

Évaluation du risque de turbulence

Lot 3 - Golfe de Gascogne Nord et Sud (GGNS)



Version A du 20/08/2025

Client

Direction Générale de l'Énergie et du Climat du Ministère de la Transition Écologique

Guillaume-
jj.poirier@developpement-durable.gouv.fr



Responsable commercial :
Météo-France D2C Toulouse

christophe.jacolin@meteo.fr



Responsable technique :
Météo-France DSM/CS

Alain.brisson@meteo.fr

- page laissée intentionnellement vide -

Documents de référence antérieurs

	Intitulé	Nom document	Référence	Date	Version
DR1	Projet de parc éolien off shore Note technique Lots 1, 2 et 3	DGEC- ProjetParcsEolien- NoteTechnique_Lots1-2- 3_V2.0_20250423	[Chatel et al, 2025]	23/04/2025	2
DR2	Choix méthodologiques des estimateurs de rafale et indice de turbulence - Volet R&D Lot 3 :analyse des risques de turbulence	DGEC_ProjetParcsEolie n- Choix_methodologiques_ des_estimateurs_V3_202 10527	[Roule, 2021]	27/05/21	3

Évolutions successives

Référence	Date	Version	Évolution
L3.RA_MeteoF- DGEC_GGNS_B1_20250528	28/05/25	B1	Création
L3.RA_MeteoF- DGEC_GGNS_B2_20250730	30/07/25	B2	Correction suite relecture CEREMA
L3.RA_MeteoF- DGEC_GGNS_A_20250820	20/08/25	A	Version validée

Signatures

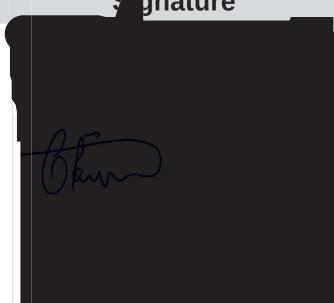
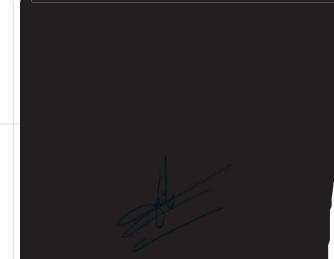
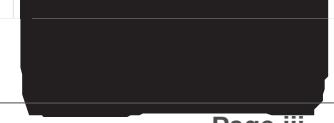
	Nom	Service	Signature
Rédacteur(s)	Hélène Fréville Florian Gibier Daka Keita Yoann Renard	Météo-France DSM/CS/DC	
Relecteur(s)	Alain Brisson Nathalie Rouchy	Météo-France DSM/CS et DSM/CS/DC	
Approbateur(s)	Christophe Jacolin	Météo-France D2C/DV/PRO	

Table des matières

1 Contexte de l'étude.....	1
2 Résultats des diagnostics de la turbulence.....	2
2.1 Intensité de turbulence.....	3
2.1.1 Moyennes et Q70 de l'intensité de turbulence tous secteurs et tous bins confondus.....	3
2.1.2 Moyennes et Q70 de l'intensité de turbulence par secteur de direction de vent.....	7
2.1.2.1 Moyennes à 100 m.....	7
2.1.2.2 Q70 à 100 m.....	10
2.1.3 Moyenne et Q70 de l'intensité de turbulence par bin de force de vent.....	13
2.1.4 Durée de retour cinquantennale.....	16
2.2 Rafales.....	18
2.2.1 Rafales modélisées à 100 m.....	18
2.2.2 Rafales cinquantennales.....	21
2.3 Exposant du cisaillement de vent (α).....	24
2.3.1 Coefficient α de cisaillement de vent tous secteurs confondus.....	24
2.3.2 Coefficient α de cisaillement de vent par secteur.....	27
2.3.3 Coefficient α de cisaillement de vent par bin de 1 m/s.....	31
3 Incertitudes associées aux données fournies.....	34
3.1 Incertitude sur les intensités de turbulence estimées.....	34
3.2 Incertitude sur l'estimation des rafales.....	34
3.3 Limites du calcul des durées de retour des rafales cinquantennales.....	35
3.4 Incertitudes associées au coefficient α de cisaillement de vent.....	35
4 Conclusion.....	36
A. Annexe - Résultats des diagnostics : Intensité de turbulence.....	39
. Intensité de turbulence par secteur de direction de vent.....	39
. Moyennes à 10 m.....	39
. Moyennes à 40 m.....	41
. Moyennes à 160 m.....	43
. Q70 à 10 m.....	46
. Q70 à 40 m.....	49
. Q70 à 160 m.....	52
. Intensité de turbulence par bin de force de vent.....	55
. Moyenne et Q70 à 10 m.....	55
. Moyenne et Q70 à 40 m.....	57
. Moyenne et Q70 à 160 m.....	59
B. Annexe - Résultats des diagnostics sur les rafales.....	61
. Rafales modélisées.....	61
. à 10 m.....	61
. à 40 m.....	63
. à 160 m.....	65
. à 200 m.....	67
. Rafales cinquantennales.....	69
. A 10 m	69
. A 40 m	74
. A 160 m	77

. A 200 m.....	80
C. Annexe - Coefficient α du cisaillement de vent par secteur.....	83
. Couche 10-40 m.....	83
. Couche 40-100 m.....	86
. Couche 100-160 m.....	89

Table des annexes

A. Annexe - Résultats des diagnostics : Intensité de turbulence.....	39
. Intensité de turbulence par secteur de direction de vent.....	39
. Moyennes à 10 m.....	39
. Moyennes à 40 m.....	41
. Moyennes à 160 m.....	43
. Q70 à 10 m.....	46
. Q70 à 40 m.....	49
. Q70 à 160 m.....	52
. Intensité de turbulence par bin de force de vent.....	55
. Moyenne et Q70 à 10 m.....	55
. Moyenne et Q70 à 40 m.....	57
. Moyenne et Q70 à 160 m.....	59
B. Annexe - Résultats des diagnostics sur les rafales.....	61
. Rafales modélisées.....	61
. à 10 m.....	61
. à 40 m.....	63
. à 160 m.....	65
. à 200 m.....	67
. Rafales cinquantenales.....	69
. A 10 m	69
. A 40 m.....	74
. A 160 m.....	77
. A 200 m.....	80
C. Annexe - Coefficient α du cisaillement de vent par secteur.....	83
. Couche 10-40 m.....	83
. Couche 40-100 m.....	86
. Couche 100-160 m.....	89

Index des figures

Illustration 1 : localisation de la zone Golfe de Gascogne Nord et Sud (GGNS).....	1
Illustration 2 : cartes des moyennes (colonne de gauche) et Q70 (colonne de droite) de l'intensité de turbulence (notée IT dans cette étude) aux niveaux 10, 40, 100 et 160 m, tous secteurs confondus pour la zone GGNS, calculées à partir des données AROME (2000-2022).....	5
Illustration 3 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculées à partir des données AROME (2000-2022).....	9

Illustration 4 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022).....	12
Illustration 5 : cartes des moyennes à gauche et du Q70 à droite de l'intensité de turbulence au niveau 100 m pour 3 bins de 1 m/s pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022).....	15
Illustration 6 : moyenne sur la zone GGNS de la moyenne de l'intensité de turbulence, en fonction de la force du vent (m/s) en abscisse. Période 2000-2022 à 100 mètres.....	16
Illustration 7 : 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.....	17
Illustration 8 : forces moyennes du vent de rafale sur la zone GGNS au niveau 100 m sur la période 2000-2022.....	19
Illustration 9 : roses des vents de rafales estimées à 100 m sur la période 2000-2022.....	20
Illustration 10 : courbe des quantiles pour le point 285, positionné à 46,025 Nord et 2,825 Ouest, et correspondant au point de grille AROME le plus proche de la position LiDAR de la zone GGNS à 100 m.....	23
Illustration 11 : carte du coefficient α de cisaillement de vent pour les couches 10-40, 10-160, 40-100 et 100-160 m tous secteurs confondus pour la zone GGNS, calculé à partir des forces du vent AROME (2000-2022).....	26
Illustration 12 : cartes du coefficient α de cisaillement de vent pour la couche 10-160 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculé à partir du vent AROME (2000-2022).....	29
Illustration 13 : coefficient α du cisaillement moyen du vent sur la couche 10-160 mètres pour les bins 2,5-3,5, 8,5-9,5 et 14,5-15,5 m/s avec et sans différenciation jour/nuit sur la zone GGNS.....	32
Illustration 14 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 10 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculées à partir des données AROME (2000-2022).....	41
Illustration 15 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculées à partir des données AROME (2000-2022).....	43
Illustration 16 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculées à partir des données AROME (2000-2022).....	45
Illustration 17 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 10 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022).....	48
Illustration 18 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022).....	51
Illustration 19 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022).....	54
Illustration 20 : cartes des moyennes à gauche et du Q70 à droite de l'intensité de turbulence au niveau 10 m par bin de 1 m/s pour la zone GGNS, calculées à partir des données AROME (2000-2022).....	56
Illustration 21 : cartes des moyennes à gauche et du Q70 à droite de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par bin de 1 m/s pour la zone GGNS, calculées à partir des données AROME (2000-2022).....	58

Illustration 22 : cartes des moyennes à gauche et du Q70 à droite de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par bin de 1 m/s pour la zone GGNS, calculées à partir des données AROME (2000-2022).....	60
Illustration 23 : forces moyennes du vent de rafale sur la zone GGNS au niveau 10 m sur la période 2000-2022.....	61
Illustration 24 : roses des vents de rafales estimées à 10 m sur la zone GGNS sur la période 2000-2022.....	62
Illustration 25 : forces moyennes du vent de rafale sur la zone GGNS au niveau 40 m sur la période 2000-2022.....	63
Illustration 26 : roses des vents de rafales estimées à 40 m sur la zone GGNS sur la période 2000-2022.....	64
Illustration 27 : forces moyennes du vent de rafale sur la zone GGNS au niveau 160 m sur la période 2000-2022.....	65
Illustration 28 : roses des vents de rafales estimées à 160 m sur la période 2000-2022.....	66
Illustration 29 : forces moyennes du vent de rafale sur la zone GGNS au niveau 200 m sur la période 2000-2022.....	67
Illustration 30 : roses des vents de rafales estimées à 200 m sur la période 2000-2022.....	68
Illustration 31 : courbe des quantiles pour le point 285, positionné à 46,025 Nord et 2,825 Ouest, et correspondant au point de grille AROME le plus proche de la position LiDAR de la zone GGNS à 10m.....	73
Illustration 32 : courbe des quantiles pour le point 285, positionné à 46,025 Nord et 2,825 Ouest, et correspondant au point de grille AROME le plus proche de la position LiDAR de la zone GGNS à 40m.....	76
Illustration 33 : courbe des quantiles pour le point 285, positionné à 46,025 Nord et 2,825 Ouest, et correspondant au point de grille AROME le plus proche de la position LiDAR de la zone GGNS à 160m.....	79
Illustration 34 : courbe des quantiles pour le point 285, positionné à 46,025 Nord et 2,825 Ouest, et correspondant au point de grille AROME le plus proche de la position LiDAR de la zone GGNS à 200 m.....	82
Illustration 35 : cartes du coefficient α de cisaillement de vent pour la couche 10-40 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculé à partir du vent AROME (2000-2022).....	85
Illustration 36 : cartes du coefficient α de cisaillement de vent pour la couche 40-100 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS calculé à partir du vent AROME (2000-2022).....	88
Illustration 37 : cartes du coefficient α de cisaillement de vent pour la couche 100-160 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS calculé à partir du vent AROME (2000-2022).....	91

Index des tableaux

Tableau 1 : plage (borne minimale et borne maximale établies à partir de l'ensemble des points de la zone GGNS) des moyennes et quantiles Q70 de l'intensité de turbulence pour les niveaux 10, 40, 100 et 160 m par secteurs de direction de 30° du vent pris respectivement au niveau 10 ou 40 ou 100 ou 160 m.....	13
---	----

Tableau 2 : carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 100 m pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022).....	22
Tableau 3 : plage (borne minimale et borne maximale établies à partir des points de la zone GGNS) des moyennes du coefficient α pour chacune des quatre couches (10-40, 10-160, 40-100 et 100-160 m) par secteurs de direction de 30° du vent au niveau 100 m, sans distinction jour-nuit	30
Tableau 4 : minimum, maximum et moyenne du coefficient α , obtenus à partir des valeurs α de l'ensemble des points de grille de la zone GGNS fournies pour la couche 10-160 m par secteurs de direction de 30° du vent au niveau 100 m.....	31
Tableau 5 : moyenne sur la zone GGNS du coefficient α pour les bins 2,5-3,5, 8,5-9,5 et 14,5-15,5 m/s dans la couche 10-160 m avec et sans différenciation jour-nuit.....	32
Tableau 6 : carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 10 m pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022).....	71
Tableau 7 : carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 40 m pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022).....	75
Tableau 8 : carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 160 m pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022).....	78
Tableau 9 : carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 200 m pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022).....	81

Glossaire

Abréviation	Signification
ALPHA ou α	Coefficient de cisaillement vertical du vent horizontal (nombre sans dimension)
AROME	Modèle de prévision numérique du temps à maille fine exploité de façon opérationnelle à Météo-France depuis décembre 2008
BIN	(de vent) Plages de forces de vent
CLA	Couche limite atmosphérique
DD	Direction du vent moyen, représentatif du vent moyenné sur les 10 minutes précédant l'heure ronde. Hauteur de la mesure dans le cadre de cette étude : 100 mètres. La direction du vent s'exprime en degrés, de 0 à 360. Elle indique la direction d'où vient le vent
FF	Vitesse du vent moyen représentatif du vent moyenné sur les 10 minutes précédant l'heure ronde. Hauteur de la mesure dans le cadre de cette étude : 100 mètres. Unité : mètres par seconde et dixièmes (1 m/s = 3,6 km/h = 1,945 noeuds).
TKE	Turbulent Kinetic Energy
WGS84	Système géodésique mondial. Il est composé d'un système de coordonnées, d'un ellipsoïde de référence (l'ellipsoïde de révolution IAG GRS 80), un géoïde (EGM96). Ce système géodésique mondial est notamment utilisé par le système de positionnement par satellite GPS.

RÉSUMÉ

L'objectif de ce lot 3 est d'étudier la **turbulence atmosphérique** dans le cadre d'une problématique d'éolien en mer. Elle vise à minimiser les risques économiques liés aux conditions météorologiques turbulentes et aux vents extrêmes (rafales) sur la zone Golfe de Gascogne Nord et Sud (GGNS).

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 160 m**, zone se situant dans la Couche Limite Atmosphérique, ainsi qu'au niveau 10 m.

Le niveau 200 m est également traité pour les rafales de vent.

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 α 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 **2000-2022**, permettant de disposer d'un jeu de données dense sur la zone étudiée.

Ci-dessous le tableau des indicateurs ainsi que les niveaux de qualité associés :

Type de données	Paramètres	Qualité des données
Données traitées (statistiques) du modèle AROME : <ul style="list-style-type: none"> • Période : 2000 – 2022 • Localisation : zone d'intérêt • niveaux 10, 40, 100 et 160 m (et 200 m pour les rafales de vent) 	<ul style="list-style-type: none"> • intensité de la turbulence tous secteurs confondus : moyenne et Q70, • intensité de la turbulence par direction de 30° : moyenne et Q70, • exposant alpha de cisaillement vertical de la force du vent, avec différenciation jour/nuit et par direction de 30° pour les couches 10 - 40 m, 40 – 100 m, 100 – 160 m et 10 – 160 m, • vent 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°. 	3 3 2 3
Analyse fréquentielle AROME : <ul style="list-style-type: none"> • Période : 2000 – 2022 • Localisation : zone d'intérêt • niveaux 10, 40, 100 et 160 m 	<ul style="list-style-type: none"> • l'intensité moyenne de la turbulence par bin de vent moyen de 1 m/s ; • 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) • l'écart-type de l'intensité de turbulence par bin de vent moyen de 1 m/s ; • l'intensité de turbulence extrême, avec une période de récurrence de 50 ans, par bin de vent moyen de 1 m/s • la valeur moyenne de l'exposant alpha de cisaillement du vent, par bin de vent moyen 1 m/s • la moyenne globale de l'exposant alpha de cisaillement du vent (tous bins confondus). 	3 3 3 3 3 3

Les niveaux de qualité sont notés de 1 à 3, 1 étant la meilleure qualité.

- La valeur 1 indique des données issues du modèle AROME
- la valeur 2 des données **calculées** à partir du modèle AROME avec des formules de définition du paramètre
- la valeur 3 des données **estimées** à partir du modèle AROME avec des formules statistiques validées dans [Roulle, 2021].

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.

La moyenne et le quantile Q70 des **intensités de turbulence** aux niveaux 10, 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 1 m/s.

Concernant les intensités de turbulence, les principales conclusions pour la zone GGNS sont les suivantes :

- Une **diminution de cette intensité de turbulence avec l'altitude et une turbulence plus forte avec les vents de secteur nord à nord-ouest** ont été constatées.
- D'autre part, l'analyse des sorties par bin montre que **l'intensité est maximale pour les vents très faibles et qu'elle diminue rapidement avec la force du vent puis ré-augmente doucement**.

Les **exposants du cisaillement vertical du vent** (coefficient α) 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 de vents (bins) au pas de 1 m/s, avec là encore une différenciation jour-nuit.

Pour alpha, les principales conclusions pour la zone GGNS sont les suivantes :

- Globalement **le coefficient α est homogène entre les différentes couches, son évolution est très faible d'une couche à l'autre. D'autre part, les coefficients plus élevés sont constatés avec les vents de secteur sud à sud-est.**
- L'analyse des bins montre que **le coefficient augmente généralement avec la force du vent.**
- Quel que soit le niveau considéré, **les roses de vent de rafales sont assez homogènes en force ; la direction dominante est un large secteur d'ouest à sud-ouest. En termes de rafale cinquantennale, les valeurs les plus élevées se situent essentiellement sur la pointe sud et nord la zone, pouvant dépasser les 55 m/s au-dessus de 100 m.**

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.

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 GGNS (Golfe de Gascogne Nord et Sud)**, zone sur laquelle un projet d'implantation d'éoliennes en mer est prévu.

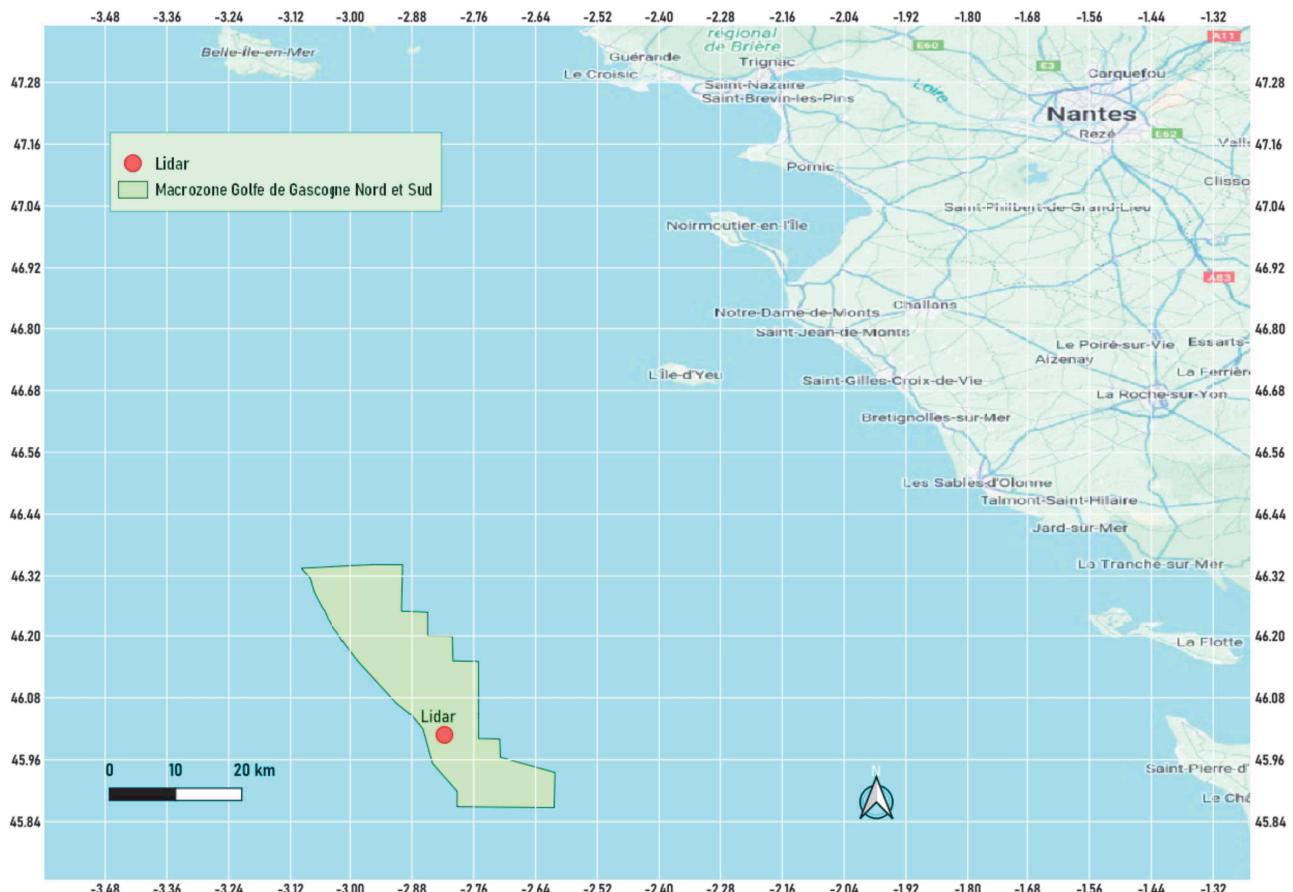


Illustration 1 : localisation de la zone Golfe de Gascogne Nord et Sud (GGNS)

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 en mer.

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).

Les **formules pour le calcul de ces indicateurs de turbulence** ont été déterminées lors de la préparation de l'étude sur Dunkerque. Dans le cadre de l'étude sur la zone 3 de l'AO6 Méditerranée, elles ont été vérifiées notamment sur mer et pour des niveaux supérieurs (180 ou 200 m). Cette vérification des formules a fait l'objet d'une étude [Roule, 2021].

La validation de l'estimateur du calcul de l'**intensité de turbulence** sur le rejet AROME est entachée par la faible confiance accordée à la mesure de la dispersion par le LiDAR en mer. Cependant, cette étude de l'indicateur de l'intensité de turbulence et de rafales de vent a été complétée récemment avec de nouvelles données allant jusqu'à 200 mètres. Le rapport de cette étude est en cours d'élaboration. Elle confirme les précédents résultats sur mer avec des comportements similaires pour les niveaux entre 160 et 200 mètres.

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.

Les notions météorologiques et statistiques abordées dans le rapport sont présentées dans [Chatel et al, 2025], plus particulièrement dans les paragraphes §3 pour la turbulence, §4.1 à §4.2 pour le modèle Arome et ses paramètres, §5 pour les méthodes statistiques employées et §7 pour les diagnostics et les méthodes de calculs.

2 Résultats des diagnostics de la turbulence

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

La zone GGNS étudiée couvre le domaine allant de 45,875 °N, 2,775 °W¹ (coin sud-est du domaine) à 46,325 °N, 2,900 °W (coin nord-ouest du domaine) et est représentée par 133 points de la grille AROME.

Pour cette zone spécifique, que ce soit pour l'intensité de turbulence, les rafales cinquantennales ou le coefficient α , 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 écart-type, une palette différente pour les écart-types. Nous avons procédé de la même façon pour le coefficient α . Il est également à noter que, sur ces cartes, figure en noir le périmètre de la zone d'intérêt prévue pour l'implantation des éoliennes. De même, nous avons choisi une palette unique pour les cartes de durées de retour à l'exception du premier bin (force du vent entre 0 et 2,5 m/s).

¹ Le système de coordonnées employé dans tout le rapport est le WGS84.

2.1 Intensité de turbulence

Pour les 133 points de grille AROME de la zone GGNS, **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 10, 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 AAAAMMMJJHH (l'heure HH étant exprimée en UTC) et pour la deuxième l'intensité de turbulence (grandeur sans unité). Ces valeurs d'intensité de turbulence proviennent directement des calculs, ce qui explique le nombre important de décimales présentes 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.

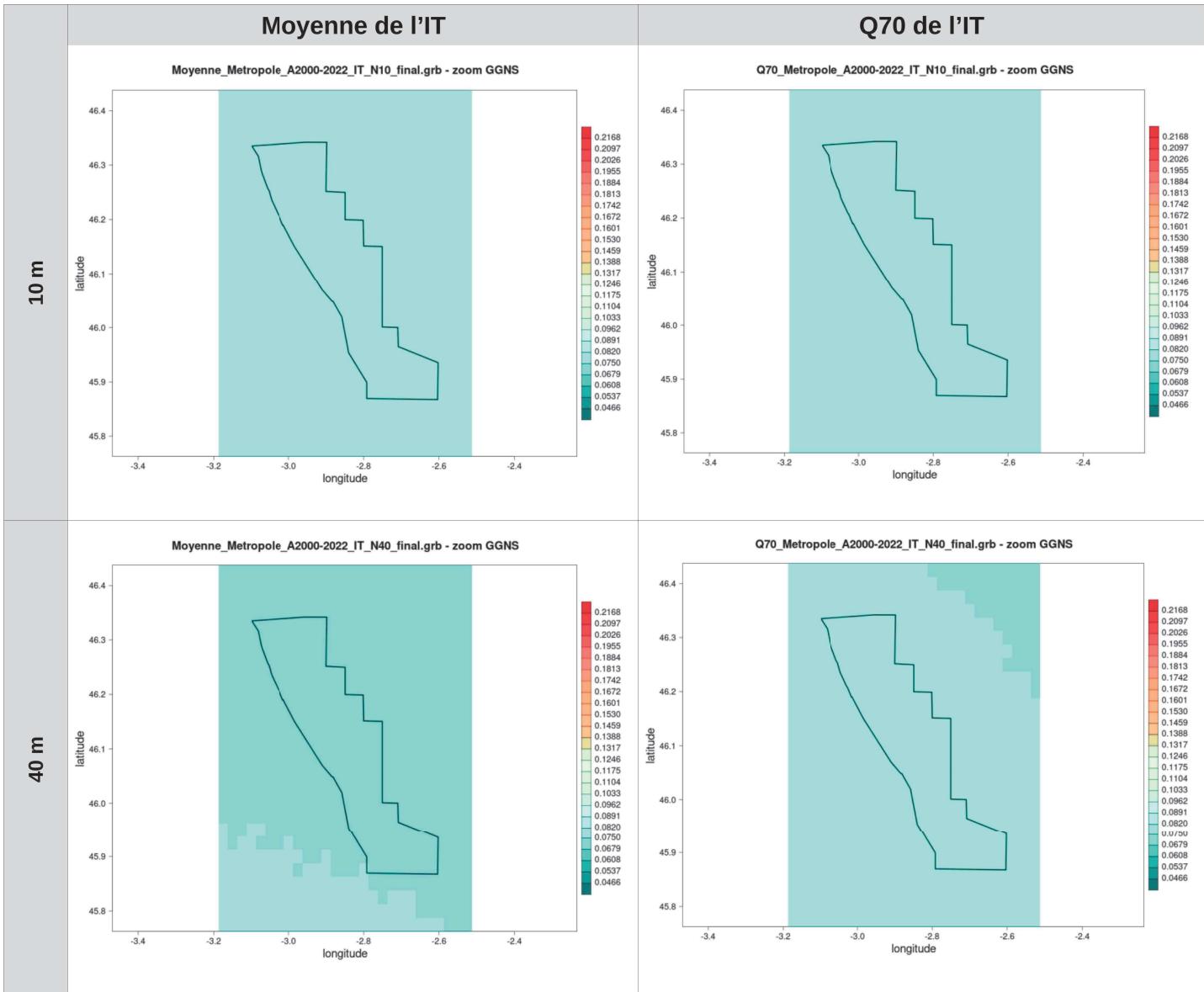
Pour chacun des points de grille de cette zone, la moyenne et les valeurs de Q70 de l'intensité de turbulence aux niveaux 10, 40, 100 et 160 m sont calculées et fournies tous secteurs confondus ainsi que par secteur de direction de 30° et par bin de vent de 1 m/s. Les fichiers livrés correspondants contiennent 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 et les durées de retour. 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 différencier par secteurs, les directions prises en compte sont celles au niveau où est calculée l'intensité de turbulence.

2.1.1 Moyennes et Q70 de l'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 10, 40, 100, 160 m sont fournies ci-dessous.



2 Résultats des diagnostics de la turbulence

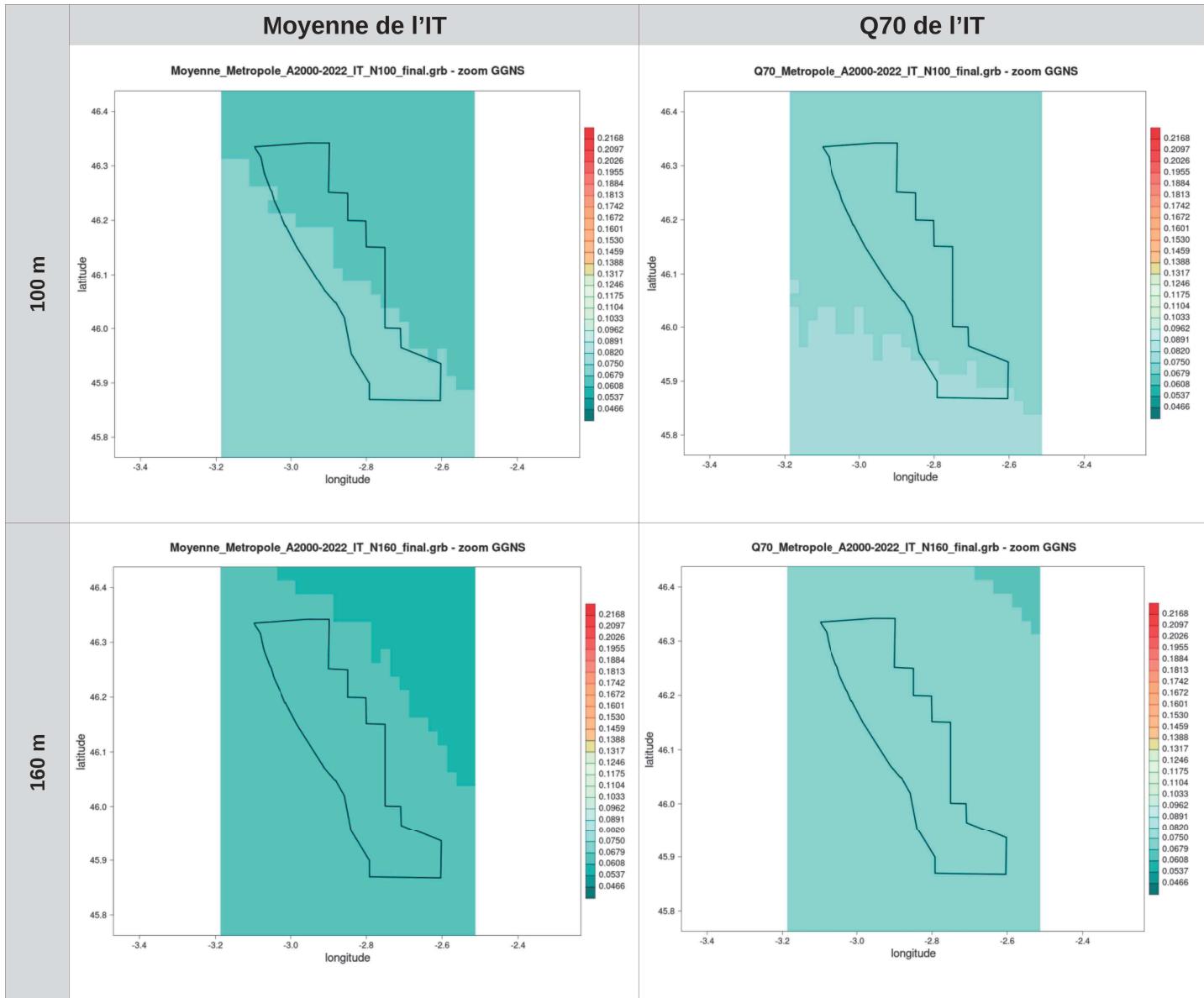


Illustration 2 : cartes des moyennes (colonne de gauche) et Q70 (colonne de droite) de l'intensité de turbulence (notée IT dans cette étude) aux niveaux 10, 40, 100 et 160 m, tous secteurs confondus pour la zone GGNS, calculées à partir des données AROME (2000-2022)

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 10 m, ensuite elle diminue. Cette diminution se fait de manière progressive par niveaux pour le Q70. Pour la moyenne de l'IT, cette diminution est plus marquée pour les niveaux 40, 100 et 160 m comparé au Q70. Ceci se voit bien sur les cartes avec des niveaux de couleur différents (passage du bleu cyan au bleu-vert) 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 10 et 40 m qu'à 160 m.

Pour l'ensemble de la zone d'implantation (délimitée en noir), la moyenne sur le domaine de l'intensité de turbulence est de l'ordre de 0,078 % à 10 m, 0,074 % à 40 m, de 0,068 % à 100 m, de 0,062 % à 160 m et à ces hauteurs, la moyenne du Q70 de l'intensité de turbulence varie de 0,078 % à 10 m à 0,071 % à 160 m.

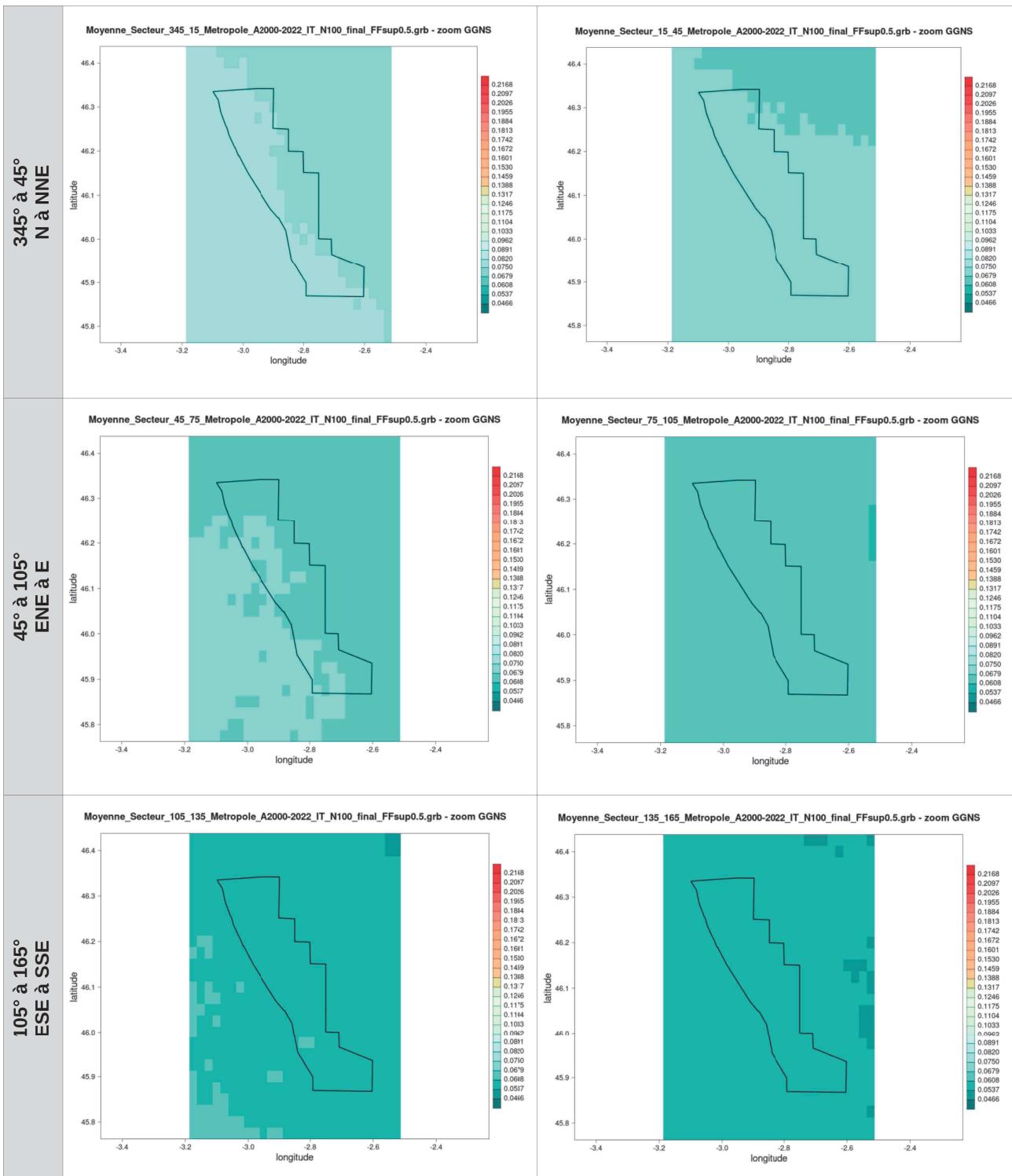
2.1.2 Moyennes et Q70 de l'intensité de turbulence par secteur de direction de vent

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 10, 40, 100, 160 m sont fournies ci-dessous pour le niveau 100 m et en annexe A pour les niveaux 10 m, 40 m et 160 m.

L'ordre des cartes est le suivant :

N (345° - 15°)	N-N-E (15° - 45°)
E-N-E (45° - 75°)	E (75° - 105°)
E-S-E (105° - 135°)	S-S-E (135°- 165°)
S (165° - 195°)	S-S-W (195° - 225°)
W-S-W (225° - 255°)	W (255° - 285 °)
W-N-W (285° - 315 °)	N-N-W (315° - 345°)

2.1.2.1 Moyennes à 100 m



2 Résultats des diagnostics de la turbulence

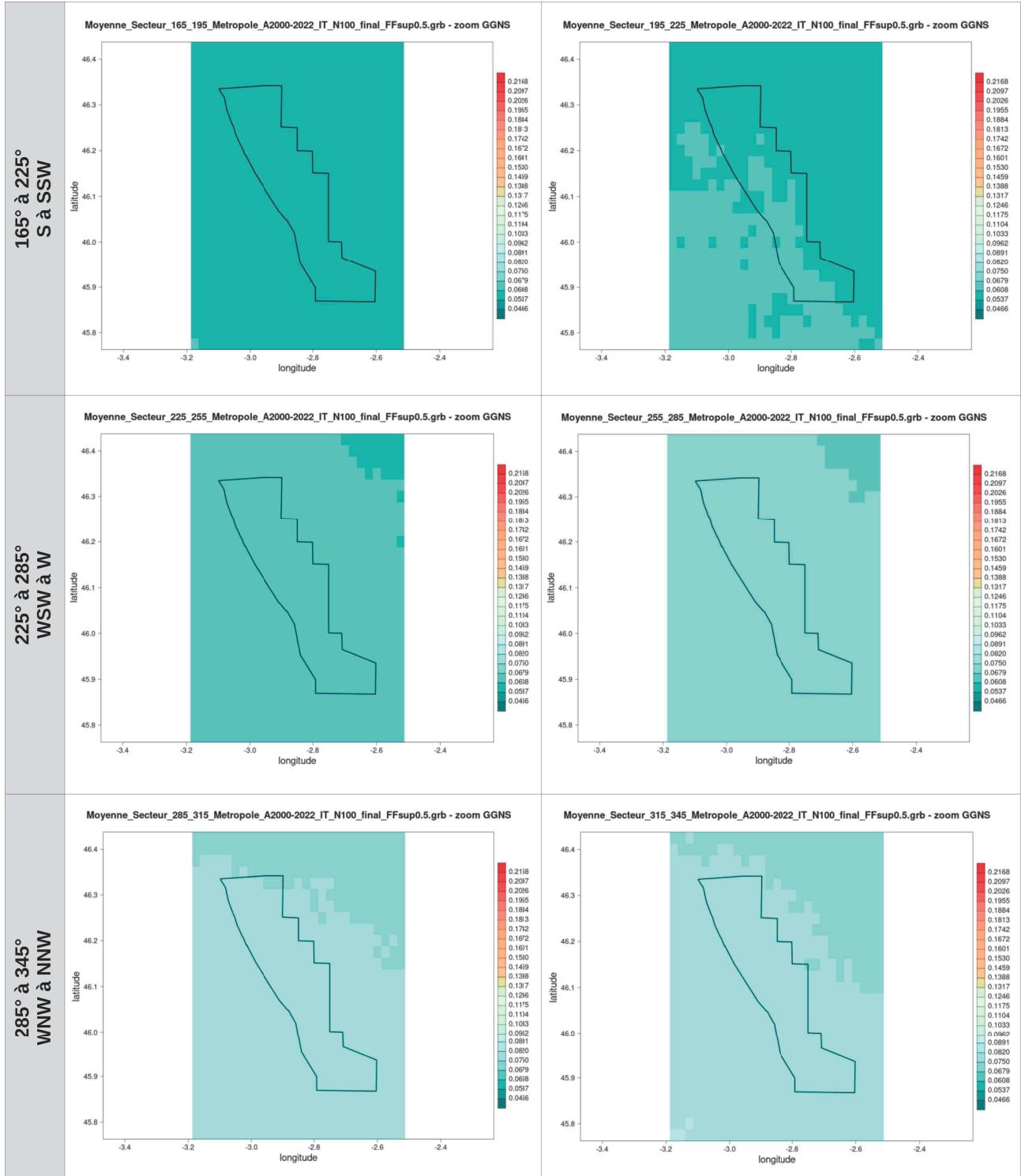
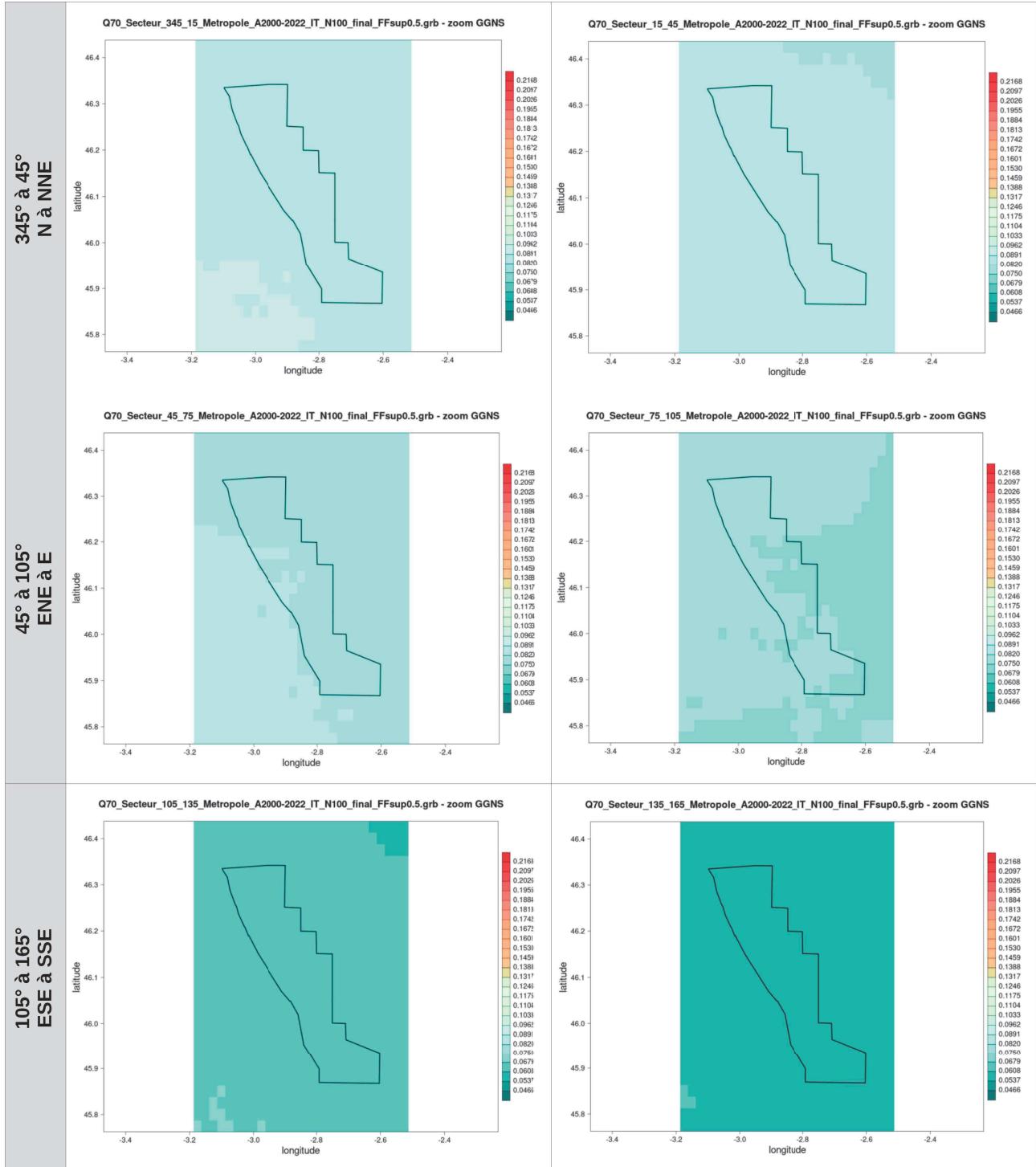


Illustration 3 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculées à partir des données AROME (2000-2022)

2.1.2.2 Q70 à 100 m

2 Résultats des diagnostics de la turbulence



Évaluation du risque de turbulence

Lot 3 - Golfe de Gascogne Nord et Sud (GGNS)

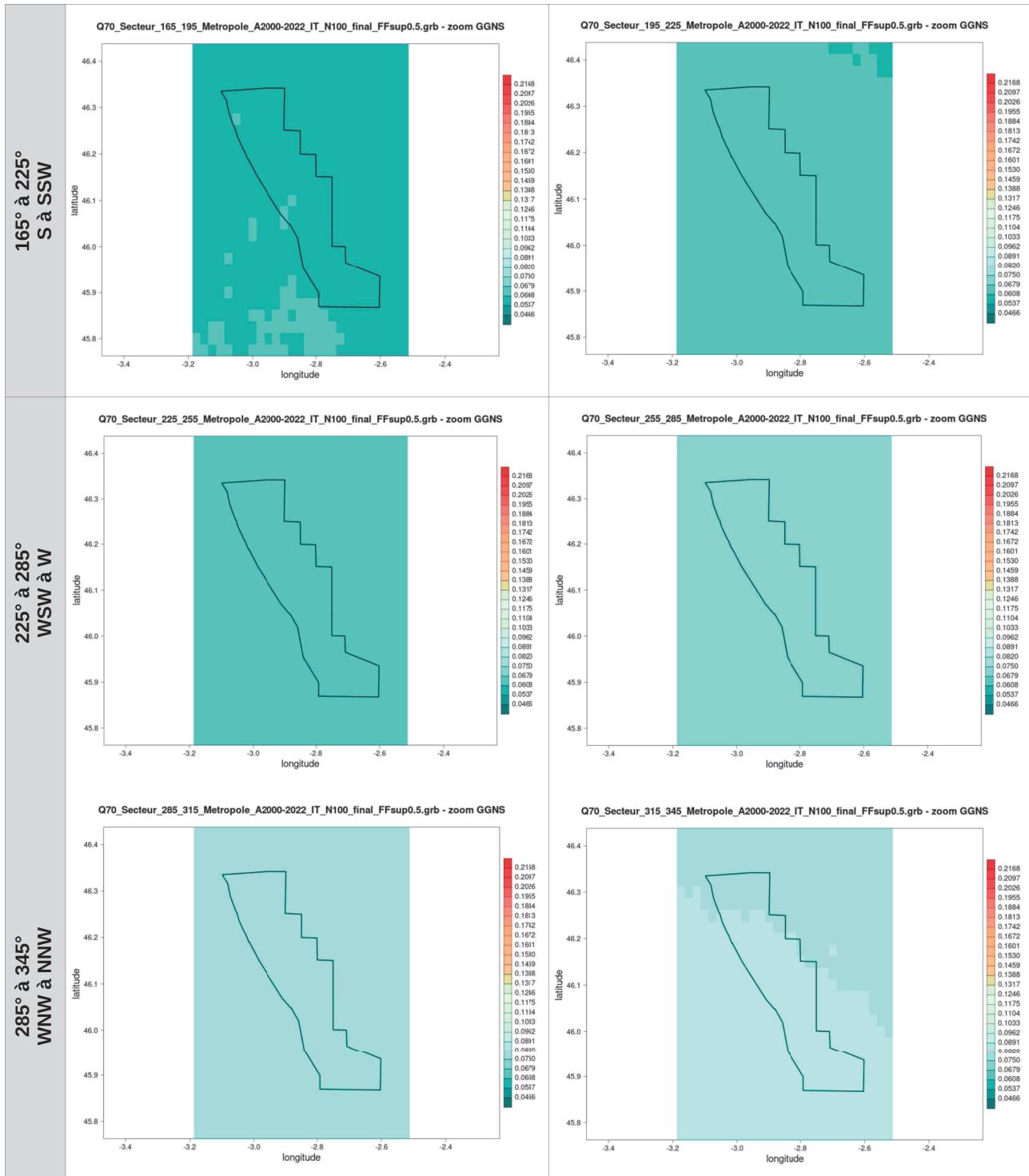


Illustration 4 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022)

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 donnés, l'intensité de turbulence est sensible à la classe de directions du vent.**

Un tableau de synthèse de l'intensité de turbulence par niveau et par secteur de 30° sur la zone GGNS est réalisé et fourni (voir tableau 1). Les valeurs minimale et maximale de la moyenne de l'intensité de turbulence sont en caractères gras.

		N	NNE	ENE	E	ESE	SSE	S	SSW	WSW	W	WNW	NNW
10 m	Moy IT	0.079 0.081	0.079 0.081	0.078 0.080	0.078 0.080	0.076 0.078	0.074 0.078	0.074 0.075	0.074 0.079	0.075 0.077	0.077 0.078	0.079 0.081	0.080 0.082
	Q70 IT	0.081 0.082	0.081 0.084	0.081 0.082	0.079 0.081	0.074 0.075	0.072 0.073	0.073 0.074	0.074 0.075	0.075 0.076	0.077 0.078	0.078 0.080	0.079 0.081
40 m	Moy IT	0.078 0.080	0.074 0.078	0.073 0.075	0.072 0.075	0.068 0.072	0.066 0.069	0.066 0.069	0.068 0.070	0.069 0.070	0.073 0.075	0.077 0.081	0.078 0.081
	Q70 IT	0.084 0.085	0.082 0.085	0.080 0.081	0.077 0.080	0.070 0.071	0.065 0.067	0.066 0.068	0.068 0.069	0.069 0.070	0.073 0.073	0.077 0.080	0.079 0.082
100 m	Moy IT	0.073 0.076	0.068 0.072	0.066 0.069	0.062 0.066	0.057 0.061	0.054 0.057	0.056 0.059	0.059 0.062	0.062 0.064	0.068 0.070	0.075 0.079	0.075 0.080
	Q70 IT	0.087 0.089	0.083 0.088	0.080 0.082	0.074 0.078	0.064 0.066	0.056 0.059	0.060 0.061	0.061 0.063	0.063 0.064	0.069 0.070	0.077 0.080	0.081 0.085
160 m	Moy IT	0.070 0.074	0.064 0.068	0.060 0.062	0.054 0.057	0.049 0.052	0.047 0.050	0.049 0.053	0.053 0.055	0.055 0.058	0.064 0.066	0.071 0.075	0.071 0.077
	Q70 IT	0.087 0.089	0.083 0.087	0.077 0.080	0.068 0.072	0.056 0.060	0.049 0.053	0.053 0.056	0.057 0.058	0.059 0.060	0.066 0.067	0.076 0.079	0.080 0.085

Tableau 1 : plage (borne minimale et borne maximale établies à partir de l'ensemble des points de la zone GGNS) des moyennes et quantiles Q70 de l'intensité de turbulence pour les niveaux 10, 40, 100 et 160 m par secteurs de direction de 30° du vent pris respectivement au niveau 10 ou 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 avec l'altitude. Les directions de plus faible intensité sont celles de vents de sud à sud-sud-est, et ce sont *a contrario* les vents de secteur ouest-nord-ouest à nord-nord-ouest qui s'accompagnent des plus fortes intensités de turbulence. D'autre part, les plus fortes valeurs moyennes sont rencontrées à 10 m pour un vent de secteur nord-ouest (315 à 345°).

2.1.3 Moyenne et Q70 de l'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 10, 40, 100, 160 m sont tracées et font partie des données livrées. Il y a 25 intervalles de forces moyennes du vent pris en compte : 0-2,5 ; 2,5-3,5 ; 3,5-4,5 ;... ; 23,5-24,5 ; 24,5-25,5 ; 25,5-100.

Dans ce rapport, nous nous limitons à présenter les cartes de 3 bins particuliers : le bin 2,5-3,5 m/s, le bin 8,5-9,5 m/s et le bin 14,5-15,5 m/s.

Le niveau 100 m est présenté ci-dessous. Les niveaux 10 m, 40 m et 160 m se trouvent dans l'annexe A.

2 Résultats des diagnostics de la turbulence

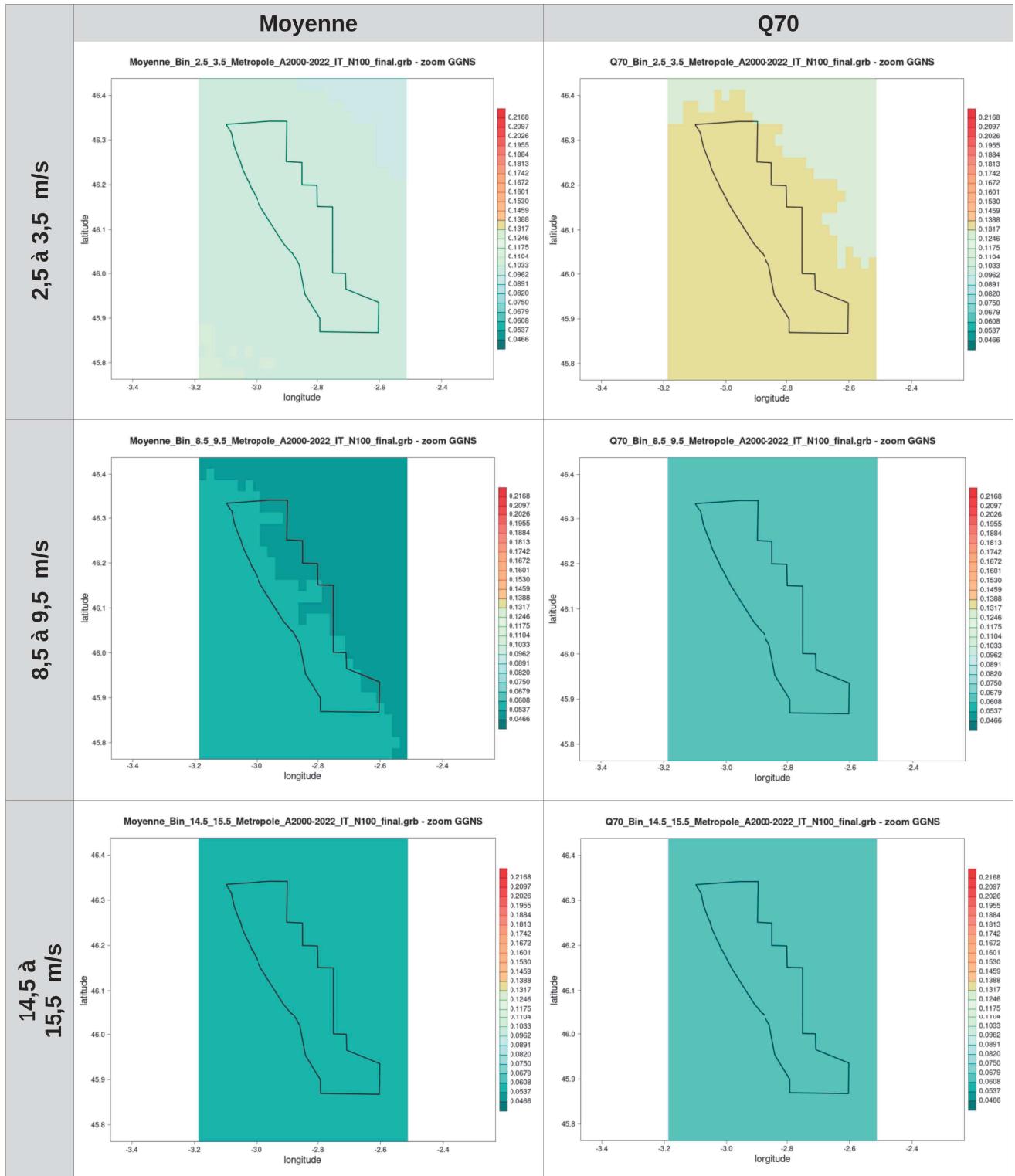


Illustration 5 : cartes des moyennes à gauche et du Q70 à droite de l'intensité de turbulence au niveau 100 m pour 3 bins de 1 m/s pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022)

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 10 m/s puis à nouveau une hausse progressive.

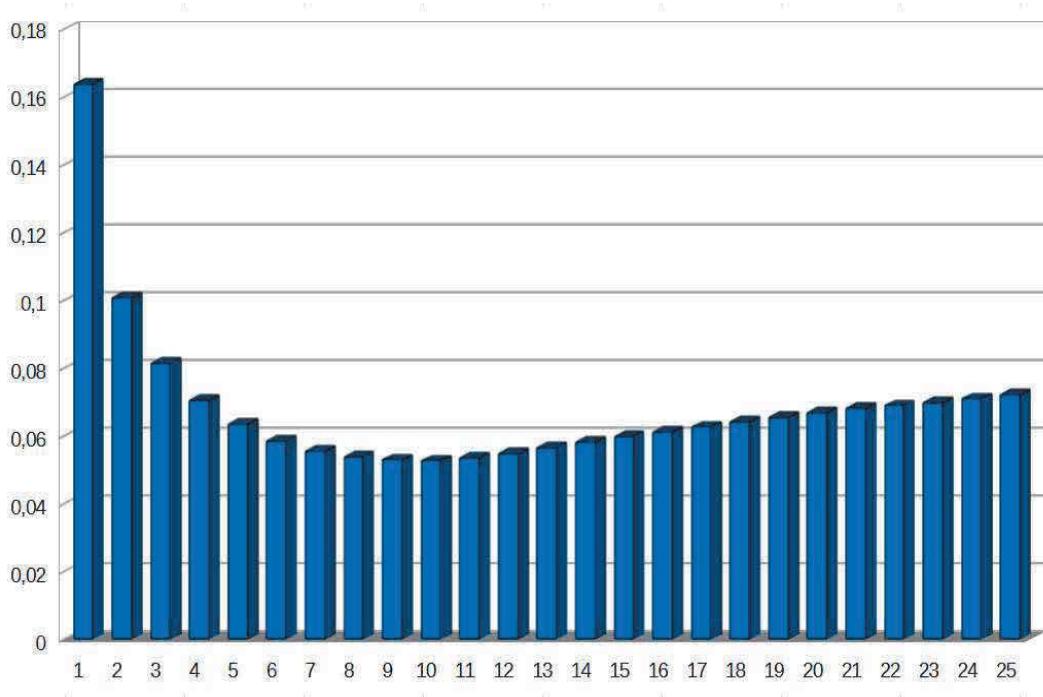


Illustration 6 : moyenne sur la zone GGNS de la moyenne de l'intensité de turbulence, en fonction de la force du vent (m/s) en abscisse. Période 2000-2022 à 100 mètres

2.1.4 Durée de retour cinquantennale

Les calculs ont été effectués pour tous les bins de 1 m/s et nous avons réalisé 4 cartes (valeur de la DR50, borne d'incertitude basse et haute et qualité de l'ajustement) par bin et par niveau, soit un total de 400 cartes.

Toutefois, un nombre de cartes relativement important n'ont pu être tracées. 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 pouvoir calculer cette durée de retour.

Nous nous limitons ici à montrer les résultats pour la valeur du bin [9,5 ;10,5] pour la hauteur 100 mètres car quelques bins sont absents du fait du nombre de valeurs insuffisant pour pouvoir calculer une durée de retour.

2 Résultats des diagnostics de la turbulence

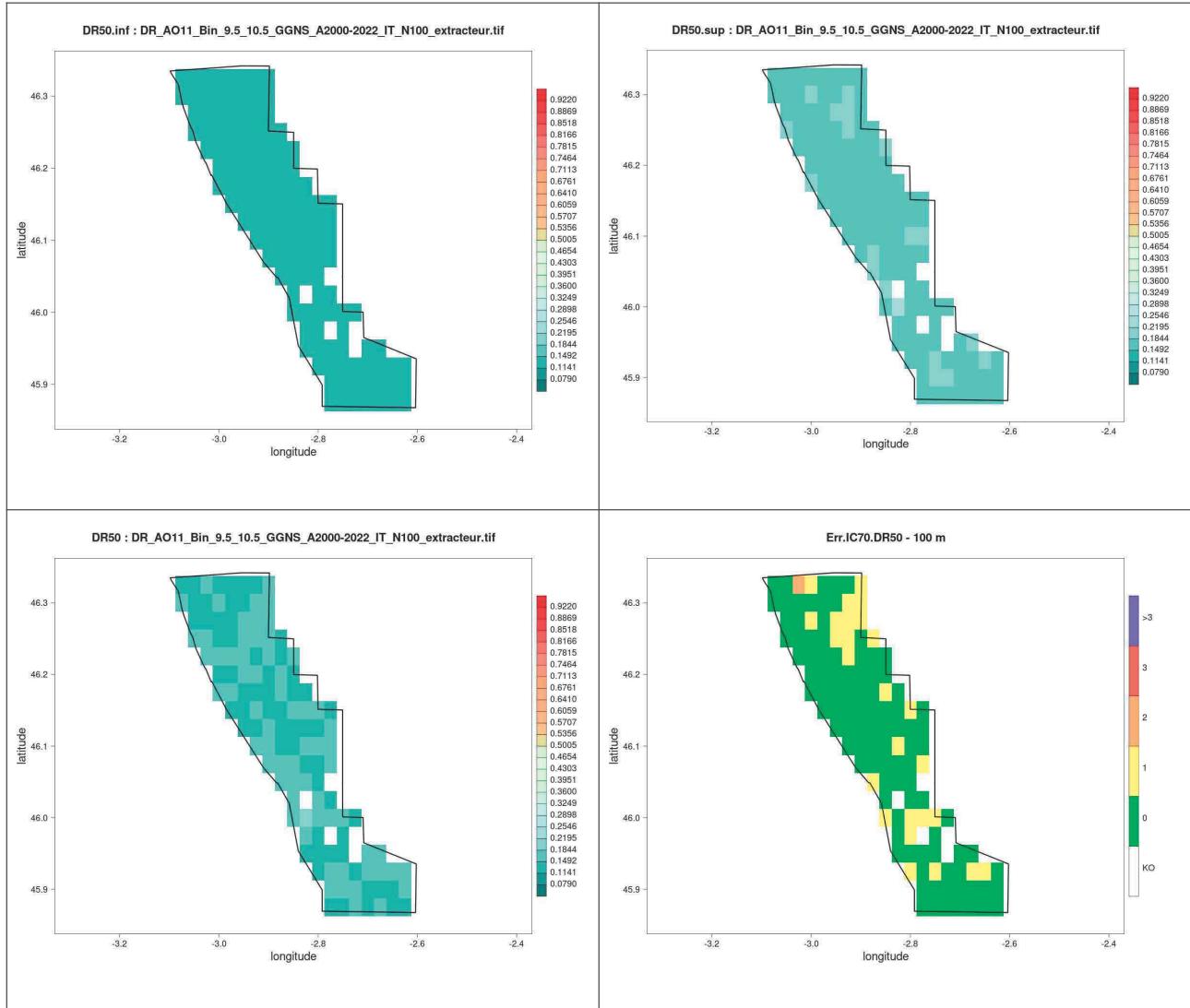


Illustration 7 : quantiles d'intensité de turbulence pour une durée de retour de 50 ans. En haut valeurs des bornes inférieure (à gauche) et supérieure (à droite) de l'intervalle de confiance à 70 %.
Au-dessous, à gauche durée de retour centrale et à droite qualité de l'ajustement

Pour rappel :

- 0** : ajustement OK
- 1** : 1 point observé hors de l'intervalle de confiance à 70 %
- 2** : 2 points observés hors de l'intervalle de confiance à 70 %
- 3** : 3 points observés hors de l'intervalle de confiance à 70 %
- >3** : plus de 3 points observés hors de l'intervalle de confiance à 70 %
- KO** : l'ajustement n'a pas convergé. Pas de valeur disponible

2.2 Rafales

Pour les 133 points de grille AROME de la zone GGNS, les **séries chronologiques des rafales estimées (estDXFX) à 40, 100, 160 et 200 m** ont été **calculées au pas de temps horaire** sur la période 2000-2022 selon les formules présentées au paragraphe §7 de [Chatel et al, 2025].

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

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

Elles sont mises à disposition tout comme les rafales à 10 m directement issues du modèle AROME. La liste et la 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 rafale (estFX) exprimée 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.

Seul le niveau 100 m est présenté dans ce paragraphe, les autres niveaux figurent en annexe B.

2.2.1 Rafales modélisées à 100 m

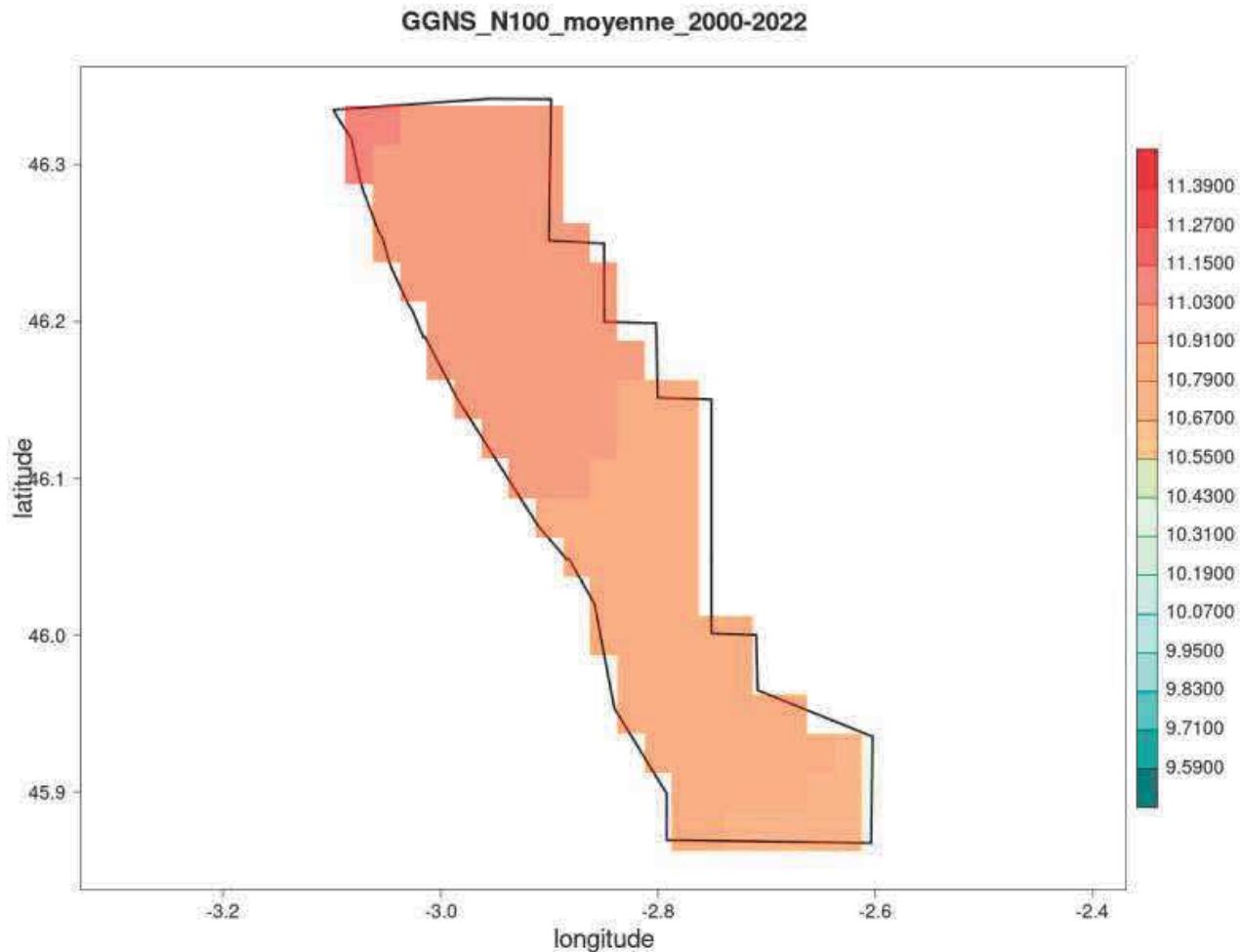


Illustration 8 : forces moyennes du vent de rafale sur la zone GGNS au niveau 100 m sur la période 2000-2022

Les forces du vent de rafale moyennées sur la période 2000-2022 au niveau 100 mètres sont comprises principalement entre 10,6 et 11 m/s sur la zone GGNS.

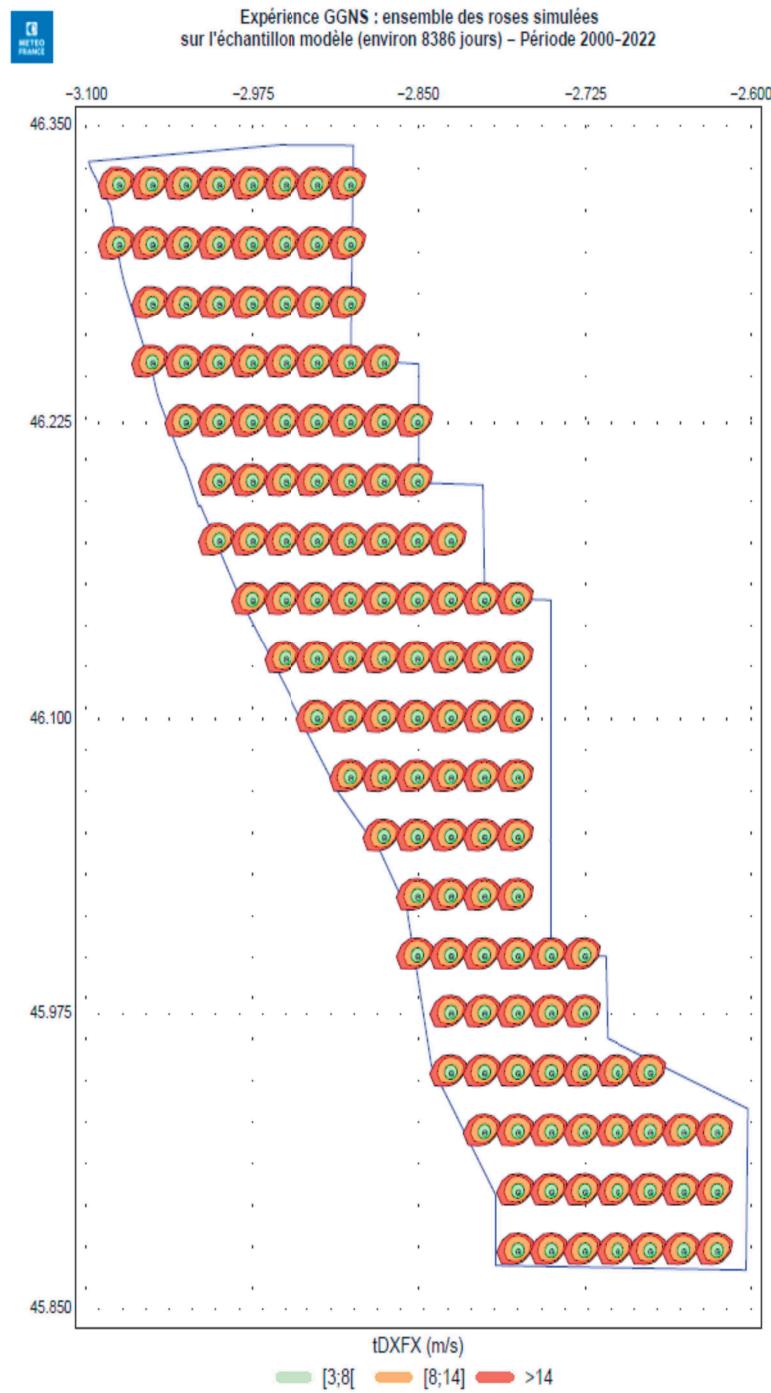


Illustration 9 : roses des vents de rafales estimées à 100 m sur la période 2000-2022

Les roses de vents de rafales à 100 m sont assez homogènes sur la zone GGNS, avec un secteur ouest à sud-ouest dominant.

Conclusion :

Quel que soit le niveau considéré, les roses de vent de rafales sont assez homogènes en force ; la direction dominante est un large secteur ouest à sud-ouest. L'intensité des rafales moyennes augmente avec la hauteur.

2.2.2 Rafales cinquantennales

Pour l'ensemble des points de la zone GGNS, les **quantiles des rafales à 10, 40, 100, 160 et 200 m associés à la durée de retour 50 ans** sont **calculés** et fournis ainsi que les **bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance de 70 % issues d'un ajustement des séries par la loi Pareto**, selon la méthodologie présentée au paragraphe §5,3 de [Chatel et al, 2025].

Le code qualité associé à l'ajustement en chaque point est identique à celui présenté pour les durées de retour de l'indicateur de turbulence (paragraphe 2.1.4).

Le seuil a été calculé en chaque point de grille par la méthode MRLP Mean Residual Life Plot (cf. §7.1.2 de [Chatel et al, 2025]). Les résultats figurent en annexe B. 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 **pour le niveau 100 m** et dans l'annexe B pour les niveaux 10, 40 et 160m.

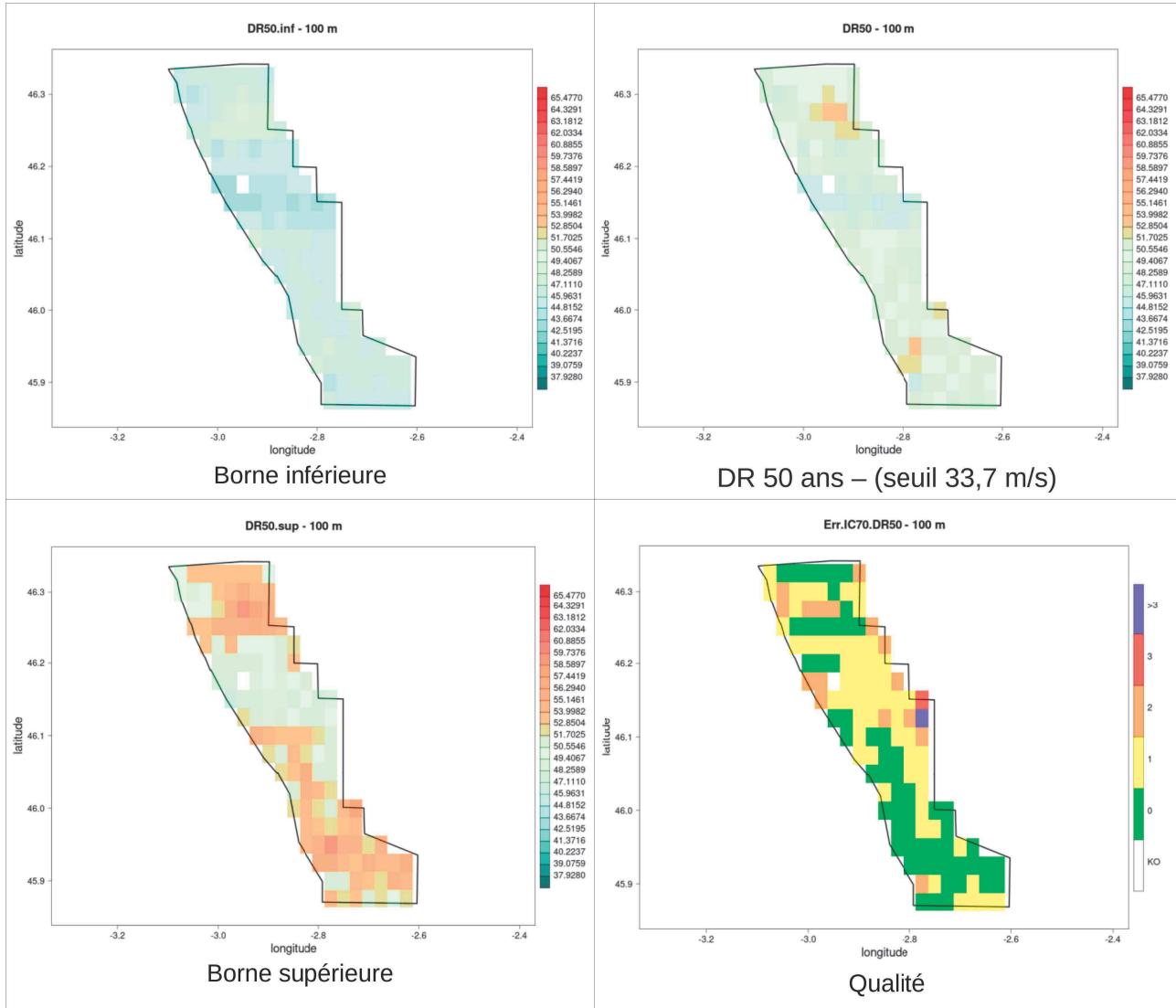


Tableau 2 : carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 100 m pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022)

Sur la zone, les durées de retour 50 ans varient entre 45,19 m/s [43,38 ; 46,99] (position 46,15°N et 2,975°W) et 53,85 m/s [48,71 ; 58,99] (position 46,275°N et 2,95°W). Les valeurs les plus élevées se situent globalement au nord et au sud de la zone.

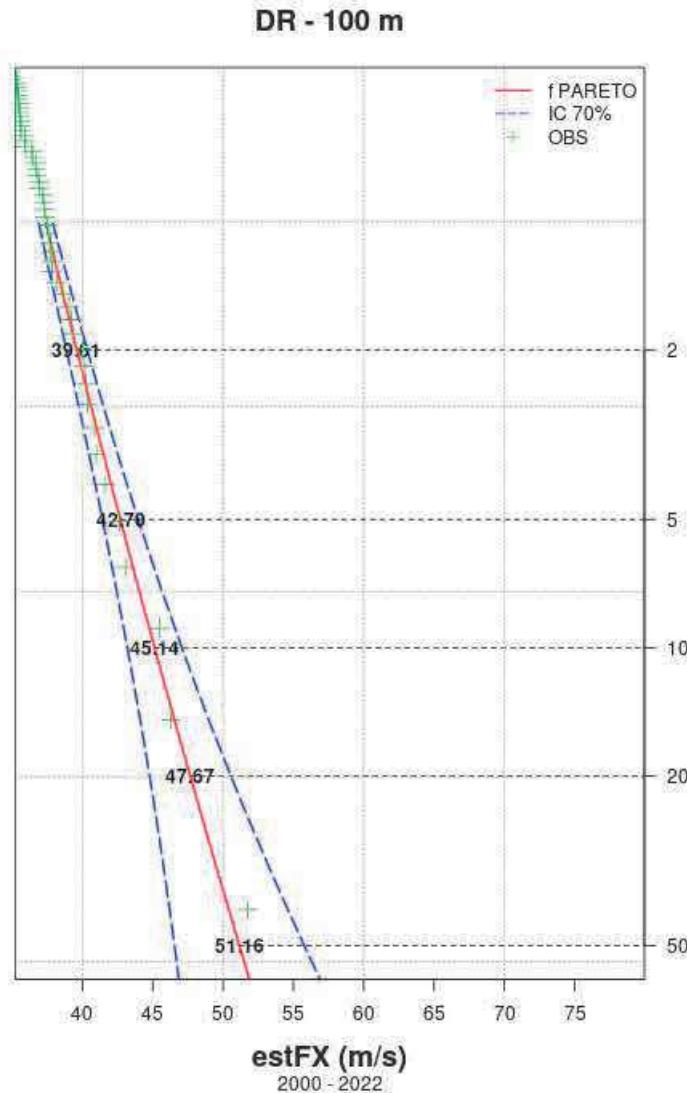


Illustration 10 : courbe des quantiles pour le point 285, positionné à 46,025 Nord et 2,825 Ouest, et correspondant au point de grille AROME le plus proche de la position LiDAR de la zone GGNS à 100 m

Conclusion :

Quel que soit le niveau considéré, les valeurs les plus élevées de rafales cinquantennales se situent essentiellement au Nord et au Sud de la zone. Dans ces zones, elles peuvent dépasser les 55 m/s au-dessus de 100 m.

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 sans qu'il y ait de cohérence entre les points alentours ; son intérêt est d'accéder à une première estimation de l'ordre de grandeur de la rafale cinquantennale sur la zone et l'analyse doit donc se faire pour la zone dans son ensemble et non point par point. À noter aussi que la profondeur de l'échantillon (période 2000-2022) 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 23 ans de données intègre une réalisation de trajectoires de vent extrêmes 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 en étant conscient de ces éléments.

2.3 Exposant du cisaillement de vent (α)

Pour les 133 points de grille AROME de la zone GGNS, à partir des séries des forces de vent sur 23 ans (période 2000-2022), les **coefficients de cisaillement vertical du vent** sont calculés pour **quatre couches (10 à 40 m, 40 m à 100 m, 100 m à 160 m et 10 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.

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.

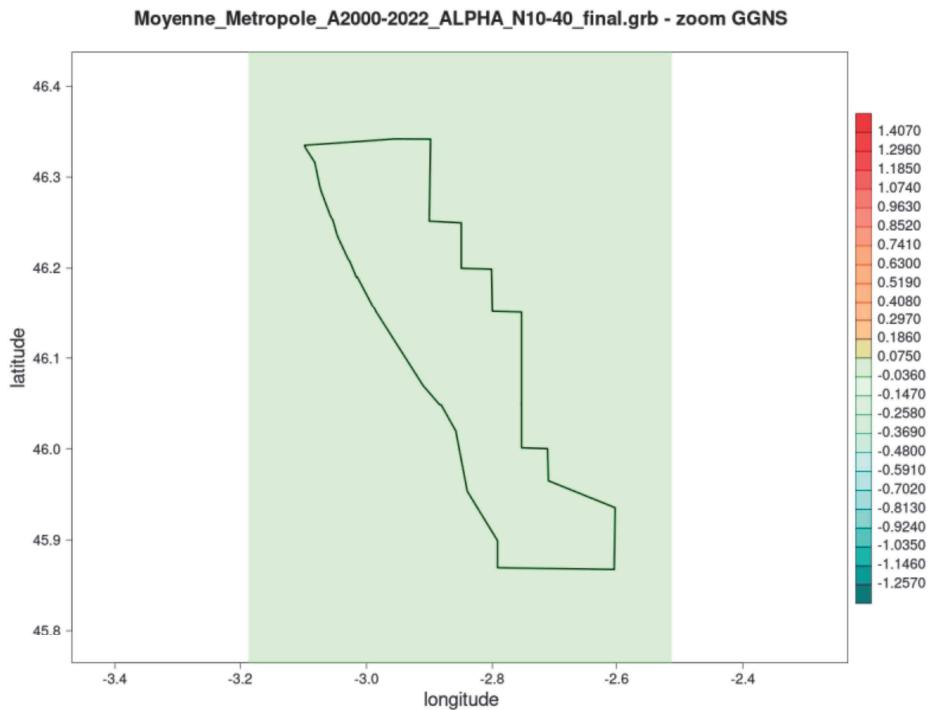
Pour le calcul des résultats par secteur ou par bin, quelle que soit l'une des quatre couches considérées ici, les directions considérées sont celles du vent au niveau 100 m.

2.3.1 Coefficient α de cisaillement de vent tous secteurs confondus

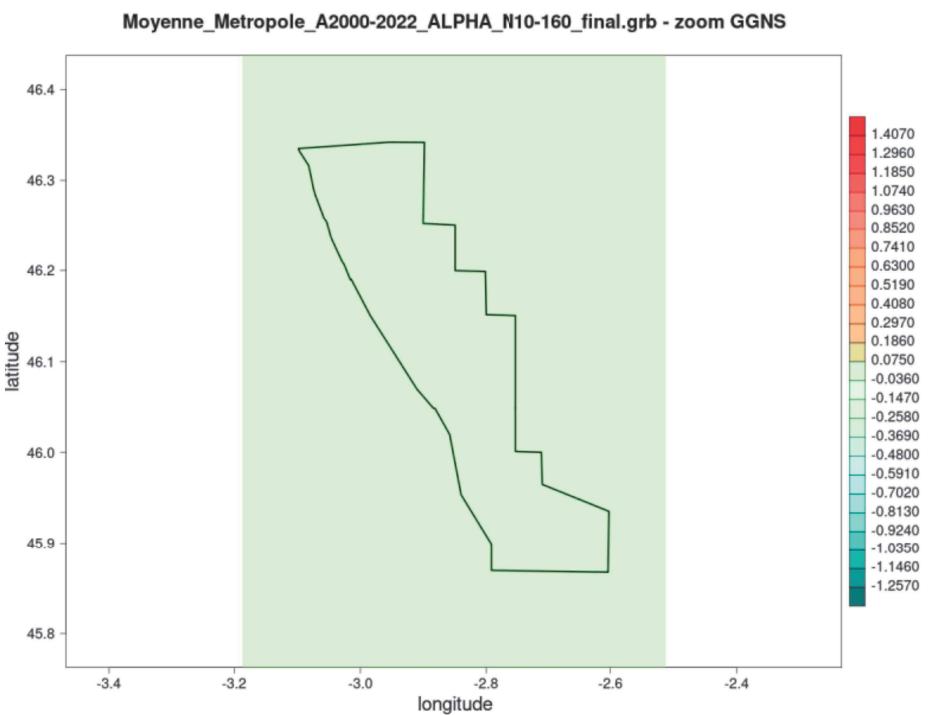
Les cartes du coefficient α de cisaillement de vent pour les couches 10-40 m, 10-160 m, 40-100 m, 100-160 m tous secteurs confondus pour la zone GGNS, calculé à partir des séries des forces du vent d'AROME sur la période 2000-2022, sont fournies ci-dessous.

2 Résultats des diagnostics de la turbulence

Couche 10-40 m



Couche 10-160m



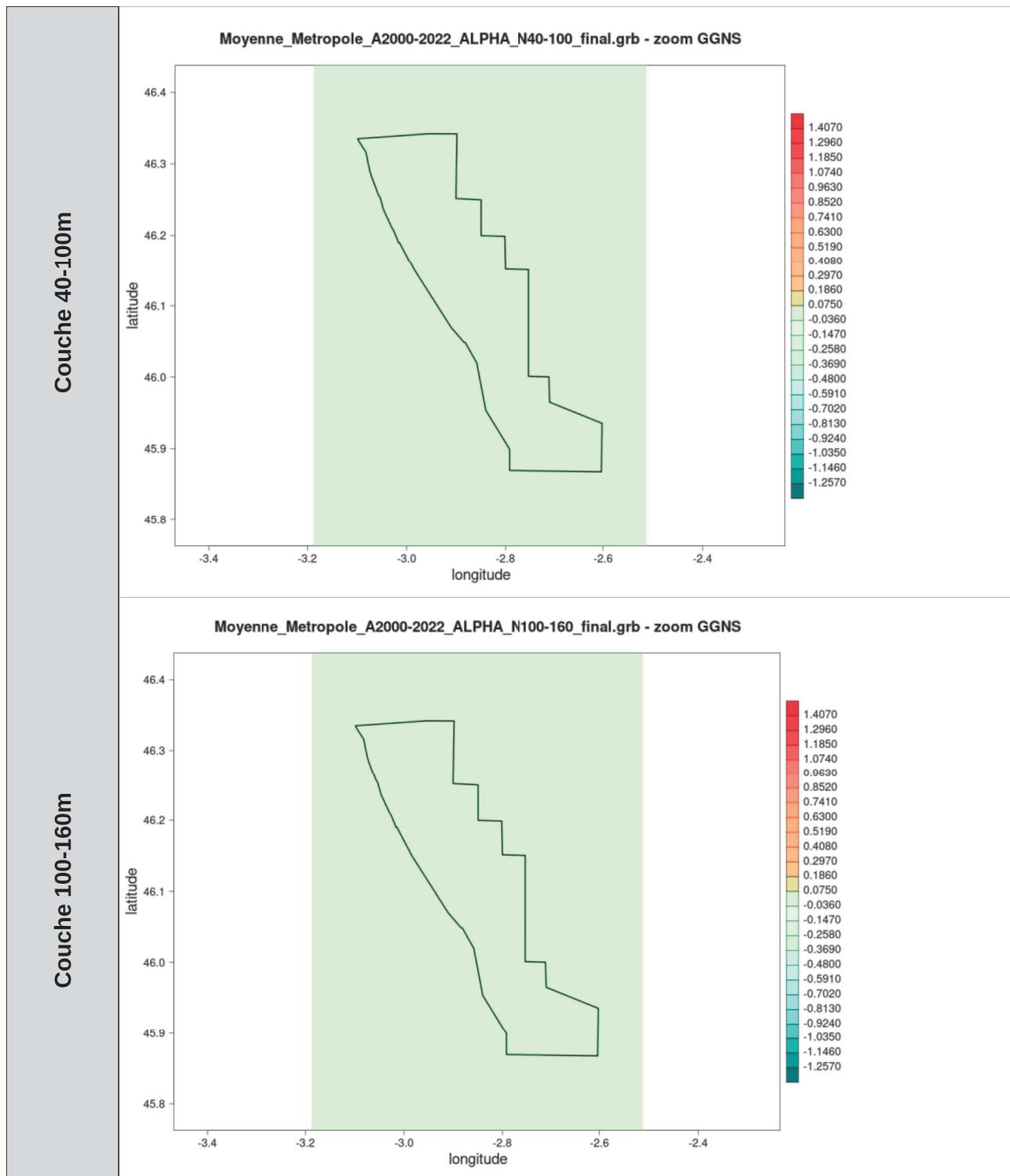


Illustration 11 : carte du coefficient α de cisaillement de vent pour les couches 10-40, 10-160, 40-100 et 100-160 m tous secteurs confondus pour la zone GGNS, calculé à partir des forces du vent AROME (2000-2022)

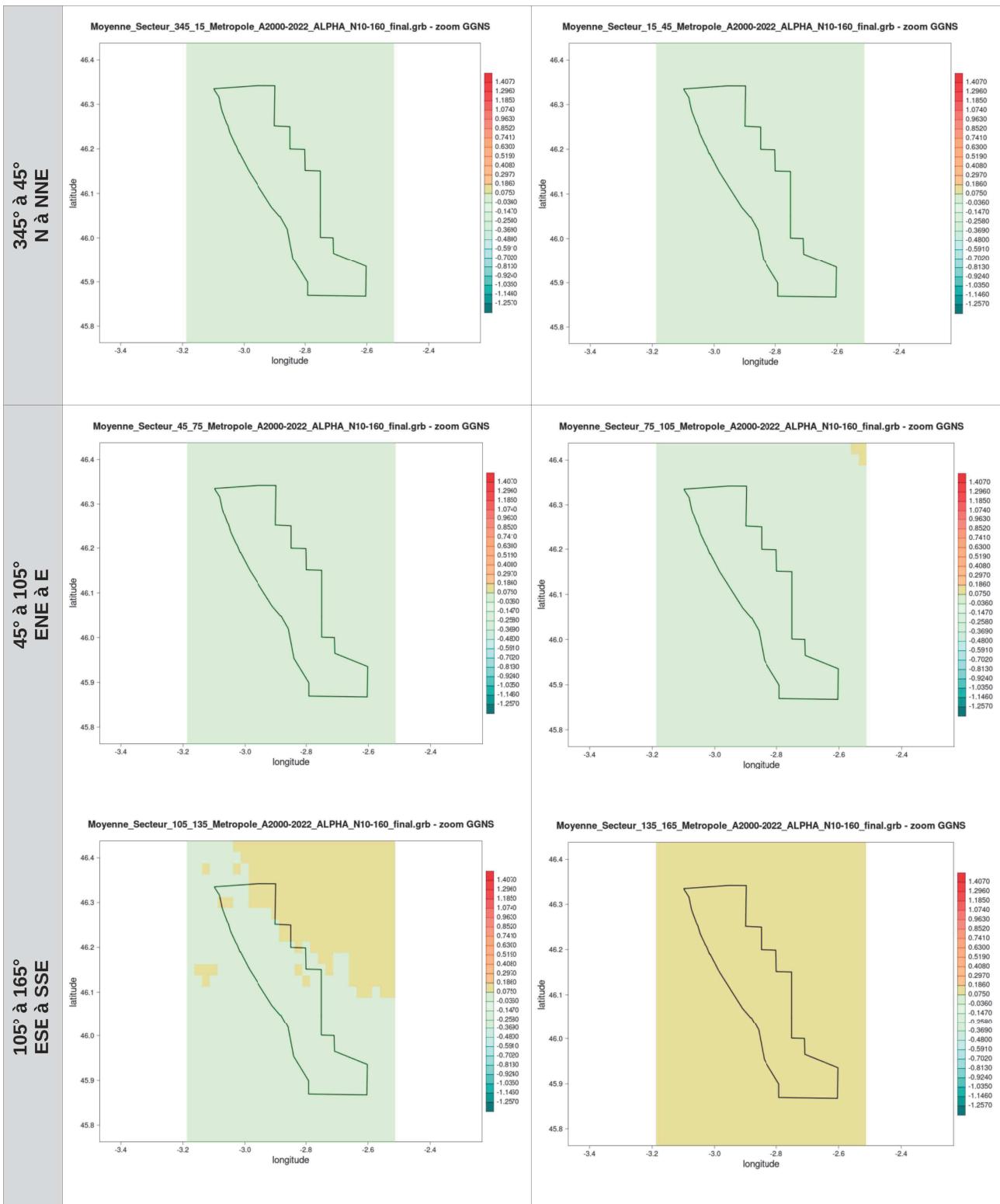
Visuellement le coefficient de cisaillement n'évolue pas entre les différentes couches. En effet, les valeurs de alpha sont des valeurs assez faibles et très proches entre elles. Elles se situent dans la même palette de couleur au niveau de la légende. Toutefois, l'analyse des valeurs numériques montre que les coefficients α de cisaillement vertical de la force du vent sont assez proches parmi les quatre couches étudiées, avec la **couche 40-100 qui a les valeurs les plus élevées** (maximum à 0.064). Ainsi, les pales des éoliennes rencontreront les coefficients α de cisaillement vertical de la force du vent parmi les plus forts notamment dans la partie basse de la couche balayée (maximum à 0.0597 pour la couche 10-40).

2.3.2 Coefficient α de cisaillement de vent par secteur

Les cartes du coefficient α de cisaillement de vent pour les couches 10-40 m, 10-160 m, 40-100 m, 100-160 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculé à partir des séries des forces du vent issues d'AROME sur la période 2000-2022, sont fournies ci-après pour le niveau 10-160 m et en annexe pour les couches 10-40 m, 40-100m et 100-160 m.

Évaluation du risque de turbulence

Lot 3 - Golfe de Gascogne Nord et Sud (GGNS)



2 Résultats des diagnostics de la turbulence

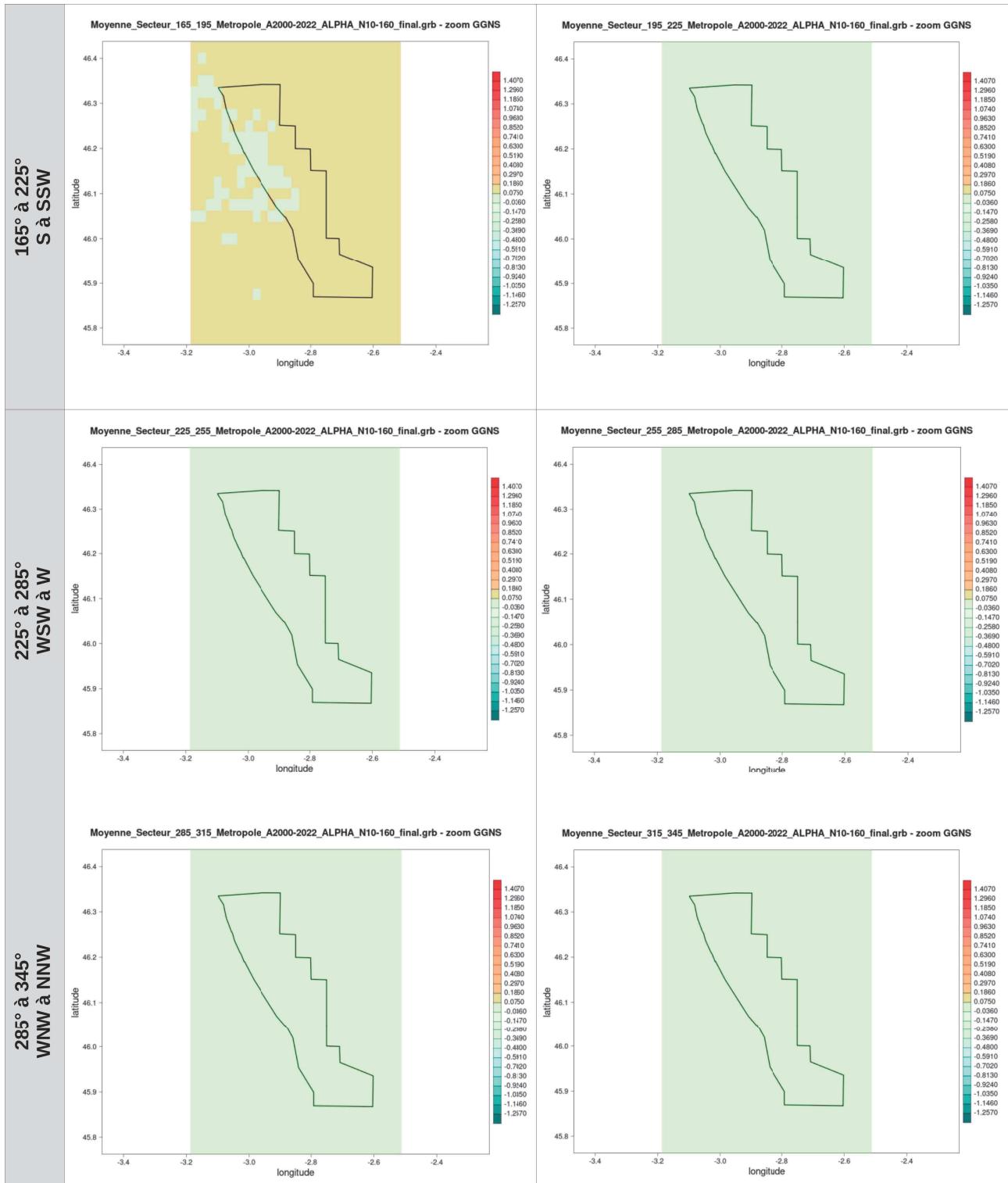


Illustration 12 : cartes du coefficient α de cisaillement de vent pour la couche 10-160 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculé à partir du vent AROME (2000-2022)

Ces cartes des coefficients α de cisaillement du vent par secteurs 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 α de cisaillement du vent par couche et par secteur sur la zone d'intérêt est réalisé et fourni dans le tableau 3.

	N	NNE	ENE	E	ESE	SSE	S	SSW	WSW	W	WNW	NNW
10-40 m	0.044 0.050	0.054 0.058	0.059 0.063	0.065 0.068	0.069 0.072	0.072 0.075	0.067 0.071	0.062 0.064	0.058 0.059	0.051 0.0552	0.045 0.046	0.043 0.046
10-160 m	0.046 0.052	0.055 0.061	0.064 0.070	0.076 0.084	0.087 0.094	0.098 0.106	0.087 0.094	0.076 0.079	0.067 0.069	0.054 0.058	0.044 0.046	0.040 0.045
40-100 m	0.039 0.041	0.045 0.049	0.056 0.061	0.064 0.068	0.071 0.076	0.081 0.086	0.074 0.079	0.069 0.072	0.062 0.064	0.052 0.054	0.042 0.044	0.039 0.041
100-160 m	-0.009 0.001	-0.005 0.001	0.029 0.042	0.027 0.043	0.044 0.058	0.072 0.082	0.064 0.077	0.075 0.079	0.068 0.071	0.050 0.055	0.030 0.037	0.016 0.024

Tableau 3 : plage (borne minimale et borne maximale établies à partir des points de la zone GGNS) des moyennes du coefficient α pour chacune des quatre couches (10-40, 10-160, 40-100 et 100-160 m) par secteurs de direction de 30° du vent au niveau 100 m, sans distinction jour-nuit

Ces calculs du coefficient α de cisaillement vertical de la force du vent par secteurs de direction du vent montrent des variations de ce coefficient entre -0,009 et 0,106.

Les cartes et le tableau montrent que les vents de nord à nord-nord-ouest sont associés à des coefficients de cisaillement faibles. À l'inverse ce sont les vents venant du sud-sud-est qui apportent les plus forts cisaillements de vent verticaux.

Une synthèse du cisaillement sur la zone pour le jour et pour la nuit est réalisée pour la couche 10-160 m et est fournie ci-dessous (voir tableau 4).

	jour			nuit			sans distinction jour-nuit		
	min	moy	max	min	moy	max	min	moy	max
Tous dd	0.053	0.053	0.054	0.058	0.059	0.059	0.055	0.056	0.057
N	0.033	0.034	0.036	0.042	0.045	0.047	0.039	0.04	0.041
NNE	0.038	0.04	0.043	0.051	0.054	0.055	0.045	0.047	0.049
ENE	0.048	0.05	0.054	0.063	0.065	0.068	0.056	0.058	0.061
E	0.056	0.059	0.062	0.071	0.073	0.075	0.064	0.066	0.068
ESE	0.061	0.064	0.067	0.082	0.085	0.088	0.071	0.074	0.076
SSE	0.076	0.079	0.081	0.085	0.088	0.091	0.081	0.083	0.086
S	0.072	0.075	0.078	0.075	0.078	0.082	0.074	0.076	0.079
SSW	0.068	0.07	0.072	0.069	0.07	0.072	0.069	0.07	0.072
WSW	0.063	0.064	0.065	0.062	0.062	0.063	0.062	0.063	0.064
W	0.052	0.053	0.055	0.052	0.053	0.055	0.052	0.053	0.054
WNW	0.042	0.043	0.045	0.042	0.043	0.044	0.042	0.043	0.044
NNW	0.037	0.038	0.039	0.04	0.041	0.043	0.039	0.04	0.041

Tableau 4 : minimum, maximum et moyenne du coefficient α , obtenus à partir des valeurs α de l'ensemble des points de grille de la zone GGNS fournies pour la couche 10-160 m par secteurs de direction de 30° du vent au niveau 100 m

Les coefficients α de cisaillement vertical de vent sur la couche 10-160 m sont en moyenne (colonne « moy ») plus forts la nuit que le jour excepté pour les vents de ouest-sud-ouest.

2.3.3 Coefficient α de cisaillement de vent par bin de 1 m/s

Le coefficient de cisaillement α a été calculé pour les quatre couches de chacun des 25 bins de vent à 100 mètres et pour les périodes temporelles « jour », « nuit » et « jour+nuit ». Cela représente au total 300 cartes. Nous ne donnerons ici comme exemple que les cartes des plages 2,5-3,5, 8,5-9,5 et 14,5-15,5 pour la couche 10-160 m :

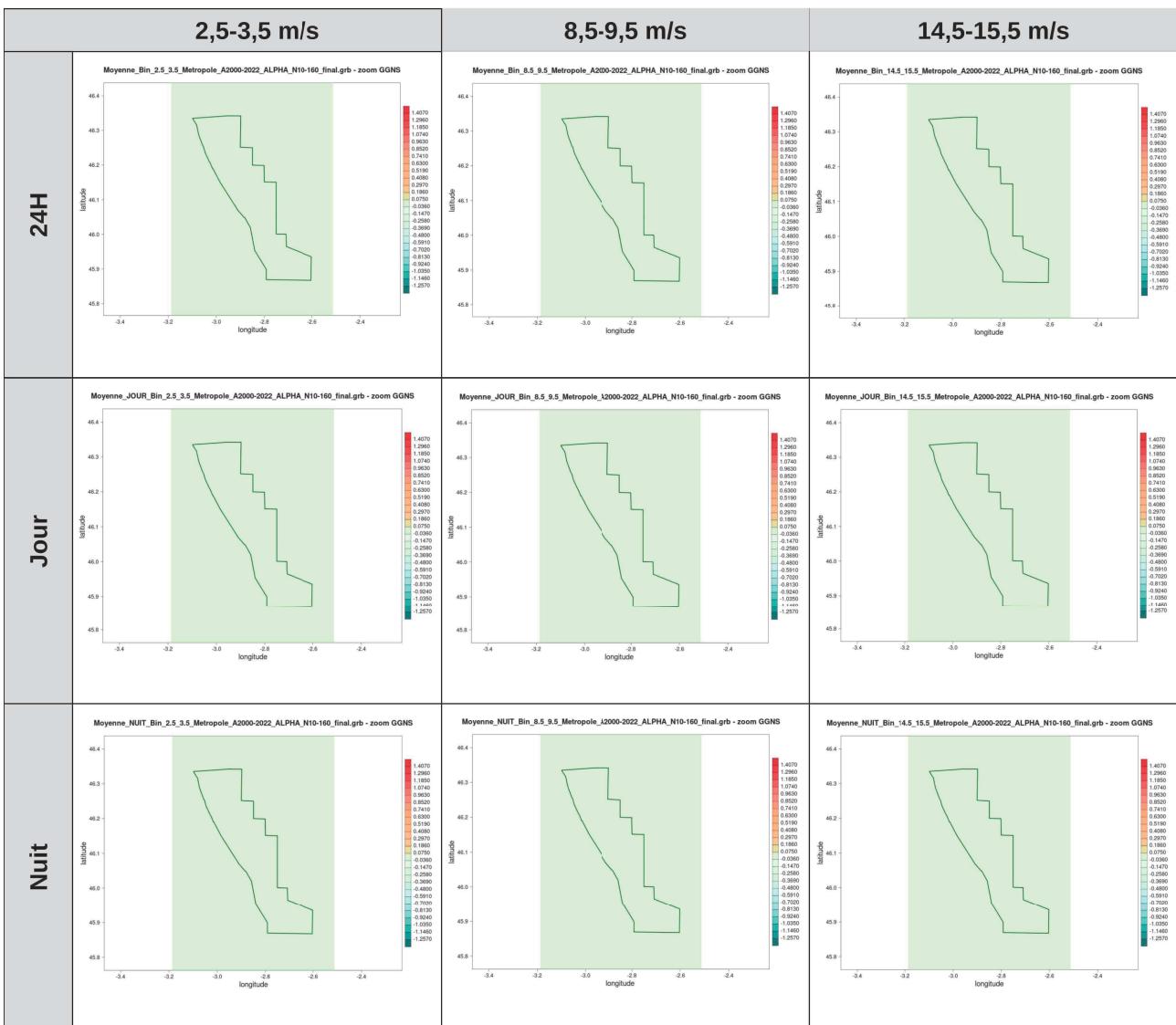


Illustration 13 : coefficient α du cisaillement moyen du vent sur la couche 10-160 mètres pour les bins 2,5-3,5, 8,5-9,5 et 14,5-15,5 m/s avec et sans différenciation jour/nuit sur la zone GGNS

Visuellement, il est impossible de constater une évolution coefficient du cisaillement moyen du vent entre les différents bins étudiés.

	2,5-3,5	8,5-9,5	14,5-15,5
24H	0.024	0.058	0.07
Jour	0.022	0.056	0.067
Nuit	0.027	0.059	0.073

Tableau 5 : moyenne sur la zone GGNS du coefficient α pour les bins 2,5-3,5, 8,5-9,5 et 14,5-15,5 m/s dans la couche 10-160 m avec et sans différenciation jour-nuit

2 Résultats des diagnostics de la turbulence



La moyenne calculée sur la zone permet de préciser que ce coefficient est d'un ordre de grandeur comparable le jour et la nuit.

Ce coefficient augmente lorsque la force du vent passe de 3 à 9 m/s. En journée et la nuit, on constate également une progression, certes bien moindre, lorsque la force du vent passe de 9 à 15 m/s.

3 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 2000-2022. 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.

3.1 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 [Couvreux 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 globalement une **sous-estimation des séries estimées par rapport à la série des données observées**. La sous-estimation est importante au fur et à mesure que l'altitude augmente.

3.2 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**.

Une comparaison du vent AROME à 10 m 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) est effectuée en routine sur terre par Météo-France. Elle montre un biais inférieur en moyenne à -0.3 m/s et une erreur quadratique moyenne 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.

Il n'existe pas de chiffrage précis de l'incertitude pour les rafales en mer. Cependant, la **comparaison entre les rafales calculées et observées à des niveaux variant entre 40 et 160 m**, réalisée sur des points disposant de mesures de vent en altitude, qu'ils soient terrestres ou maritimes, montre des résultats **tout à fait acceptables** : pour les vents du LiDAR, 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). De manière générale, la sous-estimation augmente au fur et à mesure que la vitesse du vent augmente.

3.3 Limites du calcul des durées de retour des rafales cinquantennales

Concernant les rafales cinquantennales calculées sur la zone GGNS, elles l'ont été à partir de séries d'une durée de 23 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 23 ans, il est ainsi possible de calculer des quantiles associés à des durées de retour de 50 ans, les résultats obtenus en termes de rafales cinquantennales doivent être pris avec précaution, 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 faire évoluer**. 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.

3.4 Incertitudes associées au coefficient α de cisaillement de vent

Le coefficient α de cisaillement de vent de la couche 10 – 160 m sur la bande littorale a été calculé en prenant en compte la force du vent moyen à 10 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 des limites** [Zhang et al, 2010].

4 Conclusion

L'objectif des travaux ici présentés est d'étudier la turbulence atmosphérique dans le cadre d'une problématique d'éolien en mer. Cette étude est basée sur différents indicateurs permettant d'appréhender la turbulence atmosphérique sur la couche allant de 10 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 2000-2022 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 avec les données disponibles [Roule, 2021]. Ensuite le prolongement des campagnes de mesures DGEC sur les différentes zones a permis de faire des vérifications supplémentaires des formules de l'intensité de turbulence et de la rafale.

Pour l'intensité de turbulence et l'exposant du cisaillement vertical du vent, des statistiques sont fournies sur la zone GGNS 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.

Bibliographie

Couvreux F., Bazile E., Canut G., Seity Y., Lothon M., Lohou F., Guichard F., Nilsson E., Boundary-layer turbulent processes and mesoscale variability represented by Numerical Weather Prediction models during the BLLAST campaign, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, doi:10.5194/acp-2015-1042, 2016, Manuscript under review for journal *Atmos. Chem. Phys.*, February 2016

Zhang Matthew Huaiquan, Wind Resource Assessment and Micro-siting : Science and Engineering, Wiley
Wagner R., Courtney M. Larsen, Torben J., Schmidt P., Uwe [Simulation of shear and turbulence impact on wind turbine performance](#), 2010

Ressources

Validation of the Windsea_02 Floating LiDAR at the Fécamp offshore platform, DNV-GL, page 26.

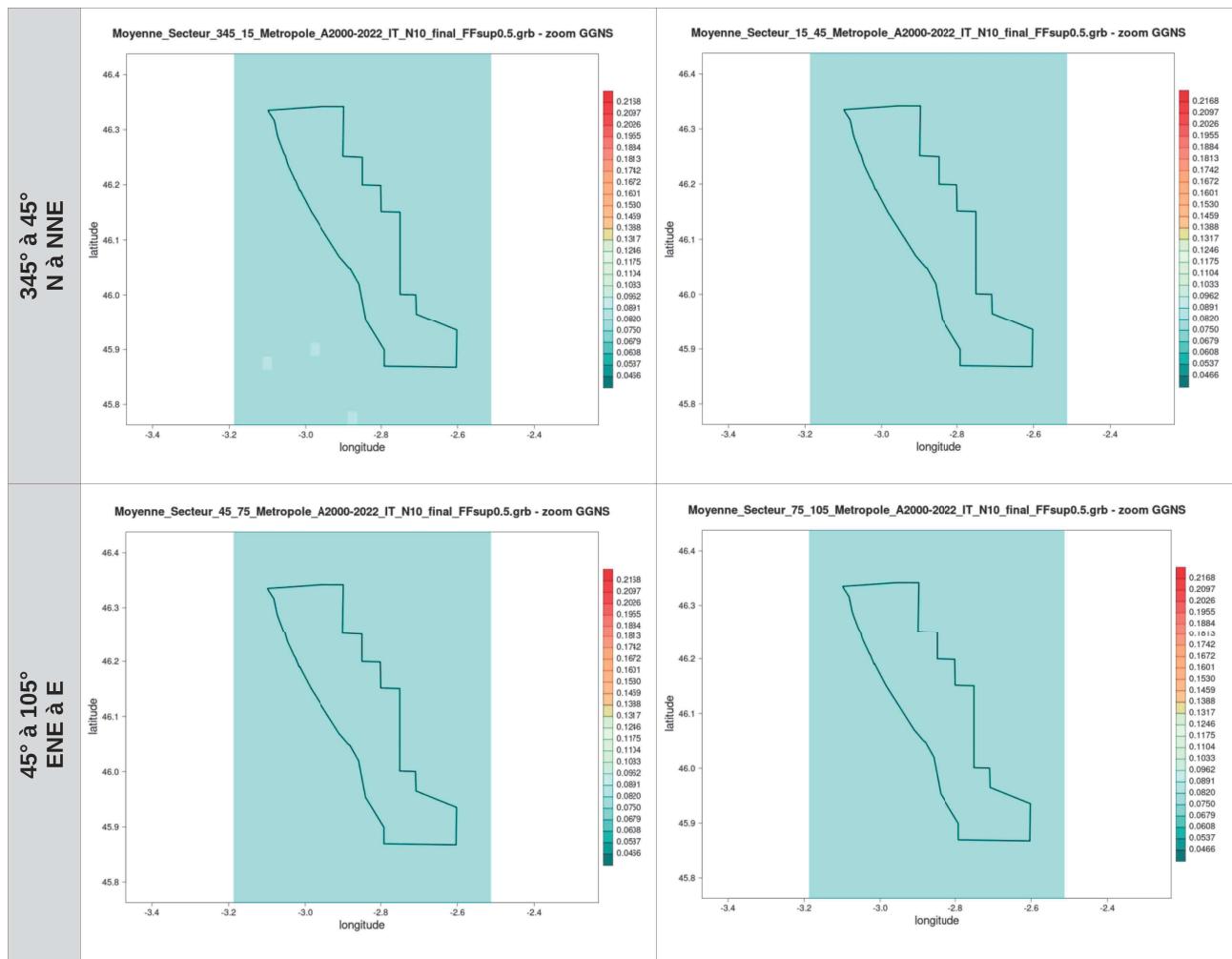
Table des annexes

A. Annexe - Résultats des diagnostics : Intensité de turbulence.....	39
. Intensité de turbulence par secteur de direction de vent.....	39
. Moyennes à 10 m.....	39
. Moyennes à 40 m.....	41
. Moyennes à 160 m.....	43
. Q70 à 10 m.....	46
. Q70 à 40 m.....	49
. Q70 à 160 m.....	52
. Intensité de turbulence par bin de force de vent.....	55
. Moyenne et Q70 à 10 m.....	55
. Moyenne et Q70 à 40 m.....	57
. Moyenne et Q70 à 160 m.....	59
B. Annexe - Résultats des diagnostics sur les rafales.....	61
. Rafales modélisées.....	61
. à 10 m.....	61
. à 40 m.....	63
. à 160 m.....	65
. à 200 m.....	67
. Rafales cinquantenales.....	69
. A 10 m	69
. A 40 m	74
. A 160 m	77
. A 200 m	80
C. Annexe - Coefficient α du cisaillement de vent par secteur.....	83
. Couche 10-40 m.....	83
. Couche 40-100 m.....	86
. Couche 100-160 m.....	89

A. Annexe - Résultats des diagnostics : Intensité de turbulence

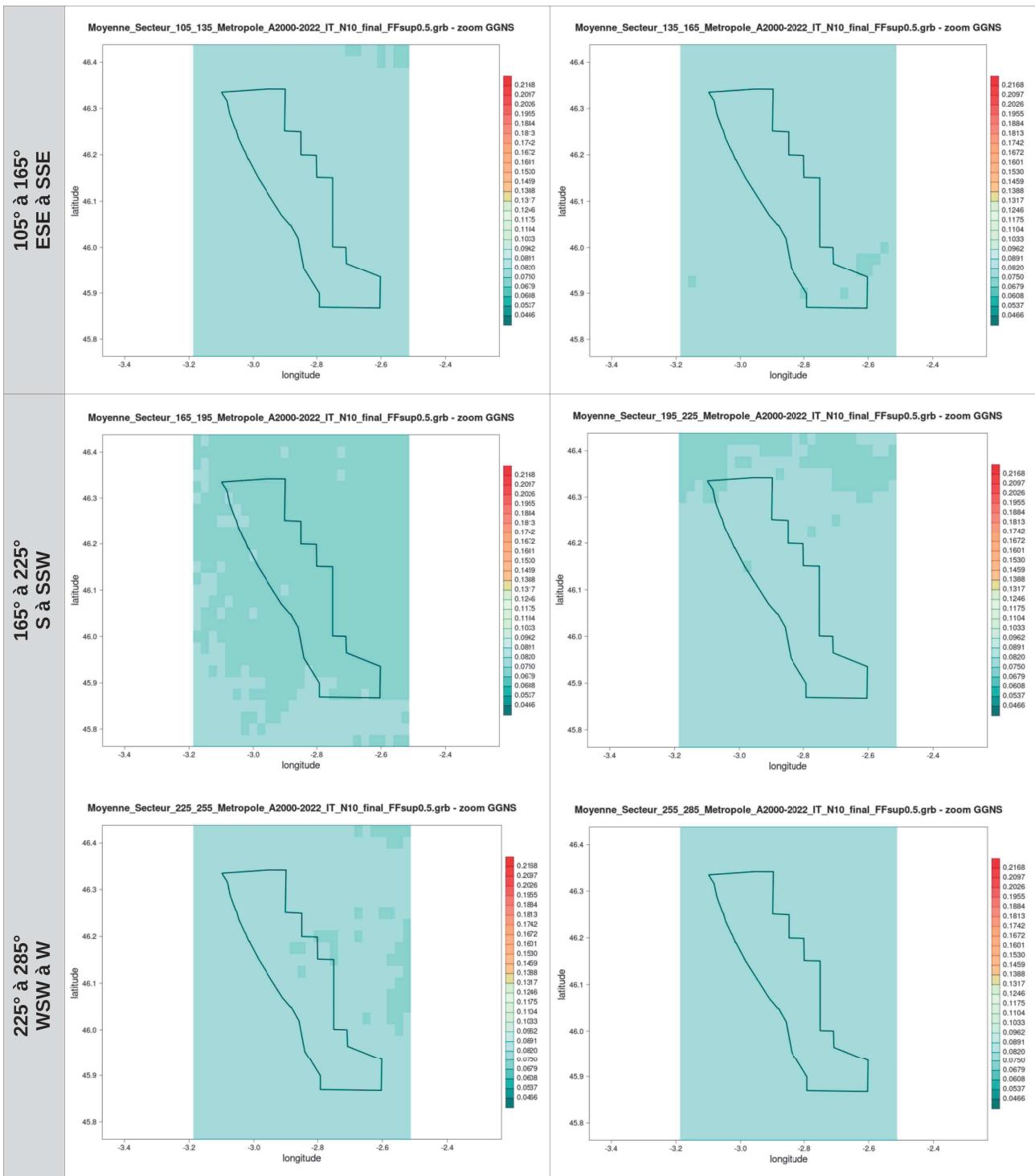
. Intensité de turbulence par secteur de direction de vent

. Moyennes à 10 m



Évaluation du risque de turbulence

Lot 3 - Golfe de Gascogne Nord et Sud (GGNS)



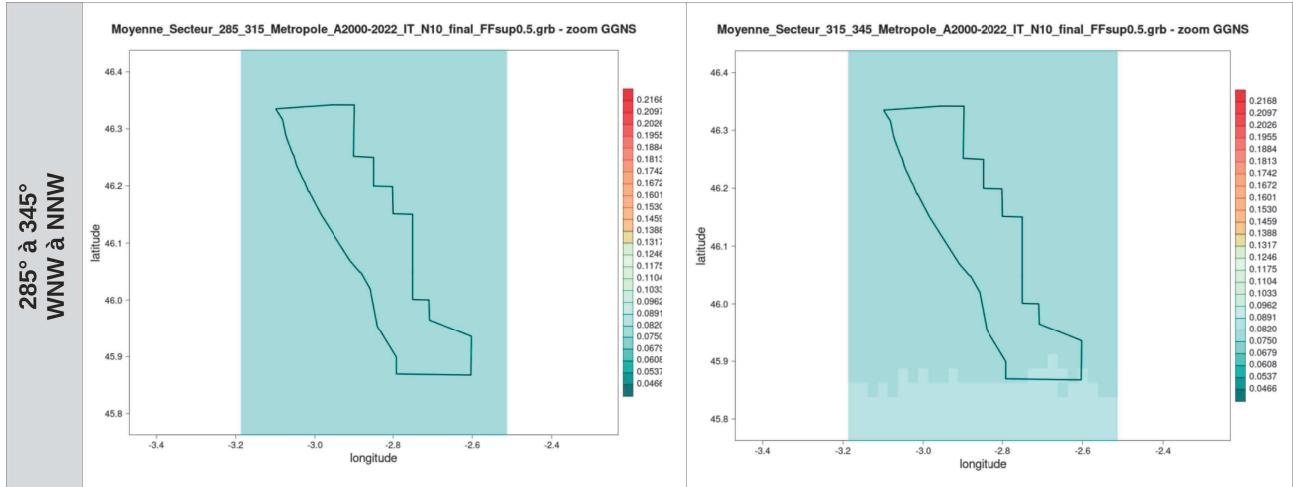
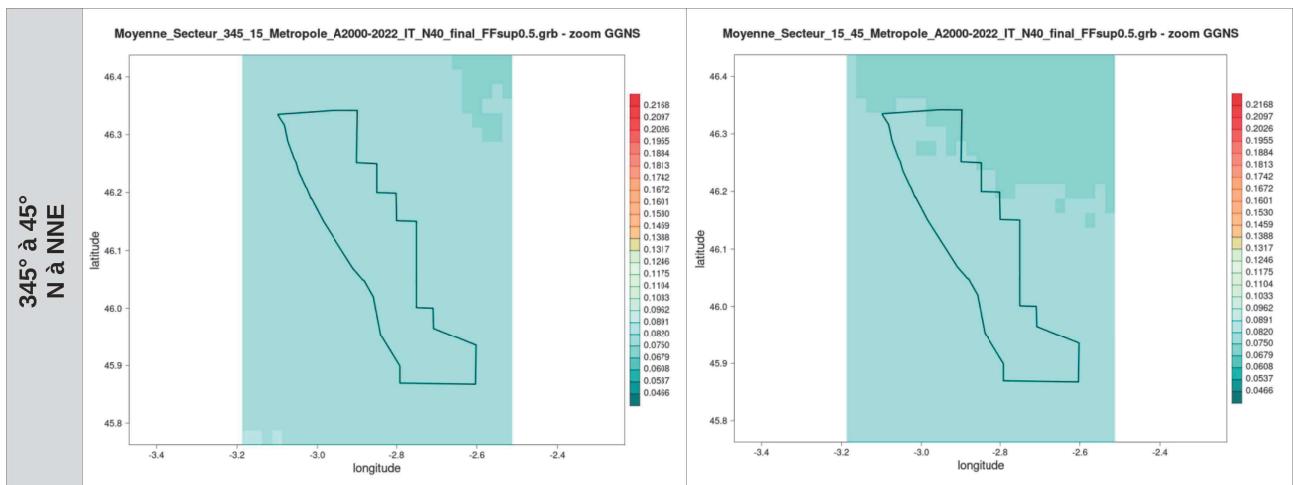


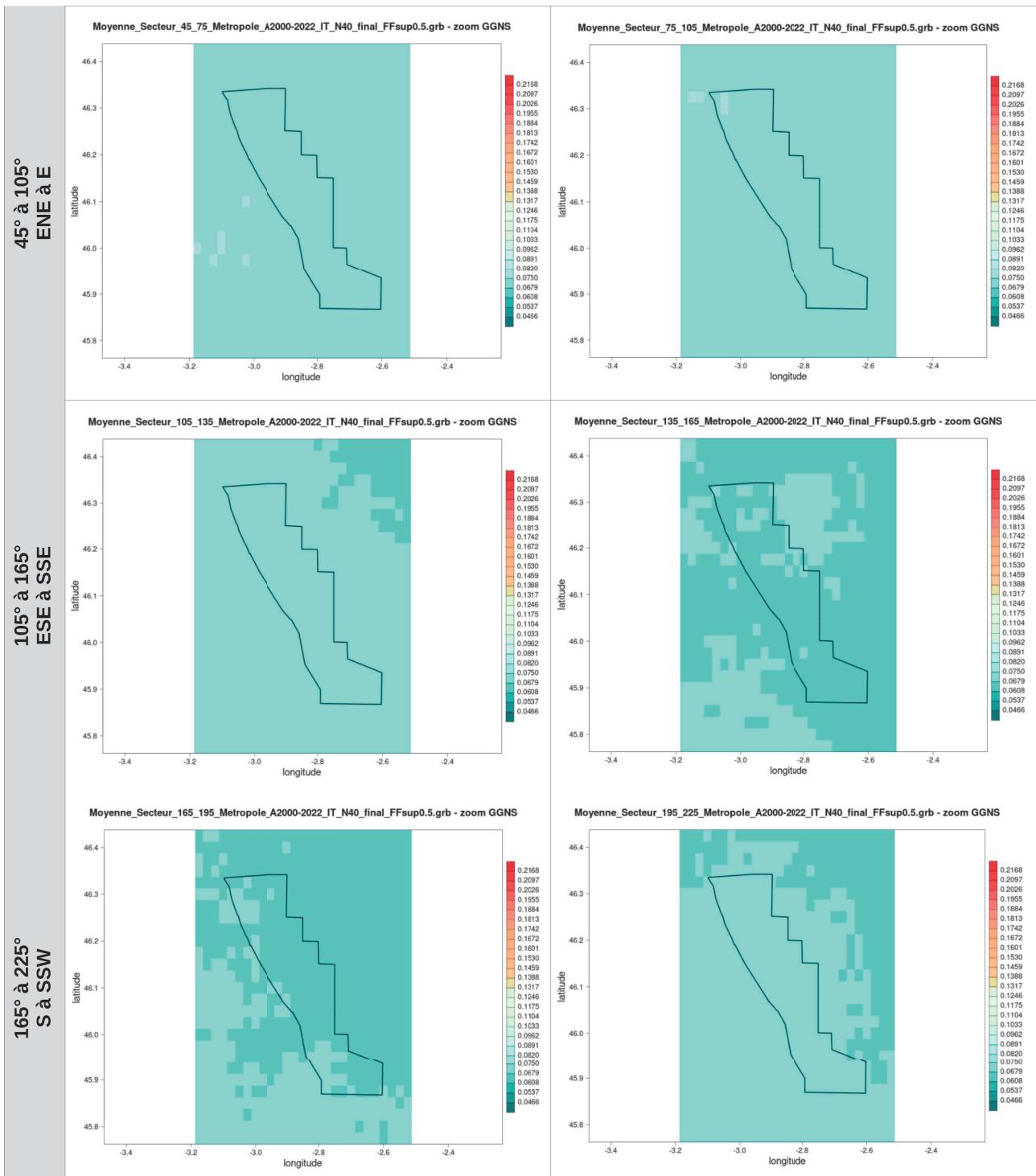
Illustration 14 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 10 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculées à partir des données AROME (2000-2022)

• Moyennes à 40 m



Évaluation du risque de turbulence

Lot 3 - Golfe de Gascogne Nord et Sud (GGNS)



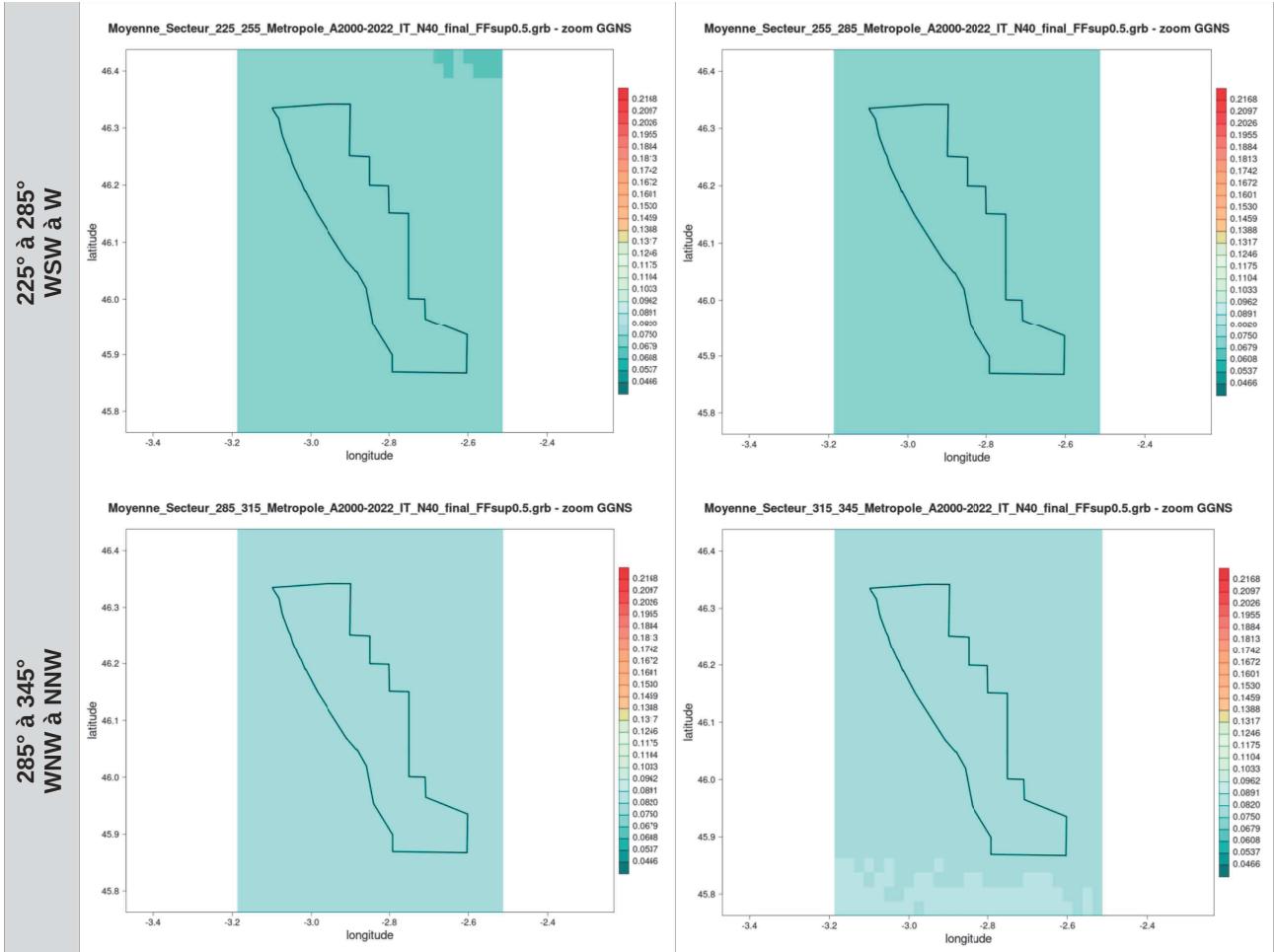
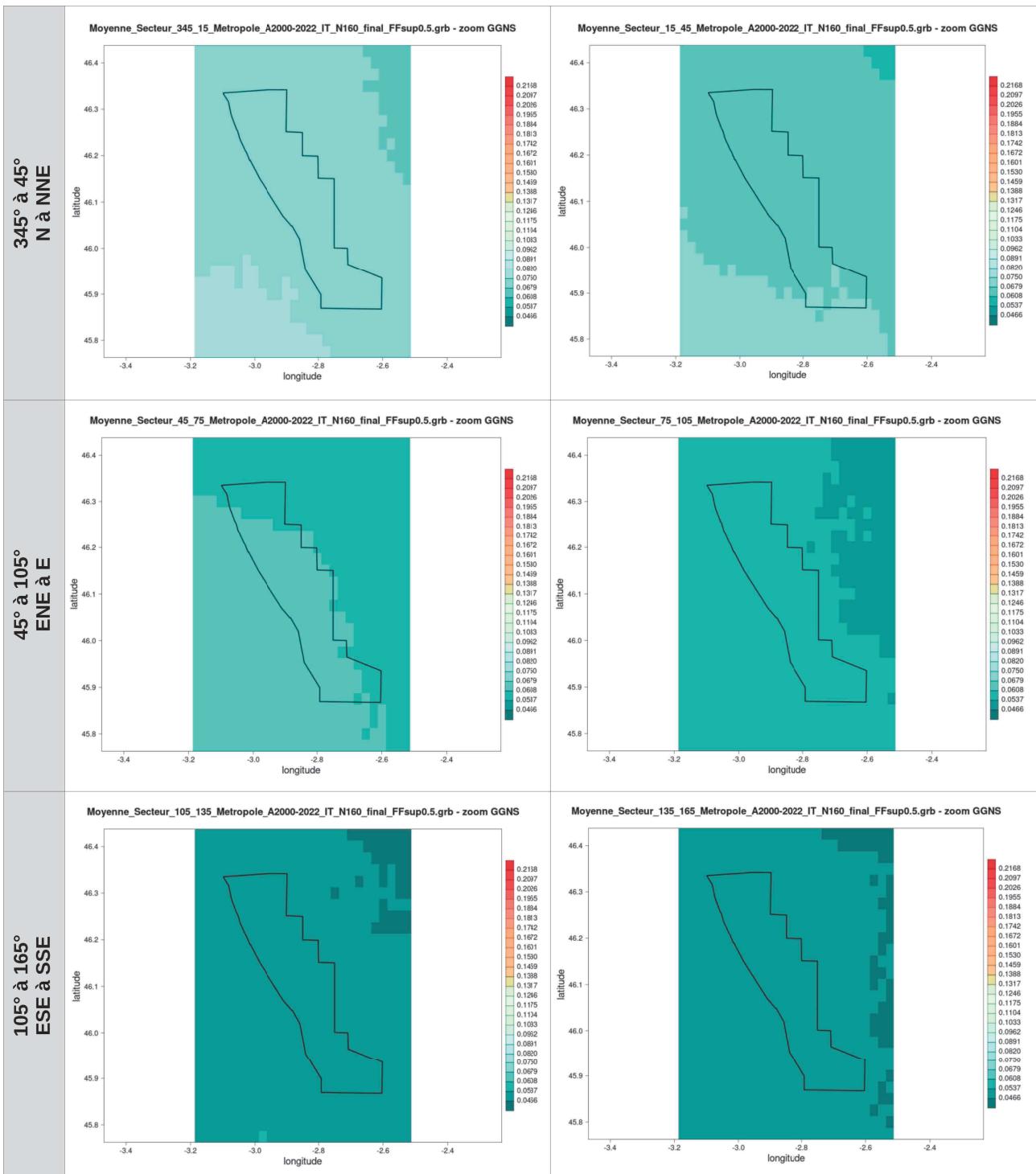


Illustration 15 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculées à partir des données AROME (2000-2022)

. Moyennes à 160 m

Évaluation du risque de turbulence

Lot 3 - Golfe de Gascogne Nord et Sud (GGNS)



A. Annexe - Résultats des diagnostics : Intensité de turbulence

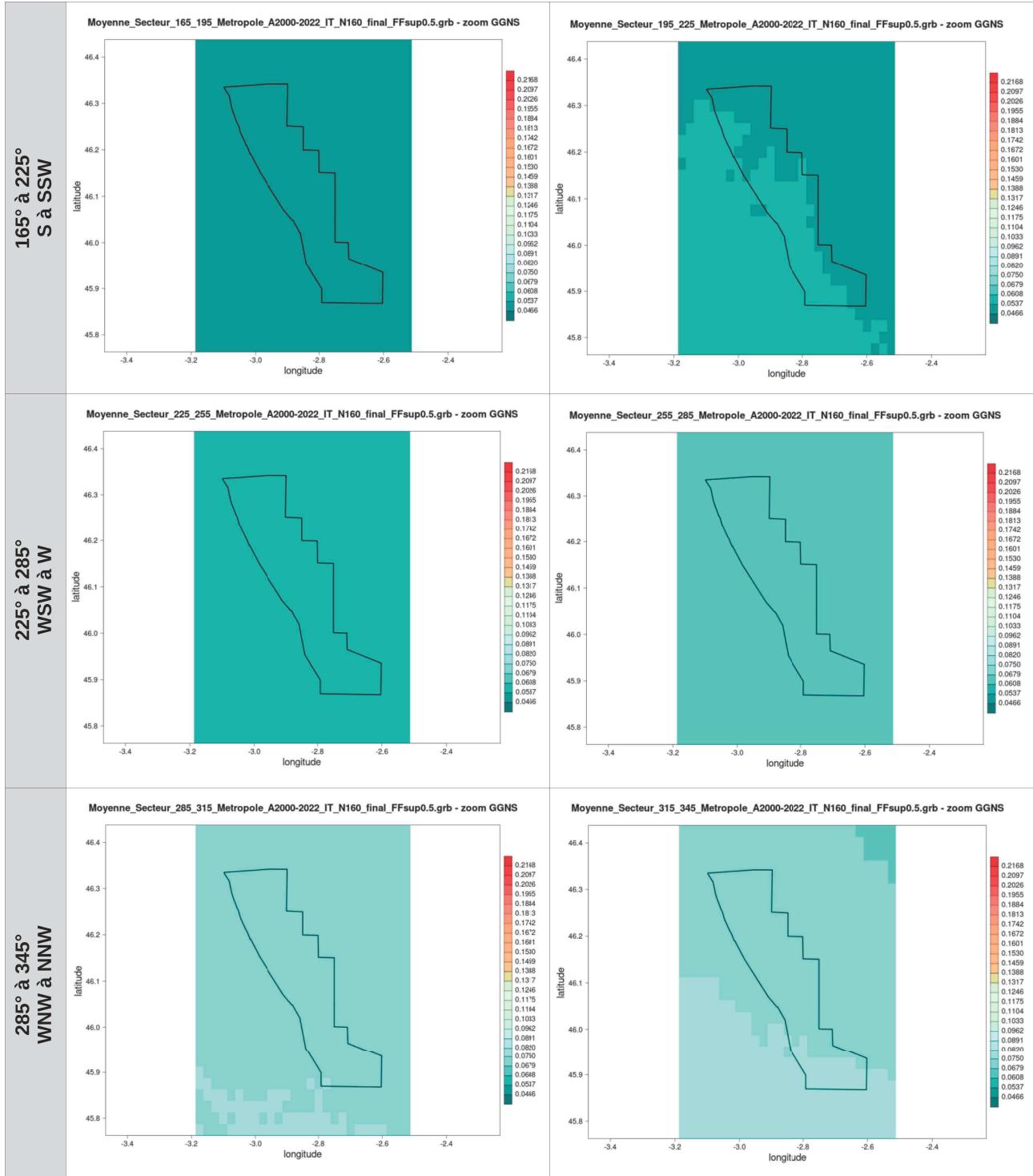
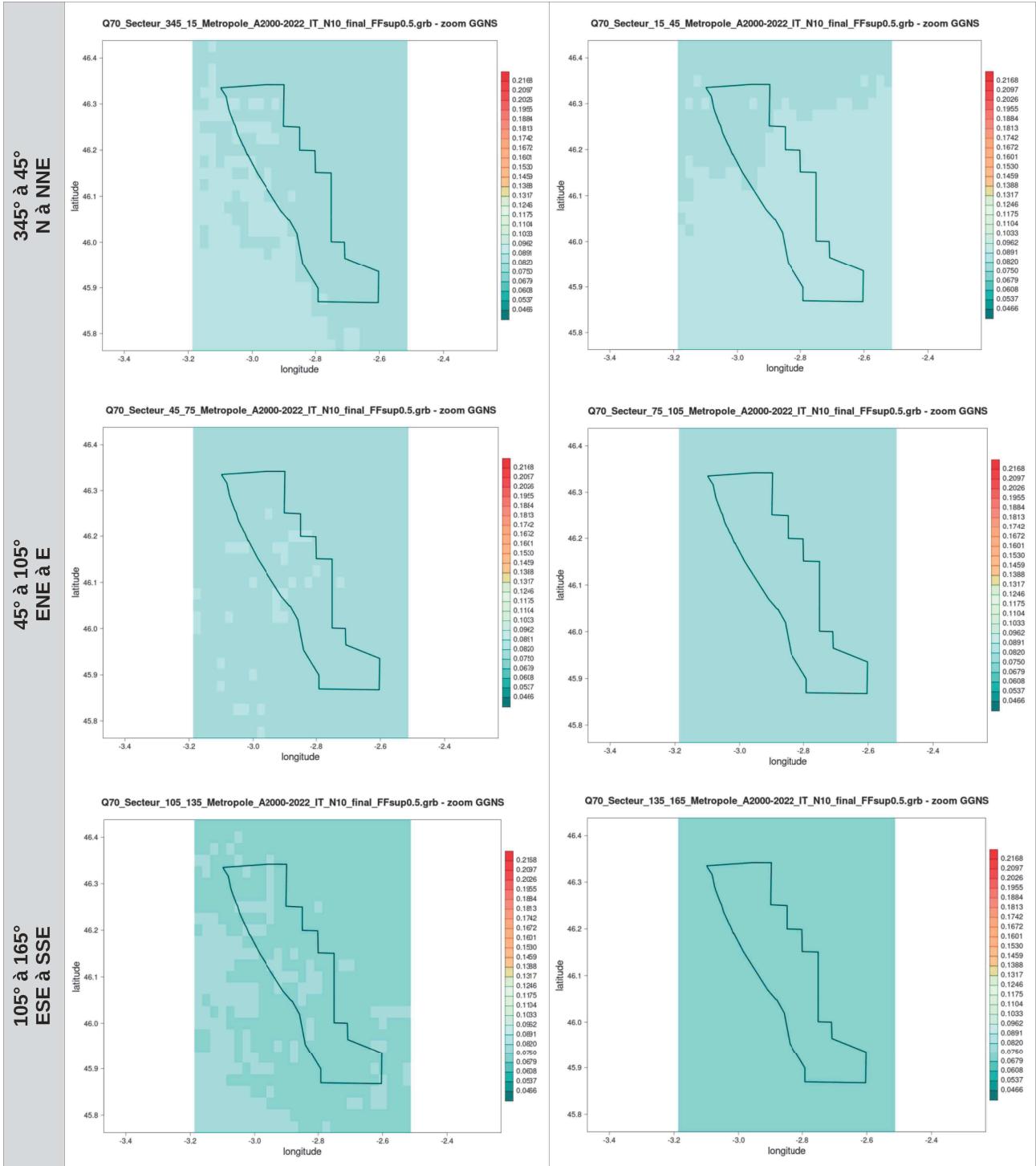


Illustration 16 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculées à partir des données AROME (2000-2022)

. Q70 à 10 m

A. Annexe - Résultats des diagnostics : Intensité de turbulence



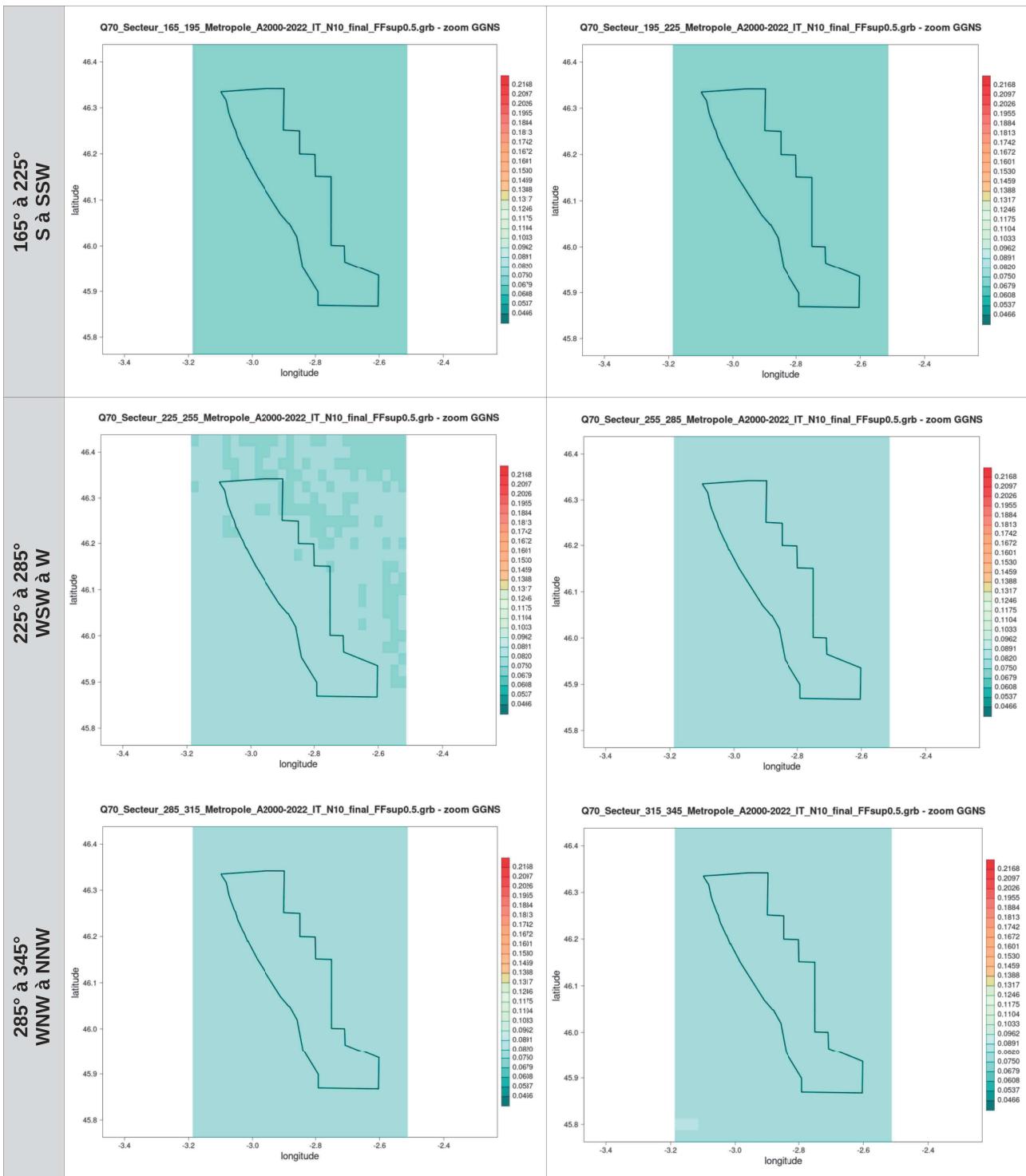
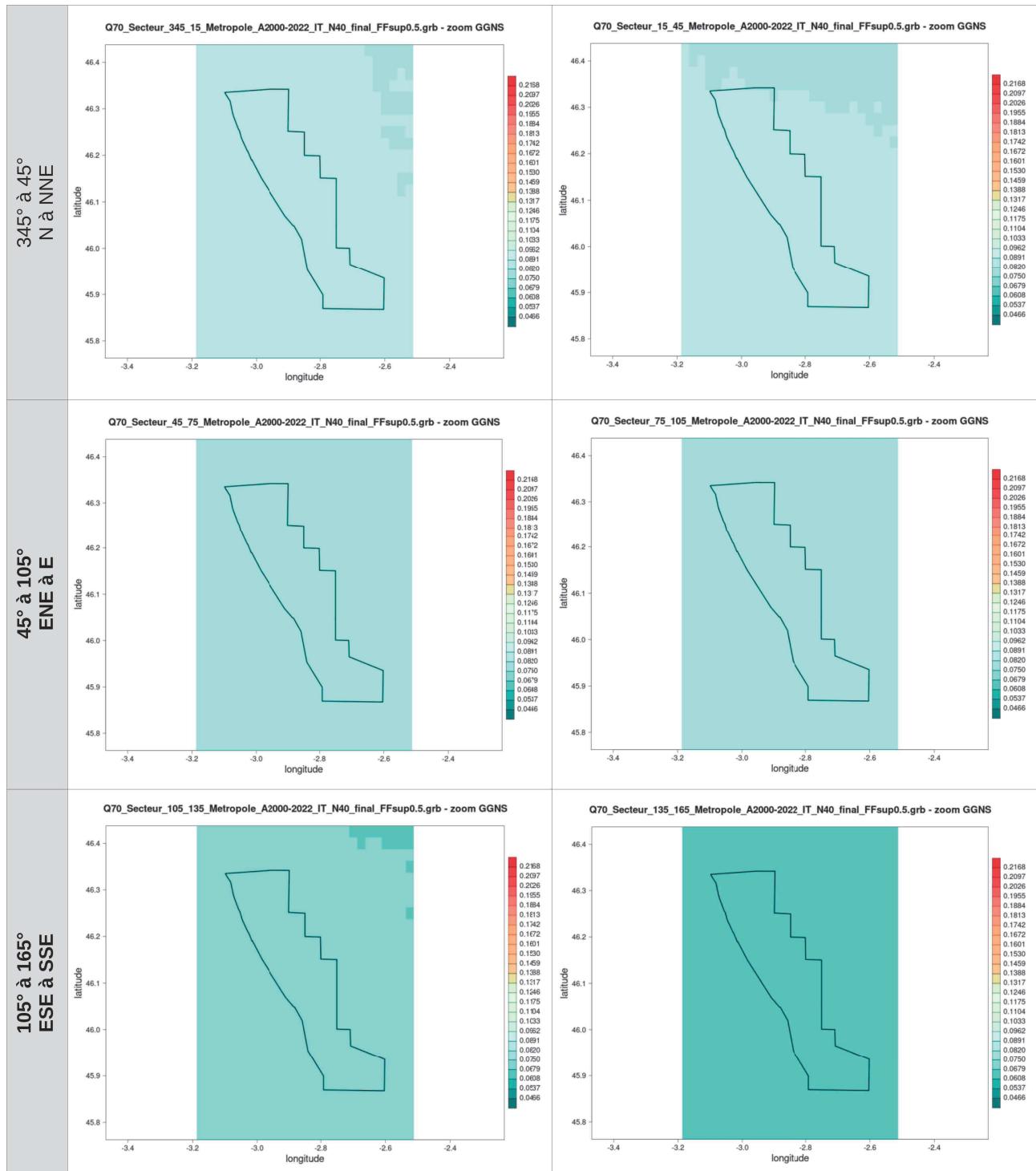


Illustration 17 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 10 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022)

Q70 à 40 m



Évaluation du risque de turbulence

Lot 3 - Golfe de Gascogne Nord et Sud (GGNS)

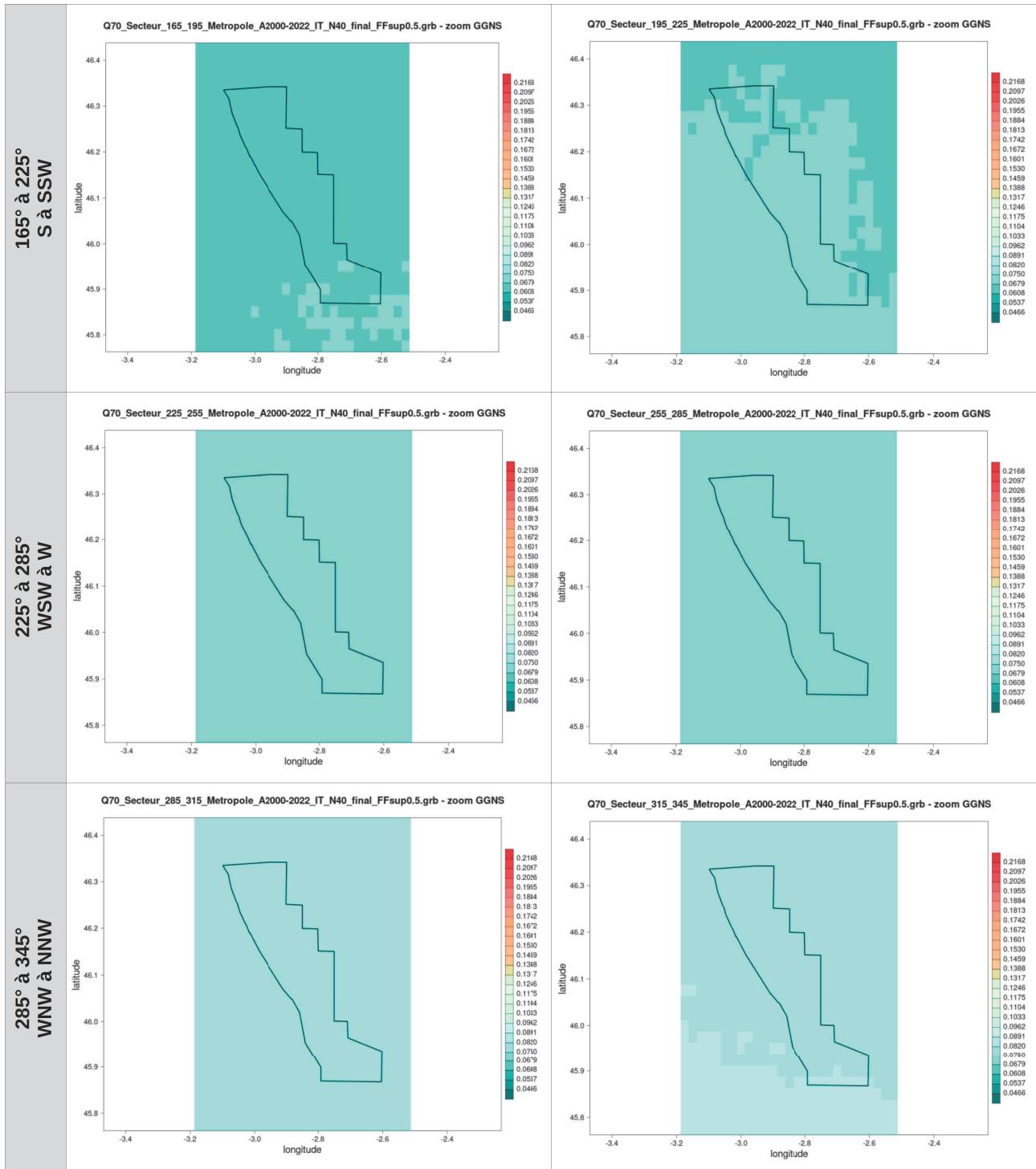
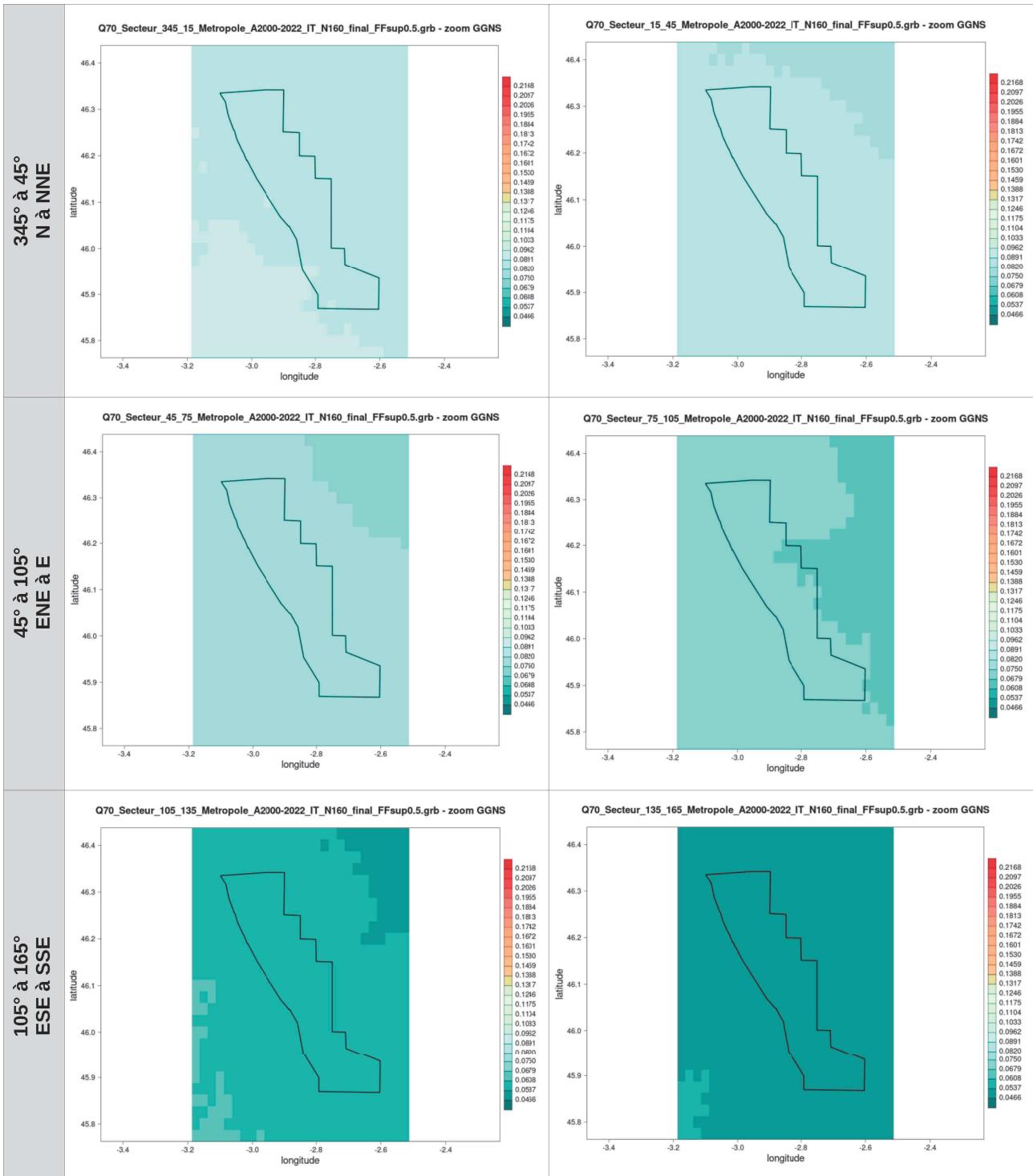


Illustration 18 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022)

. Q70 à 160 m

Évaluation du risque de turbulence

Lot 3 - Golfe de Gascogne Nord et Sud (GGNS)



A. Annexe - Résultats des diagnostics : Intensité de turbulence

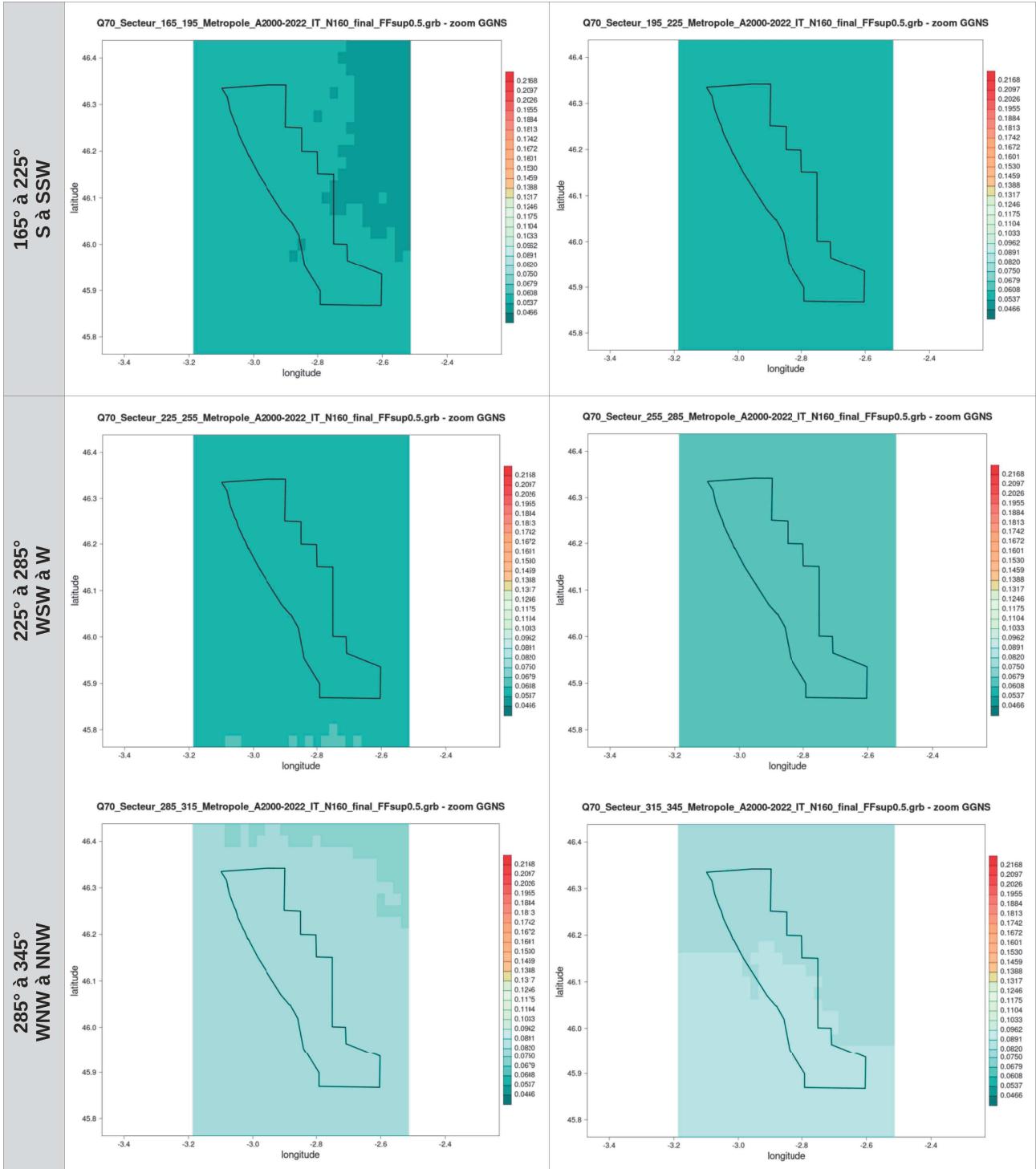


Illustration 19 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022)

. Intensité de turbulence par bin de force de vent

. Moyenne et Q70 à 10 m

A. Annexe - Résultats des diagnostics : Intensité de turbulence

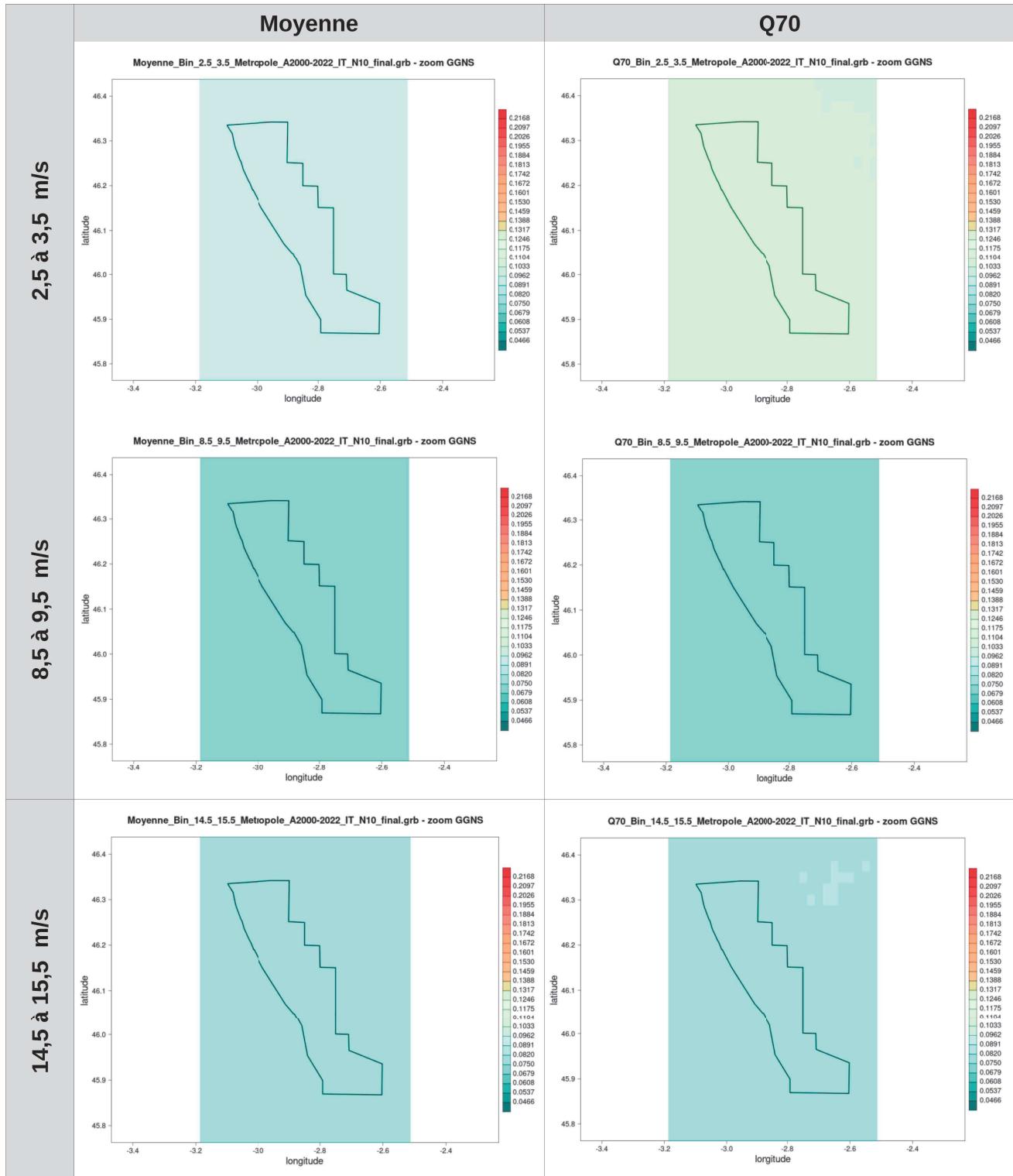


Illustration 20 : cartes des moyennes à gauche et du Q70 à droite de l'intensité de turbulence au niveau 10 m par bin de 1 m/s pour la zone GGNS, calculées à partir des données AROME (2000-2022)

. Moyenne et Q70 à 40 m

A. Annexe - Résultats des diagnostics : Intensité de turbulence

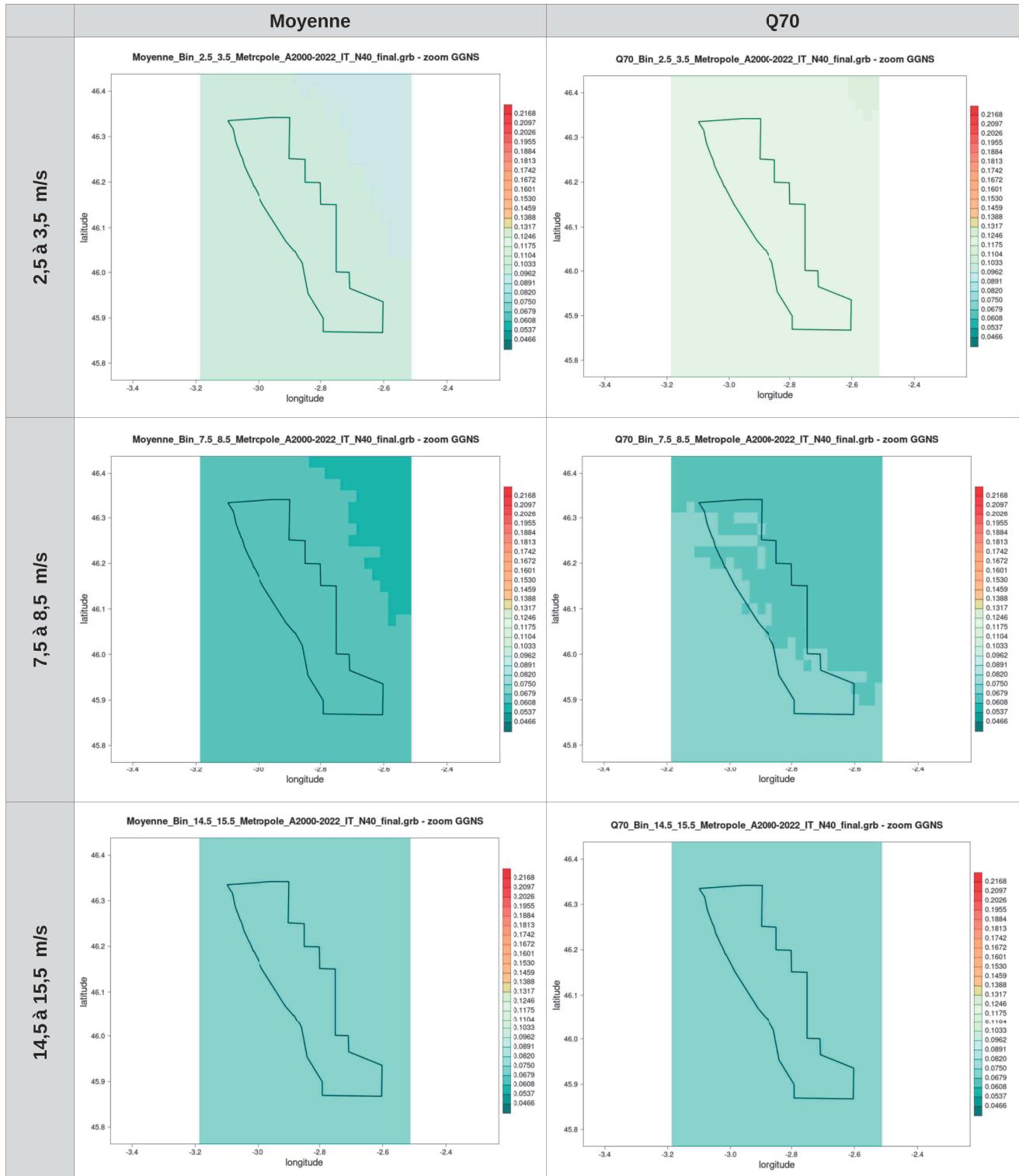


Illustration 21 : cartes des moyennes à gauche et du Q70 à droite de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par bin de 1 m/s pour la zone GGNS, calculées à partir des données AROME (2000-2022)

. Moyenne et Q70 à 160 m

A. Annexe - Résultats des diagnostics : Intensité de turbulence

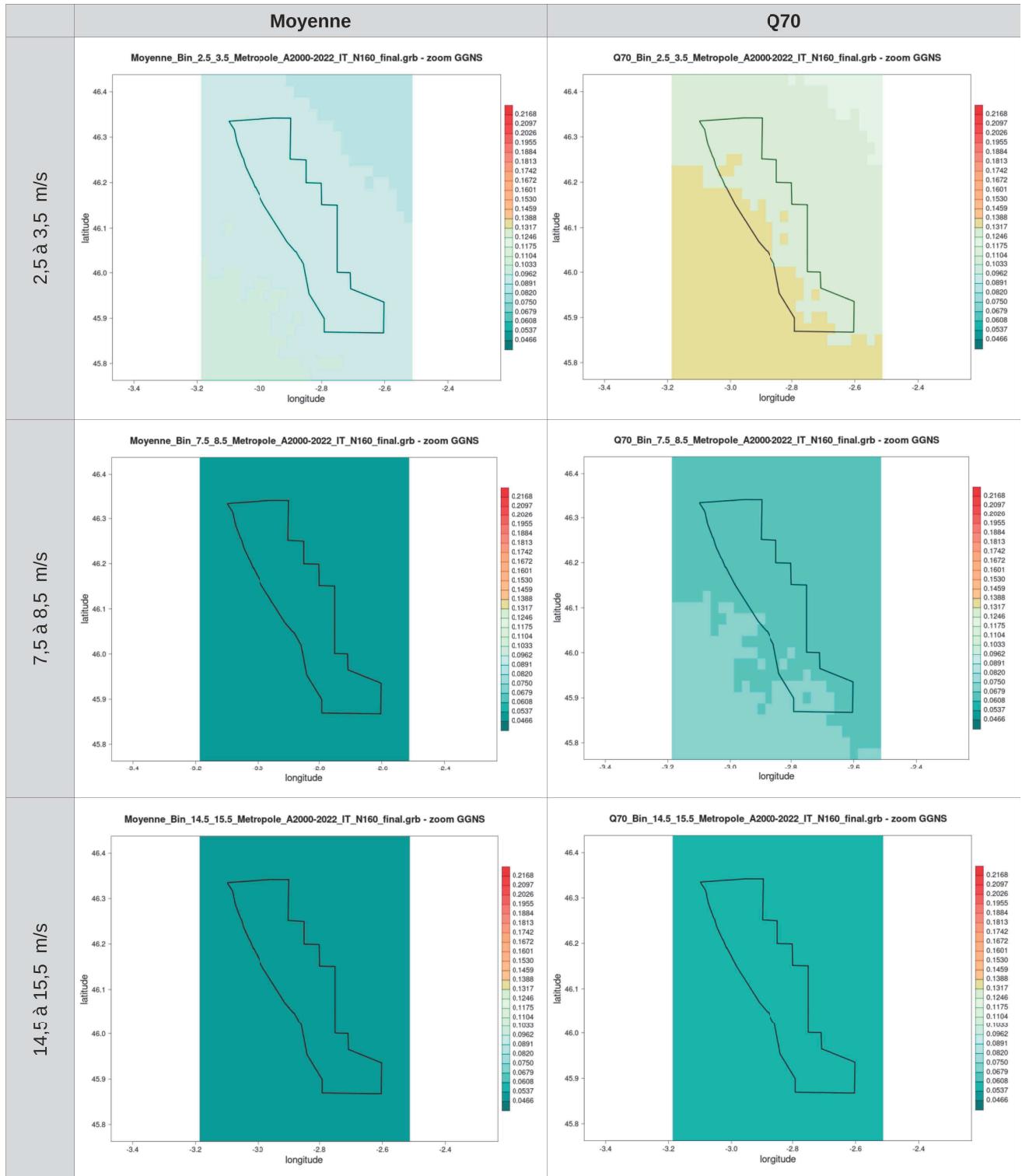


Illustration 22 : cartes des moyennes à gauche et du Q70 à droite de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par bin de 1 m/s pour la zone GGNS, calculées à partir des données AROME (2000-2022)

B. Annexe - Résultats des diagnostics sur les rafales

. Rafales modélisées

. à 10 m

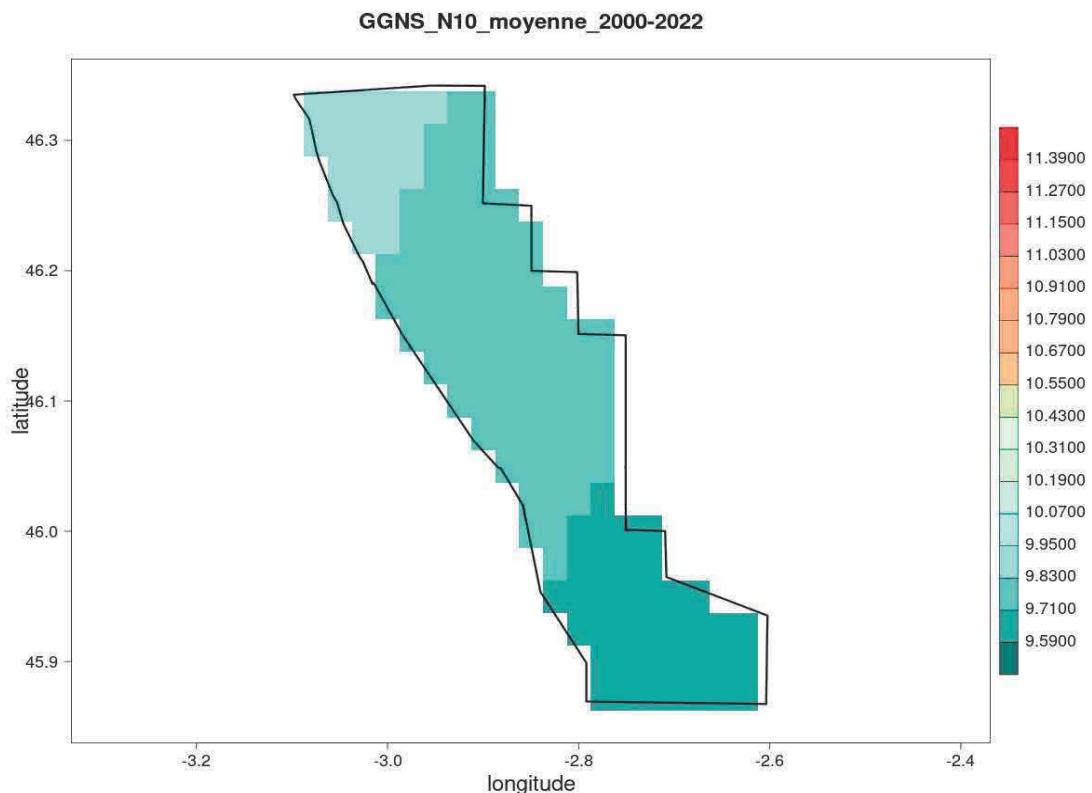


Illustration 23 : forces moyennes du vent de rafale sur la zone GGNS au niveau 10 m sur la période 2000-2022

Les forces du vent de rafale moyennées sur la période 2000-2022 au niveau 10 mètres sont comprises principalement entre 9,5 et 10 m/s sur la zone GGNS, avec des intensités plus élevées dans le nord de la zone.

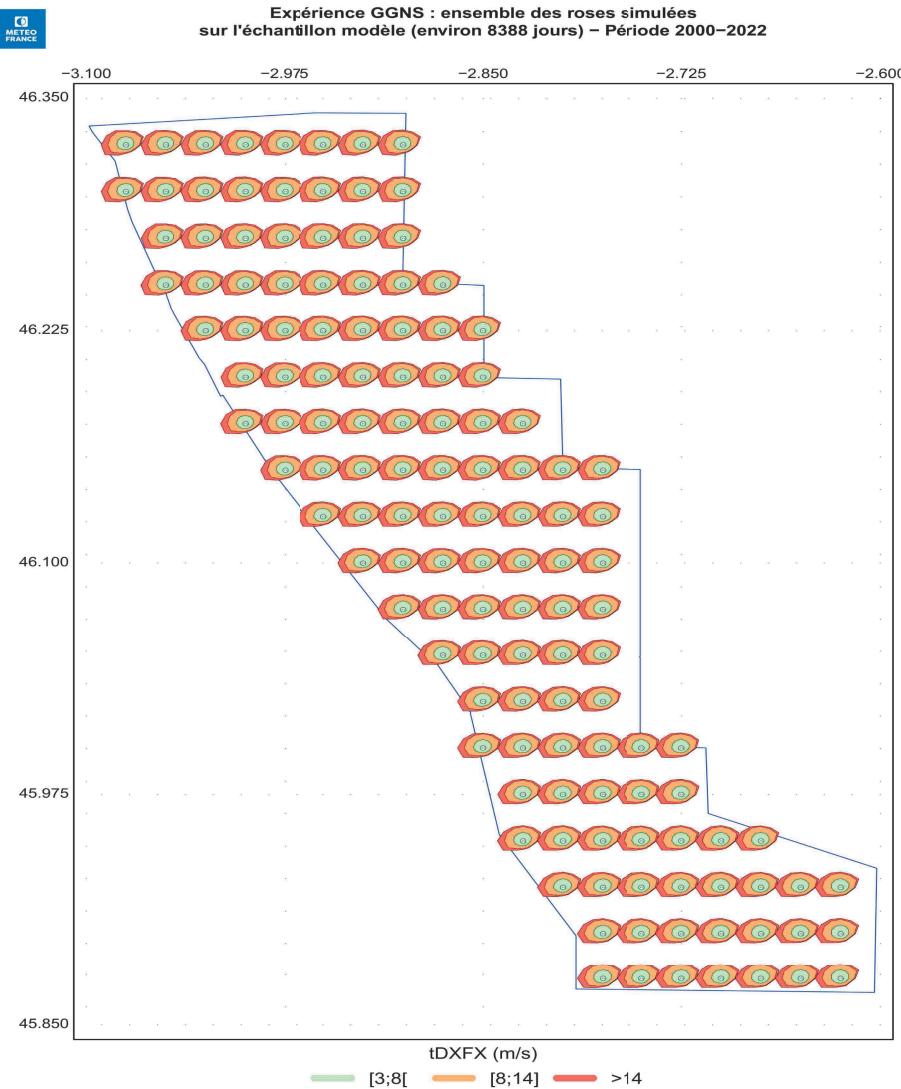
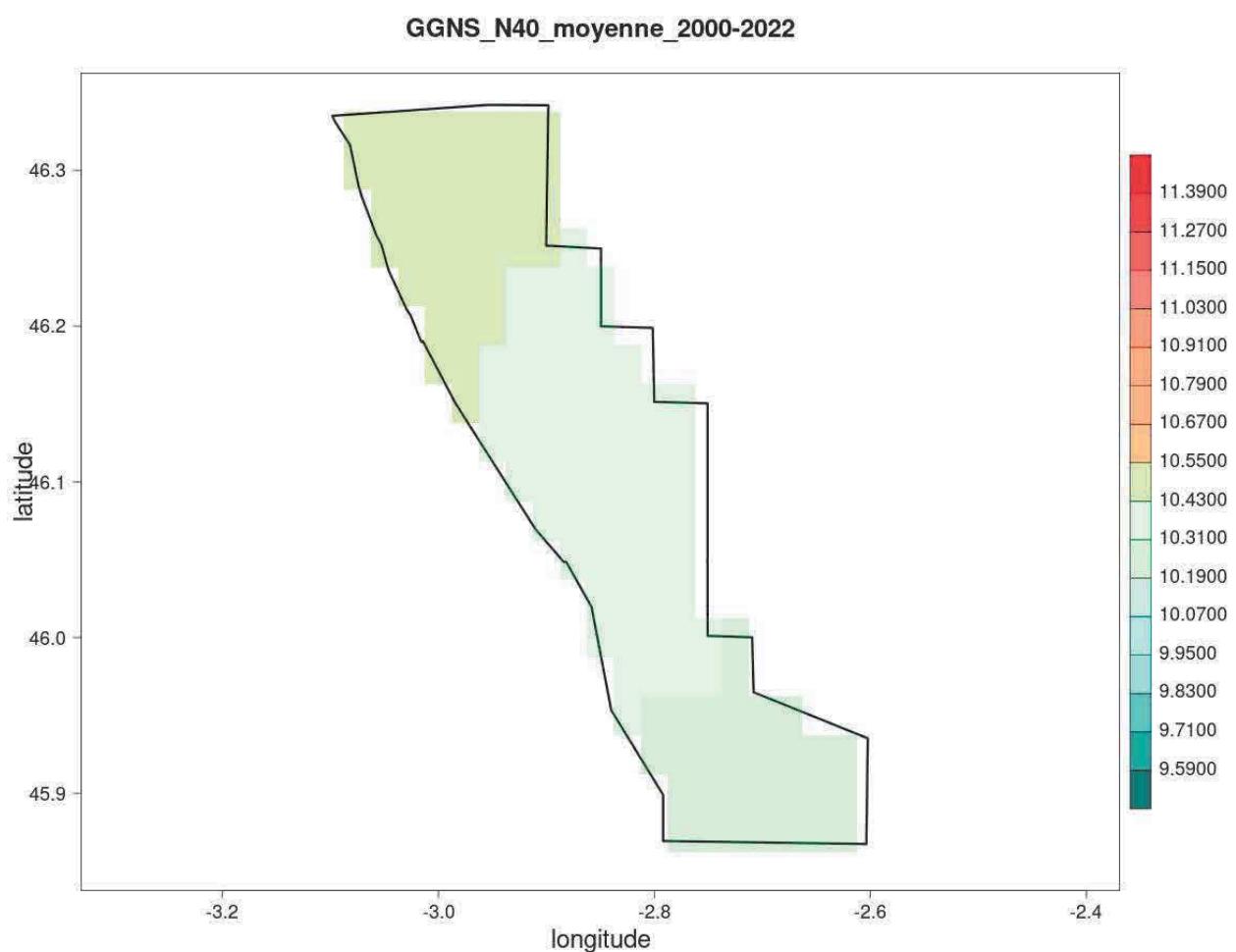


Illustration 24 : roses des vents de rafales estimées à 10 m sur la zone GGNS sur la période 2000-2022

Les roses de vents de rafales à 10 m sont assez homogènes sur la zone GGNS, avec une composante ouest assez développée.

. à 40 m

Illustration 25 : forces moyennes du vent de rafale sur la zone GGNS au niveau 40 m sur la période 2000-2022



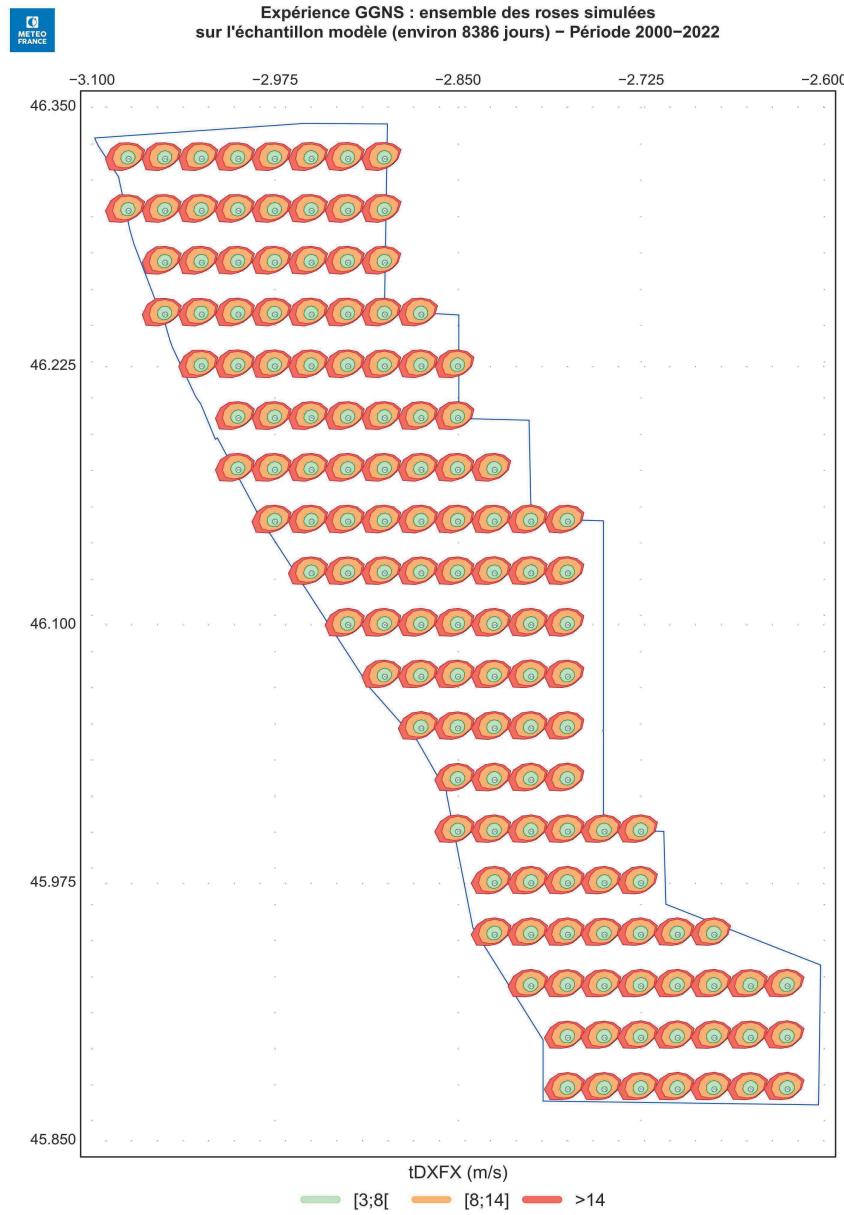


Illustration 26 : roses des vents de rafales estimées à 40 m sur la zone GGNS sur la période 2000-2022

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

. à 160 m

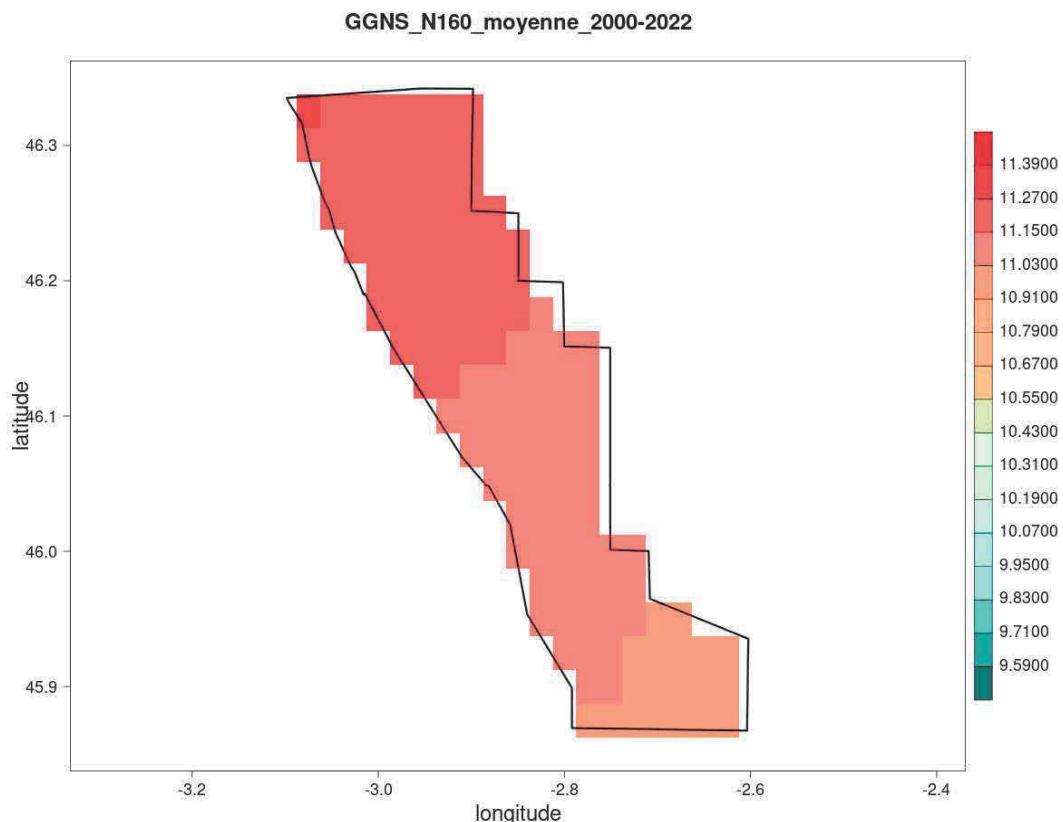


Illustration 27 : forces moyennes du vent de rafale sur la zone GGNS au niveau 160 m sur la période 2000-2022

Les forces du vent de rafale moyennées sur la période 2000-2022 au niveau 160 mètres sont comprises principalement entre 10,5 et 11,4 m/s sur la zone GGNS, avec des intensités plus faibles dans le sud-est de la zone.

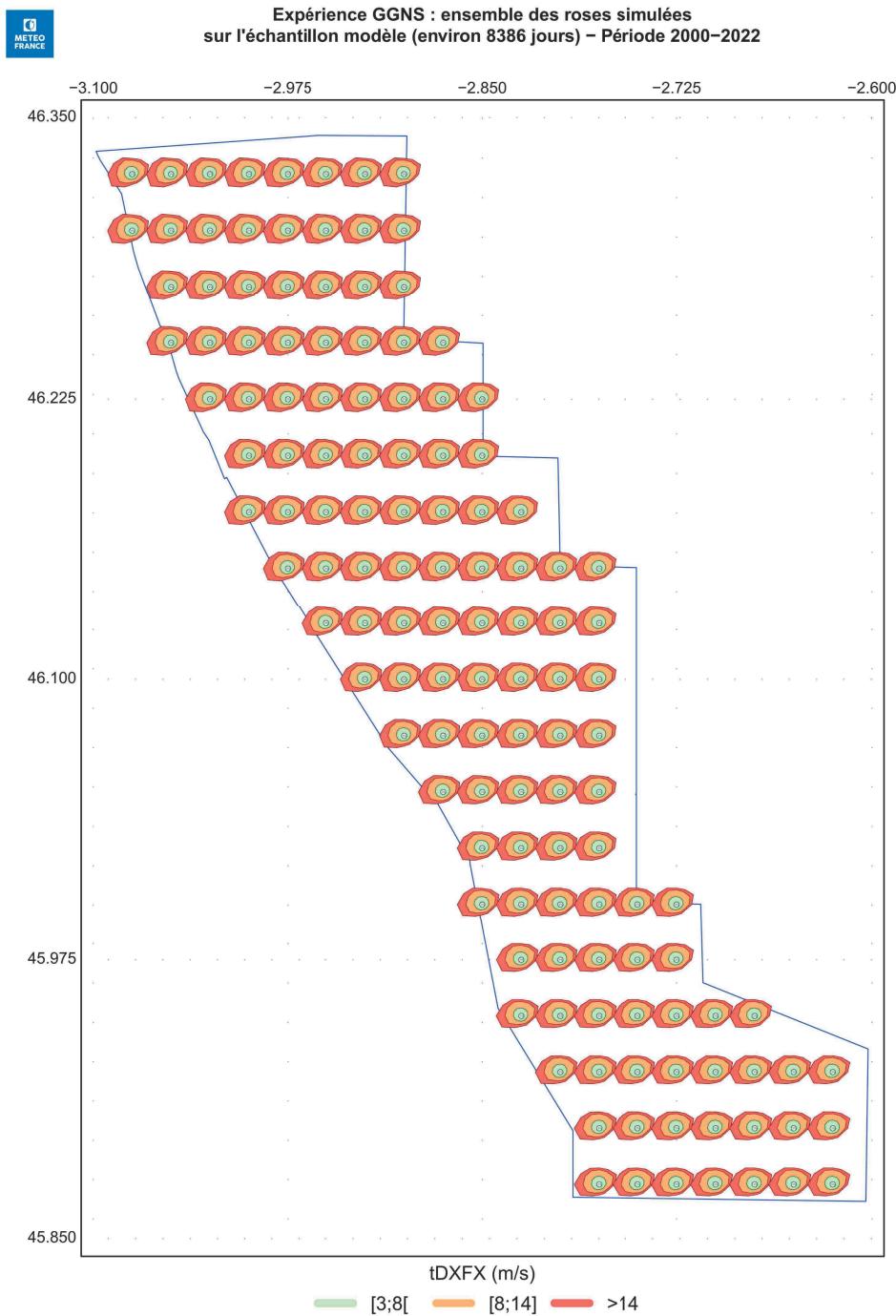


Illustration 28 : roses des vents de rafales estimées à 160 m sur la période 2000-2022

Les roses de vents de rafales à 160 m sont assez homogènes sur la zone GGNS, avec une large composante ouest assez développée.

• à 200 m

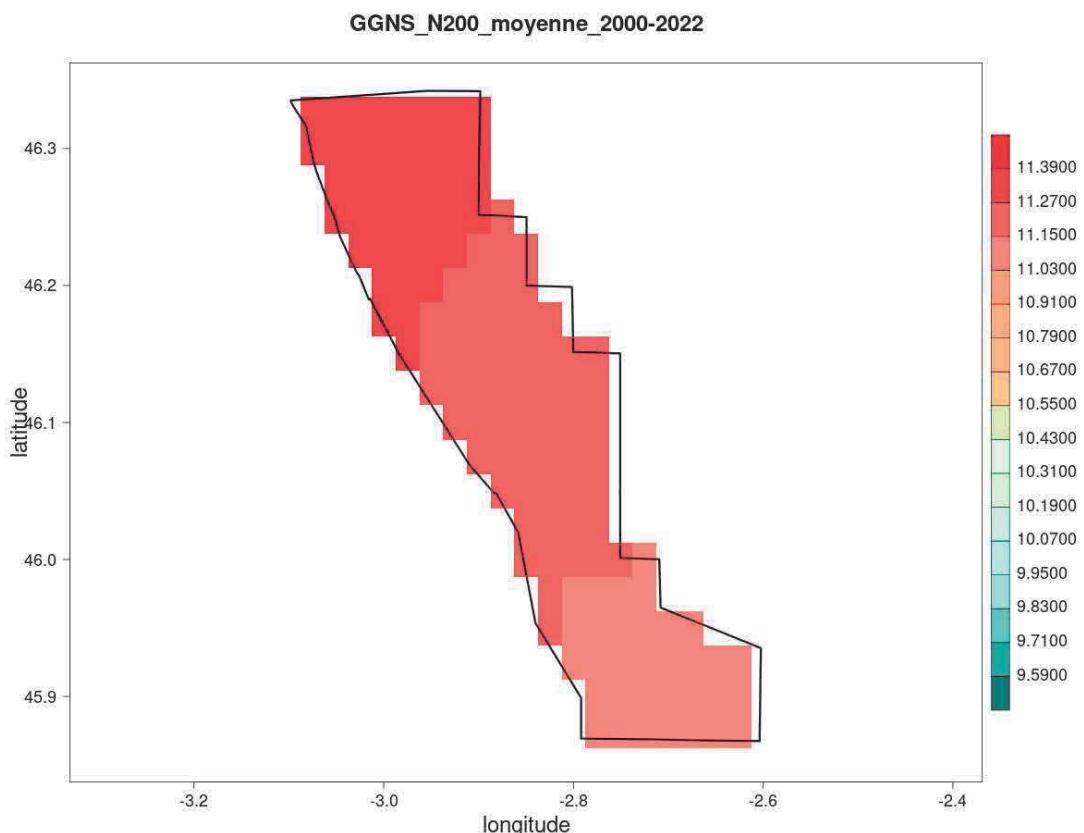


Illustration 29 : forces moyennes du vent de rafale sur la zone GGNS au niveau 200 m sur la période 2000-2022

Les forces du vent de rafale moyennées sur la période 2000-2022 au niveau 200 mètres sont comprises principalement entre 10,5 et 11,4 m/s sur la zone GGNS, avec des intensités plus faibles dans le sud de la zone.

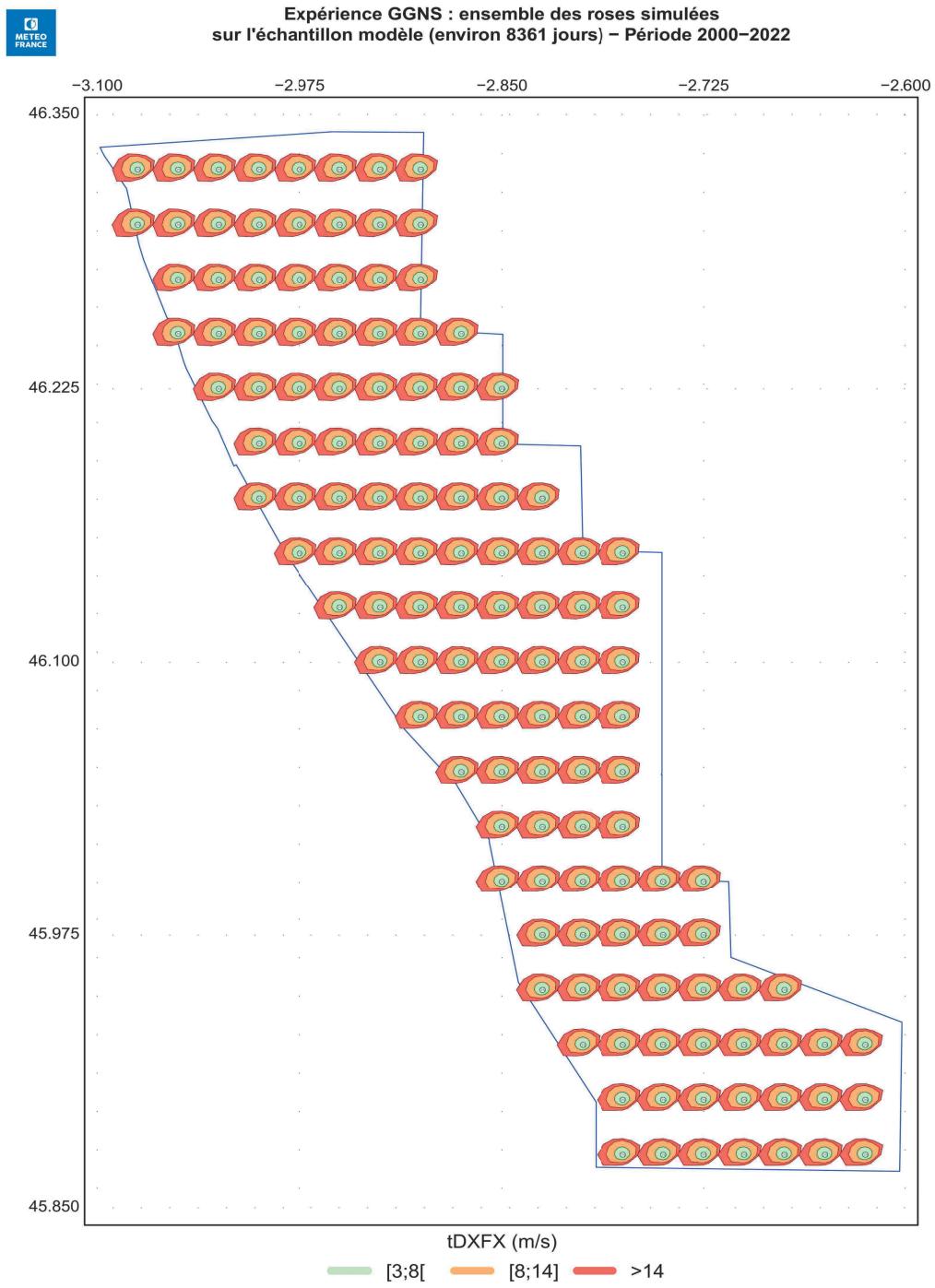


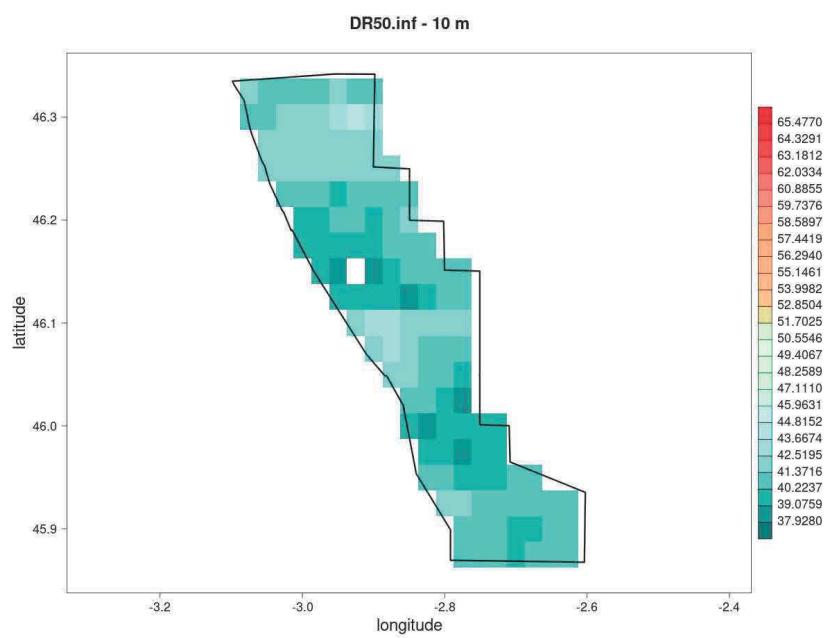
Illustration 30 : roses des vents de rafales estimées à 200 m sur la période 2000-2022

Les roses de vents de rafales à 200 m sont assez homogènes sur la zone GGNS, avec une large composante ouest assez développée.

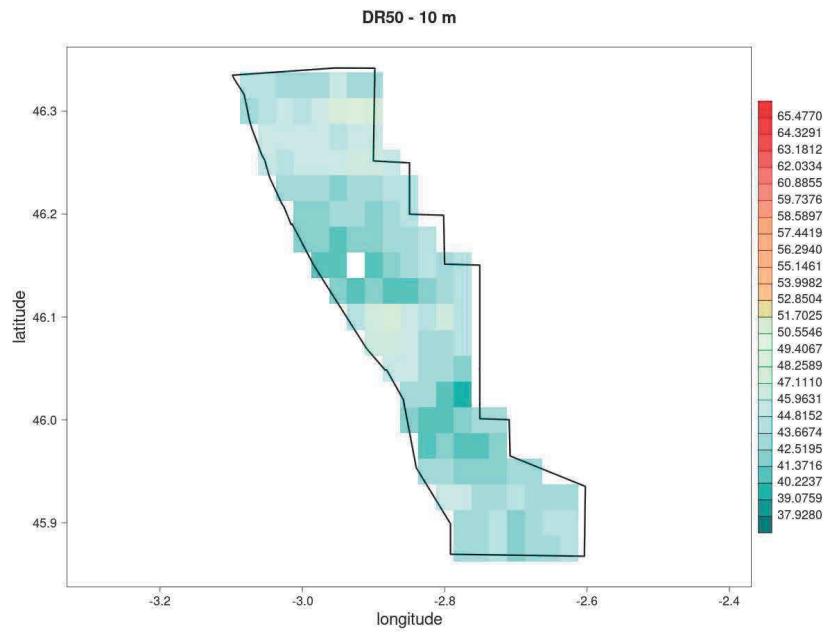
. Rafales cinquantenales

. A 10 m

Borne inférieure



DR 50 ans
(seuil 30,1 m/s)



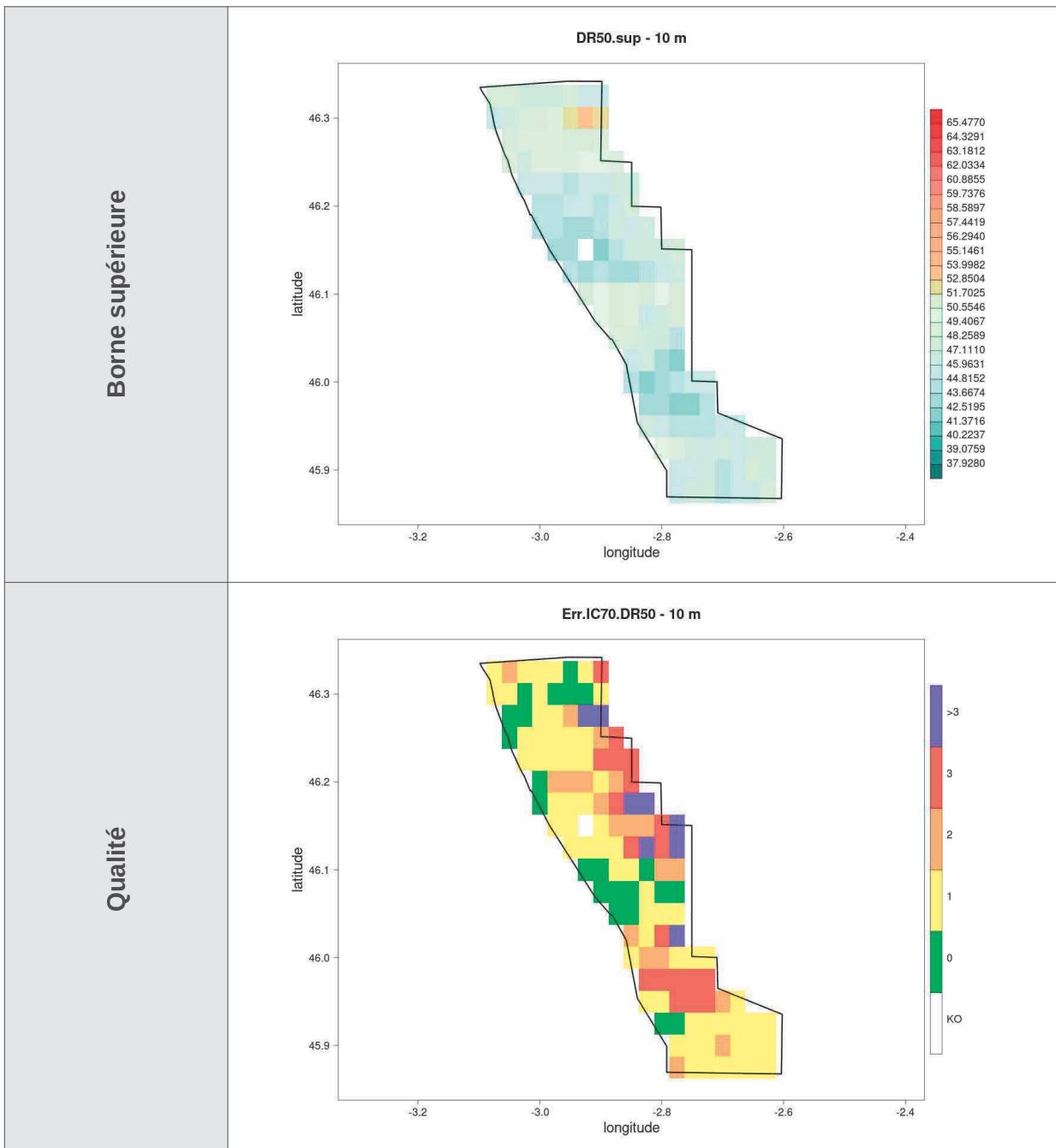


Tableau 6 : carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 10 m pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022)

Sur la zone, les durées de retour 50 ans varient entre 39,97 m/s [38,43 ; 41,50] (position 46,025°N et 2,775°W) et 48,71 m/s [43,68 ; 53,74] (position 46,3°N et 2,925°W). Les valeurs les plus élevées se situent au nord et au centre de la zone. Près du tiers des points ont un ajustement relativement bon (en jaune lorsqu'au plus une observation sort de l'intervalle de confiance à 70 %).

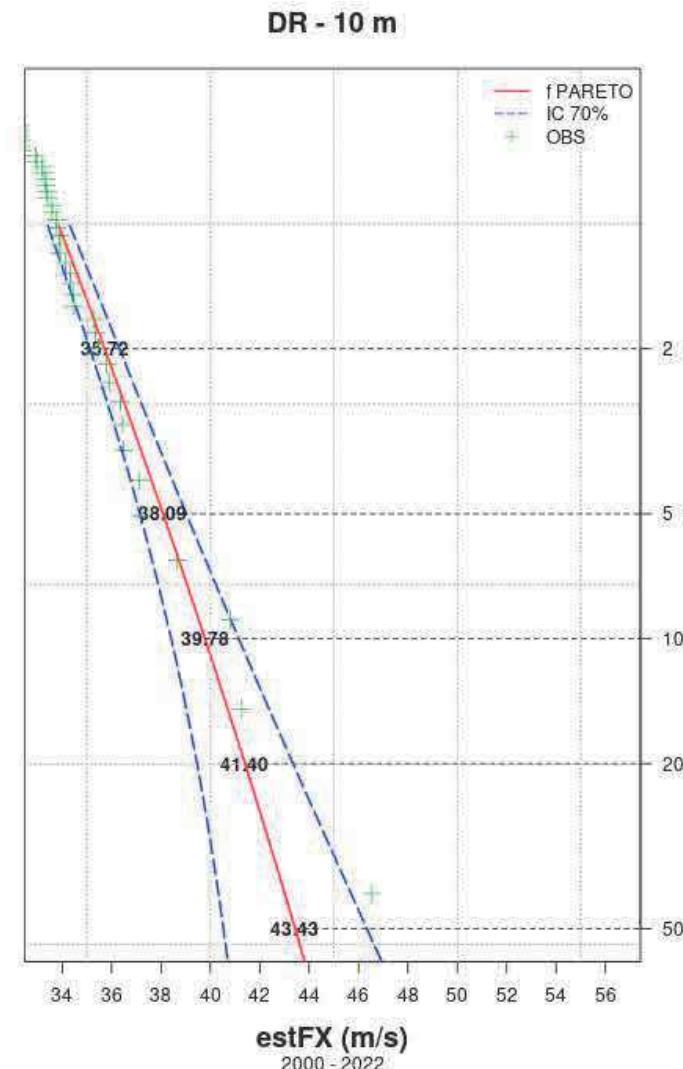
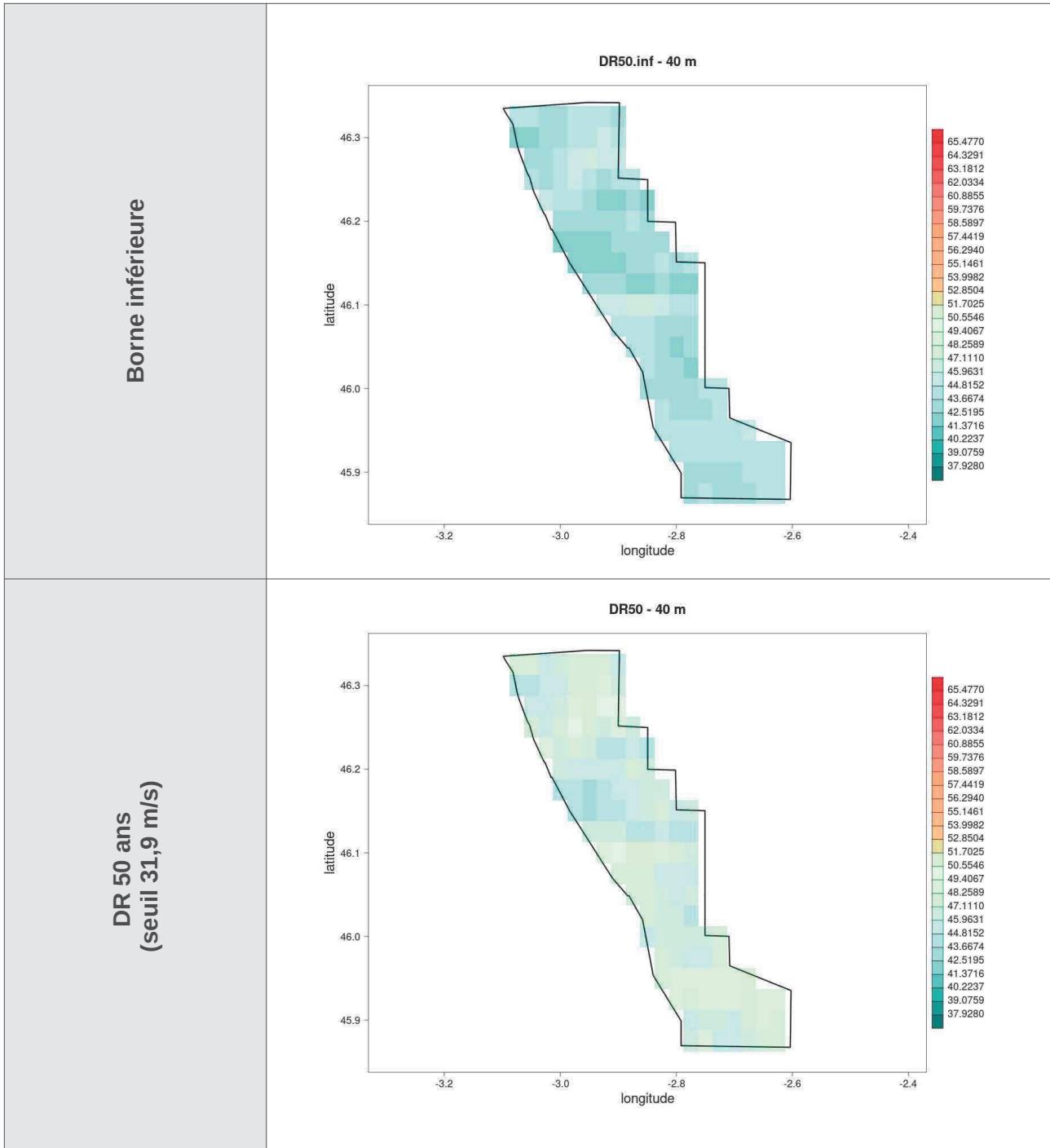


Illustration 31 : courbe des quantiles pour le point 285, positionné à 46,025 Nord et 2,825 Ouest, et correspondant au point de grille AROME le plus proche de la position LiDAR de la zone GGNS à 10m

. A 40 m



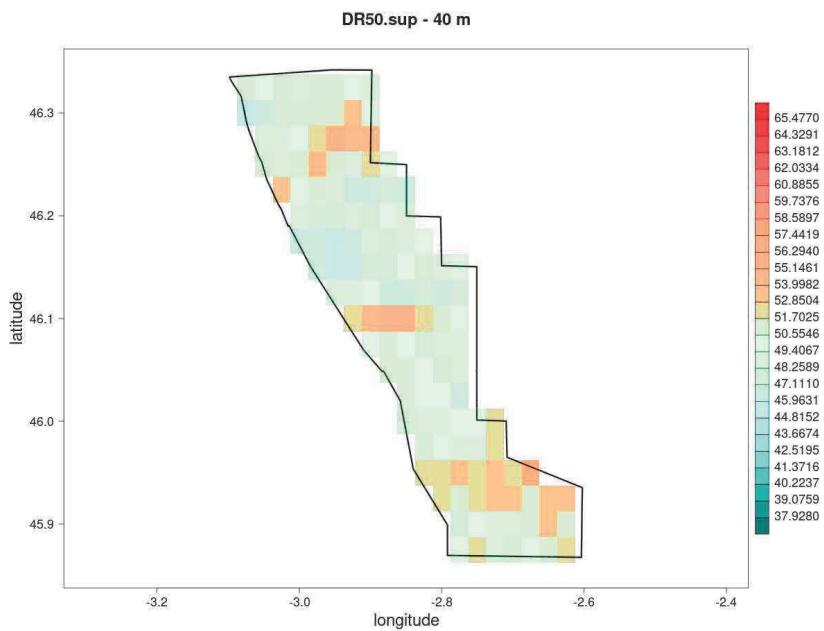
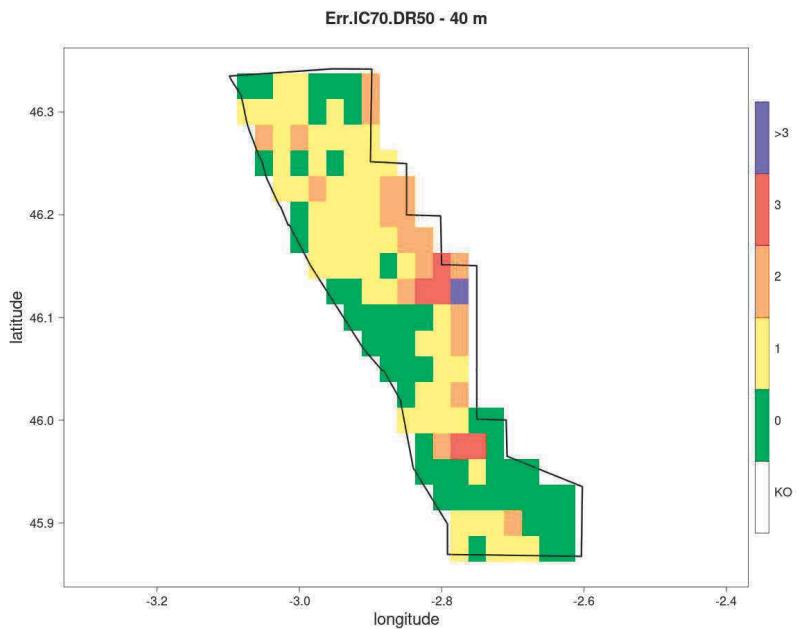
Borne supérieure

Qualité


Tableau 7 : carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 40 m pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022)

Sur la zone, les durées de retour 50 ans varient entre 43,60 m/s [41,65 ; 45,54] (position 46,15°N et 2,95°W) et 51,55 m/s [45,73 ; 57,36] (position 45,95°N et 2,675°W). Les valeurs les plus élevées sont nombreuses au

sud de la zone. Près d'un tiers des points ont un bon ajustement (en vert lorsque les observations ne sortent pas de l'intervalle de confiance à 70 %).

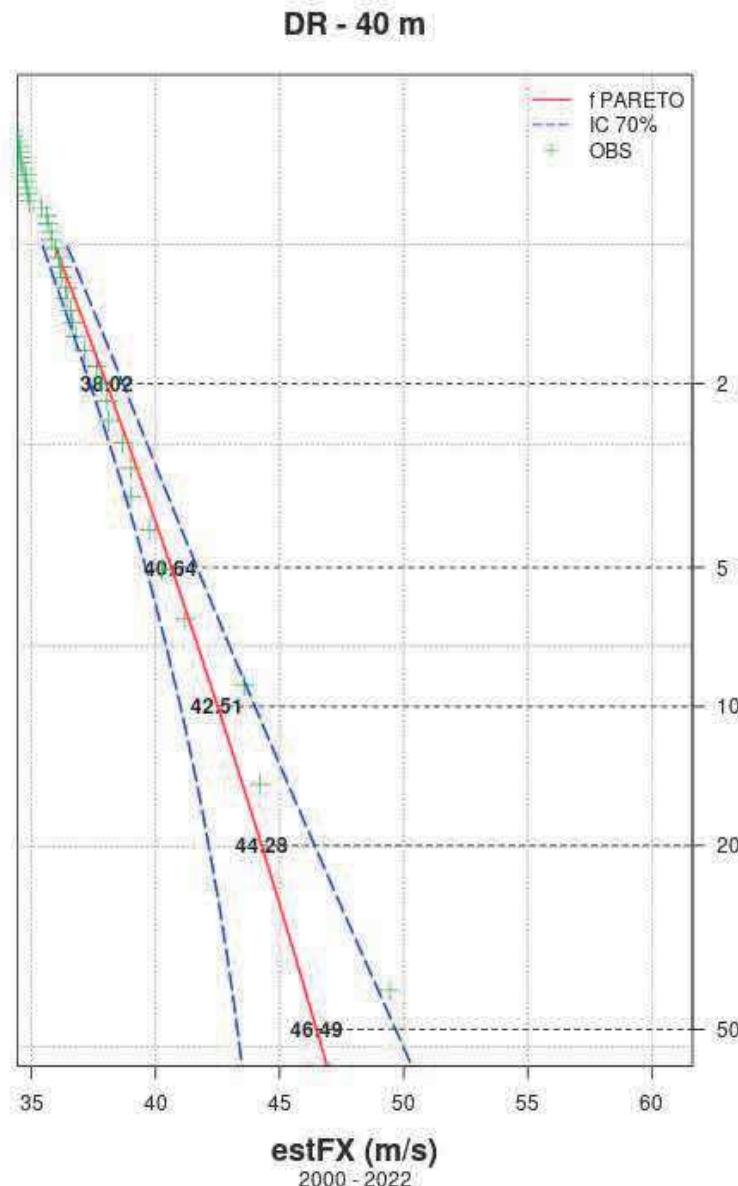
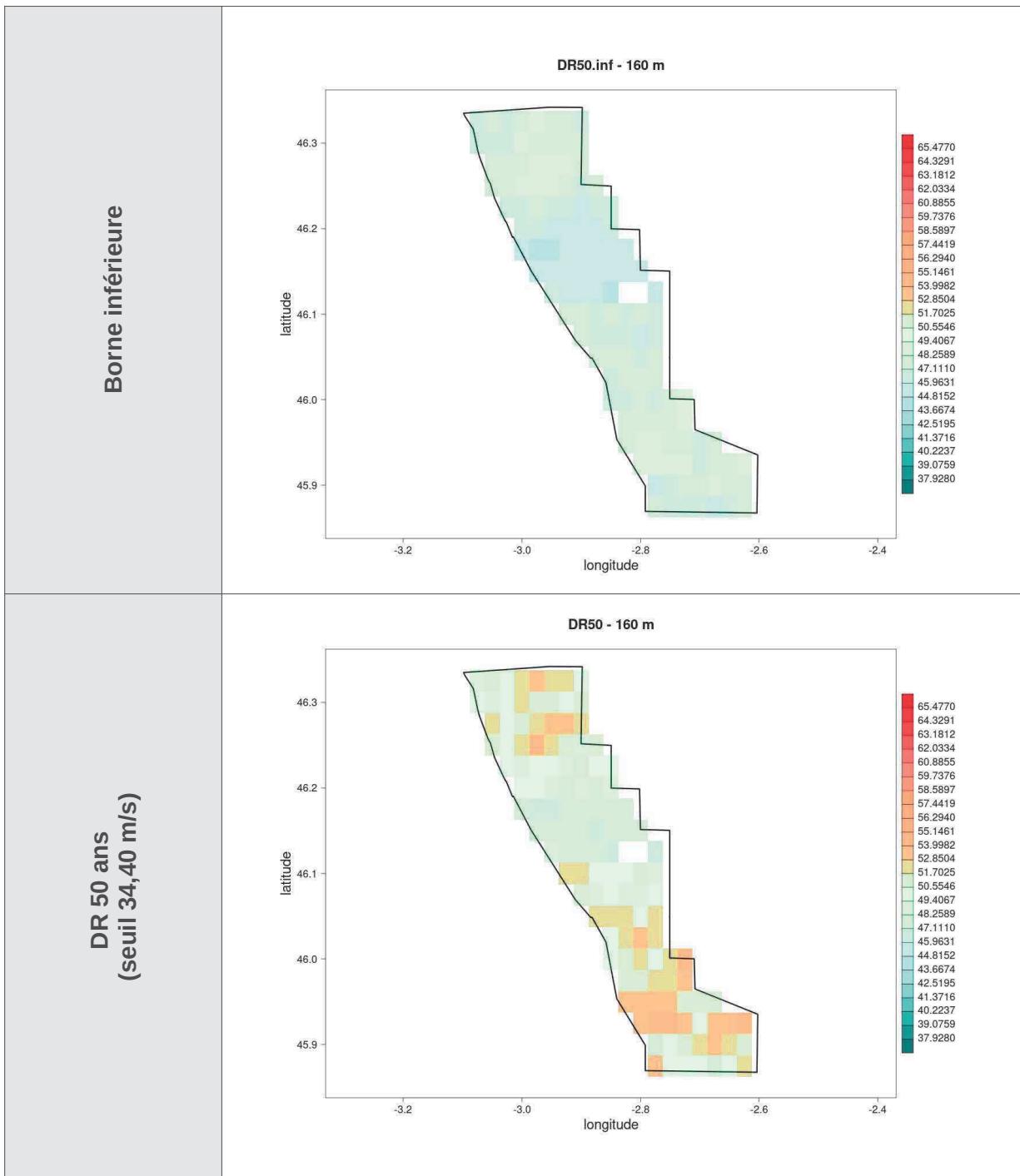


Illustration 32 : courbe des quantiles pour le point 285, positionné à 46,025 Nord et 2,825 Ouest, et correspondant au point de grille AROME le plus proche de la position LiDAR de la zone GGNS à 40m

. A 160 m



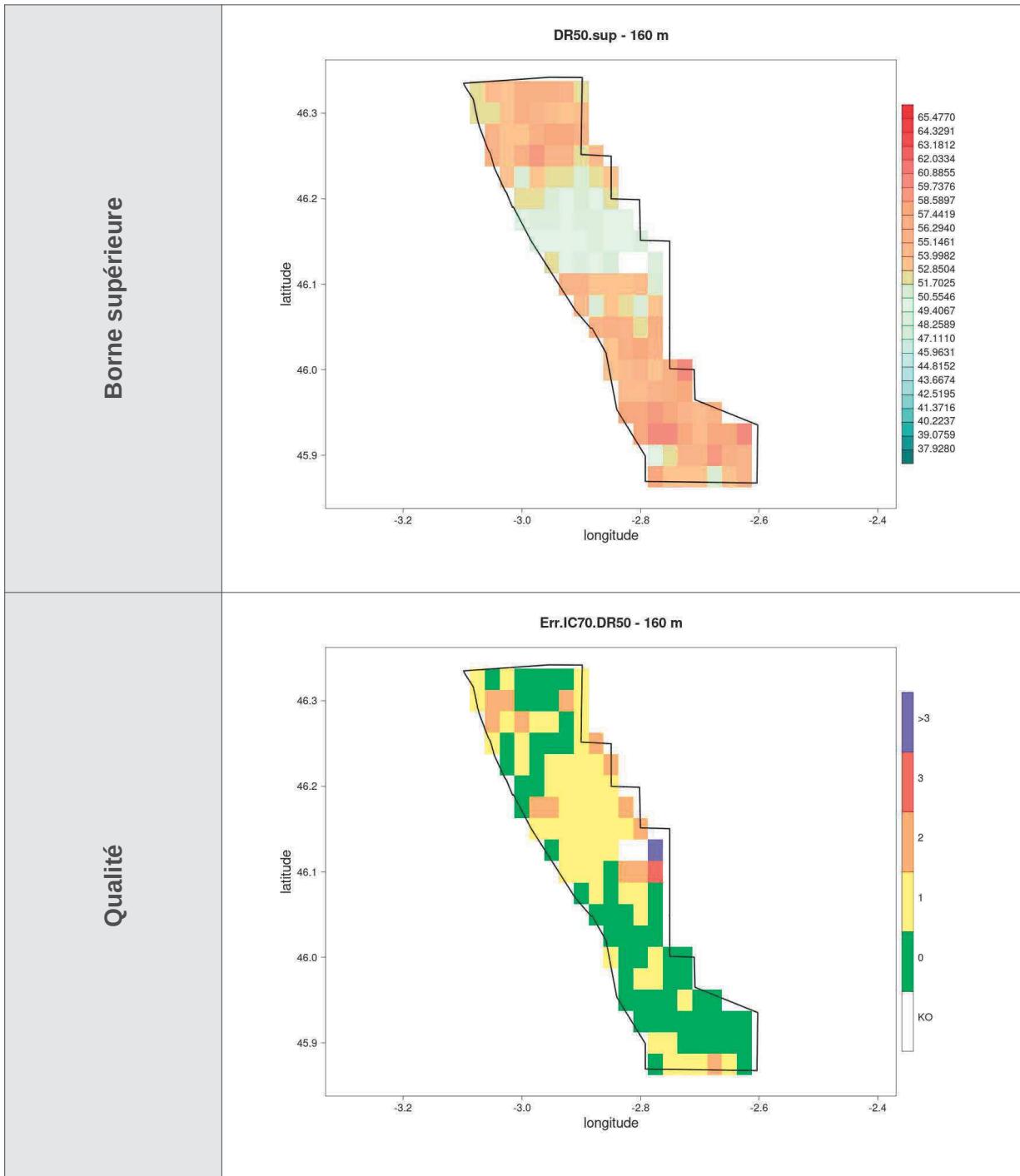


Tableau 8 : carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 160 m pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022)

Sur la zone, les durées de retour 50 ans varient entre 46,77 m/s [44,75 ; 48,79] (position 46,175°N et 2,975°W) et 54,56 m/s [48,83 ; 60,30] (position 45,925°N et 2,775°W). Les valeurs les plus élevées se

situent essentiellement sur la pointe sud-ouest et le nord-est de la zone. Environ 40 % des points ont un bon ajustement (en vert lorsque les observations ne sortent pas de l'intervalle de confiance à 70 %).

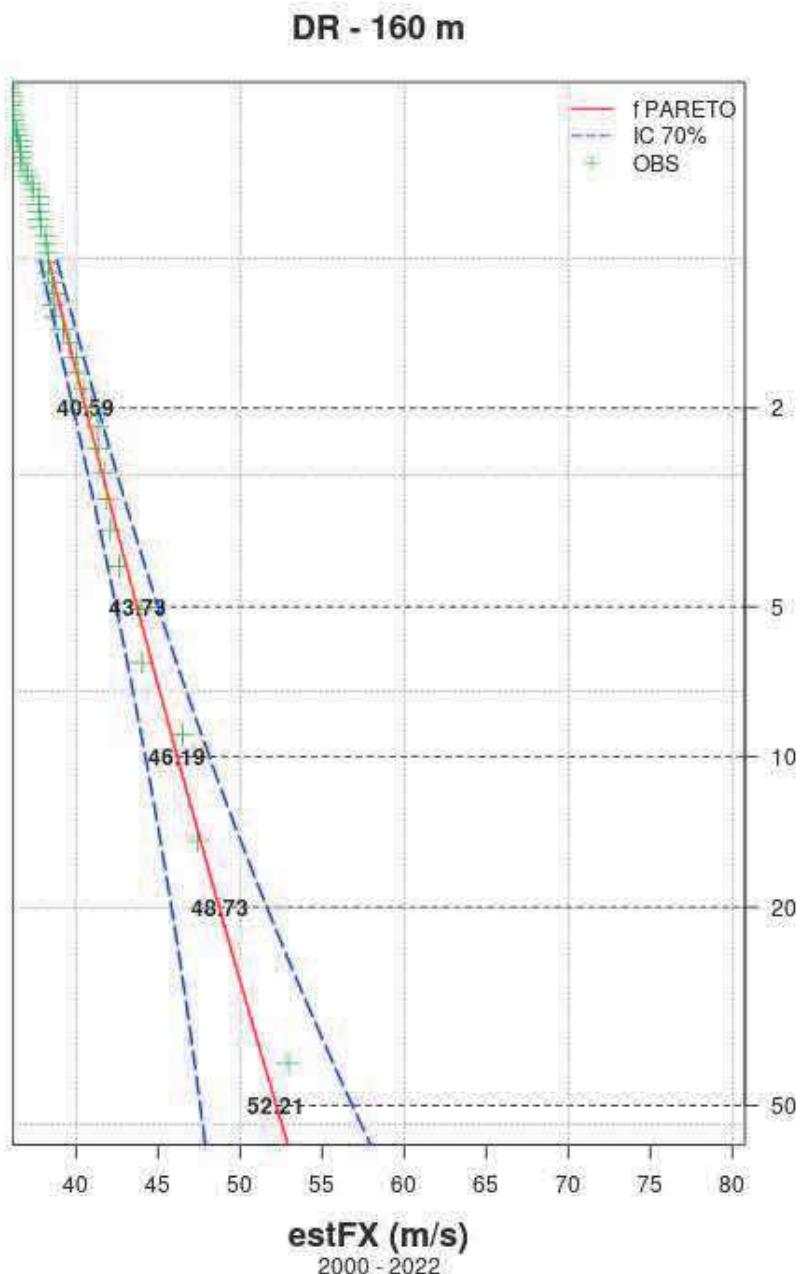
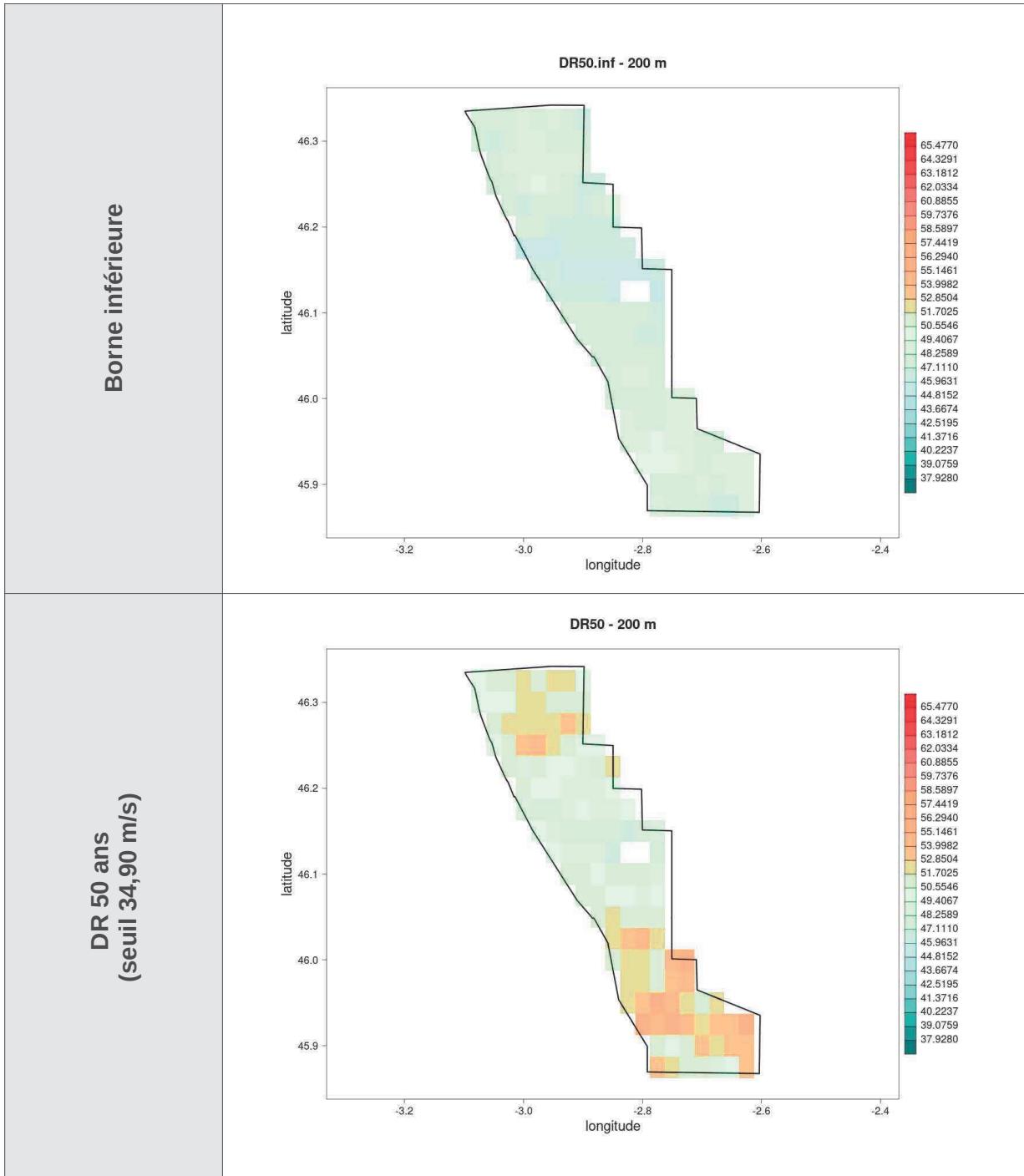


Illustration 33 : courbe des quantiles pour le point 285, positionné à 46,025 Nord et 2,825 Ouest, et correspondant au point de grille AROME le plus proche de la position LiDAR de la zone GGNS à 160m

. A 200 m



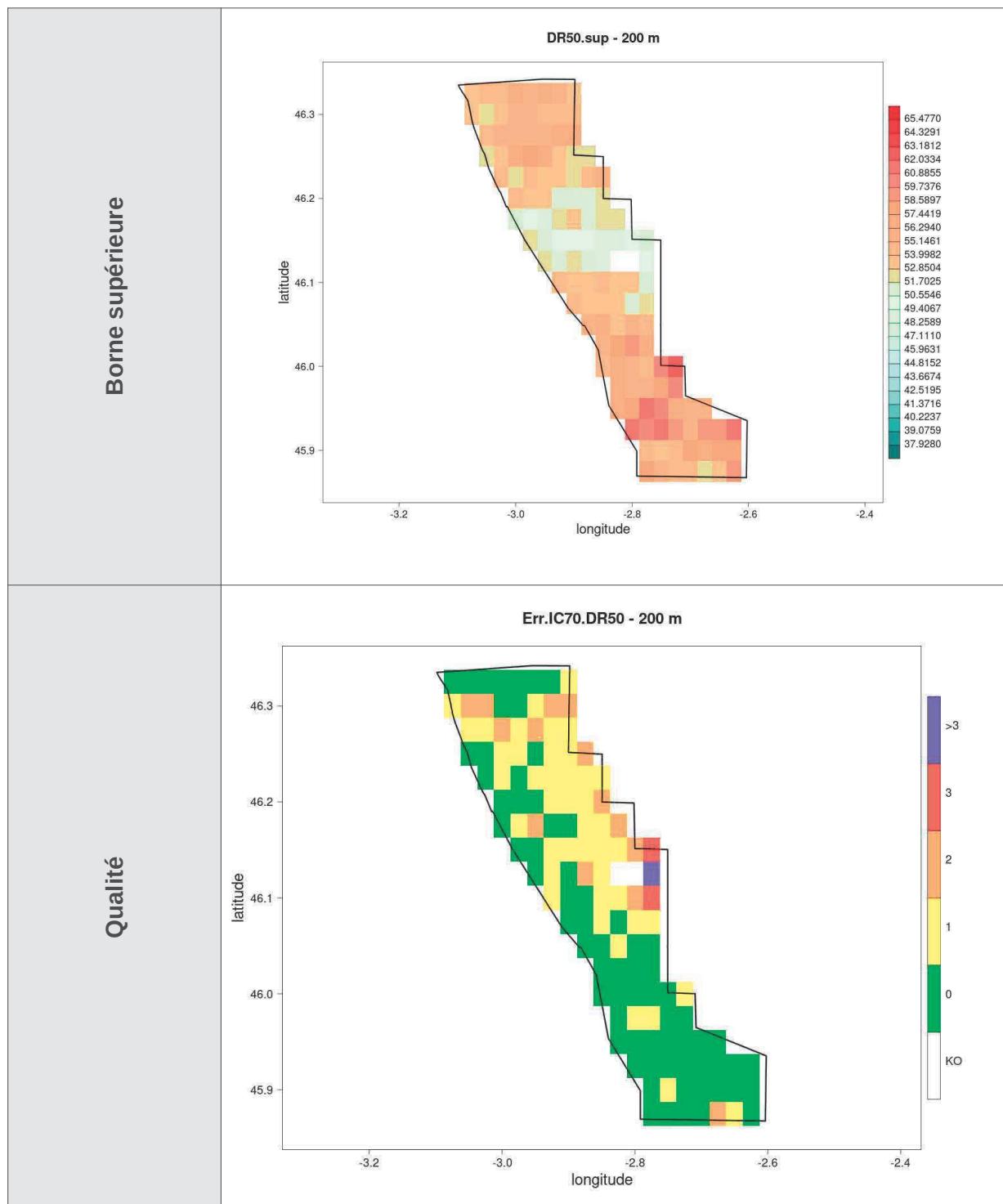


Tableau 9 : carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 200 m pour la zone GGNS, calculés à partir des données AROME (2000-2022)

Sur la zone, les durées de retour 50 ans varient entre 46,74 m/s [46,67 ; 48,60] (position 46,15°N et 2,825°W) et 55,97 m/s [49,37 ; 62,56] (position 46°N et 2,725°W). Les valeurs les plus élevées sont plus fréquentes dans le sud de la zone. Près de la moitié des points ont un bon ajustement (en vert lorsque les observations ne sortent pas de l'intervalle de confiance à 70 %).

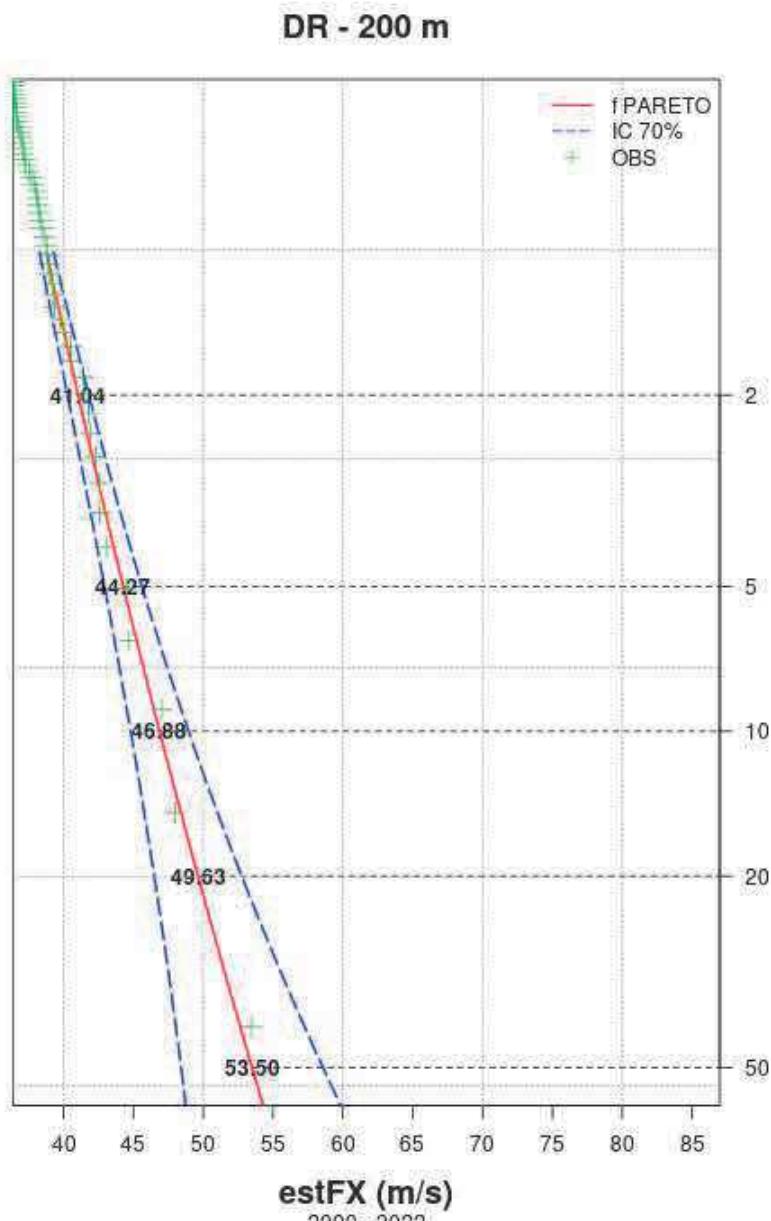
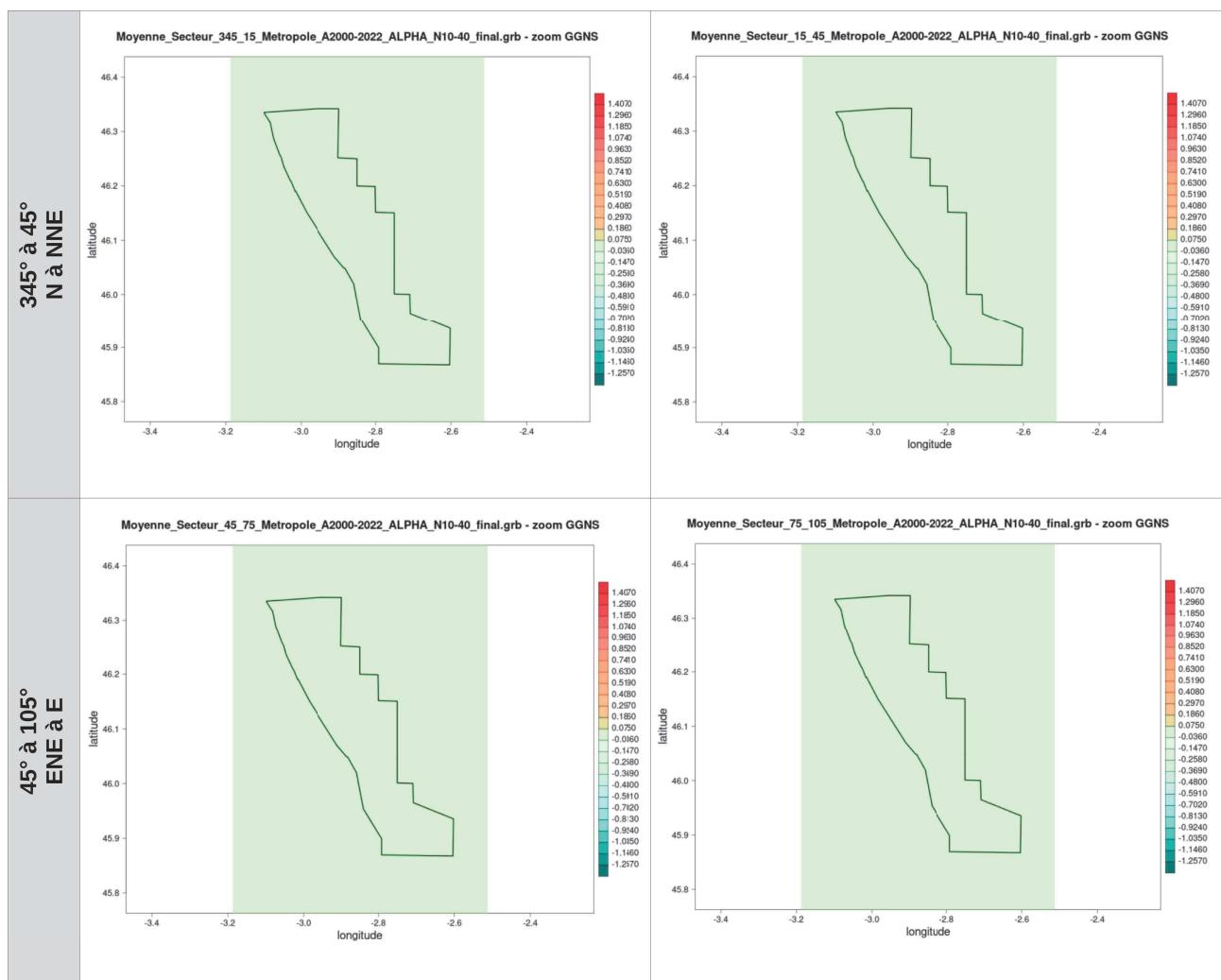


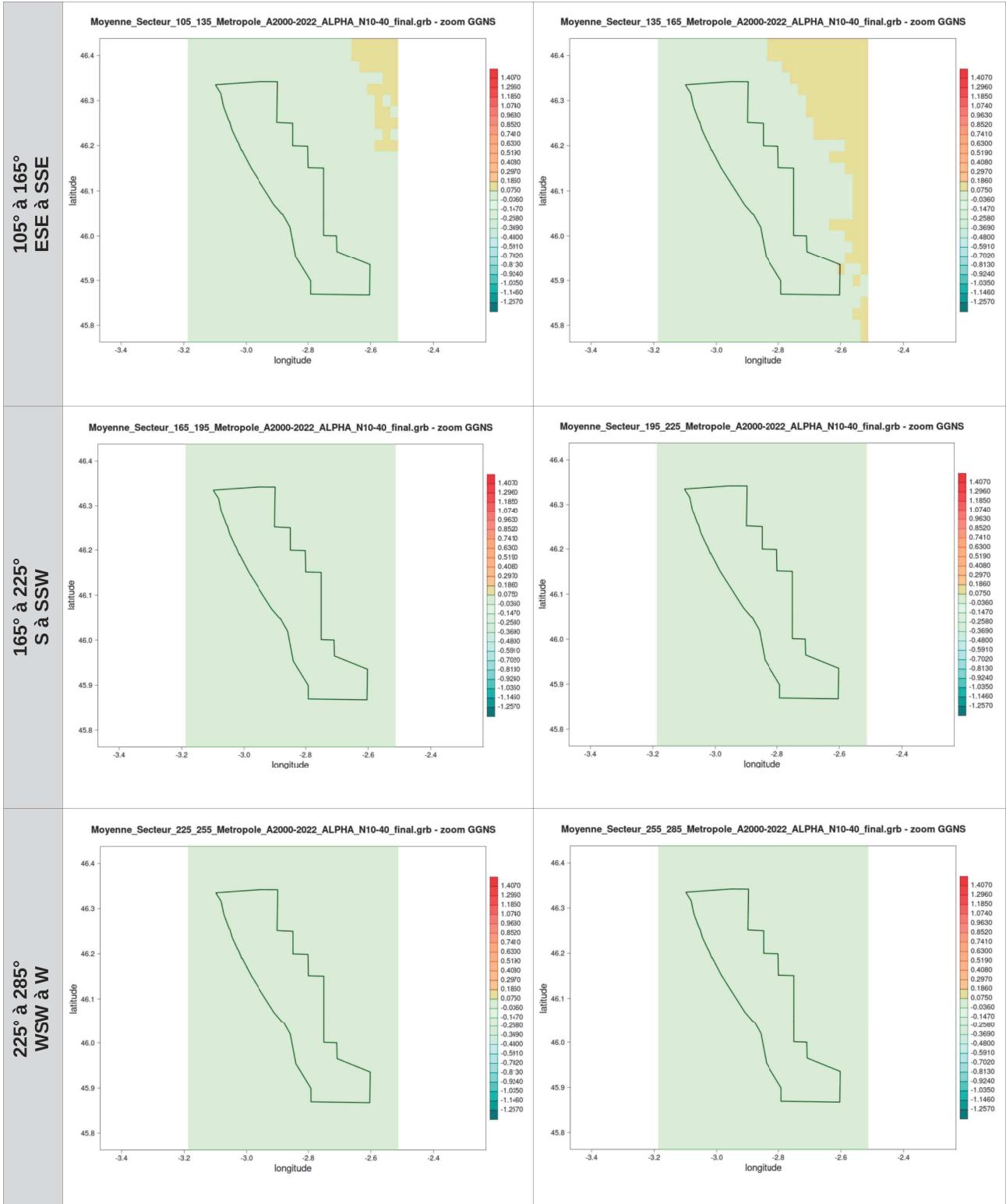
Illustration 34 : courbe des quantiles pour le point 285, positionné à 46,025 Nord et 2,825 Ouest, et correspondant au point de grille AROME le plus proche de la position LiDAR de la zone GGNS à 200 m

C. Annexe - Coefficient α du cisaillement de vent par secteur

. Couche 10-40 m



C. Annexe - Coefficient α du cisaillement de vent par secteur



Évaluation du risque de turbulence

Lot 3 - Golfe de Gascogne Nord et Sud (GGNS)

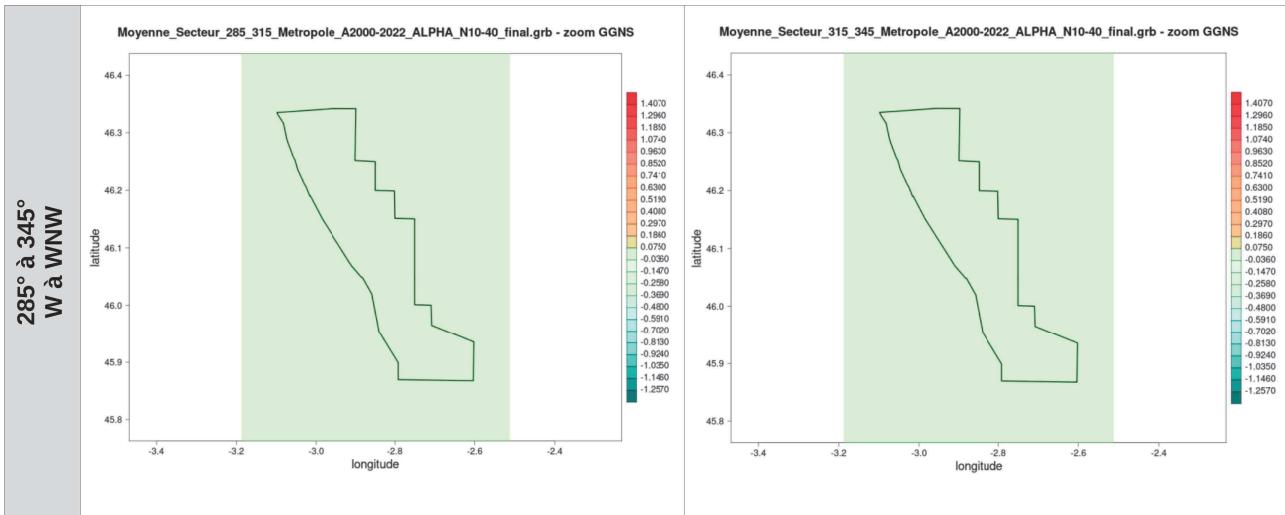
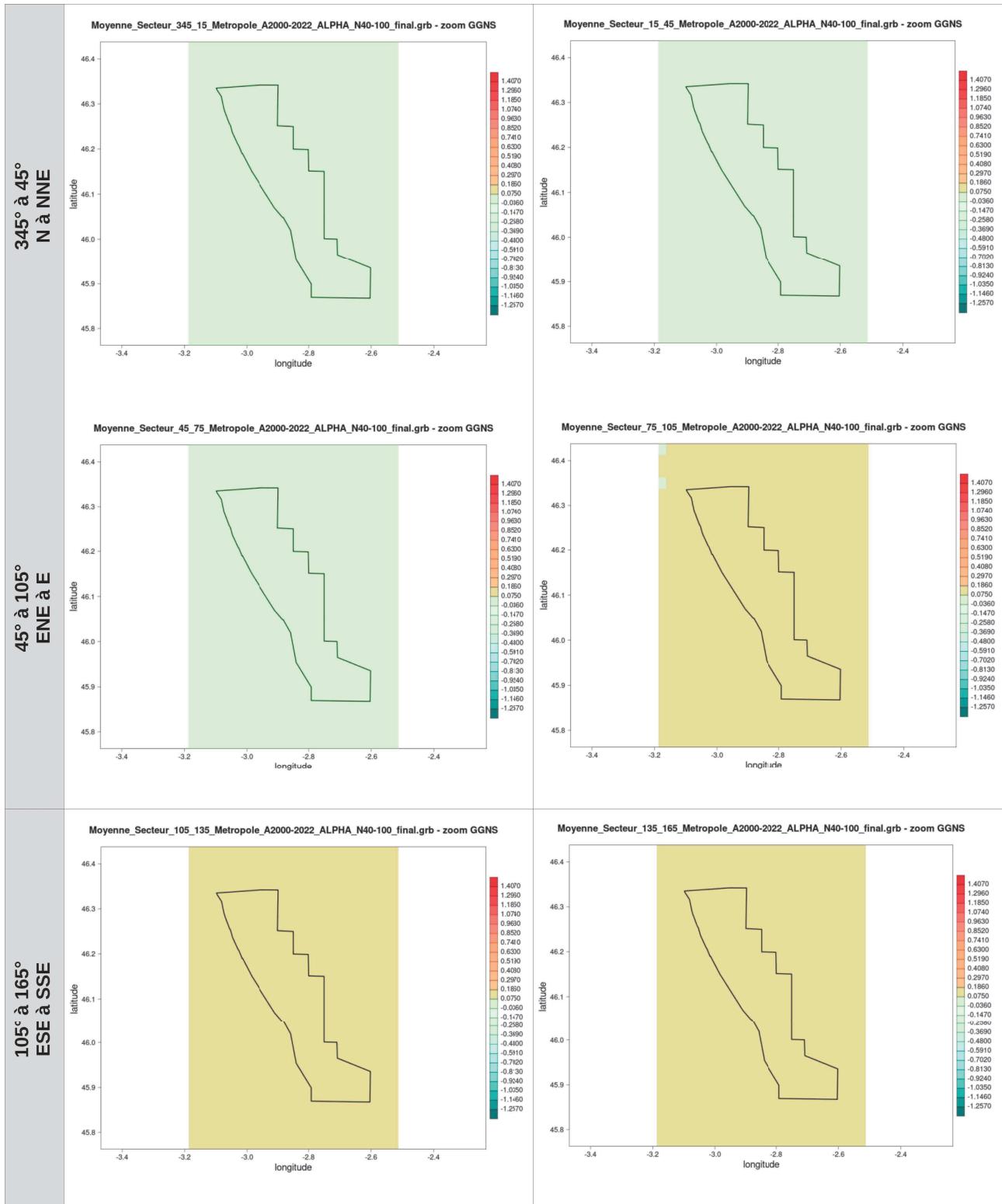


Illustration 35 : cartes du coefficient α de cisaillement de vent pour la couche 10-40 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS, calculé à partir du vent AROME (2000-2022)

. Couche 40-100 m

Évaluation du risque de turbulence

Lot 3 - Golfe de Gascogne Nord et Sud (GGNS)



C. Annexe - Coefficient α du cisaillement de vent par secteur

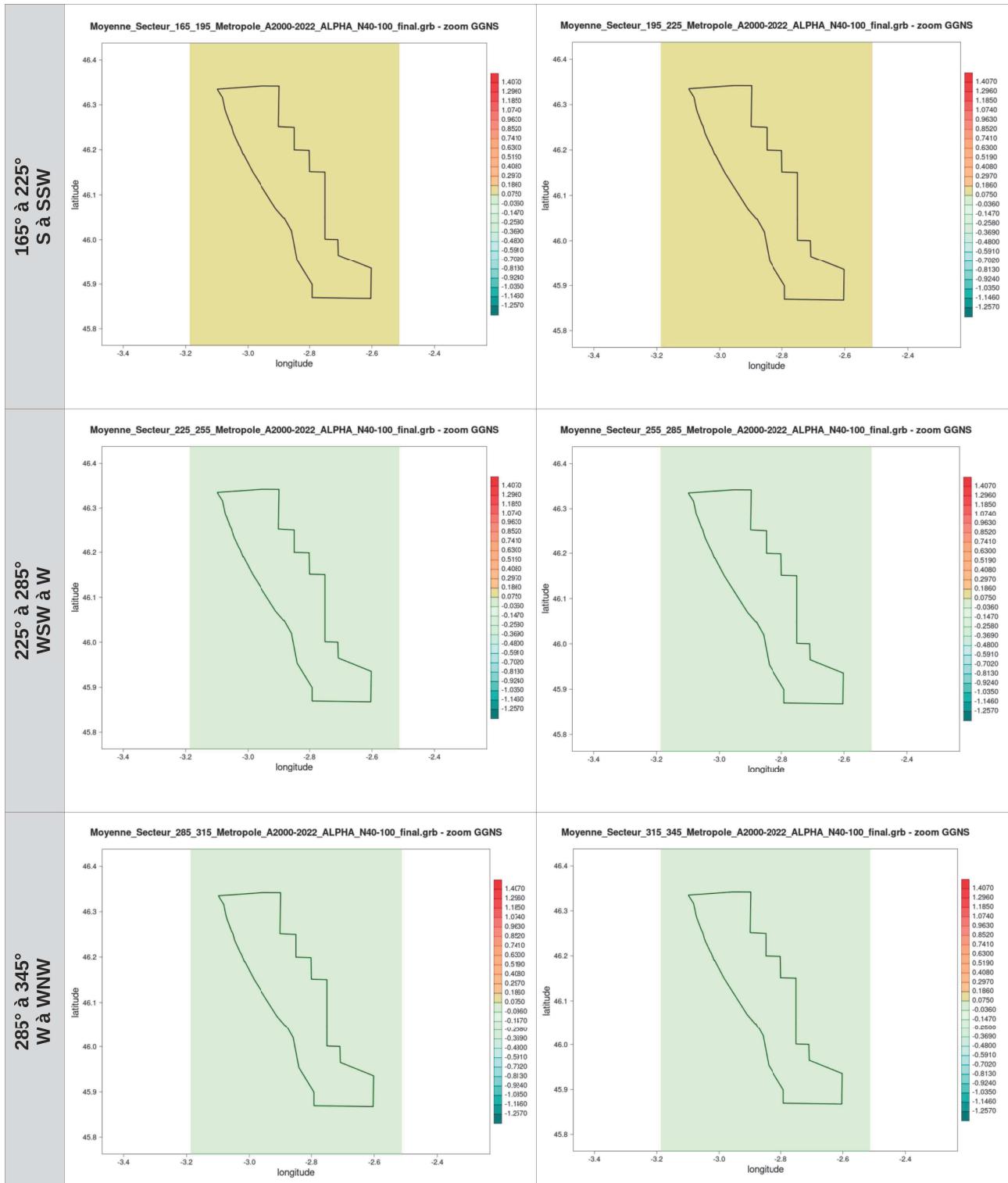
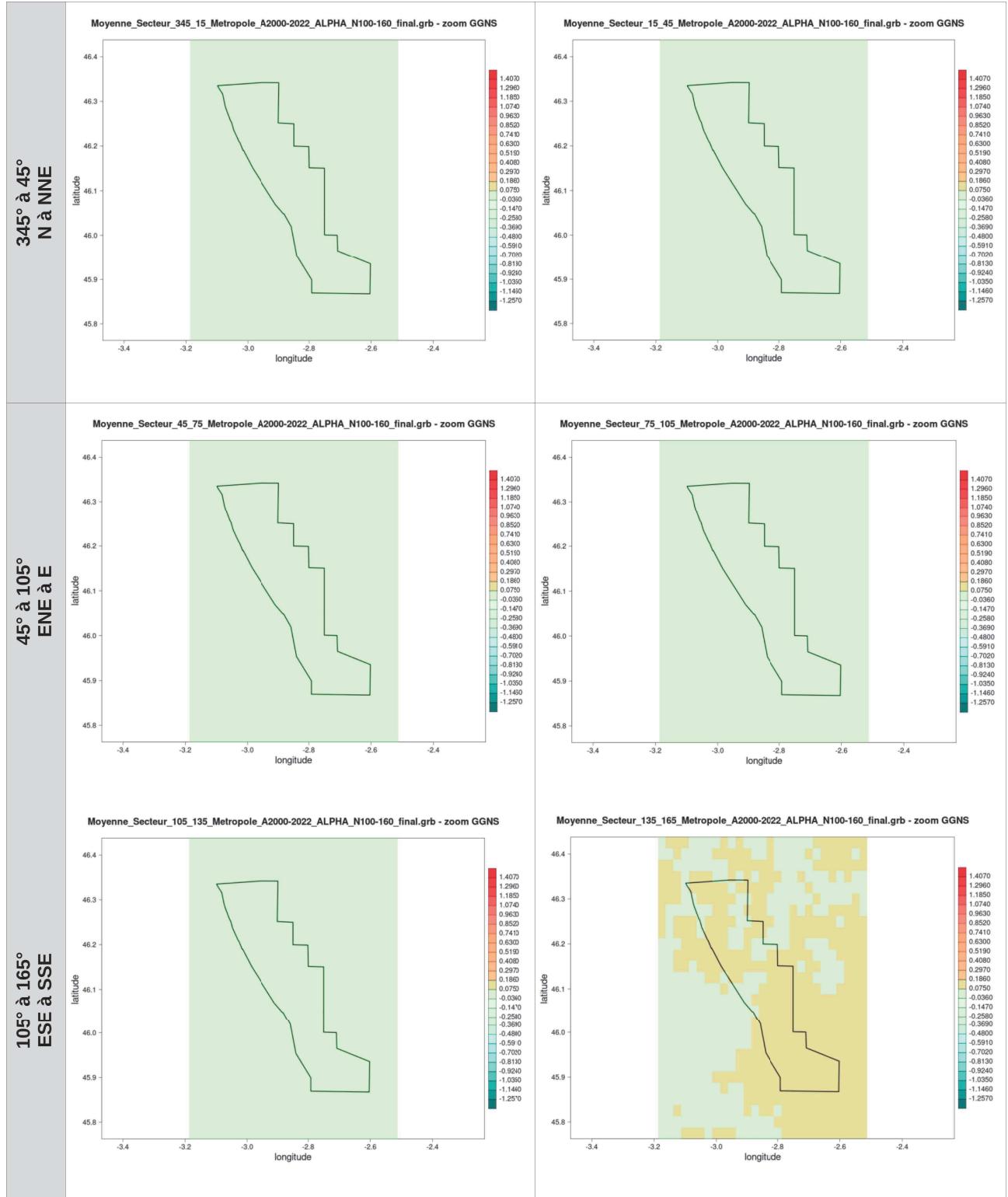


Illustration 36 : cartes du coefficient α de cisaillement de vent pour la couche 40-100 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS calculé à partir du vent AROME (2000-2022)

. Couche 100-160 m

C. Annexe - Coefficient α du cisaillement de vent par secteur



Évaluation du risque de turbulence

Lot 3 - Golfe de Gascogne Nord et Sud (GGNS)

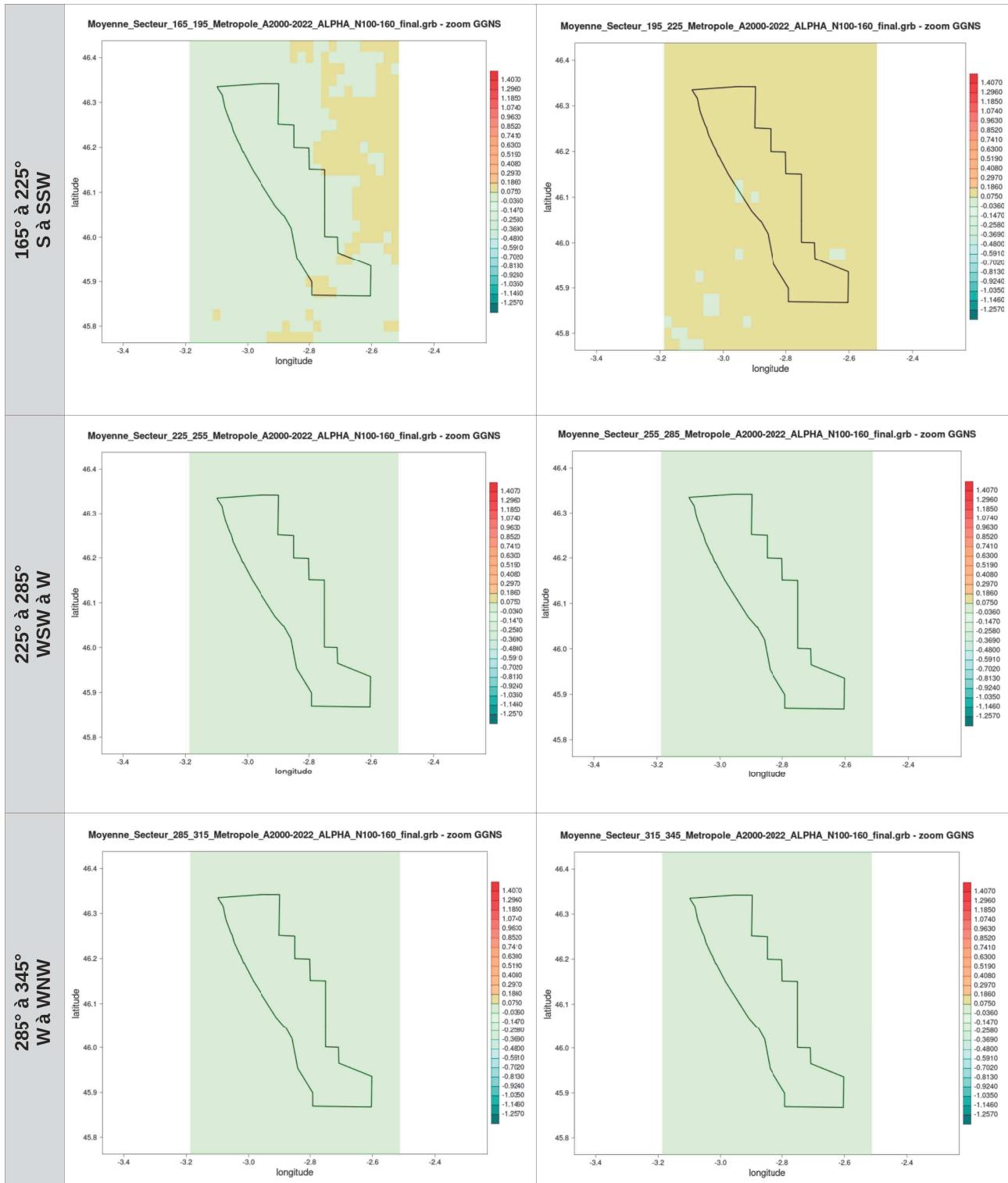


Illustration 37 : cartes du coefficient α de cisaillement de vent pour la couche 100-160 m par secteur de direction de 30° pour la zone GGNS calculé à partir du vent AROME (2000-2022)

FIN DE DOCUMENT
