jour-nuit		
	min	moy	max	min	moy	max	min	moy	max
Tous dd	0,055	0,057	0,061	0,061	0,064	0,073	0,058	0,061	0,067
dd000	0,011	0,023	0,050	0,022	0,028	0,053	0,018	0,026	0,052
dd030	0,031	0,043	0,064	0,046	0,057	0,084	0,040	0,051	0,076
dd060	0,053	0,061	0,080	0,070	0,077	0,098	0,062	0,070	0,090
dd090	0,054	0,070	0,088	0,070	0,075	0,091	0,062	0,073	0,086
dd120	0,061	0,073	0,087	0,086	0,095	0,106	0,075	0,083	0,092
dd150	0,082	0,089	0,099	0,089	0,098	0,109	0,086	0,093	0,102
dd180	0,083	0,087	0,093	0,087	0,091	0,096	0,086	0,089	0,094
dd210	0,085	0,088	0,092	0,085	0,091	0,098	0,085	0,090	0,093
dd240	0,073	0,076	0,078	0,074	0,078	0,083	0,074	0,077	0,080
dd270	0,043	0,056	0,060	0,059	0,062	0,067	0,053	0,059	0,061
dd300	0,020	0,033	0,044	0,043	0,045	0,048	0,031	0,039	0,044
dd330	0,009	0,018	0,032	0,026	0,029	0,038	0,018	0,024	0,035

Tableau 5.3 : minimum, maximum et moyenne du coefficient  $\alpha$ , obtenus à partir des valeurs  $\alpha$  de l'ensemble des points de grille de la zone d'intérêt de Bretagne fournies pour la couche 40-160 m par secteurs de direction de 30° du vent au niveau 100 m

Les coefficients  $\alpha$  de cisaillement vertical de vent sur la couche 40-160 m sont systématiquement plus forts la nuit que le jour.

### 5.3.3 Coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent par bin de 1 m/s

Nous avons calculé le cisaillement  $\alpha$  pour les trois couches, pour chacun des 25 bins de vent à 100 mètres et pour les périodes temporelles « jour », « nuit » et « jour+nuit ». Cela représente au total 225 cartes. Nous ne donnerons ici comme exemple que les cartes des plages 2,5-3,5, 7,5-8,5 et 14,5-15,5 m/s pour la couche 40-160 :

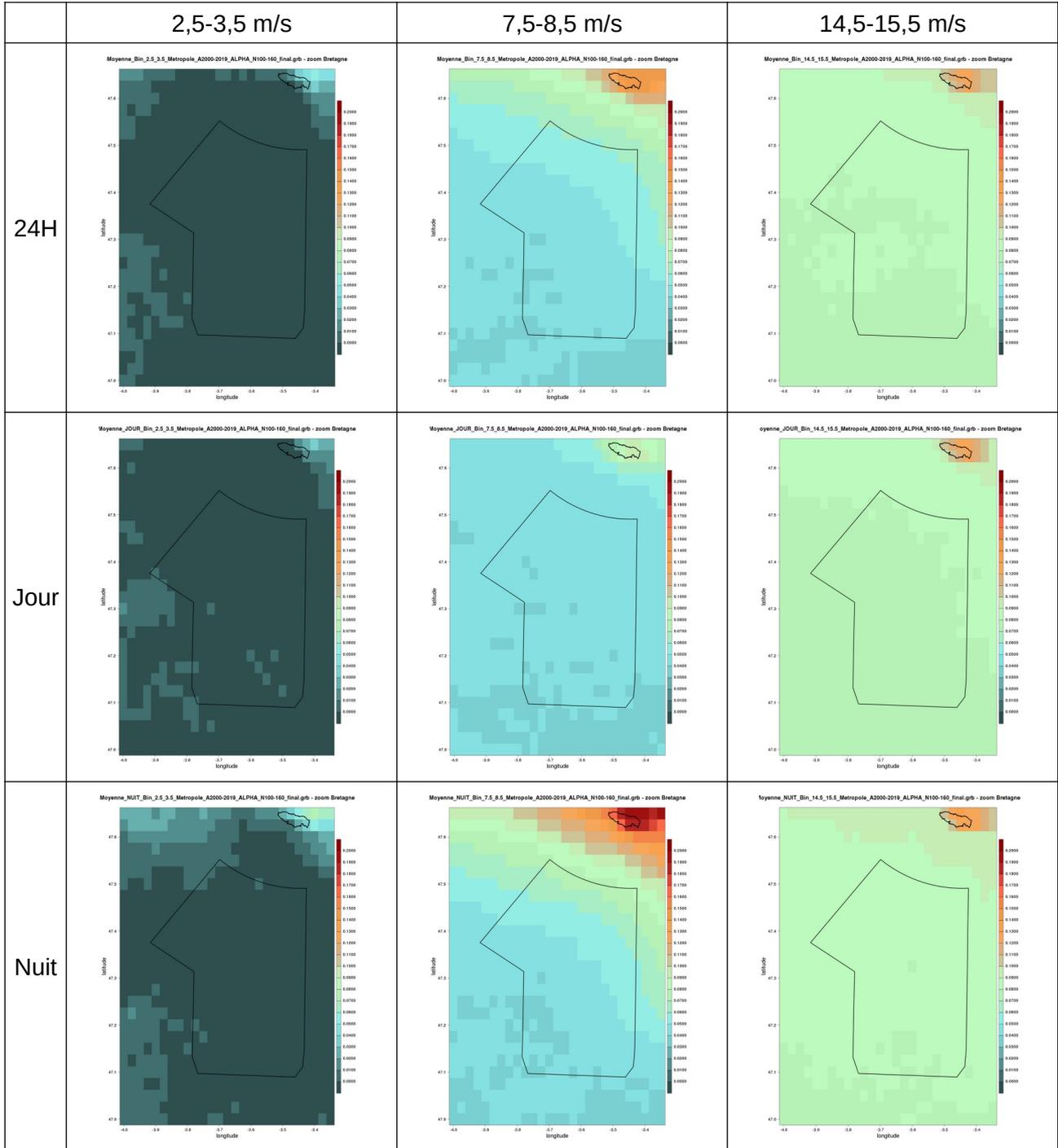


Illustration 5.29: Coefficient  $\alpha$  du cisaillement moyen du vent sur la couche 40-160 mètres pour les bins 2,5-3,5, 7,5-8,5 et 14,5-15,5 m/s avec différenciation jour/nuit sur la zone Bretagne

Nous constatons relativement peu de différences entre les valeurs de jour et les valeurs de nuit, sauf sur la plage autour de 8 m/s où nous voyons pour la nuit un accroissement du gradient sud-

ouest / nord-est dû à un noyau de cisaillement plus fort sur l'île de Groix. Nous remarquons aussi un accroissement sensible du coefficient entre le bin 2,5-3,5 m/s et le bin 7,5-8,5 m/s puis entre 7,5-8,5 m/s et 14,5-15,5 m/s mais de façon moins nette, compte-tenu de la palette de couleurs associée aux cartes.

	2,5-3,5 m/s	7,5-8,5 m/s	14,5-15,5 m/s
<b>24H</b>	0,023	0,065	0,079
<b>Jour</b>	0,024	0,063	0,077
<b>Nuit</b>	0,022	0,066	0,082

Tableau 5.4 : Moyenne sur la zone d'intérêt Bretagne du coefficient  $\alpha$  pour les bins de 3, 8 et 15 m/s avec différenciation jour-nuit, dans la couche 40-160 m

La moyenne calculée sur la zone permet de préciser que ce coefficient est plus important la nuit que le jour pour les vents de 8 m/s et 15 m/s, mais pas pour les vents faibles autour de 3 m/s.

Nous vérifions ici que ce coefficient augmente avec la force du vent, mais nettement plus quand on passe de 3 à 8 m/s que lorsqu'on passe de 8 à 15 m/s.

## 6 Incertitudes associées aux données fournies

Tous les calculs effectués dans le cadre de ce lot l'ont été à partir de la base de données horaires d'AROME sur la période 2000-2019. Ainsi, une source d'incertitude de ces résultats est liée notamment à **l'incertitude associée aux variables issues du modèle AROME entrant en jeu pour le calcul des indicateurs de turbulence** ici fournis.

Il est très difficile de fournir de manière précise une incertitude chiffrée sur les données fournies. En effet, les **points d'observations de vent en altitude** sont **peu nombreux** et ce **constat** est **amplifié dès lors que l'on s'intéresse au domaine maritime**. Cette faible densité des observations de vent et de turbulence en altitude, que ce soit sur terre ou sur mer, ne permet pas, d'une part, de disposer d'un regard critique vis-à-vis de la qualité intrinsèque de ces données mesurées et, d'autre part, réduit l'évaluation possible des formules retenues pour les indicateurs de turbulence en seulement quelques points.

### 6.1 Incertitude sur les intensités de turbulence estimées

La formule retenue pour le calcul de l'intensité de turbulence prend en compte les variables TKE et FF d'AROME à un niveau d'altitude donné. La qualité des intensités de turbulence estimées dépend ainsi de la qualité de ces paramètres AROME. Des évaluations de champs relatifs à la couche limite d'AROME et à la TKE ont été réalisées sur le domaine terrestre (comme lors de la

campagne de mesure BLLAST [Couvreur et al, 2016]) mais on ne dispose pas d'évaluation spécifique sur le domaine maritime.

La **comparaison des intensités de turbulence** issues des données observées et estimées par AROME pour un point en mer a montré une **sous-estimation des séries estimées par rapport à la série des données observées**.

## 6.2 Incertitude sur l'estimation des rafales

La rafale d'AROME à 10 m est issue d'un diagnostic dont la formule de calcul est  $RAF_{10m} = FF_{10m} + C * \sqrt{TKE_{20m}}$  avec  $FF_{10m}$  le vent moyen à 10 m,  $TKE_{20m}$  l'énergie cinétique turbulente à 20 m. La force du vent à 10 m intervenant dans la formule de calcul de la rafale à 10 m, il est intéressant de fournir ici **quelques éléments sur la qualité du vent à 10 m dans AROME**. Météo-France suit en routine la qualité du vent à 10 m dans AROME sur terre. La comparaison par rapport aux observations du vent à 10 m issues des SYNOP (messages d'observation en surface circulant sur le système mondial de télécommunication de l'Organisation Météorologique Mondiale) montre, au niveau de la direction, un biais inférieur en moyenne à  $-3^\circ$  et une erreur quadratique moyenne inférieure à  $35^\circ$  en moyenne ; au niveau de la force du vent, on constate un biais inférieur en moyenne à  $-0.3$  m/s en force du vent et une erreur quadratique moyenne de l'intensité du vent inférieure à 1.7 m/s en moyenne. Le vent sur terre et dans les basses couches (près du sol) est davantage entaché d'erreur que le vent plus haut et sur mer, du fait d'une représentation partielle des spécificités du terrain dans le modèle à résolution horizontale 2,5 km. On sait actuellement qu'AROME surestime les rafales à 10 m dans certaines situations convectives et qu'il les sous-estime plutôt dans des cas de vents régionaux tels que le Mistral et la Tramontane.

Quant aux rafales estimées dans le cadre de ces travaux, la formule de calcul retenue fait entrer en jeu la rafale à 10 m. Aussi, les limites des estimations de la rafale au-dessus de 40 m proviennent notamment des limites de calcul de la rafale à 10 m et du comportement connu d'AROME de surestimation sous rafales convectives.

Le chiffrage précis de l'incertitude pour les rafales en off-shore nécessiterait un calcul de score par rapport à des observations de vent au-dessus de 100 m dont Météo-France ne dispose pas de façon suffisante sur mer. Toutefois, pour les quelques points étudiés disposant de mesures de vent en altitude, qu'ils soient terrestres ou maritimes, la **comparaison entre les rafales en altitude calculées et observées** (pour des niveaux analysés entre 40 et 160 m) montre des résultats **tout à fait acceptables** : pour les vents du LIDAR supérieurs à 2 m/s, les scores statistiques « appairés avec AROME » pour Oléron et Dunkerque laissent apparaître une erreur relative d'AROME sur l'estimation de l'intensité de la rafale de l'ordre de 15 % (sous-estimation).

## 6.3 Limites du calcul des durées de retour des rafales cinquantennales

Concernant les rafales cinquantennales calculées sur la zone Bretagne, elles l'ont été à partir de séries d'une durée de 20 ans. En général, on admet qu'il n'est pas raisonnable d'évaluer des quantiles de durée de retour supérieure à quatre fois la durée de l'échantillon. À partir de série de durée 20 ans, il est ainsi possible de calculer des quantiles associés à des durées de retour de 50 ans, mais nous sommes encore proches de la limite de la durée de retour calculable ; aussi, les résultats obtenus en termes de rafales cinquantennales doivent être pris par conséquent avec précaution, notamment pour les points où l'indicateur de qualité n'est pas à 0.

La **valeur de la rafale cinquantennale doit être considérée en ayant toujours à l'esprit les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance**, la connaissance de l'amplitude de cet intervalle est absolument nécessaire et a autant d'importance que la valeur centrale. Concernant ces rafales cinquantennales, il faut également garder en tête que les valeurs des quantiles associés à une durée de retour dépendent des informations disponibles au moment de leur évaluation et qu'**un événement ultérieur ou antérieur à la période de l'échantillon est toujours susceptible de les contredire**. De plus, en matière de durée de retour, les **résultats sont sensibles à la méthode utilisée** ; ceci constitue également une source d'incertitude à prendre en considération vis-à-vis de ces résultats des rafales de durée de retour 50 ans.

## 6.4 Incertitudes associées au coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent

Le coefficient  $\alpha$  de cisaillement de vent de la couche 40 – 160 m sur la bande littorale a été calculé en prenant en compte la force du vent moyen à 40 m et à 160 m.

La formule permettant le calcul de cet exposant du cisaillement de vent provient de la loi du profil logarithmique du vent, qui est rappelons-le une relation semi-empirique et correspond à une **approximation** faite au-dessus d'un terrain plat et avec une stratification atmosphérique neutre. L'**application de cette loi** a ainsi ces **limites** [Zhang, 2015].

## 7 Conclusions

L'objectif des travaux ici présentés est d'étudier la turbulence atmosphérique dans le cadre d'une problématique d'éolien off-shore. Cette étude a permis d'identifier différents indicateurs permettant d'appréhender la turbulence atmosphérique sur la couche allant de 40 m à 160 m principalement. Ces **indicateurs de turbulence** sont **l'intensité de turbulence, la rafale (représentative de la rafale 3 secondes), l'exposant du cisaillement de vent.**

**L'utilisation de la base de données horaires du modèle météorologique AROME à résolution horizontale 2,5 km sur la période 2000-2019** permet de calculer des statistiques de ces différents indicateurs de la turbulence. Pour l'intensité de la turbulence et la rafale à 160 m, une **phase préliminaire** a été la **vérification des formules** utilisées lors de la première étude sur la zone de Dunkerque en utilisant autant que faire se peut des données de vent en altitude et sur mer, disponibles depuis l'étude sur Dunkerque (annexe I).

Pour l'intensité de turbulence et l'exposant du cisaillement vertical du vent, des statistiques sont fournies sur la zone Bretagne avec une analyse plus fine de ces résultats par secteurs de direction de 30° et par bin de force de vent de 1 m/s. Ces données à disposition permettent ainsi d'avoir une estimation de ces diagnostics de la turbulence et d'accéder ainsi à une climatologie de la turbulence atmosphérique sur ces domaines.

## 8 Bibliographie

- Couvreux, Fleur, et al. "Boundary-layer turbulent processes and mesoscale variability represented by numerical weather prediction models during the BLLAST campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics* 16.14 (2016): 8983-9002
- Cuxart, J., P. Bougeault, et J.-L. Redelsperger, 2000, *A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations*, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 126, 1–30, 2000.
- De Moor G, *Couche limite atmosphérique et turbulence : les bases de la micrométéorologie dynamique*, Cours et manuels n°13, 2000
- Dubois C., Faucou E., Barthod M., Pouponneau B., Pourret V., Mestre O., Martinoni-Lapierre S., Sorel.M. : *Combining National Meteorological meso-scale data modelling and CFD, for wind power plant production assessments* – European Wind Energy Conference 2015.
- Hadjira Schmitt-Foudhil, *Météorologie de la couche limite atmosphérique, module environnement atmosphérique et qualité de l'air*, CEREa, novembre 2010, [http://cerea.enpc.fr/fich/support\\_cours/POLU1\\_2010-2011/cours\\_CLA\\_2\\_nov\\_2010\\_HSF\\_final.pdf](http://cerea.enpc.fr/fich/support_cours/POLU1_2010-2011/cours_CLA_2_nov_2010_HSF_final.pdf)
- Honnert R., Masson V., and Couvreux F., 2011 : *A Diagnostic for Evaluating the Representation of Turbulence in Atmospheric Models at the Kilometric Scale*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68, p.3112-3131
- Honnert R. and Masson V., 2014 : *What is the smallest physically acceptable scale for 1D turbulence schemes ?* *Front. Earth Sci.* 2 :27. doi : 10.3389/feart.2014.00027
- MEASNET Procedure : *Evaluation of Site-Specific Wind Conditions*, Version 2, April 2016
- Norme internationale de classification des éoliennes* IEC 61400-3, édition 1.0, 2009-02
- Peña A., Floors R., Sathe A., Gryning S.-E., Wagner R., Courtney M. S., Larsén X. G., Hahmann A. N., Hasager C.B., *Ten Years of Boundary-Layer and Wind-Power Meteorology at Høvsøre*, Denmark, *Boundary-Layer Meteorol* (2016) 158:1–26, DOI 10.1007/s10546-015-0079-8
- Ricard, D., Lac, C., Riette, S., Legrand, R., & Mary, A. (2013). Kinetic energy spectra characteristics of two convection-permitting limited-area models AROME and Meso-NH. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(674), 1327-1341.
- Seigneur C., Cours SGE, Modélisation de la pollution atmosphérique, Dynamique, Cerea
- Seity Y., Brousseau P., Malardel S., Hello G., Benard P., Bouttier F., Lac C., Masson V., *The AROME-France Convective-Scale Operational Model*, *Monthly weather review*, American Meteorological Society, volume 139, mars 2011, DOI : 10.1175/2010MWR3425.1
- Stull R., *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers, 1988

Suomi I., Gryning S.-E., Floors R., Vihma T., Fortelius C., [On the vertical structure of wind gusts](#), décembre 2014

Suomi I., Vihma T., Gryning S.-E. and Fortelius C., *Wind-gust parametrizations at heights relevant for wind energy : a study based on mast observations*, Q.J.R. Meteorol. Soc., 139 : 1298–1310. doi : 10.1002/qj.2039, 2013

Tammelin B., Vihma T., Atlaskin E., Badger J., Fortelius C., Gregow H., Hortnainen M., Hyvönen R., Kilpinen J., Latikka J., Ljungberg K., Gylling Mortensen N., Niemelä S., Ruosteenoja K., Salonen K., Suomi I., Venäläinen A., *Production of the Finnish Wind Atlas, 2011*

Zhang, M. H. (2015). *Wind resource assessment and micro-siting: science and engineering*. John Wiley & Sons.

Wagner R., Courtney M. Larsen, Torben J., Schmidt P., Uwe [Simulation of shear and turbulence impact on wind turbine performance](#), 2010

Wichers Schreur B., Geertsema G., *Theory for a TKE based parameterization of wind gusts*, Hirlam Newsletter n°54, décembre 2008

---

**FIN DU DOCUMENT**

---

---

## Annexes

Les annexes « Choix méthodologiques des estimateurs de rafale et indice de turbulence » et « Calcul des durées de retour » sont livrées en compléments du rapport dans deux documents joints :

- [AO5\\_BretagneSud\\_Lot3\\_Rapport\\_Bretagne\\_V1\\_Annexe1.pdf](#)
- [AO5\\_BretagneSud\\_Lot3\\_Rapport\\_Bretagne\\_V1\\_Annexe2.pdf](#)