

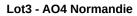
# Rapport d'étude

# Évaluation du risque de turbulence

# Lot3 - AO4 Normandie



Version 3.0 du 27/05/2021





— page laissée intentionnellement vide —

Lot3 - AO4 Normandie



### 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 de l'AO4 Normandie.

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 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 2000-2019, 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 ([Roulle et al. V3, 2021]). La mesure du paramètre « dispersion du vent » sur les LIDARS en mer est peu fiable (« Validation of the Windsea\_02 Floating LiDAR at the Fécamp offshore platform », DNV-GL, page 26). La méthode de calcul de l'intensité de turbulence à partir des données du rejeu AROME n'a donc pas pu être validée sur mer.

Cette étude analyse les indicateurs suivants :

Type de don- nées	Paramètres					
Données traitées (statistiques) du modèle AROME :  • Période : 2000 – 2019  • Localisation : zone d'intérêt  • niveaux 40, 100 et 160 m	<ul> <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 – 10 m, 100 – 160 m et 40 – 160 m,</li> <li>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°.</li> </ul>	2				
Analyse fréquentielle AROME :  • Période : 2000 - 2019  • Localisation : zone d'intérêt  • niveaux 40, 100 et	<ul> <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>	• 3 • 3 • 3 • 3				

27/05/2021	Version : 3.0	Page 3 / 75

#### Lot3 - AO4 Normandie



Les données sont fournies avec trois niveaux de qualité 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 et la valeur 3 des données **estimées** à partir du modèle AROME avec des formules statistiques validées dans [Roulle et al. V3, 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.

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 de qualité 1.

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 1 m/s.

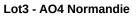
Pour la zone de l'AO4 Normandie, nous avons constaté une diminution de cette intensité de turbulence avec l'altitude, et une turbulence plus forte avec les vents de secteur nord. D'autre part, l'analyse des sorties par bin montre que l'intensité est maximale pour les vents très faibles et diminue rapidement 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 de vents (bins) au pas de 1 m/s, avec là encore une différenciation jour-nuit.

Pour la zone de l'AO4 Normandie, nous constatons une diminution du coefficient de cisaillement avec l'altitude, et des coefficients plus élevés par vent de sud. L'analyse des bin montre que le coefficient augment avec la force du vent. La différenciation jour-nuit permet de constater que les coefficients sont plus élevés la nuit que le jour.

Quel que soit le niveau considéré, les roses de vent de rafales sont assez homogènes en force bien que les vents soient un peu plus soutenus sur la partie nord ; la direction dominante est ouest à sud-sud-ouest au nord de la zone puis évolue progressivement au sud-ouest au sud de la zone. En termes de rafale cinquantennale, les valeurs les plus élevées se situent essentiellement dans la partie sud 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 ± 11 à 12 % .

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**

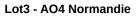
	Contexte de l'étude	
2	Résultats des diagnostics de la turbulence	11
	2.1 Intensité de turbulence	11
	2.1.1 Intensité de turbulence tous secteurs et tous bins confondus	12
	2.1.2 Intensité de turbulence par secteur de direction de vent	15
	2.1.3 Intensité de turbulence par bin de force de vent	20
	2.1.4 Durée de retour cinquantennale	23
	2.2 Rafale	24
	2.2.1 Rafales modélisées à 100 m	25
	2.2.2 Rafales cinquantennales	26
	2.3 Exposant du cisaillement de vent (α)	
	2.3.1 Coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent tous secteurs confondus	
	2.3.2 Coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent par secteur	
	2.3.3 Coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent par bin de 1 m/s	
3	Incertitudes associées aux données fournies	
	3.1 Incertitude sur les intensités de turbulence estimées	
	3.2 Incertitude sur l'estimation des rafales	
	3.3 Limites du calcul des durées de retour des rafales cinquantennales	
	3.4 Incertitudes associées au coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent	
	Conclusion	
	Bibliographie	
	Annexe - Résultats des diagnostics : Intensité de turbulence à 40 m et 160 m	
	Annexe - Résultats des diagnostics : Rafales modélisées à 40 m et 160 m	
	. Annexe - Résultats des diagnostics : Exposant $lpha$ du cisaillement de vent à 40m et 1 $^\circ$	
		71

Lot3 - AO4 Normandie



# **Index des illustrations**

illustration 2.1 : cartes des moyennes (colonne de gauche) et Q70 (colonne de droite) de
l'intensité de turbulence (notée IT dans cette étude) aux niveaux 40 ,100 et 160 m, tous
secteurs confondus pour la zone de l'AO4 Normandie, calculées à partir des données
AROME (2000-2019)14
Illustration 2.2 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par
secteur de direction de 30° pour la zone de l'AO4 Normandie, calculées à partir des
données AROME (2000-2019)18
Illustration 2.3 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par secteur
de direction de 30° pour la zone de l'AO4 Normandie, calculés à partir des données
AROME (2000-2019)20
Illustration 2.4: cartes des moyennes à gauche et du Q70 à droite de l'intensité de
turbulence au niveau 100 m par bin de 1 m/s pour la zone de l'AO4 Normandie, calculées
à partir des données AROME (2000-2019)22
Illustration 2.5: Moyenne sur la zone d'intérêt de l'AO4 Normandie de la moyenne de
l'intensité de turbulence, en fonction de la force du vent (m/s) en abscisse. Période 2000-
2019, 100 mètres23
Illustration 2.6: 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 (médiocre à douteux en vert, douteux en jaune, orange, rouge et violet)24
Illustration 2.7 : Forces moyennes du vent de rafale sur la zone de l'AO4 Normandie au
Illustration 2.8 : Roses des vents de rafales estimées à 100m sur la période 2000-201926
Illustration 2.9: Courbe des quantiles pour le point 112, positionné à 49.850 Nord et –0.800
Est, et correspondant au point de grille AROME le plus proche de la position lidar
BARFLEUR, à 100m31
Illustration 2.10: carte du coefficient α de cisaillement de vent pour les couches 40-100,
40-160 et 100-160 m tous secteurs confondus pour la zone de l'AO4 Normandie, calculé à
partir des forces du vent AROME (2000-2019)
Illustration 2.11 : cartes du coefficient α de cisaillement de vent pour la couche 40-160 m
par secteur de direction de 30° pour la zone de l'AO4 Normandie, calculé à partir du vent
AROME (2000-2019)
Illustration 2.12: Coefficient α 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 avec différenciation jour/nuit sur la zone de
l'AO4 Normandie41
Illustration A.1 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par
secteur de direction de 30° pour la zone de l'AO4 Normandie, calculées à partir des
données AROME (2000-2019)47
Illustration A.2 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par secteur de
direction de 30° pour la zone de l'AO4 Normandie, calculés à partir des données AROME
(2000-2019)49
Îllustration Á.3 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par
secteur de direction de 30° pour la zone de l'AO4 Normandie, calculées à partir des
données AROME (2000-2019)51
Illustration A.4 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par secteur
de direction de 30° pour la zone de l'AO4 Normandie, calculés à partir des données





AROME (2000-2019)53
Illustration A.5: 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 de l'AO4 Normandie, calculées à
partir des données AROME (2000-2019)55
Illustration A.6: 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 de l'AO4 Normandie, calculées
à partir des données AROMÉ (2000-2019)56
Illustration B.1: Forces moyennes du vent de rafale sur la zone de l'AO4 Normandie au
niveau 40 m sur la période 2000-201957
Illustration B.2: Roses des vents de rafales estimées à 40 m sur la zone de l'AO4
Normandie sur la période 2000-201958
Illustration B.3: Forces moyennes du vent de rafale sur la zone de l'AO4 Normandie au
niveau 160 m sur la période 2000-201959
Illustration B.4: Roses des vents de rafales estimées à 160 m sur la période 2000-2019. 60
Illustration B.5 :Courbe des quantiles pour le point 112, positionné à 49.850 Nord et –
0.800 Est, et correspondant au point de grille AROME le plus proche de la position lidar
BARFLEUR, à 40 m65
Illustration B.6: Courbe des quantiles pour le point 112, positionné à 49.850 Nord et –
0.800 Est, et correspondant au point de grille AROME le plus proche de la position lidar
BARFLEUR, à 160m70
Illustration C.1 : cartes du coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent pour la couche 40-100 m
par secteur de direction de 30° pour la zone de l'AO4 Normandie, calculé à partir du vent
AROME (2000-2019)73
Illustration C.2 : cartes du coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent pour la couche 100-160 m
par secteur de direction de 30° pour la zone de l'AO4 Normandie, calculé à partir du vent
AROME (2000-2019)75

Lot3 - AO4 Normandie



# **Index des tableaux**

Tableau 2.1 : 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 et 160 m par secteurs de direction de 30° du vent pris
respectivement au niveau 40 ou 100 ou 160 m21
Tableau 2.2: carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 100 m
pour la zone de l'AO4 Normandie, calculés à partir des données AROME (2000-2019)30
Tableau 2.3 : plage (borne minimale et borne maximale établies à partir des points de la
zone d'intérêt de l'AO4 Normandie) des moyennes du coefficient α pour chacune des trois
couches (40-100, 40-160 et 100-160 m) par secteurs de direction de 30° du vent au
niveau 100 m, sans distinction jour-nuit39
Tableau 2.4 : minimum, maximum et moyenne du coefficient α, obtenus à partir des
valeurs α de l'ensemble des points de grille de la zone d'intérêt de l'AO4 Normandie
fournies pour la couche 40-160 m par secteurs de direction de 30° du vent au niveau
100 m40
Tableau 2.5: Moyenne sur la zone d'intérêt de l'AO4 Normandie du coefficient α pour les
bins de 3, 8 et 15 m/s avec différenciation jour-nuit, dans la couche 40-160 m41
Tableau B.1: carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 40 m
pour la zone de l'AO4 Normandie, calculés à partir des données AROME (2000-2019)64
Tableau B.2: carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 160 m
pour la zone de l'AO4 Normandie, calculés à partir des données AROME (2000-2019)69



# Signatures

	Nom	Service	Signature		
Rédacteur(s)	Roulle O. Pouponneau B.	Météo-France DSM/CS/DC	6. Roulle	Roy	
Relecteur(s)	Roulle O. Pouponneau B. Chatel V. Legrand R.	Météo-France DSM/CS/DC	G. Roule	Ray	
Approbateur(s)	C. Jacolin	Météo-France D2C/DV/PRO			



# 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 de l'AO4 Normandie, 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.

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. Dans le cadre de l'étude sur la zone de l'AO4 Normandie, elles ont été vérifiées notamment sur mer et pour des niveaux supérieurs (180 ou 200 m), puisque d'une part nous avions à notre disposition des données de LIDAR sur mer à Dunkerque et Oléron que nous n'avions pas lors de l'étude sur Dunkerque et d'autre part les pales des éoliennes seront un peu plus élevées pour le parc off-shore de l'AO4 Normandie. Cette vérification des formules a fait l'objet d'une étude [Roulle et al. V3, 2021].

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.

Il est important de préciser à ce stade que, dans le cadre de la pré-étude, les formules de calcul de l'intensité de turbulence n'ont pas pu être validées sur mer en raison de la piètre qualité de la mesure de dispersion du vent sur les LIDARS flottants. De même, pour l'intensité de la rafale maximale horaire, les résultats obtenus par la méthode du rejeu étaient proches des mesures d'un mât instrumenté en mer mais plus éloignées de celles des LIDARS sur mer.

Les résultats obtenus dans ce rapport sont donc à relativiser compte tenu des résultats de la pré-étude [Roulle et al. V3, 2021]. De nouvelles études seront réalisées dès que nous aurons des mesures reconnues fiables de dispersion du vent sur les LIDARS flottants.

Les notions météorologiques et statistiques abordées dans le rapport sont présentés dans [Chatel et al. V1, 2021], 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 de l'AO4 Normandie a été présentée en détail dans le livrable du lot 1.

La zone de l'AO4 Normandie étudiée couvre le domaine allant de 49,6 °N, 1,325 °O (coin sud-ouest du domaine) à 50,1 °N, 0,325 °O (coin nord-est du domaine) et est représentée par 228 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, figurent en rouge le périmètre de la zone la plus grande prévue pour l'implantation des éoliennes et en vert la sous-zone d'intérêt. De même, nous avons choisi une palette unique pour les cartes de durées de retour.

### 2.1 Intensité de turbulence

Pour les 228 points de grille AROME de la zone de l'AO4 Normandie, 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.



### 2.1.1 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.



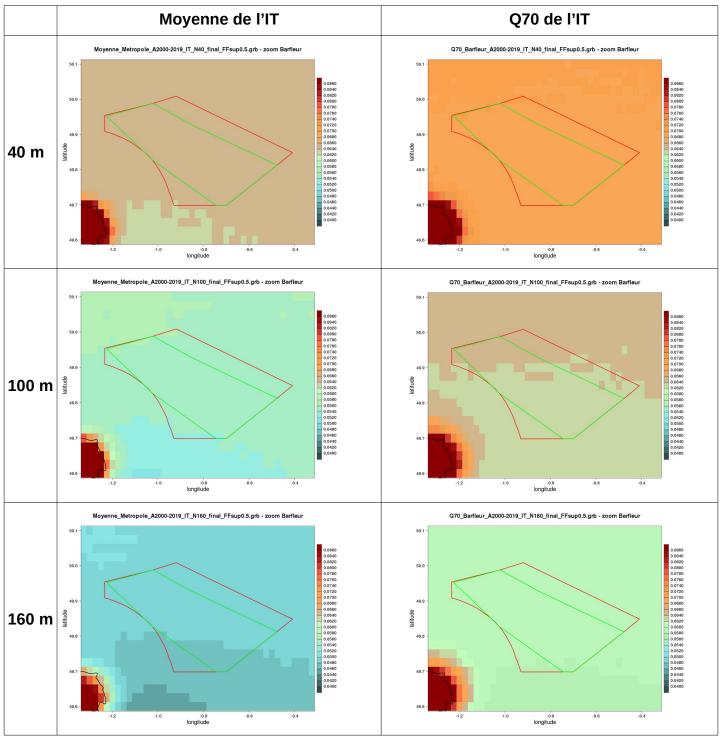


Illustration 2.1 : cartes des moyennes (colonne de gauche) et Q70 (colonne de droite) de l'intensité de turbulence (notée IT dans cette étude) aux niveaux 40 ,100 et 160 m, tous secteurs confondus pour la zone de l'AO4 Normandie, calculées à partir des données AROME (2000-2019)

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 la portion de terre côtière (croissance de l'intensité de turbulence de la mer vers la terre).

Pour l'ensemble de la zone d'implantation (délimitée en rouge), la moyenne de l'intensité de turbulence est de l'ordre de 6,5 % à 40 m, de 5,5 % à 100 m, de 4,9 % 160 m et à ces hauteurs, le Q70 de l'intensité de turbulence varie de 7,0 % à 40 m à 5,9 % à 160 m.

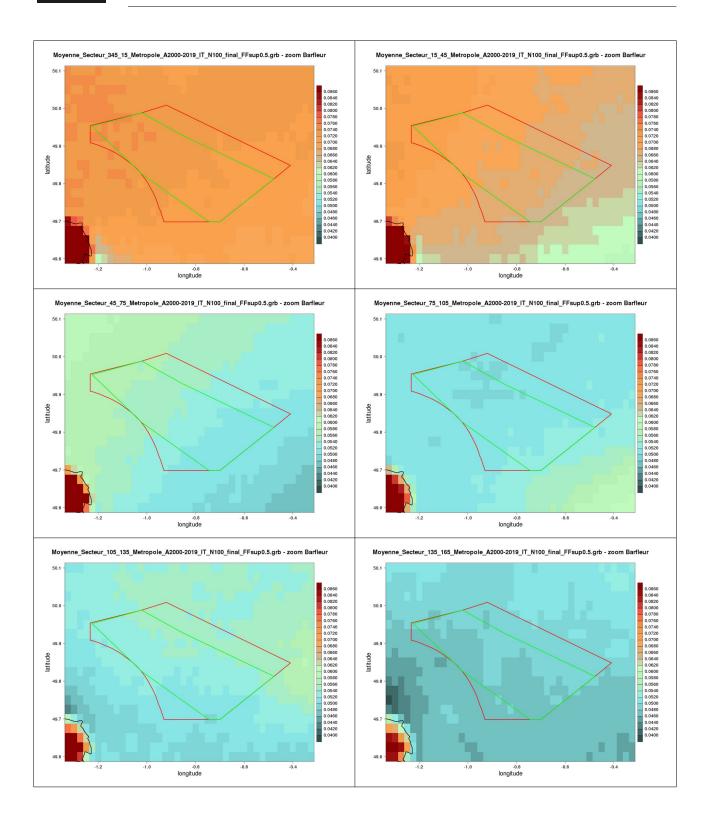


### 2.1.2 Intensité de turbulence par secteur de direction de vent

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 pour le niveau 100m et en annexe A pour les niveaux 40m et 160m.

L'ordre des cartes est le suivant :

N	N-N-E			
E-N-E	E			
E-S-E	S-S-E			
S	S-S-O			
O-S-O	0			
O-N-O	N-N-O			





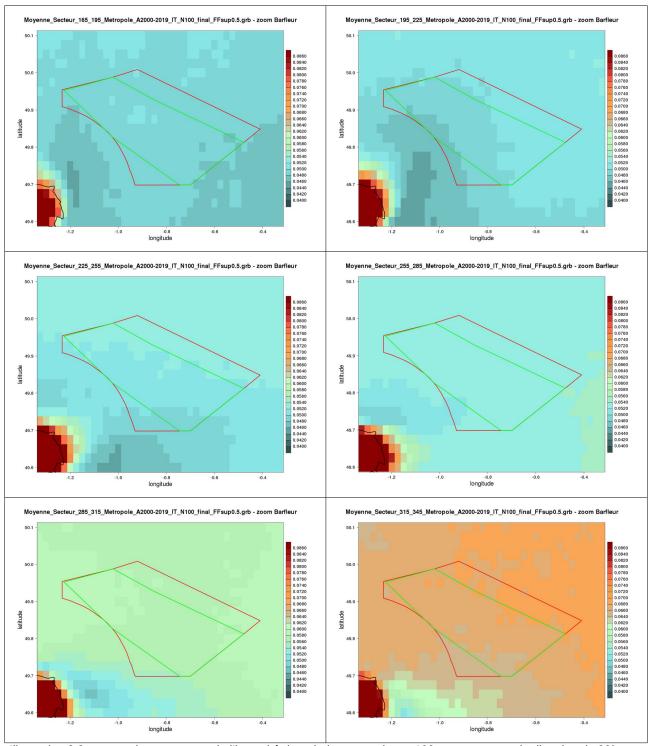
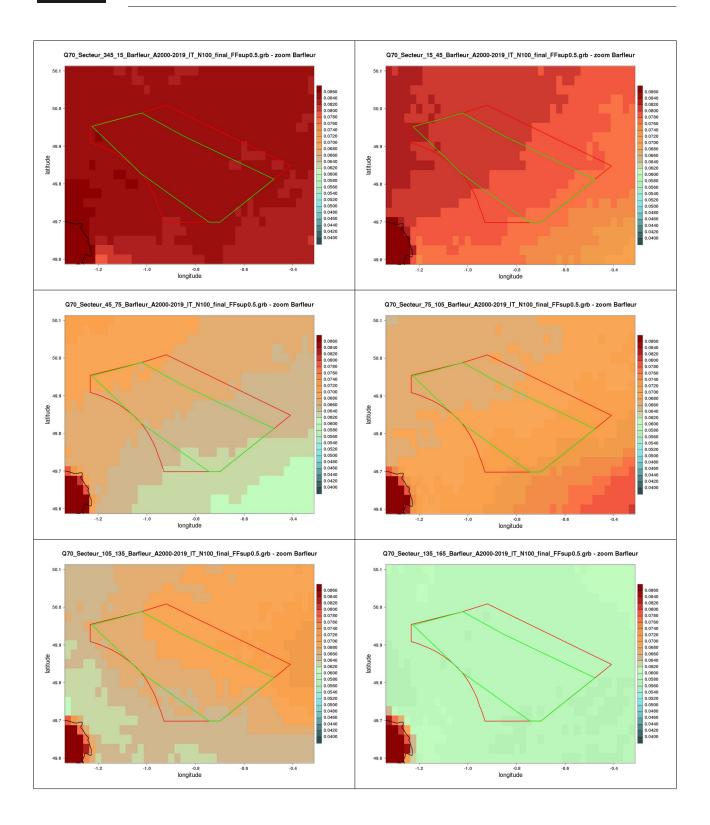


Illustration 2.2 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par secteur de direction de 30° pour la zone de l'AO4 Normandie, calculées à partir des données AROME (2000-2019)





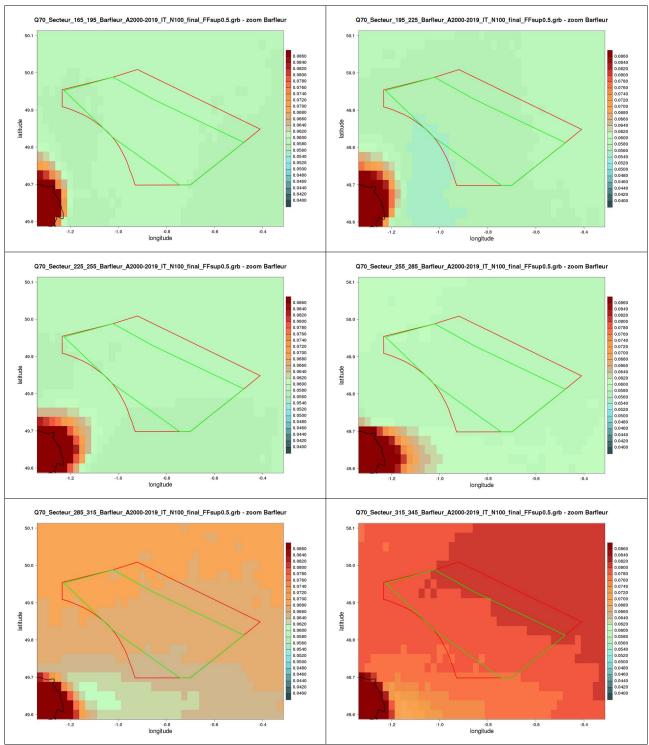


Illustration 2.3 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par secteur de direction de 30° pour la zone de l'AO4 Normandie, calculés à partir des données AROME (2000-2019)

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 donnés, 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 de l'AO4 Normandie est réalisé et fourni (voir tableau 2.1). Les valeurs minimale et maximale de la moyenne de l'intensité de turbulence sont en caractères gras.

		dd000	dd030	dd060	dd090	dd120	dd150	dd180	dd210	dd240	dd270	dd300	dd330
	Moy	0,076	0,071	0,061	0,061	0,062	0,060	0,060	0,060	0,061	0,062	0,064	0,072
40 m	IT	0,080	0,075	0,065	0,064	0,066	0,063	0,063	0,063	0,064	0,064	0,068	0,077
	Q70	0,082	0,077	0,068	0,072	0,071	0,066	0,066	0,065	0,065	0,065	0,068	0,078
	IT	0,085	0,081	0,071	0,076	0,077	0,068	0,067	0,067	0,066	0,066	0,072	0,081
100 m	Moy	0,070	0,064	0,050	0,049	0,050	0,046	0,047	0,047	0,048	0,052	0,054	0,065
	IT	0,075	0,072	0,058	0,054	0,056	0,050	0,051	0,051	0,053	0,054	0,059	0,069
100 111	Q70	0,083	0,077	0,063	0,067	0,065	0,058	0,057	0,056	0,057	0,059	0,064	0,077
	IT	0,086	0,082	0,069	0,073	0,071	0,060	0,059	0,058	0,059	0,060	0,069	0,081
160 m	Moy IT	0,067 0,072	0,061 0,067	0,046 0,053	0,044 0,048	0,043 0,048	<b>0,038</b> 0,043	0,039 0,043	0,039 0,043	0,040 0,046	0,044 0,048	0,049 0,053	0,059 0,064
<b>100 III</b>	Q70	0,083	0,075	0,060	0,062	0,055	0,049	0,050	0,048	0,050	0,054	0,061	0,075
	IT	0,085	0,081	0,067	0,068	0,061	0,052	0,053	0,052	0,053	0,056	0,065	0,079

Tableau 2.1 : 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 et 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 à 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 de l'AO4 Normandie, les intensités moyennes de turbulence atteignent à peine 8 % et le Q70 de l'intensité de turbulence 8,6 % et les plus fortes valeurs moyennes sont rencontrées à 40 m pour un vent de secteur nord.

### 2.1.3 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 force 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.

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.

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



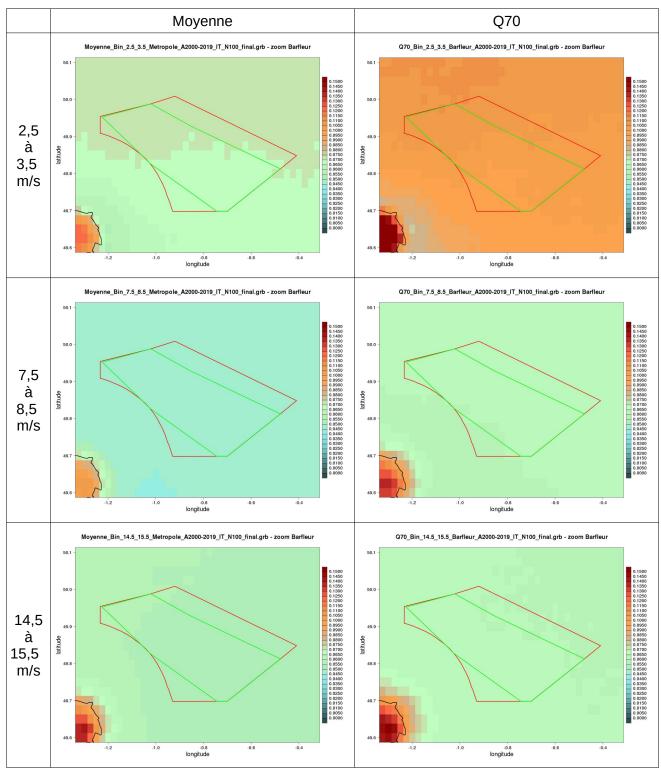


Illustration 2.4: cartes des moyennes à gauche et du Q70 à droite de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par bin de 1 m/s pour la zone de l'AO4 Normandie, calculées à partir des données AROME (2000-2019)

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.

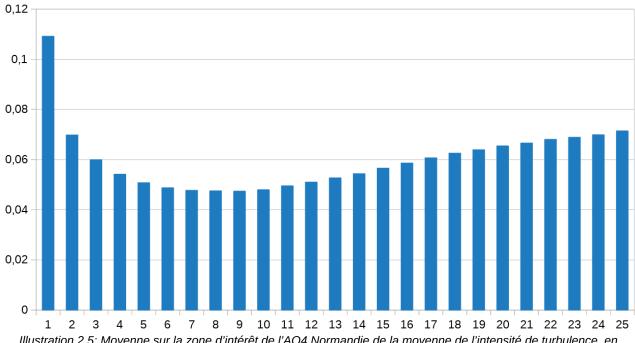


Illustration 2.5: Moyenne sur la zone d'intérêt de l'AO4 Normandie de la moyenne de l'intensité de turbulence, en fonction de la force du vent (m/s) en abscisse. Période 2000-2019, 100 mètres

### 2.1.4 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'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 donner les résultats pour la valeur du bin [14,5; 15,5] pour la hauteur 100 mètres.

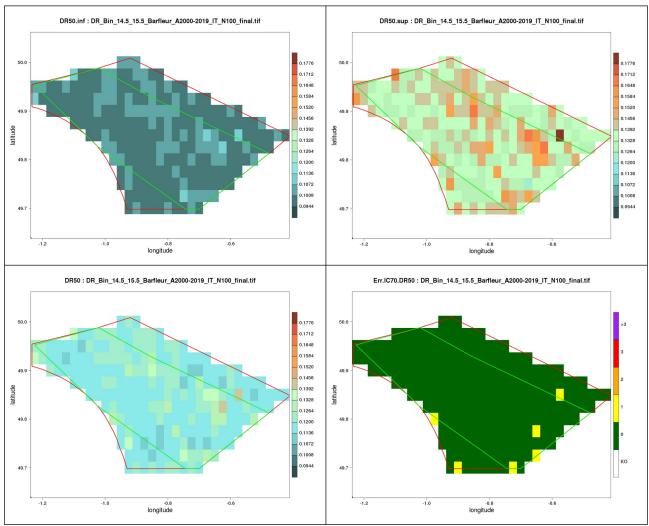


Illustration 2.6: Quantiles d'intensité de turbulence pour une durée de retour de 50 ans. En haut valeurs des bornes inférieure (à gauche) et supérieure (à droite) de l'intervalle de confiance à 70 %.

Au-dessous, à gauche durée de retour centrale et à droite qualité de l'ajustement (médiocre à douteux en vert, douteux en jaune, orange, rouge et violet).

### 2.2 Rafale

Pour les 228 points de grille AROME de la zone de l'AO4 Normandie, 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 §7 de [Chatel et al. V1, 2021]. 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 rafale (estFX) en m/s, puis la troisième la direction de rafale estDX exprimé 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 présente 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.

### 2.2.1 Rafales modélisées à 100 m

#### Metropole\_A2000-2019\_estFFmax\_N100\_MOY.grb - zoom Barfleur

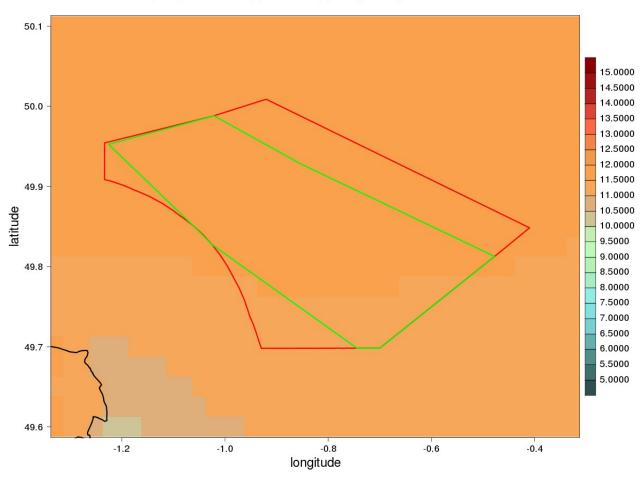


Illustration 2.7 : Forces moyennes du vent de rafale sur la zone de l'AO4 Normandie au niveau 100 m sur la période 2000-2019

Les forces du vent de rafale moyennées sur la période 2000-2019 au niveau 100 mètres sont comprises principalement entre 11 et 12 m/s sur la zone de l'AO4 Normandie.



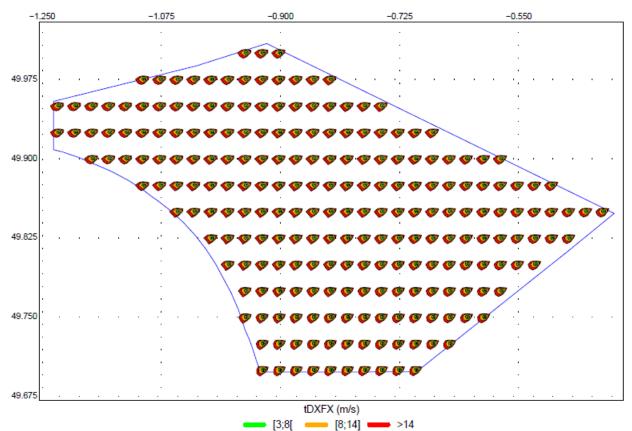


Illustration 2.8 : Roses des vents de rafales estimées à 100m sur la période 2000-2019

Les roses de vents de rafales à 100 m sont assez homogènes sur la zone de l'AO4 Normandie, avec une composante W/SW développée.

#### **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 plus soutenus sur la partie nord ; la direction dominante est ouest à sud-sud-ouest au nord de la zone puis évolue progressivement au sud-ouest au sud de la zone. L'intensité des rafales moyennes augmente avec la hauteur.

### 2.2.2 Rafales cinquantennales

Pour l'ensemble des points de la zone de l'AO4 Normandie, 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 au paragraphe §5,3 de [Chatel et al. V1, 2021].

Le code qualité associé à l'ajustement en chaque point est identique à celui présenté pour les durées de

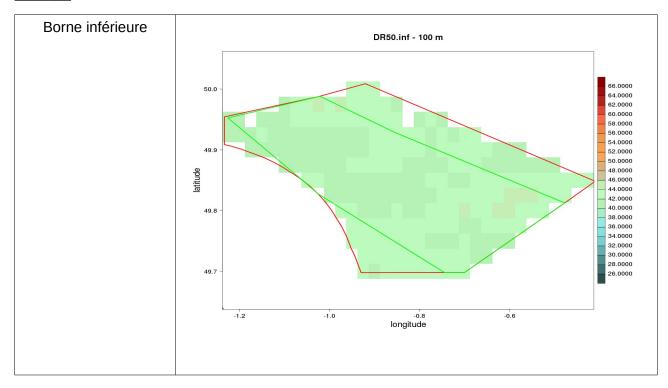


retour de l'indice de turbulence (paragraphe 2.1.4).

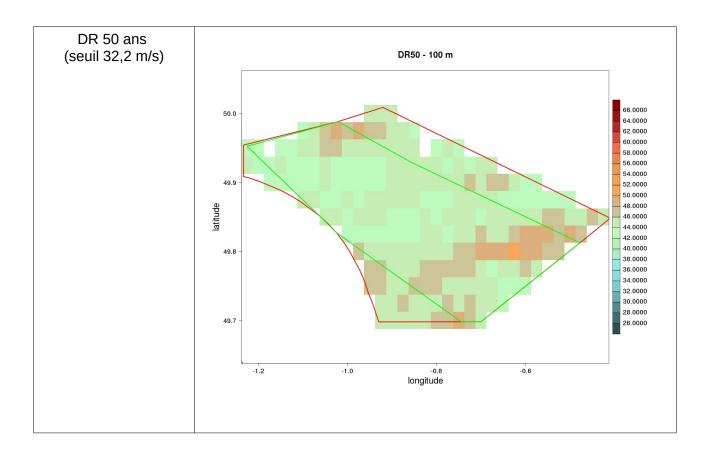
Le seuil a été calculé en chaque point de grille par la méthode mlrp . Puis la médiane de l'ensemble de ces valeurs a été retenue pour être appliquée à l'ensemble des points de la zone.

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 100m et dans l'annexe B pour les niveaux 40 et 160m.

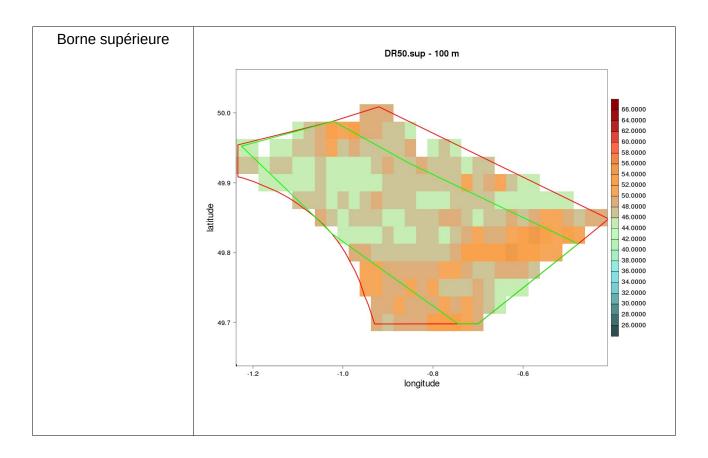
#### A 100 m:











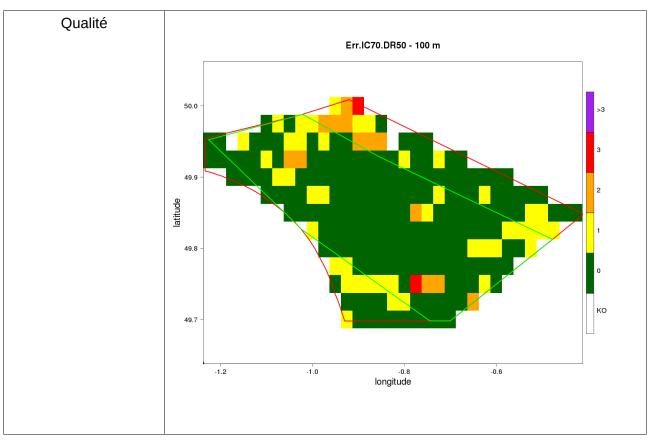


Tableau 2.2: carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 100 m pour la zone de l'AO4 Normandie, calculés à partir des données AROME (2000-2019)

Sur la zone, les durées de retour 50 ans varient entre 42,54 m/s [40,75; 44,34] (position 49,85 °N et -0,875°E) et 50,19 m/s [44,68; 55,70] (position 49,8°N et -0,625°E). Les valeurs les plus élevées se situent essentiellement dans la partie sud de la zone. Il y a 3 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 %).

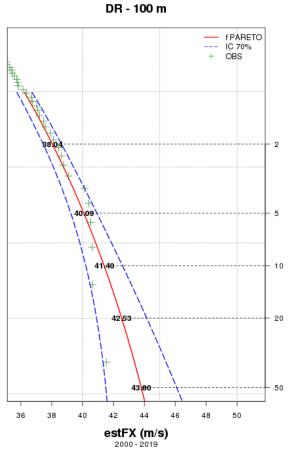


Illustration 2.9: Courbe des quantiles pour le point 112, positionné à 49.850 Nord et –0.800 Est, et correspondant au point de grille AROME le plus proche de la position lidar BARFLEUR, à 100m

#### Conclusion:

Quel que soit le niveau considéré, les valeurs les plus élevées de rafale cinquantennales se situent essentiellement dans la partie sud 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  $\pm$  11 à 12 % .

#### 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 évènements 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 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 avec précaution.

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

Pour les 228 points de grille AROME de la zone de l'AO4 Normandie, 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.

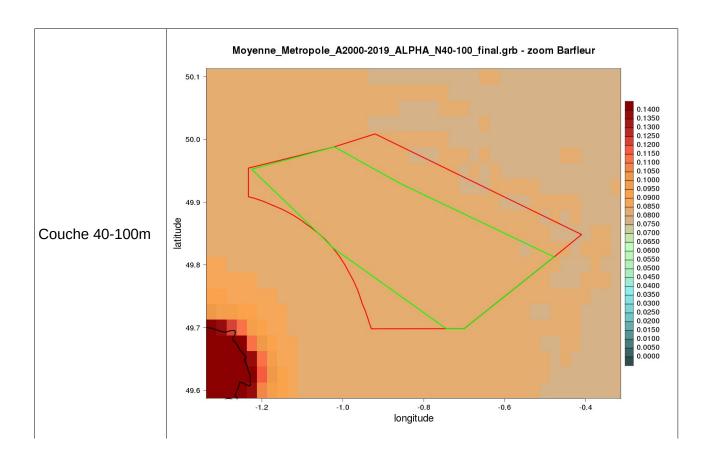
Les statistiques des coefficients de cisaillement  $\alpha$  sont calculées en distinguant le jour et la nuit ; la distinction jour/nuit est effectuée de la façon suivante : les données du jour sont celles correspondant aux données horaires allant de 07 h UTC à 18 h UTC et celles de la nuit correspondent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

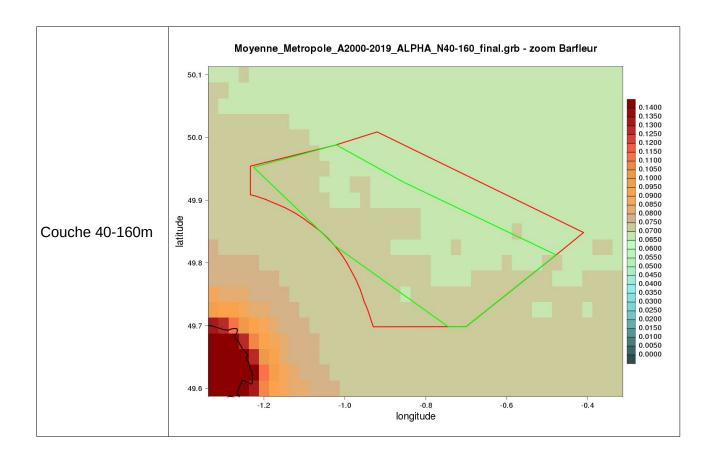
Ces données sont disponibles dans les fichiers qui font partie des livrables. Le séparateur de champs est la virgule, le caractère de décimale est le point.

#### 2.3.1 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 de l'AO4 Normandie, calculé à partir des séries des forces du vent d'AROME sur la période 2000-2019, sont fournies ci-dessous.







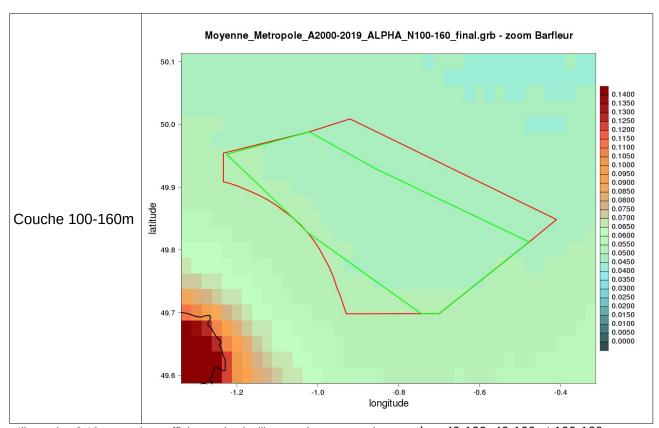


Illustration 2.10: carte du coefficient α de cisaillement de vent pour les cou<del>ches 40-100, 40-160 et 100-160 m tous</del> secteurs confondus pour la zone de l'AO4 Normandie, calculé à partir des forces du vent AROME (2000-2019)

L'analyse de ces cartes et des cartes en annexe 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 rouge, tous secteurs de vent confondus, le coefficient  $\alpha$  de cisaillement vertical de la force du vent varie de 0,049 dans la couche 100-160 mètres à 0,081 dans la couche 40-100 m, lorsqu'on se rapproche de la surface.

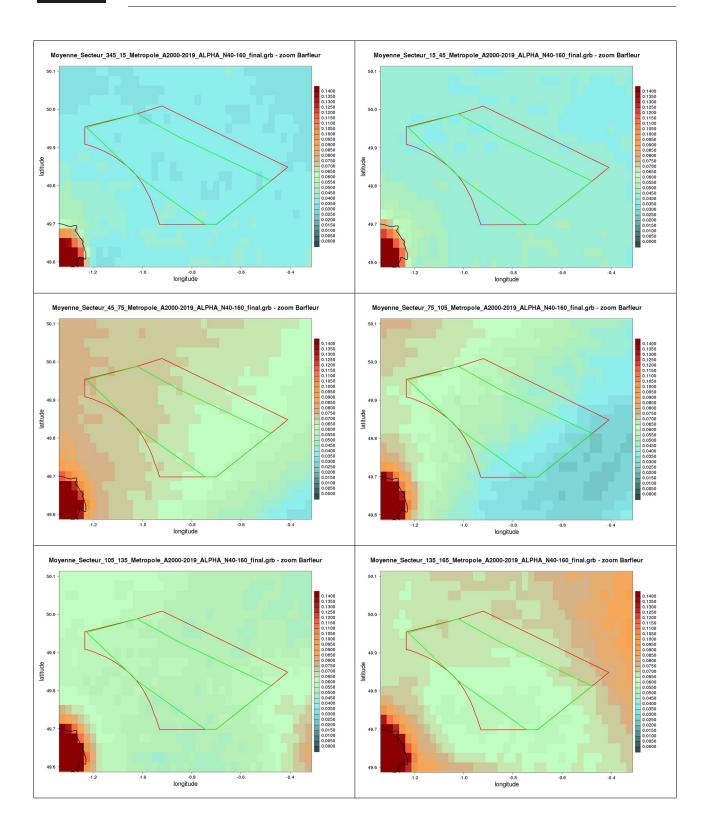
Sur cette zone d'implantation, se dessine un gradient sud-ouest / nord-est dans la couche la plus élevée (100-160 m) avec des valeurs de l'ordre de 0,051 dans la partie sud et 0,045 dans la partie nord de la zone. Dans la couche la plus près de la surface (40-100 mètres), on retrouve ce même type de gradient avec des valeurs de 0,082 au sud-ouest et un peu plus de 0,079 dans la partie nord-est.

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



# 2.3.2 Coefficient α 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 de l'AO4 Normandie, calculé à partir des séries des forces du vent issues d'AROME sur la période 2000-2019, sont fournies ci-après pour le niveau 40-160m et en annexe pour les couches 40-100m et 100-160m.





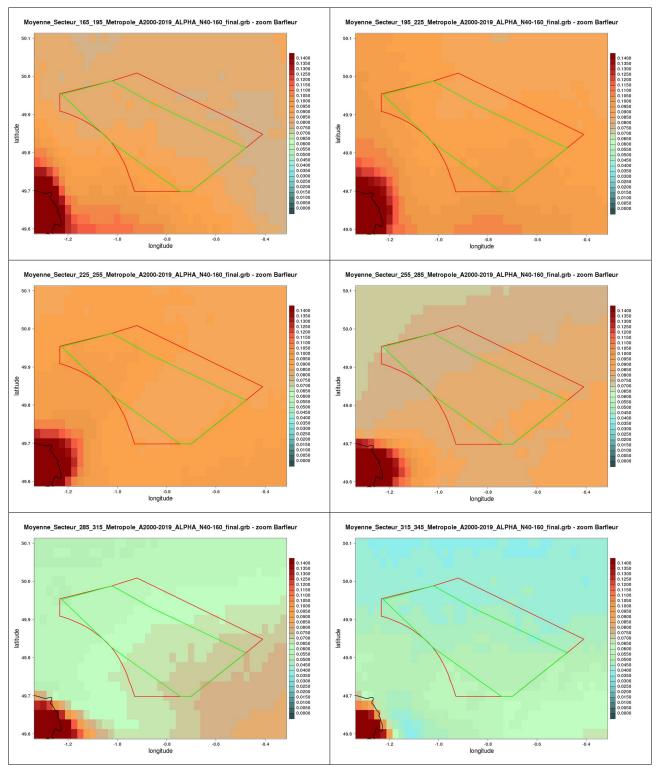


Illustration 2.11 : cartes du coefficient α de cisaillement de vent pour la couche 40-160 m par secteur de direction de 30° pour la zone de l'AO4 Normandie, calculé à partir du vent AROME (2000-2019)



Ces cartes des coefficients  $\alpha$  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  $\alpha$  de cisaillement du vent par couche et par secteur sur la zone d'intérêt est réalisé et fourni (voir tableau 2.3).

	dd000	dd030	dd060	dd090	dd120	dd150	dd180	dd210	dd240	dd270	dd300	dd330
40-100 m	0,045	0,047	0,084	0,063	0,064	0,068	0,083	0,088	0,086	0,079	0,070	0,062
	0,055	0,057	0,090	0,101	0,093	0,094	0,089	0,099	0,096	0,088	0,086	0,075
40-160 m	0,034	0,039	0,058	0,028	0,047	0,056	0,078	0,087	0,086	0,074	0,055	0,042
	0,041	0,045	0,077	0,068	0,062	0,080	0,096	0,101	0,098	0,086	0,075	0,058
100-160	0,002	0,013	0,006	<b>-0,052</b> 0,004	-0,008	0,019	0,059	0,083	0,082	0,066	0,023	0,001
m	0,020	0,025	0,055		0,047	0,056	<b>0,112</b>	0,108	0,104	0,085	0,055	0,024

Tableau 2.3 : plage (borne minimale et borne maximale établies à partir des points de la zone d'intérêt de l'AO4 Normandie) des moyennes du coefficient α pour chacune des trois couches (40-100, 40-160 et 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 -0,052 et 0,112.

Il est possible de rencontrer un cisaillement négatif sous un orage où en la présence d'un jet de basse couche.

Les cartes et le tableau montrent que les vents d'est 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 terre (ici du 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 2.4).



		jour			nuit		sans distinction jour-nuit			
	min	moy	max	min	moy	max	min	moy	max	
Tous dd	0,064	0,066	0,068	0,072	0,074	0,078	0,068	0,070	0,072	
dd000	0,026	0,031	0,035	0,039	0,042	0,049	0,034	0,037	0,041	
dd030	0,031	0,037	0,041	0,042	0,047	0,052	0,039	0,042	0,045	
dd060	0,046	0,057	0,070	0,071	0,078	0,085	0,058	0,067	0,077	
dd090	0,003	0,023	0,047	0,048	0,068	0,090	0,028	0,047	0,068	
dd120	0,028	0,040	0,054	0,057	0,068	0,079	0,047	0,054	0,062	
dd150	0,038	0,052	0,074	0,069	0,078	0,087	0,056	0,065	0,080	
dd180	0,073	0,083	0,097	0,078	0,086	0,096	0,078	0,085	0,096	
dd210	0,085	0,093	0,102	0,088	0,094	0,101	0,087	0,094	0,101	
dd240	0,087	0,094	0,102	0,082	0,087	0,096	0,086	0,091	0,098	
dd270	0,073	0,083	0,090	0,076	0,080	0,086	0,074	0,082	0,086	
dd300	0,048	0,063	0,075	0,059	0,067	0,076	0,055	0,065	0,075	
dd330	0,033	0,041	0,053	0,048	0,055	0,063	0,042	0,048	0,058	

Tableau 2.4 : minimum, maximum et moyenne du coefficient α, obtenus à partir des valeurs α de l'ensemble des points de grille de la zone d'intérêt de l'AO4 Normandie 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 plus forts la nuit que le jour sauf pour les vents des deux secteurs ouest-sud-ouest et ouest. Les secteurs 180° à 270° (vent de secteur sud à ouest) correspondant aux secteurs les plus soumis à l'influence terrestre sont ceux présentant les plus forts coefficients  $\alpha$  de cisaillement de vent.

### 2.3.3 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 pour la couche 40-160 :

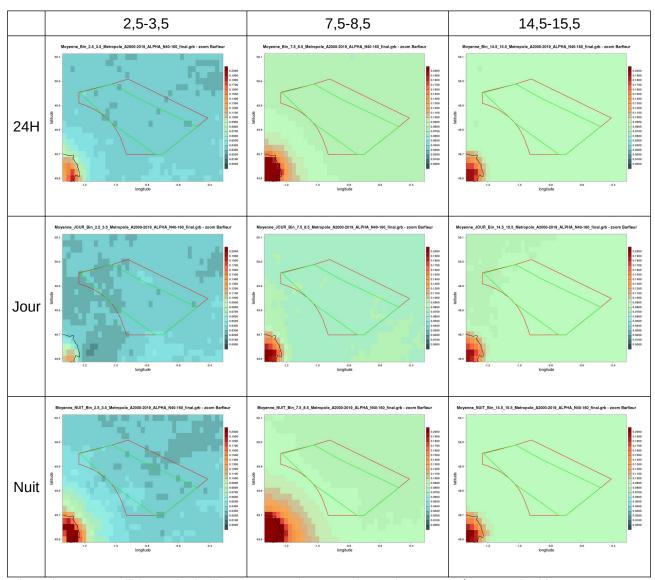


Illustration 2.12: Coefficient α du cisaillement moyen du vent sur la couche 40-160 mètres pour les bins 2,5-3,5, 7,5-8,5 et 14,5-15,5 avec différenciation jour/nuit sur la zone de l'AO4 Normandie

Nous constatons relativement peu de différence entre les valeurs de jour et les valeurs de nuit, et un accroissement sensible du coefficient entre le bin 2,5-3,5 et le bin 7,5-8,5. Entre 7,5-8,5 et 14,5-15,5 l'augmentation est plus faible et reste peu perceptible avec la palette de couleurs associée aux cartes.

	2,5-3,5	7,5-8,5	14,5-15,5
24H	0,034	0,074	0,084
Jour	0,033	0,068	0,083
Nuit	0,035	0,079	0,084

Tableau 2.5: Moyenne sur la zone d'intérêt de l'AO4 Normandie du coefficient α 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, cette différence étant nette pour les vents de 8 m/s, et quasi-négligeable pour les vents de 15 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.

### 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 2000-2019. 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.

### 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 une sous-estimation des séries estimées par rapport à la série des données observées.

### 3.2 Incertitude sur l'estimation des rafales

La rafale d'AROME à  $10~\mathrm{m}$  est issue d'un diagnostic dont la formule de calcul est  $RAF_{10\,m} = FF_{10\,m} + C*\sqrt{TKE_{20m}}$  avec  $FF_{10\,m}$  le vent moyen à  $10~\mathrm{m}$ ,  $TKE_{20\,m}$  l'énergie cinétique turbulente à  $20~\mathrm{m}$ . La force du vent à  $10~\mathrm{m}$  intervenant dans la formule de calcul de la rafale à  $10~\mathrm{m}$ , il est intéressant de fournir ici **quelques éléments sur la qualité du vent à 10~\mathrm{m} dans AROME.** Météo-France suit en routine la qualité du vent à  $10~\mathrm{m}$  dans AROME sur terre. La comparaison par rapport aux observations du vent à  $10~\mathrm{m}$  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°et une erreur quadratique moyenne inférieure à  $35~\mathrm{e}$  en moyenne ; au niveau de la force du vent, on constate un biais inférieur en moyenne à  $-0.3~\mathrm{m/s}$  en force du vent et une erreur quadratique moyenne de l'intensité du vent inférieure à  $1.7~\mathrm{m/s}$  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 sousestime 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).

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

Concernant les rafales cinquantennales calculées sur la zone de l'AO4 Normandie, 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.

## 3.4 Incertitudes associées au coefficient α 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 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 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 [Roulle et al. V3, 2021].

Pour l'intensité de turbulence et l'exposant du cisaillement vertical du vent, des statistiques sont fournies sur la zone de l'AO4 Normandie 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.

### 5 Bibliographie

Chatel, V., Dalphinet, A., Merle, R., Mezdour, A., Rouchy, N., Roulle, O., Pouponneau, B. et Legrand R.: Projet de parc éolien off-shore, Note technique Lots 1, 2 et 3, Version 1, 2021

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

Roulle O., Pouponneau B. et Chatel V.: Choix méthodologiques des estimateurs de rafale et indice de turbulence - Volet R&D Lot 3 :analyse des risques de turbulence, Version 3, 2021

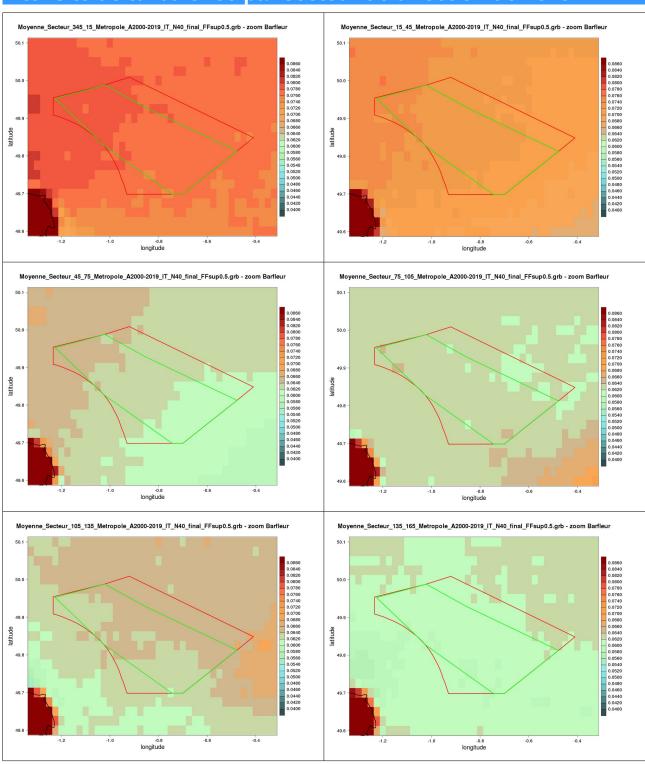
Zhang Matthew Huaiquan, Wind Resource Assessment and Micro-siting: Science and Engineering, Wiley Wagner R., Courtney M. Larsen, Torben J., Schmidt P., Uwe <u>Simulation of shear and turbulence impact on wind turbine performance</u>, 2010



A. Annexe - Résultats des diagnostics : Intensité de turbulence à 40 m et 160 m



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



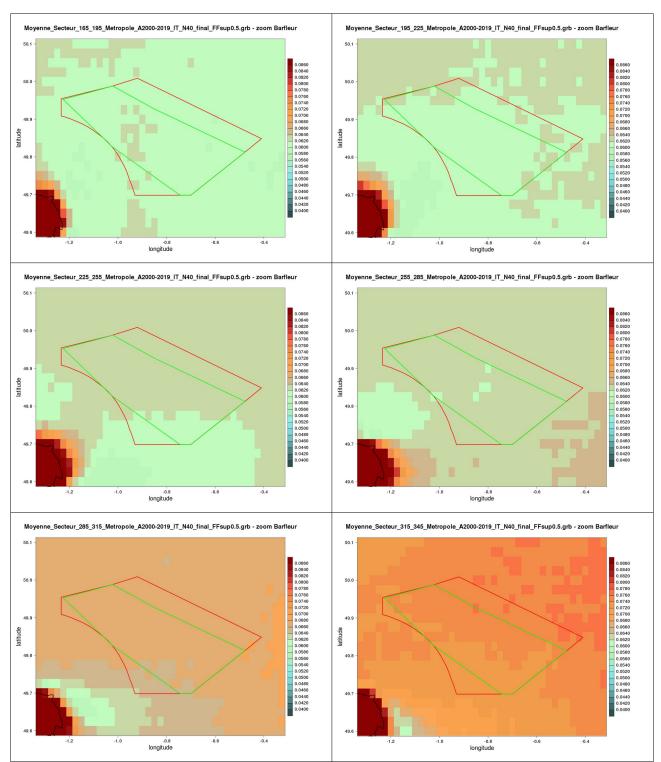
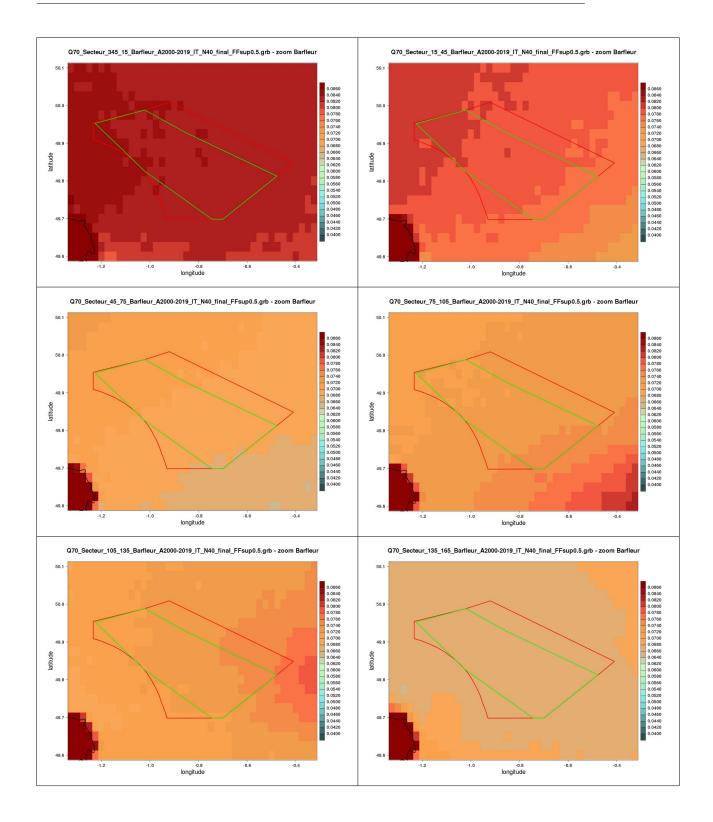


Illustration A.1 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par secteur de direction de 30° pour la zone de l'AO4 Normandie, calculées à partir des données AROME (2000-2019)





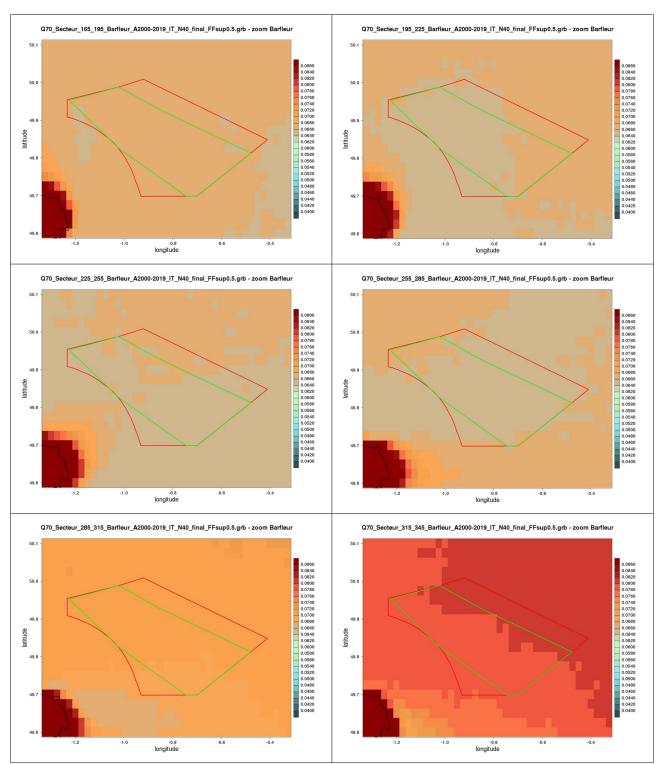
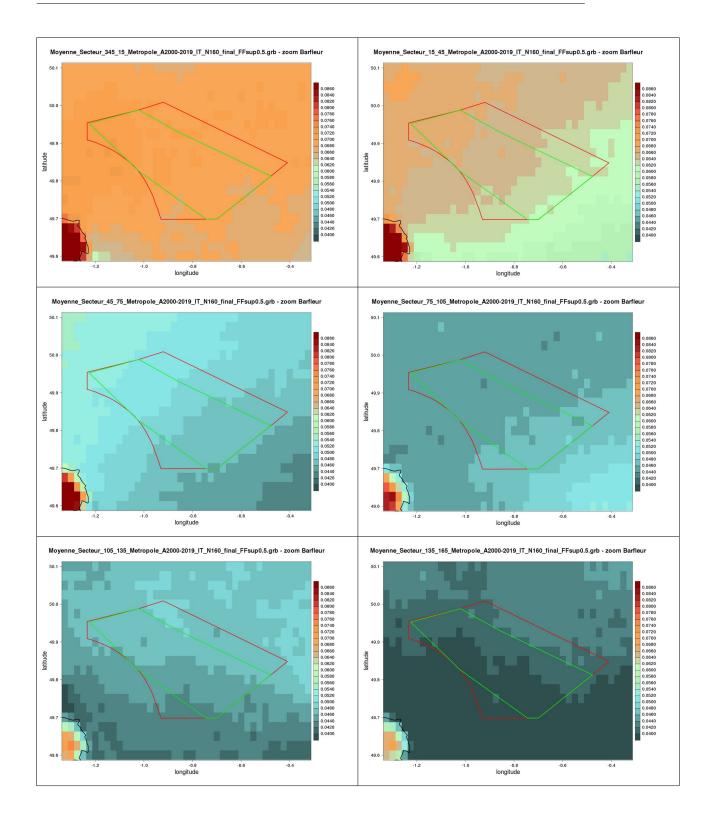


Illustration A.2 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par secteur de direction de 30° pour la zone de l'AO4 Normandie, calculés à partir des données AROME (2000-2019)





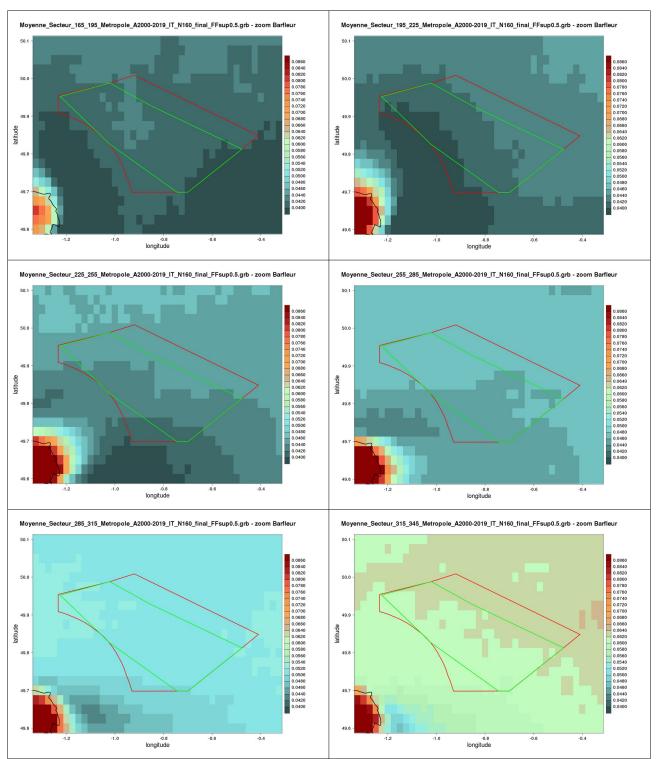
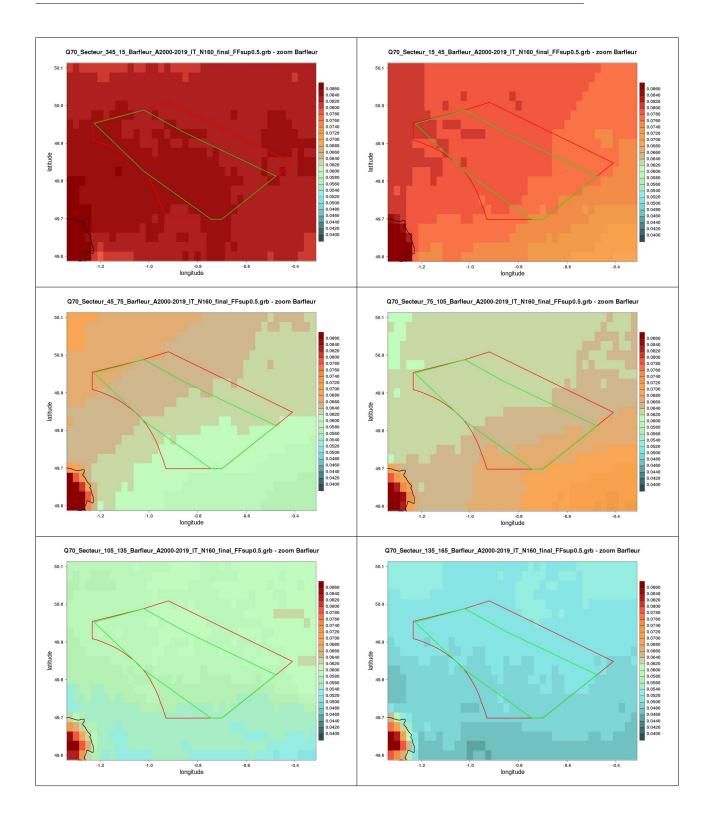


Illustration A.3 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par secteur de direction de 30° pour la zone de l'AO4 Normandie, calculées à partir des données AROME (2000-2019)





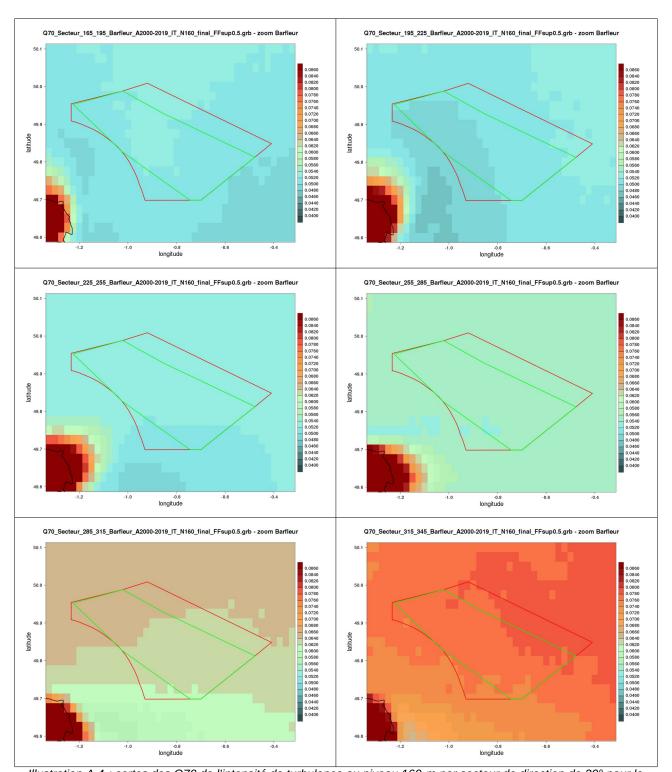


Illustration A.4 : cartes des Q70 de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par secteur de direction de 30° pour la zone de l'AO4 Normandie, calculés à partir des données AROME (2000-2019)



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

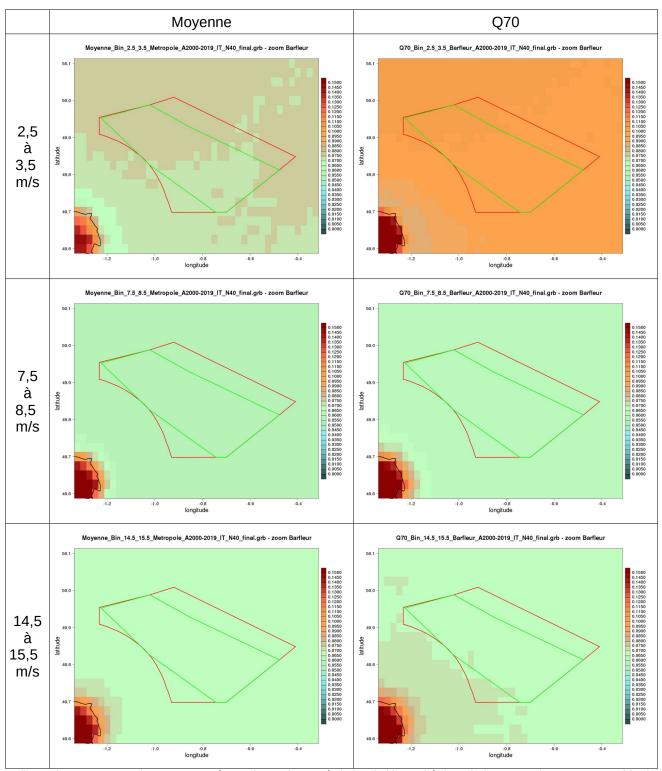


Illustration A.5: cartes des moyennes à gauche et du Q70 à droite de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par bin de 1 m/s pour la zone de l'AO4 Normandie, calculées à partir des données AROME (2000-2019)



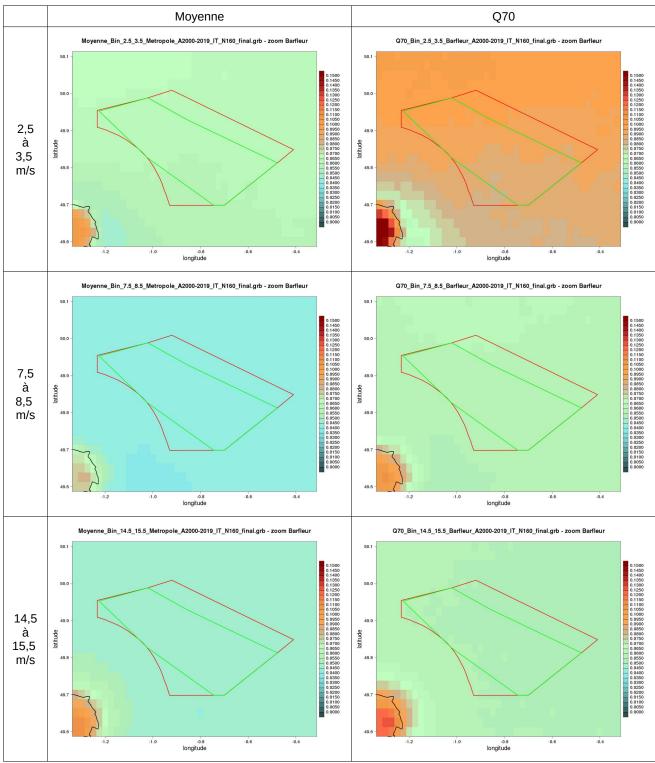


Illustration A.6: cartes des moyennes à gauche et du Q70 à droite de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par bin de 1 m/s pour la zone de l'AO4 Normandie, calculées à partir des données AROME (2000-2019)



# B. Annexe - Résultats des diagnostics : Rafales modélisées à 40 m et 160 m

### Rafales modélisées à 40 m

#### Metropole\_A2000-2019\_estFFmax\_N40\_MOY.grb - zoom Barfleur

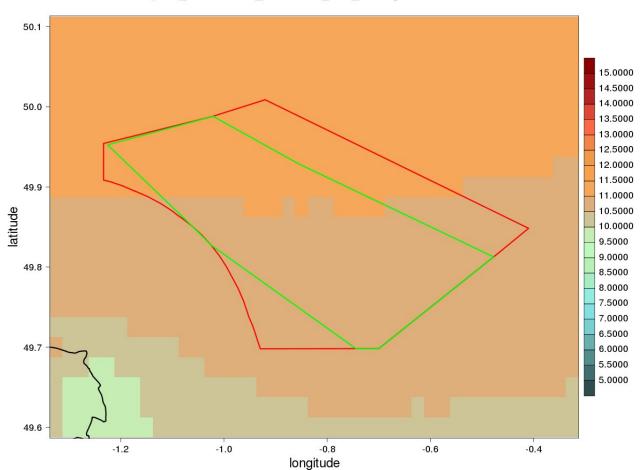


Illustration B.1: Forces moyennes du vent de rafale sur la zone de l'AO4 Normandie au niveau 40 m sur la période 2000-2019

Les forces du vent de rafale moyennées sur la période 2000-2019 au niveau 40 mètres sont comprises



principalement entre 10,5 et 11,5 m/s sur la zone de l'AO4 Normandie, avec des intensités plus élevées au nord de la zone.

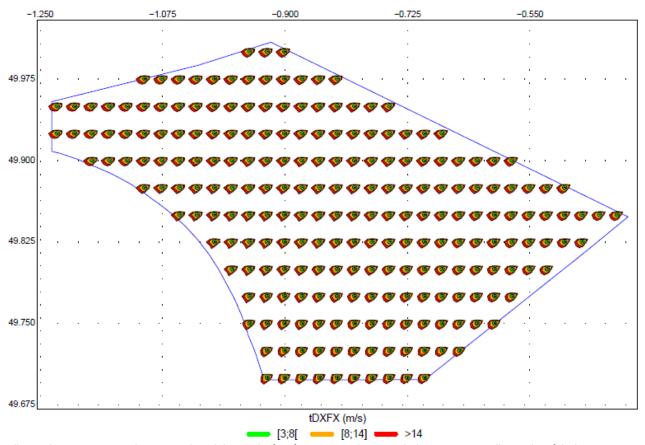


Illustration B.2: Roses des vents de rafales estimées à 40 m sur la zone de l'AO4 Normandie sur la période 2000-2019

Les roses de vents de rafales à 40 m sont assez homogènes sur la zone de l'AO4 Normandie, avec une composante W/SW développée.



### Rafales modélisées à 160 m

#### Metropole\_A2000-2019\_estFFmax\_N160\_MOY.grb - zoom Barfleur

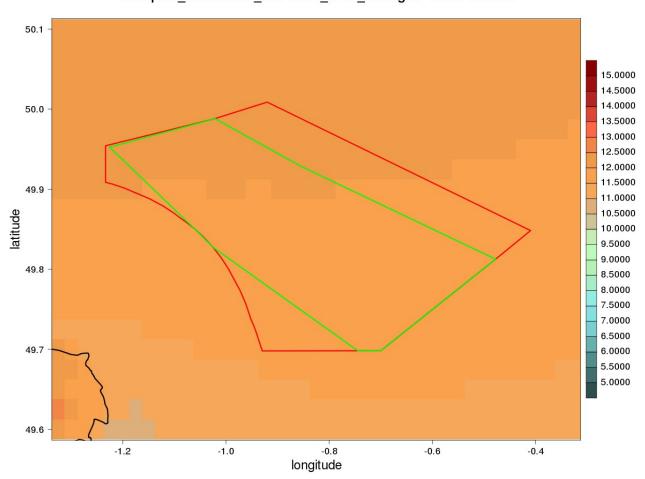


Illustration B.3: Forces moyennes du vent de rafale sur la zone de l'AO4 Normandie au niveau 160 m sur la période 2000-2019

Les forces du vent de rafale moyennées sur la période 2000-2019 au niveau 160 mètres sont comprises principalement entre 11,5 et 12,5 m/s sur la zone de l'AO4 Normandie, avec des intensités plus élevées au nord de la zone.



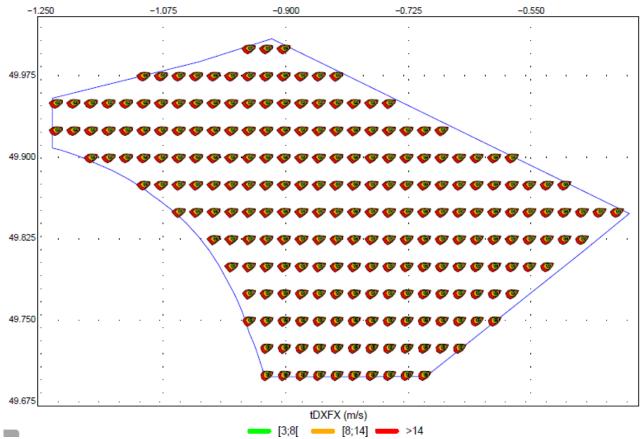


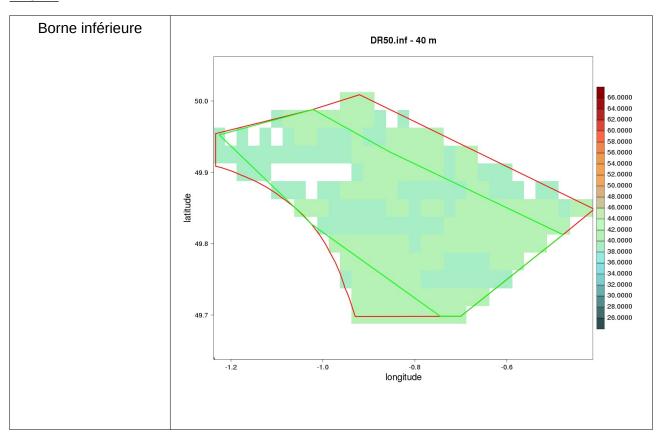
Illustration B.4: Roses des vents de rafales estimées à 160 m sur la période 2000-2019

Les roses de vents de rafales à 160 m sont assez homogènes sur la zone de l'AO4 Normandie, avec une composante W/SW développée.

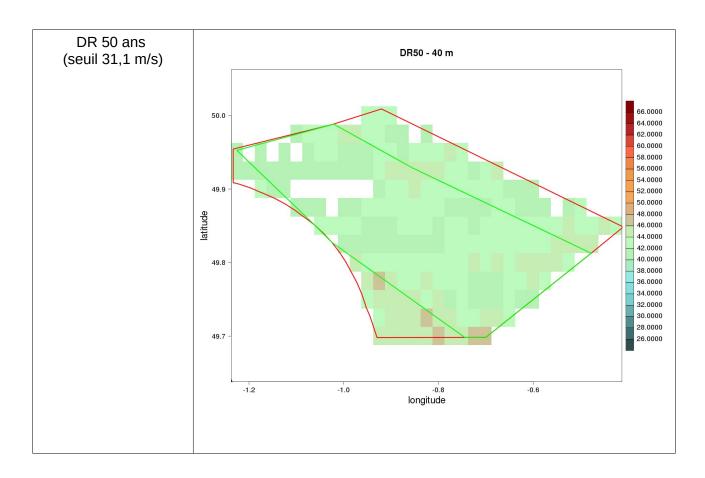


### Rafales cinquantenales

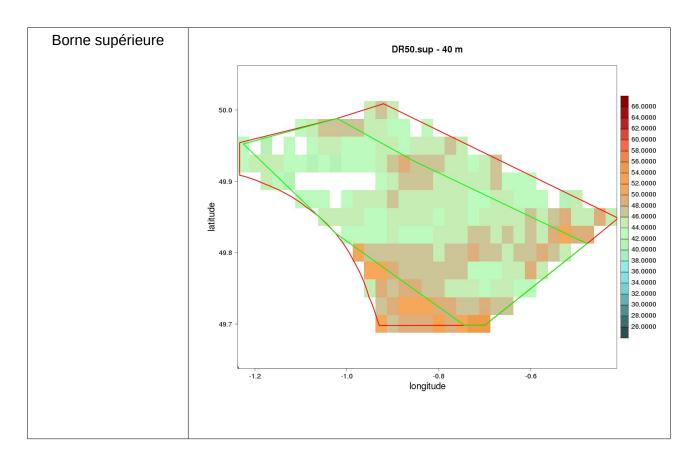
### <u>A 40 m :</u>











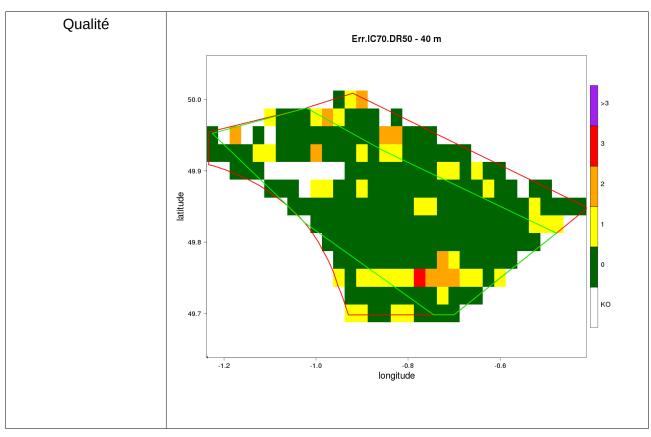


Tableau B.1: carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 40 m pour la zone de l'AO4 Normandie, calculés à partir des données AROME (2000-2019)

Sur la zone, les durées de retour 50 ans varient entre 40,26 m/s [38,74; 41,79] (position 49,9 °N et -1,125°E) et 47,87 m/s [41,41; 54,34] (position 49,7°N et -0,725°E). Les valeurs les plus élevées se situent essentiellement dans la partie sud de la zone. Il y a 14 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 %).

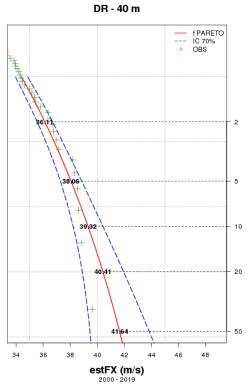
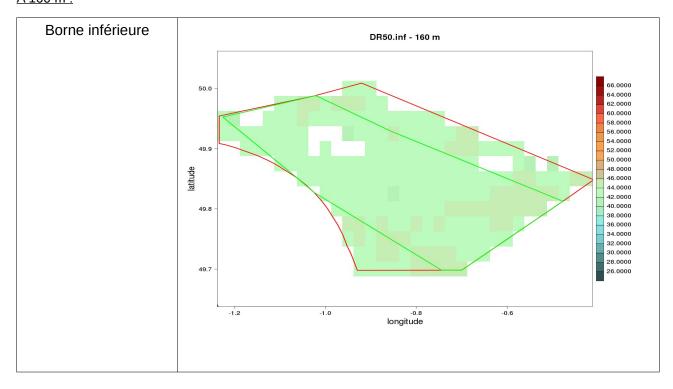
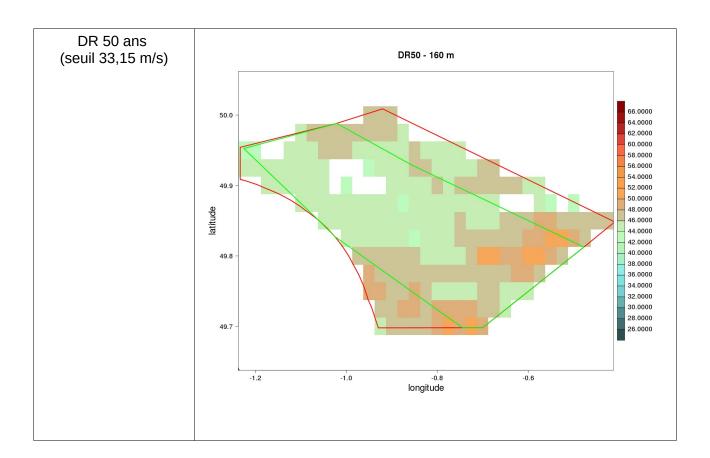


Illustration B.5 :Courbe des quantiles pour le point 112, positionné à 49.850 Nord et –0.800 Est, et correspondant au point de grille AROME le plus proche de la position lidar BARFLEUR, à 40 m

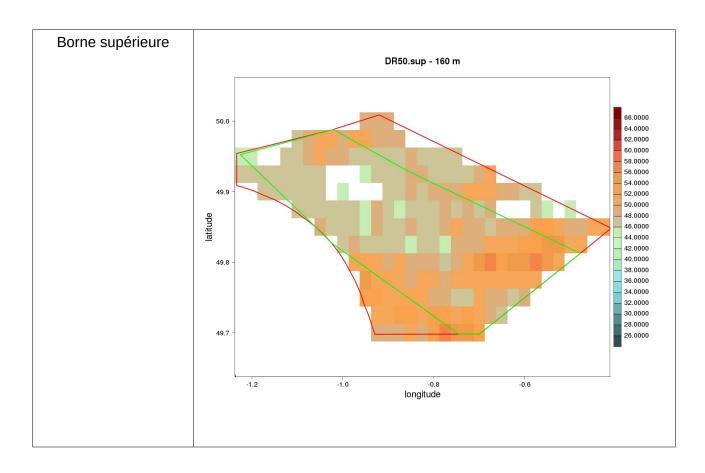


### A 160 m:









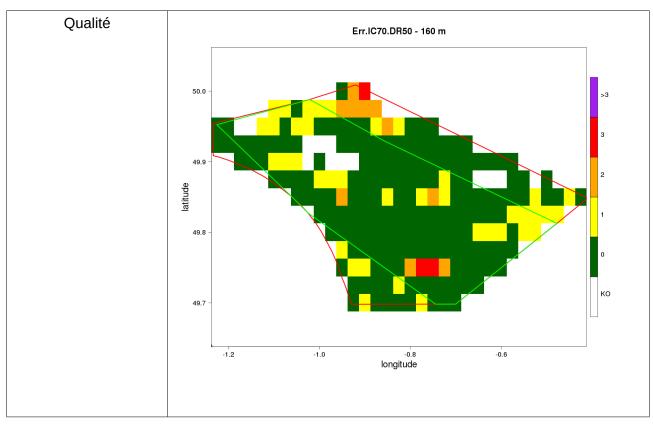


Tableau B.2: carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 160 m pour la zone de l'AO4 Normandie, calculés à partir des données AROME (2000-2019)

Sur la zone, les durées de retour 50 ans varient entre 43,46 m/s [41,75; 45,17] (position 49,875 °N et -0,55°E) et 51,32 m/s [45,79; 56,85] (position 49,8°N et -0,575°E). Les valeurs les plus élevées se situent essentiellement dans la partie sud de la zone. Il y a 13 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 %).



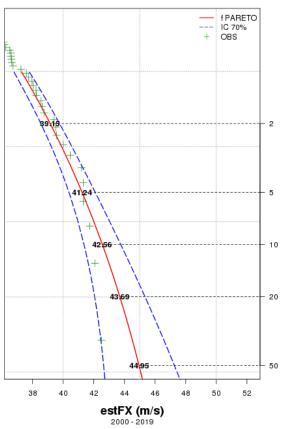


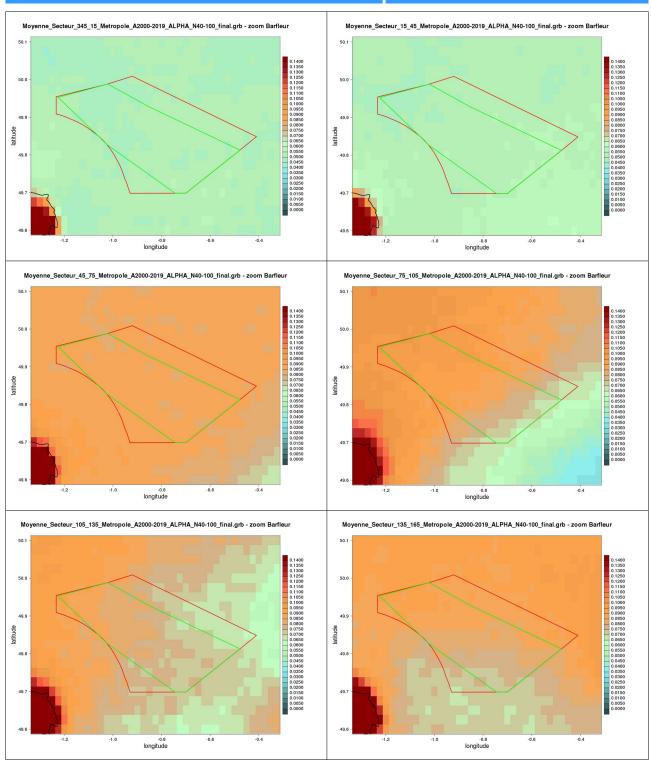
Illustration B.6: Courbe des quantiles pour le point 112, positionné à 49.850 Nord et –0.800 Est, et correspondant au point de grille AROME le plus proche de la position lidar BARFLEUR, à 160m



C. Annexe - Résultats des diagnostics : Exposant α du cisaillement de vent à 40m et 160m



### Coefficient α du cisaillement de vent par secteur



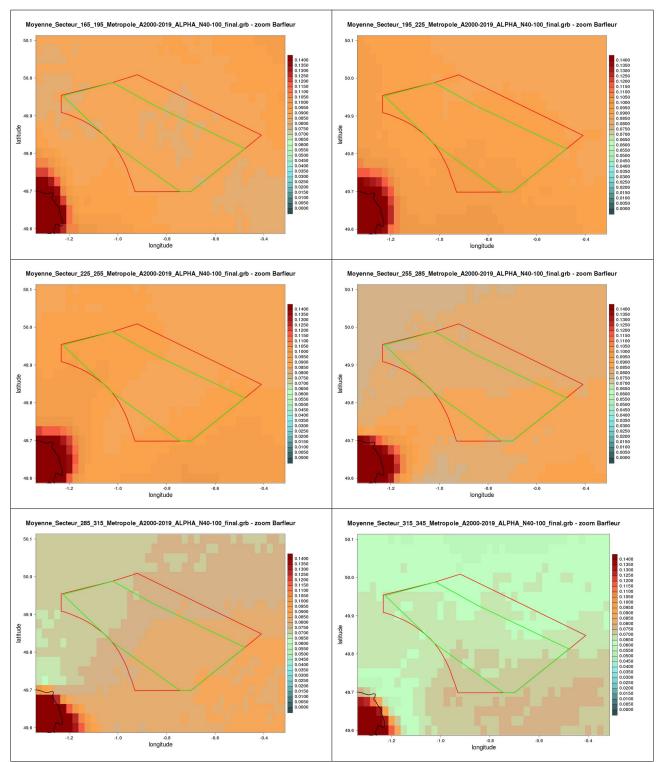
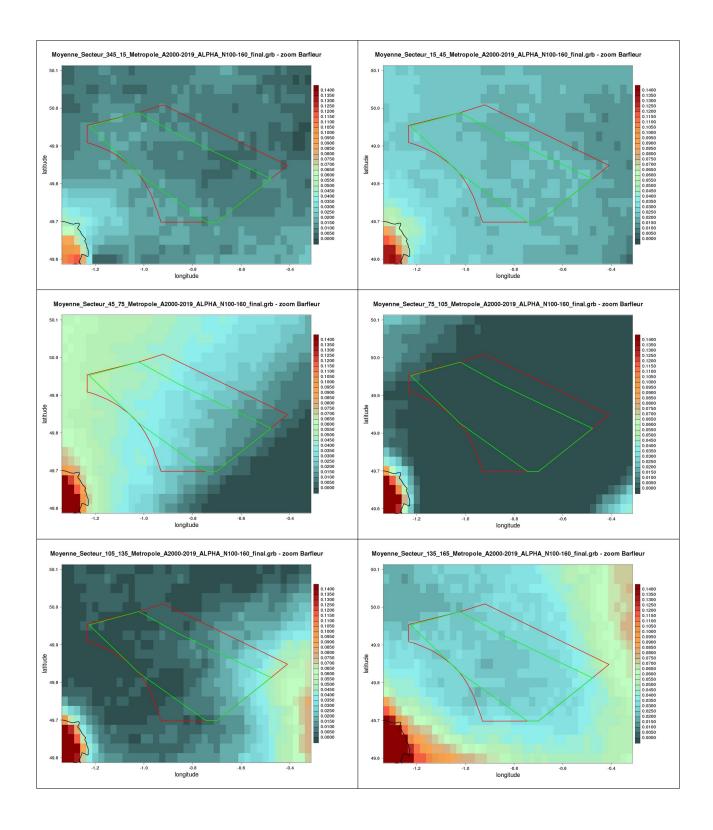


Illustration C.1 : cartes du coefficient α de cisaillement de vent pour la couche 40-100 m par secteur de direction de 30° pour la zone de l'AO4 Normandie, calculé à partir du vent AROME (2000-2019)





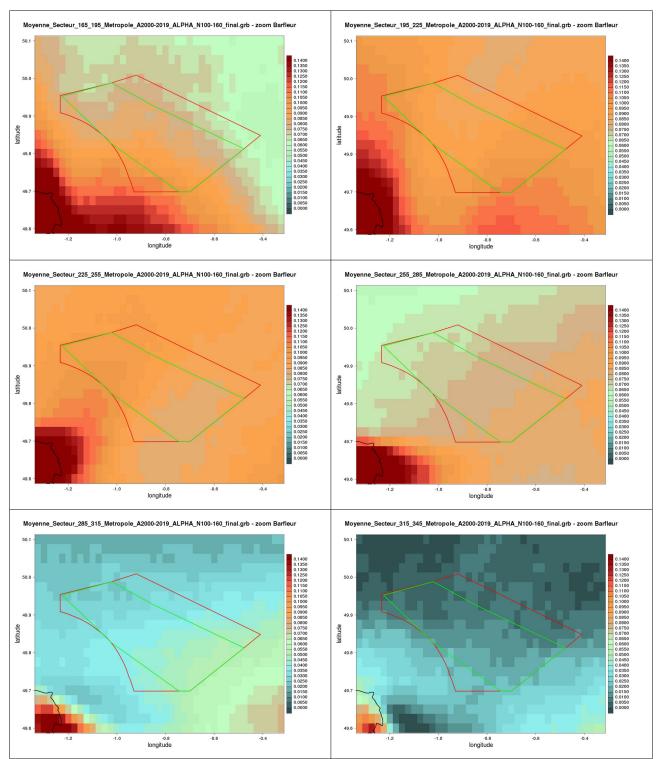


Illustration C.2 : cartes du coefficient α de cisaillement de vent pour la couche 100-160 m par secteur de direction de 30° pour la zone de l'AO4 Normandie, calculé à partir du vent AROME (2000-2019)



### **FIN DU DOCUMENT**