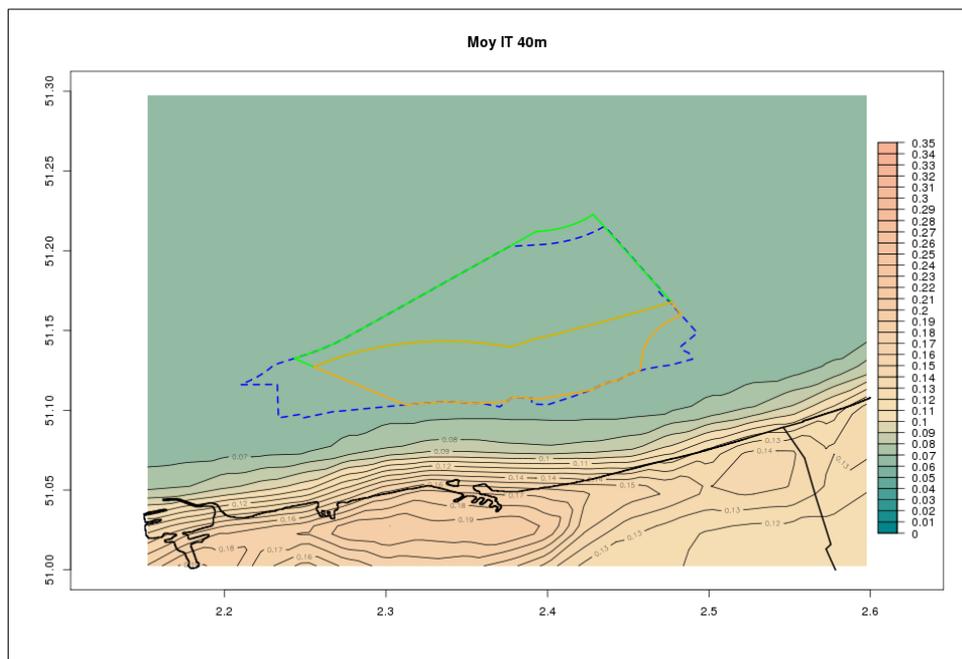




**METEO  
FRANCE**

# Analyse des risques de turbulence atmosphérique

Lot 3



Version 1.0 du 14/02/2017

<b>Client :</b> Pour la Direction Générale Énergie Air et Climat du Ministère de l'Environnement de l'Énergie et de la Mer	@ <a href="mailto:sakina.mouhamad@developpement-durable.gouv.fr">sakina.mouhamad@developpement-durable.gouv.fr</a> ☎ +33 1 40 81 96 97	 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer
--	---	--

<b>Correspondant commercial :</b> Météo-France, D2C, Toulouse	@ <a href="mailto:christophe.periard@meteo.fr">christophe.periard@meteo.fr</a> ☎ + 33 5 61 07 80 81	
<b>Responsable technique :</b> Météo-France, DIR Sud-Ouest, Bordeaux	@ <a href="mailto:nathalie.bargerie@meteo.fr">nathalie.bargerie@meteo.fr</a> ☎ +33 5 57 29 12 21	

- page laissée intentionnellement vide -

## RÉSUMÉ

L'objectif de ce lot 3 est d'étudier la **turbulence atmosphérique** dans le cadre d'une problématique d'éolien off-shore. 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.

Le **domaine couvert** par cette étude est **l'ensemble des zones littorales de la Mer du Nord, de la Manche et de l'Atlantique** avec une **analyse plus approfondie pour la zone de Dunkerque**, zone sur laquelle un projet d'implantation d'éoliennes off-shore est prévu.

Suite à une **revue bibliographique** et une réunion en septembre 2016 pilotée par la DGEC avec les porteurs de projets d'éoliens, les diagnostics les plus adaptés à l'évaluation de la turbulence atmosphérique ont été identifiés. Ces **indicateurs de turbulence** sont **l'intensité de turbulence, la rafale à 100 m** ainsi que **l'exposant  $\alpha$  du cisaillement de vent**.

Ces **diagnostics de la turbulence fournis** dans le cadre de ce lot sont **calculés à partir de données horaires du modèle météorologique AROME à la résolution horizontale 0.025° (2.5 km)** sur la période **2000-2015**, permettant de disposer d'un jeu de données dense sur la zone étudiée.

Pour l'intensité de la turbulence et la rafale à 100 m, une **phase préliminaire et non négligeable** a été la **détermination de formules** permettant de calculer à partir des données AROME des diagnostics comparables pour ces grandeurs à ceux issus de données observées. Le choix **des formules pour le calcul de ces indicateurs de turbulence** a été opéré **en fonction de la qualité des résultats issus de l'application de ces formules comparés à des mesures de vent à disposition** ainsi que **des orientations obtenues au cours de la recherche bibliographique**. Une des difficultés de cet exercice de validation est de disposer de données de vent en altitude, et qui plus est sur mer.

Des informations relatives à la turbulence atmosphérique et aux données AROME utilisées pour calculer les indicateurs de turbulence retenus sont fournies. Une fois définie 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 comparaison réalisée pour quelques points de mesures entre les **intensités de turbulence** calculées à partir de l'énergie cinétique turbulente et de la force de vent issues d'AROME aux séries observées de cet indicateur **montre une bonne concordance au niveau de la répartition quotidienne et mensuelle** et globalement **des distributions des séries assez proches**. Il est toutefois à noter que les **séries des données d'intensités de turbulence issues des calculs avec AROME** présentent une **légère sous-estimation** par rapport aux séries des données

observées. Pour la zone de Dunkerque, la moyenne et le quantile Q90 des intensités de turbulence aux niveaux 40, 100 et 160 m sont calculés tous secteurs confondus et par secteurs de direction de 30°. La **diminution de l'intensité de turbulence quand l'altitude augmente** est bien mise en évidence de même qu'une **croissance des intensités de turbulence de la mer vers la terre**.

Pour **les rafales à 100 m, les comparaisons entre les données observées et celles issues de l'utilisation de la base de données AROME** ont montré que **les distributions de ces séries sont très proches, avec une très bonne corrélation entre ces deux sources**, prouvant ainsi que **la formule appliquée permet une estimation tout à fait acceptable de la rafale en altitude**. Pour la zone de Dunkerque, les séries de ces rafales estimées à 100 m permettent d'évaluer la rafale de vent 100 m associée à une durée de retour 50 ans en appliquant un ajustement statistique des valeurs extrêmes.

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.

Sur la zone prévue du projet d'implantation d'éoliennes off-shore, la turbulence atmosphérique caractérisée par l'intensité de la turbulence et l'exposant du cisaillement vertical de la force du vent est un peu plus marquée dans sa partie méridionale mais est nettement moins importante que sur terre.

Les indicateurs de turbulence mis à disposition, que ce soit l'intensité de turbulence, les rafales à 100 m, l'exposant du cisaillement de vent, permettent ainsi d'accéder à une estimation et une climatologie de la turbulence atmosphérique sur le domaine couvert par cette étude.

## Table des matières

1	Contexte de l'étude.....	11
2	Notions de turbulence atmosphérique.....	12
2.1	Qu'est-ce que la turbulence ?.....	12
2.2	L'atmosphère : un milieu turbulent.....	12
2.3	La Couche Limite Atmosphérique.....	13
2.3.1	Mécanisme de la Couche Limite Atmosphérique.....	13
2.3.2	Évolution diurne de la Couche Limite Atmosphérique.....	14
2.4	Le vent dans la CLA.....	15
2.4.1	Analyse spectrale de la force du vent.....	15
2.4.2	Profil vertical du vent moyen.....	16
2.5	L'énergie cinétique turbulente.....	17
2.6	Quels diagnostics de la turbulence utiliser ?.....	18
3	Utilisation de données AROME pour diagnostiquer la turbulence.....	19
3.1	La base de données issues d'AROME.....	19
3.2	Le schéma de turbulence dans AROME.....	21
3.3	La TKE dans AROME.....	22
3.3.1	Calcul et évaluation de la TKE.....	22
3.3.2	La TKE sur mer.....	23
3.4	Le vent dans AROME.....	24
3.4.1	Évaluation du vent moyen dans AROME.....	24
3.4.2	La rafale de vent dans AROME.....	24
4	Diagnostics de la turbulence et méthodologie de calculs.....	25
4.1	Intensité de turbulence.....	25
4.2	Rafale à 100 m.....	30
4.2.1	Formule d'estimation de la rafale à 100 m.....	30
4.2.2	Rafale cinquantennale à 100 m.....	33
4.3	Exposant du cisaillement de vent ( $\alpha$ ).....	35
5	Résultats des diagnostics de la turbulence.....	36
5.1	Pour la zone de Dunkerque.....	36
5.1.1	Intensité de turbulence.....	36
5.1.2	Rafale à 100 m.....	51
5.1.3	Exposant du cisaillement de vent ( $\alpha$ ).....	54
5.2	Pour la bande littorale.....	64
5.2.1	Intensité de turbulence.....	64
5.2.2	Rafale à 100 m.....	66
5.2.3	Exposant du cisaillement de vent ( $\alpha$ ).....	68
6	Incertitudes associées aux données fournies.....	70
6.1	Incertitude sur les intensités de turbulence estimées.....	70
6.2	Incertitude sur l'estimation des rafales.....	70
6.3	Limites du calcul des durées de retour des rafales cinquantennales.....	71
6.4	Incertitudes associées au coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent.....	72
7	Conclusion.....	73
8	Remerciements pour la mise à disposition de données.....	76
9	Bibliographie.....	76

## Index des illustrations

Illustration 1 : décomposition d'un écoulement turbulent (source Seigneur C., Cours SGE, Modélisation de la pollution atmosphérique, Dynamique, Cerea).....	13
Illustration 2 : profil moyen journalier de hauteurs de couche limite atmosphérique calculées à partir d'AROME réseau 00H pour le site de Bordeaux-Mérignac, sur la période du 01/07/2012 au 30/07/2013, source CNRM, Météo-France. Le calcul est issu d'une méthode basée sur le dépassement d'une valeur critique du nombre « bulk » de Richardson afin d'en déduire des hauteurs de la couche limite. C'est la même méthode qui est appliquée pour les données modèle et les données d'observation du radiosondage...	15
Illustration 3 : spectre de densité de puissance représentative de la vitesse horizontale du vent à 100 m au-dessus du sol d'après Van der Hoven (1957).....	16
Illustration 4 : schéma de la cascade d'énergie.....	17
Illustration 5 : domaine France couvert par AROME.....	20
Illustration 6 : profils verticaux de l'énergie cinétique turbulente issue d'AROME (lignes pleines) et d'ARPEGE (lignes en pointillés) de 1200 à 1800 UTC avec observations disponibles, source article « Boundary-layer turbulent processes and mesoscale variability represented by Numerical Weather Prediction models during the BLLAST campaign », Couvreur et al.....	23
Illustration 7 : comparaison des intensités de turbulence entre données observées et calculées à partir de la formule retenue appliquée aux données AROME au niveau de l'évolution diurne, mensuelle, de l'histogramme aux niveaux 80 m, 100 m pour un mât en mer sur une période commune d'un an et demi.....	28
Illustration 8 : comparaison de l'évolution diurne des intensités de turbulence entre données observées (en blanc) et calculées à partir de la formule retenue appliquée aux données AROME (en rose) au niveau 60 m pour un mât sur terre, en région bretonne sur une période commune d'un an et demi.....	29
Illustration 9 : comparaison des rafales entre données observées (en blanc) et estimées à partir de la formule retenue appliquée aux données de vent AROME (en jaune) au niveau de l'évolution diurne, mensuelle, de l'histogramme et corrélation aux niveaux 40 m, 100 m pour un mât en mer sur une période commune d'un an et demi.....	32
Illustration 10 : cartes des moyennes (colonne de gauche) et Q90 (colonne de droite) de l'intensité de turbulence (notée IT dans cette étude) aux niveaux 40 m, 100 m, 160 m tous secteurs confondus pour la zone de Dunkerque, calculées à partir des données AROME (2000-2015).....	38
Illustration 11 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par secteur de direction de 30° pour la zone de Dunkerque, calculées à partir des données AROME (2000-2015).....	40
Illustration 12 : cartes des Q90 de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par secteur de direction de 30° pour la zone de Dunkerque, calculés à partir des données AROME (2000-2015).....	42
Illustration 13 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par secteur de direction de 30° pour la zone de Dunkerque, calculées à partir des données AROME (2000-2015).....	44
Illustration 14 : cartes des Q90 de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par secteur de direction de 30° pour la zone de Dunkerque, calculés à partir des données AROME (2000-2015).....	46
Illustration 15 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par	

secteur de direction de 30° pour la zone de Dunkerque, calculées à partir des données AROME (2000-2015).....	48
Illustration 16 : cartes des Q90 de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par secteur de direction de 30° pour la zone de Dunkerque, calculés à partir des données AROME (2000-2015).....	50
Illustration 17 : carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 100 m pour la zone de Dunkerque, calculés à partir des données AROME (2000-2015) .	52
Illustration 18 : carte des bornes inférieures des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 100 m pour l'intervalle de confiance à 70 % pour la zone de Dunkerque, calculées à partir des données AROME (2000-2015).....	52
Illustration 19 : carte des bornes supérieures des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 100 m pour l'intervalle de confiance à 70 % pour la zone de Dunkerque, calculées à partir des données AROME (2000-2015).....	53
Illustration 20 : 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 Dunkerque, calculé à partir des forces du vent AROME (2000-2015).....	57
Illustration 21 : cartes du coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent pour la couche 40-160 m par secteur de direction de 30° pour la zone de Dunkerque, calculé à partir du profil moyen du vent AROME (2000-2015).....	59
Illustration 22 : cartes du coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent pour la couche 40-100 m par secteur de direction de 30° pour la zone de Dunkerque, calculé à partir du profil moyen du vent AROME (2000-2015).....	61
Illustration 23 : cartes du coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent pour la couche 100-160 m par secteur de direction de 30° pour la zone de Dunkerque, calculé à partir du profil moyen du vent AROME (2000-2015).....	63
Illustration 24 : carte de la moyenne de l'intensité de turbulence au niveau 40 m sur la bande littorale, calculée à partir des données AROME (2000-2015).....	64
Illustration 25 : carte de la moyenne de l'intensité de turbulence au niveau 100 m sur la bande littorale, calculée à partir des données AROME (2000-2015).....	65
Illustration 26 : carte de la moyenne de l'intensité de turbulence au niveau 160 m sur la bande littorale, calculée à partir des données AROME (2000-2015).....	66
Illustration 27 : carte de la moyenne des rafales à 100 m sur la bande littorale, calculée à partir des données AROME (2000-2015).....	67
Illustration 28 : carte du maximum des rafales à 100 m sur la bande littorale, calculé à partir des données AROME (2000-2015).....	68
Illustration 29 : carte du coefficient $\alpha$ de cisaillement de vent pour la couche 40-160 m tous secteurs confondus sur la bande littorale, calculé à partir du profil moyen du vent AROME (2000-2014).....	69

## Index des tableaux

Tableau 1 : coordonnées du domaine et résolution de la grille pour le domaine France couvert par AROME.....	20
Tableau 2 : statistiques descriptives des séries des intensités de turbulence (notées IT dans cette étude) à 80 m et à 100 m observées (première ligne) et estimées à partir de la formule retenue (deuxième ligne) pour un mât en mer sur une période commune d'un an et demi.....	28
Tableau 3 : statistiques descriptives des séries des rafales à 40 m et à 100 m observées (première ligne) et estimées à partir de la formule retenue (deuxième ligne) sur une période d'un an et demi.....	33
Tableau 4 : valeurs de l'exposant $\alpha$ en fonction de la nature du terrain (source <a href="http://eolienne.f4jr.org/vent">http://eolienne.f4jr.org/vent</a> ).....	35
Tableau 5 : récapitulatif de l'ensemble des données et fichiers fournis dans le cadre des présents travaux sur la turbulence atmosphérique.....	75

## Évolutions successives

Référence	Date	Version	Évolution
Analyse des risques de turbulence atmosphérique	14/02/2017	V1.0	Version diffusée à la DGEC

## Signatures

	Nom	Service	Signature
<b>Rédacteur(s)</b>	Gautier C. Pouponneau B.	DIRSO/EC DSM/EC/ECGC	CG BP
<b>Relecteur(s)</b>	Honnert R. Seity Y. Marquet P. Ricard D. Gouget V. Baraer F. Bargerie N.	CNRM/GMAP/PROC CNRM/GMAP/PROC CNRM/GMAP/PROC CNRM/GMME/MESO-NH DCSC/AVH DIRO/EC/D DIRSO/EC/D	RH YS PM DR VG FB NB
<b>Approbateur(s)</b>	Pouponneau B.	DSM/EC/ECGC	BP

## Glossaire

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
<b>CLA</b>	<b>Couche Limite Atmosphérique</b>
<b>GPD</b>	<b>Generalized Pareto Distribution</b>
<b>TKE</b>	<b>Turbulent Kinetic Energy</b>

## 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 **l'ensemble des zones littorales de la Mer du Nord, de la Manche et de l'Atlantique** avec une **analyse plus approfondie pour la zone de Dunkerque**, 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 **revue bibliographique** a été conduite afin d'identifier les diagnostics les plus adaptés à l'évaluation de la turbulence atmosphérique, ceci dans un 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° (2.5 km) sur la période 2000-2015** (profondeur de 16 ans).

Le **choix de certaines formules pour le calcul de ces indicateurs de turbulence** a été déterminé **en fonction de la qualité des résultats issus de l'application de ces formules sur des mesures à disposition** (mâts et données lidar) et **des orientations obtenues au cours de la recherche bibliographique**.

Ce rapport présente en première partie des informations générales sur la turbulence atmosphérique issues d'une revue bibliographique puis en deuxième partie les données AROME utilisées pour calculer les indicateurs de turbulence retenus. En troisième partie, les éléments de méthodologie pour le calcul des indicateurs de turbulence sont présentés et sont suivis des principaux résultats obtenus 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 ascii est fourni contenant les données des diagnostics de turbulence calculés.

## 2 Notions de turbulence atmosphérique

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

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

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

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

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

### 2.2 L'atmosphère : un milieu turbulent

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

**L'atmosphère est un milieu avec un écoulement turbulent**. Dans un écoulement turbulent, on a coutume de découper la variable, par exemple la vitesse du vent notée ici  $U$ , en deux composantes qui sont les suivantes (voir illustration 1) :

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

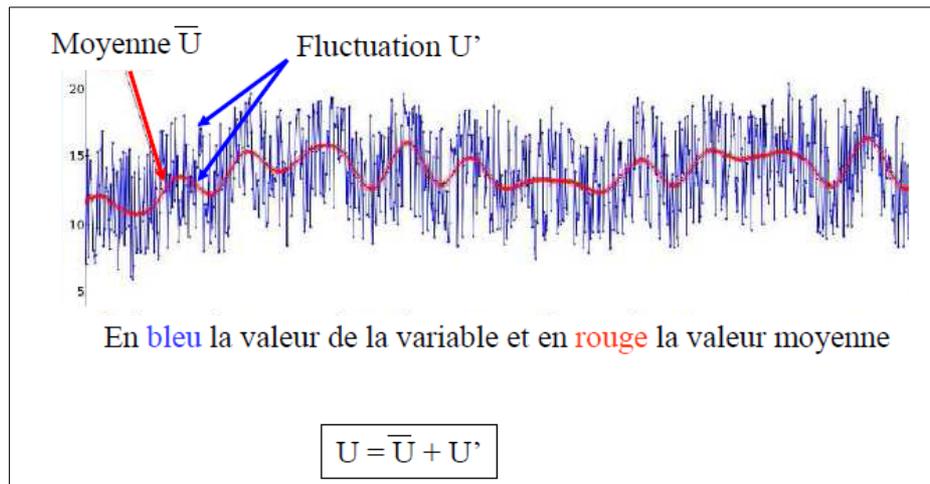


Illustration 1 : décomposition d'un écoulement turbulent (source Seigneur C., Cours SGE, Modélisation de la pollution atmosphérique, Dynamique, Cerea)

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

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

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

La Couche Limite Atmosphérique est détaillée dans le paragraphe suivant.

## 2.3 La Couche Limite Atmosphérique

### 2.3.1 Mécanisme de la Couche Limite Atmosphérique

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

D'un point de vue dynamique, **la Couche Limite Atmosphérique** est définie comme étant la **zone de l'atmosphère dans laquelle l'écoulement du fluide est influencé directement par**

**l'interaction avec la surface terrestre.** Le temps de réponse à un forçage (qui peut être dû à la rugosité, au relief, à l'évaporation, au transfert de chaleur, etc.) est court, de l'ordre de l'heure.

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

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

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

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

### 2.3.2 Évolution diurne de la Couche Limite Atmosphérique

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

**La hauteur de la CLA présente une évolution diurne** (voir illustration 2). En journée, le sol réchauffe la CLA par transfert turbulent, provoquant un épaissement de la CLA l'après-midi. Le soir, avec le refroidissement du sol, il y a destruction de la turbulence d'origine thermique. La nuit, le mélange turbulent est faible et la CLA diminue et devient mince (stratification stable).

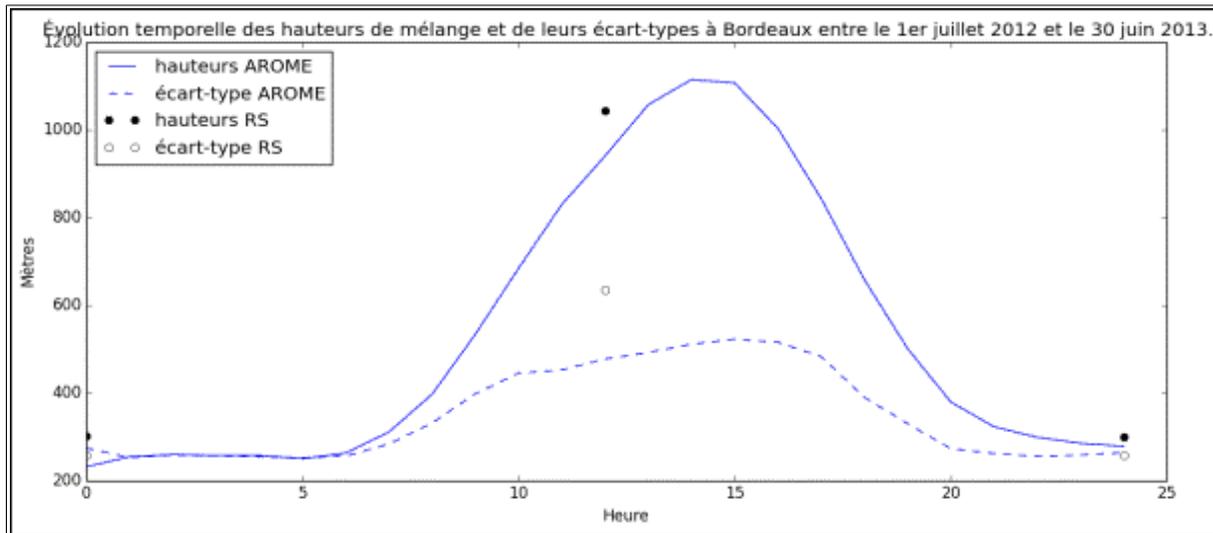


Illustration 2 : profil moyen journalier de hauteurs de couche limite atmosphérique calculées à partir d'AROME réseau 00H pour le site de Bordeaux-Mérignac, sur la période du 01/07/2012 au 30/07/2013, source CNRM, Météo-France. Le calcul est issu d'une méthode basée sur le dépassement d'une valeur critique du nombre « bulk » de Richardson afin d'en déduire des hauteurs de la couche limite. C'est la même méthode qui est appliquée pour les données modèle et les données d'observation du radiosondage.

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

## 2.4 Le vent dans la CLA

### 2.4.1 Analyse spectrale de la force du vent

Dans la Couche Limite Atmosphérique, l'analyse spectrale de la vitesse du vent permet de mettre en évidence plusieurs échelles temporelles de fluctuation (voir illustration 3).

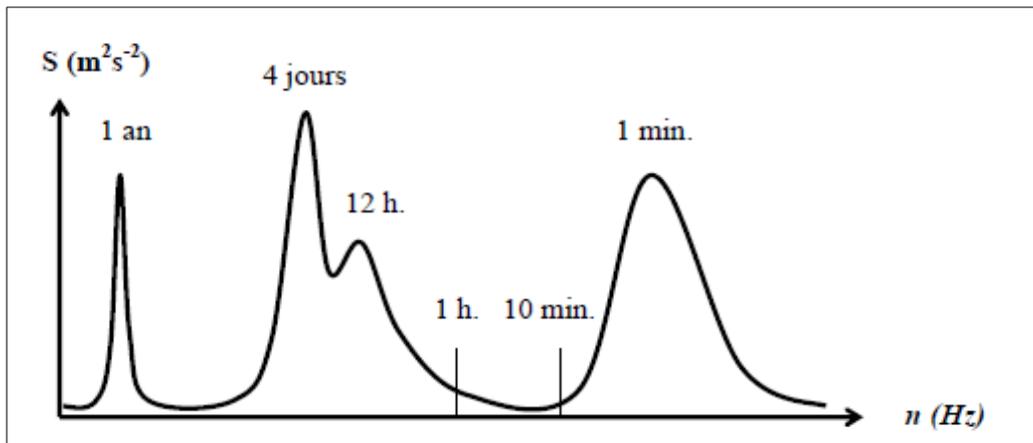


Illustration 3 : spectre de densité de puissance représentative de la vitesse horizontale du vent à 100 m au-dessus du sol d'après Van der Hoven (1957)

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

## 2.4.2 Profil vertical du vent moyen

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

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

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

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

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

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

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

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

Cette **grandeur  $\alpha$**  correspond au **coefficient de cisaillement vertical de la force du vent**. Il en est question plus loin dans ce document (voir paragraphes 4.3, 5.1.3, 5.2.3) car il peut être utilisé comme un indicateur de la turbulence atmosphérique.

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

## 2.5 L'énergie cinétique turbulente

**L'énergie cinétique turbulente provient de l'énergie cinétique du mouvement moyen.** Le transfert de l'énergie cinétique dans un écoulement turbulent se fait de l'écoulement moyen vers les mouvements turbulents (tourbillons ou « eddies »). Ce **transfert d'énergie** se fait via une **cascade d'énergie des grands ou gros tourbillons (fluctuations) vers les plus petits tourbillons**, jusqu'à dissipation de l'énergie cinétique turbulente en chaleur (énergie cinétique moléculaire). Cette cascade de l'énergie (voir illustration 4) est ainsi décrite par L.F. Richardson en ces termes en 1922 : « Big whirls have little whirls that feed on their velocity and little whirls have lessler whirls and so on to viscosity in the molecular sense. »

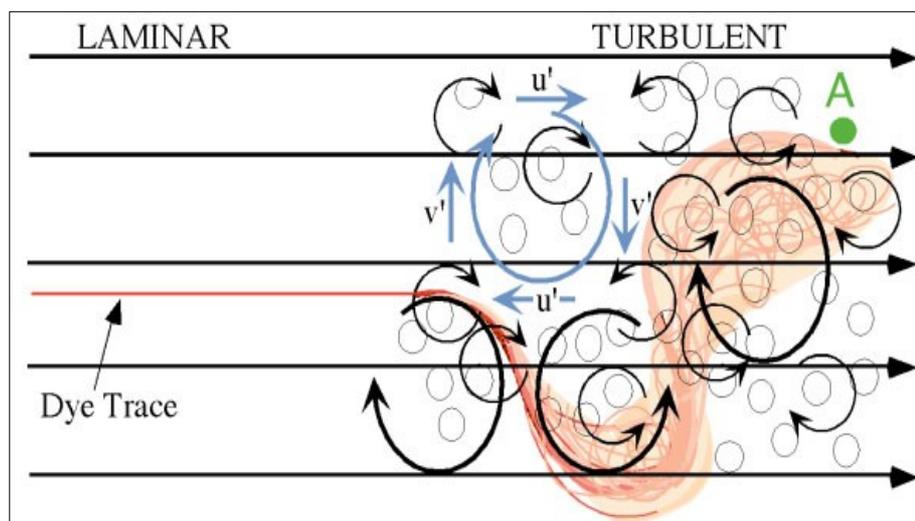


Illustration 4 : schéma de la cascade d'énergie

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## 2.6 Quels diagnostics de la turbulence utiliser ?

La CLA peut être caractérisée et la turbulence évaluée en calculant différents diagnostics. En première approche, ces diagnostics possibles sont par exemple le nombre de Richardson de gradient Ri, le gradient vertical du vent, l'énergie cinétique turbulente ou le vent maximum via la rafale.

**Le nombre de Richardson** de gradient Ri est un critère de stratification thermique. Si la couche est instable, Ri est négatif alors qu'en couche stable (configuration nuit claire ou peu après le coucher du soleil ou peu après le lever du soleil), Ri est positif ; Ri nul correspond à une couche neutre (couverture nuageuse importante sur mer, turbulence uniquement d'origine dynamique).

En matière de **cisaillements de vent**, plutôt que ce nombre de Richardson qui se réduit à la prise en compte de l'aspect thermique, l'accès à des gradients verticaux de vent est plus pertinent. En

couche stable, le gradient vertical du vent est plus fort qu'en couche instable.

Quant à la **TKE**, c'est un indicateur pertinent pour le diagnostic de la turbulence atmosphérique, car elle prend bien en compte la contribution thermique et également dynamique. On verra par la suite que c'est une grandeur qui va intervenir dans certains indicateurs de turbulence calculés et évalués.

Quand on s'intéresse à la turbulence atmosphérique, recourir aux **rafales de vent** est aussi un indicateur pertinent. En effet, une rafale de vent, étant un extrême de la variation de vitesse de vent sur un intervalle de temps, est une mesure statistique de la turbulence atmosphérique [ Wichers Schreur B., Geertsema G., 2008].

De plus, dans le monde de l'éolien, la turbulence atmosphérique est souvent caractérisée par une grandeur dénommée **intensité de la turbulence** et qui est détaillée plus loin, dans le paragraphe 4.1.

Dans la publication Evaluation of Site-Specific Wind Conditions du MEASNET, nous pouvons noter que l'**intensité de turbulence** (page 32), le **coefficient exposant du cisaillement de vent** (page 33) et les **vents maximums** (via la durée de retour 50 ans, page 26 -27 et 33) sont mentionnés. Certains de ces indicateurs de la turbulence sont aussi indiqués dans l'article de Peña A. et al. intitulé Ten Years of Boundary-Layer and Wind-Power Meteorology at Høvsøre, Denmark.

Aussi, pour caractériser la turbulence, suite à la revue bibliographique effectuée et à la réunion du 15 septembre 2016 pilotée par la DGEC avec les porteurs de projets d'éoliens, plusieurs diagnostics ont été retenus.

**Les diagnostics de la turbulence atmosphérique qui ont été retenus et calculés dans le cadre de ce lot sont :**

- l'intensité de turbulence,
- la rafale à 100 m,
- l'exposant  $\alpha$  du cisaillement de vent.

## 3 Utilisation de données AROME pour diagnostiquer la turbulence

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

L'analyse de la turbulence réalisée dans le cadre de cette étude s'appuie sur une évaluation de la turbulence atmosphérique à partir de données modélisées par AROME à la résolution horizontale 0.025° (2.5 km) au pas de temps horaire sur une profondeur de 16 ans (période 2000-2015).

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

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

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

La base de données AROME de 16 ans (2000-2015) est disponible sur le domaine France élargie (voir tableau 1 et illustration 5) au pas de temps horaire. Cette base de données a été constituée à partir d'un rejeu du modèle sur la période 2000-2009 complété par les données de la production opérationnelle AROME sur la période 2010-2015. La partie rejeu a été construite par descente dynamique d'échelle à partir de la réanalyse ERA-INTERIM du Centre Européen de Prévision et d'un modèle intermédiaire (ALADIN à la résolution horizontale de 15 km) avec application d'une analyse de surface intégrant des observations de surface. Lors de la constitution de cette base de données, une phase de vérification d'absence de rupture d'homogénéité liée à l'usage de ces deux sources différentes a été effectuée et les données de vent issues d'AROME (rejeu + partie opérationnelle) ont été comparées à des données de sodar sur terre aux niveaux verticaux 50, 100, 150 m avec calculs des critères des roses de vent.

Grille	Nb de lignes	Nb de colonnes	Latitude minimale	Longitude minimale	Latitude maximale	Longitude maximale	Pas en latitude	Pas en longitude
<b>FRANGP 0025</b>	421	661	41°N	6°W	51.5°N	10.5°E	0.025°	0.025°

Tableau 1 : coordonnées du domaine et résolution de la grille pour le domaine France couvert par AROME

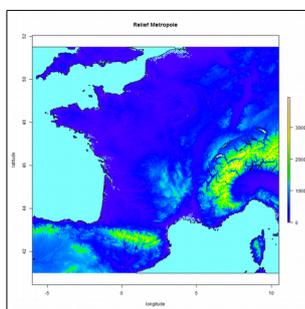


Illustration 5 : domaine France couvert par AROME

Le pas de temps de calcul du modèle AROME est de 60 secondes et ses sorties sont au pas de temps horaire.

## 3.2 Le schéma de turbulence dans AROME

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

Pour paramétrer la turbulence, AROME à 2.5 km de résolution horizontale utilise un **schéma de turbulence 1D** ; cela signifie que, dans AROME, le schéma repose sur l'hypothèse que les échanges se font verticalement et donc par simplification uniquement en 1D sur la colonne verticale et que les flux turbulents horizontaux sont négligés.

En dessous de 500 m de résolution, un schéma 3D est recommandé (Honnert R. et Masson V., 2014). Pour une résolution entre 2 km et 500 m, on est dans ce qu'on appelle la zone grise de la turbulence. La zone grise correspond à la frontière entre une turbulence entièrement paramétrée (comme dans AROME) et une turbulence très majoritairement résolue (comme dans des modèles d'échelle fine dits LES (Large-Eddy Simulations)) : une partie de la turbulence est résolue et une partie doit être paramétrée ; la partie dynamique résout des termes explicitement, mais on a encore besoin de paramétrisation. Au vu des caractéristiques de la couche limite marine considérée dans cette étude, le modèle AROME à 2.5 km de résolution horizontale se situe en dehors de la zone grise de la turbulence et sa paramétrisation de la turbulence est adaptée (Honnert R. et al., 2011).

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

Les échelles spatiales (résolution effective) pleinement résolues par le modèle AROME 2.5 km correspondent à des échelles au moins égales à six à neuf fois la taille de la résolution de la maille, AROME étant un modèle spectral avec advection semi-lagrangienne. Le schéma de turbulence permet de représenter de façon paramétrique (1D) la turbulence non résolue d'échelle inférieure (représentation dite sous-maille).

## 3.3 La TKE dans AROME

### 3.3.1 Calcul et évaluation de la TKE

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

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

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

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

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

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

La **TKE est surtout active la journée** avec une décroissance de la TKE au fur et à mesure de l'après-midi (voir illustration 6 suite à la campagne BLLAST).

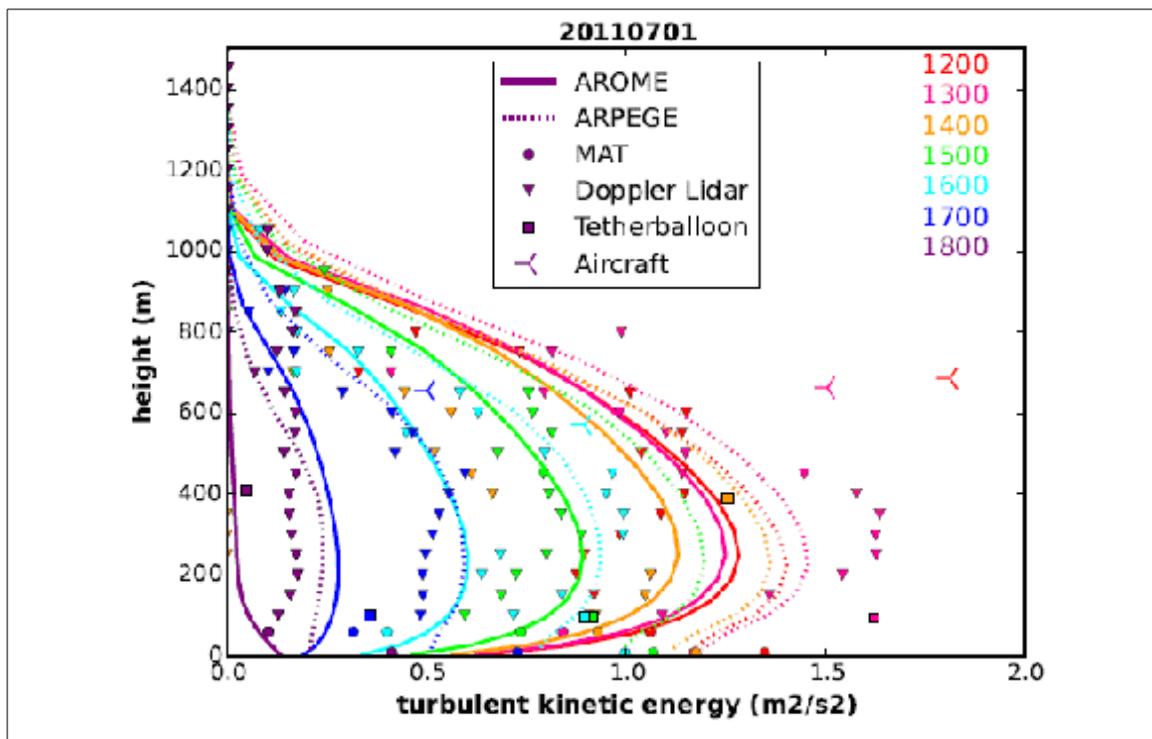


Illustration 6 : profils verticaux de l'énergie cinétique turbulente issue d'AROME (lignes pleines) et d'ARPEGE (lignes en pointillés) de 1200 à 1800 UTC avec observations disponibles, source article « Boundary-layer turbulent processes and mesoscale variability represented by Numerical Weather Prediction models during the BLLAST campaign », Couvreur et al.

### 3.3.2 La TKE sur mer

La problématique de la turbulence sur mer est spécifique par rapport à celle sur terre, dans le sens où **sur mer, il y a moins de frottement** ; ainsi, la couche limite est moins développée verticalement que sur terre (se situant plutôt dans les 400 m au-dessus de la mer). Autrement dit, la hauteur de la CLA (point d'annulation des courbes de TKE, visible sur la figure 6 à l'intersection avec l'axe des ordonnées) sera plus basse. Sur mer, **la TKE est globalement moins forte que sur terre** (les courbes sur la figure 6 seraient ainsi plus décalées vers la gauche dans le cas de profils sur mer) et **le cycle diurne de la TKE est moins marqué**.

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

## 3.4 Le vent dans AROME

### 3.4.1 Évaluation du vent moyen dans AROME

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

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

Actuellement, une surestimation du vent dans les basses couches est observée lors de phénomènes de convection avec un air très sec près de la surface alors qu'en situation d'Autan ou de Mistral, AROME a tendance à sous-estimer les rafales. Les brises côtières sont assez bien vues par AROME avec la prise en compte des contrastes thermiques. La bonne représentation des brises côtières par AROME est à mentionner ici d'autant plus que la zone de Dunkerque concernée par cette présente étude est soumise à ce régime de brise (voir rapport du Lot 1 sur « Analyse du risque décennal des forces de vent et des hauteurs de vague sur la zone de Dunkerque », paragraphe 4.1.4 sur le phénomène de brise à Dunkerque).

### 3.4.2 La rafale de vent dans AROME

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

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

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

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

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

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

$$RAF_{10m} = FF_{10m} + 3.5 * \sqrt{TKE_{20m}}$$

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

La valeur du coefficient multiplicateur (3.5 pour AROME) est adaptée au modèle météorologique de prévision.

## 4 Diagnostics de la turbulence et méthodologie de calculs

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

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

- intensité de turbulence,
- rafale à 100 m,
- coefficient  $\alpha$  correspond à l'exposant du cisaillement de vent.

Pour la zone de Dunkerque, l'intensité de turbulence et le coefficient  $\alpha$  sont calculés par classes de secteurs de 30°.

### 4.1 Intensité de turbulence

Dans différents articles (par exemple celui de Ben Wichers Schreur and Gertie Geertsema intitulé « Theory for a TKE based parameterization of wind gusts », page 181 ou bien dans le livre intitulé « Wind Resource Assessment and Micro-siting » de Zhang page 95), l'intensité de turbulence

est le plus souvent définie comme étant **le rapport de l'écart-type de la force du vent sur la force du vent moyen.**

Ainsi, à partir de données observées de vent comportant l'écart-type de la force du vent 10 minutes et la force du vent moyen 10 minutes, il est possible de calculer l'intensité de turbulence selon la formule :

$$IT_{obs} = \frac{\sigma_{FF_{10min}}}{FF_{10min}}$$

avec  $\sigma_{FF_{10min}}$  l'écart-type de  $FF_{10min}$  et  $FF_{10min}$  la force moyenne du vent 10 minutes.

**L'intensité de turbulence** est un nombre sans dimension ; elle **décroit avec la hauteur** étant donné que la vitesse moyenne du vent croît avec la hauteur et que les écarts-types, quant à eux, sont quasiment indépendants de la hauteur.

Comme l'indiquent Ben Wichers Schreur and Gertie Geertsema dans l'article intitulé « Theory for a TKE based parameterization of wind gusts », p 184, de manière générale, l'intensité de turbulence modèle est calculable selon la formule suivante :

$$IT_{modele} = \frac{\sqrt{2 * TKE}}{FF}$$

Dans le cadre de cette étude, nous **cherchons à calculer à partir des données AROME** la grandeur **intensité de turbulence selon une formule comparable à celle appliquée à partir de données disponibles au niveau des mâts de mesure.**

On sait que  $TKE_{AROME} = (1/2) * (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)$ . En faisant l'hypothèse, comme le fait AROME, que la turbulence est isotrope, on a  $\sigma_u^2 = \sigma_v^2 = \sigma_w^2 = \sigma_{iso}^2$ , ce qui conduit à :

$$TKE_{AROME} = (1/2) * (3\sigma_{iso}^2) \quad \text{donc } \sigma_{iso}^2 = (2/3) * TKE_{AROME}$$

Or, dans la formule de calcul de l' $IT_{obs}$ , les écarts-types de FF ne prennent en compte que les composantes horizontales u et v du vent. Aussi, on a la formule :

$$TKE_{obs\ hori} = (1/2) * (\sigma_u^2 + \sigma_v^2)$$

$$\text{donc } TKE_{obs\ hori} = (1/2) * (2\sigma_{iso}^2) \text{ selon l'hypothèse d'isotropie.}$$

Aussi,  $TKE_{obs\ hori} = \sigma_{iso}^2$

$$\text{et donc } TKE_{obs\ hori} = (2/3) * TKE_{AROME}$$

Aussi, à niveau d'altitude donné, **l'intensité de turbulence est calculable à partir des données de TKE et de FF d'AROME à ce niveau, en utilisant la formule de calcul suivante :**

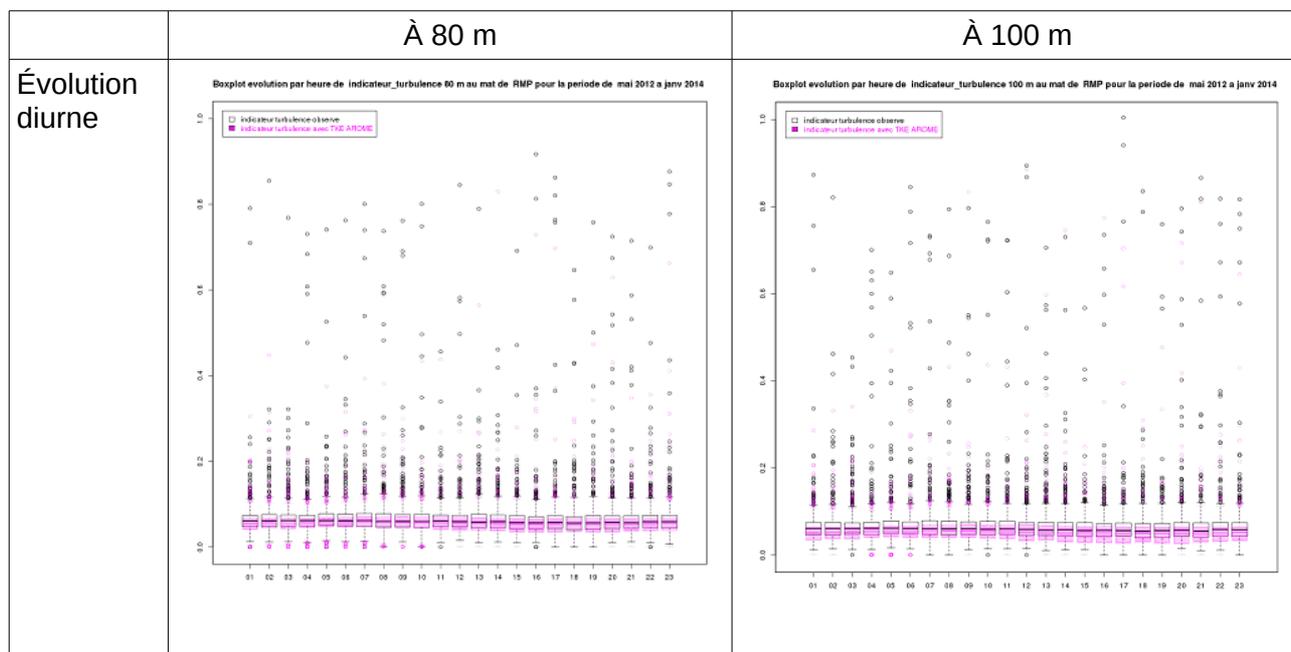
$$IT_{AROME} = \frac{\sqrt{2 * (2/3) * TKE_{AROME}}}{FF_{AROME}}$$

Avant de procéder aux calculs massifs d'intensité de turbulence à partir de cette formule, nous l'avons **validée en quelques points d'observation, en comparant les données d'intensité de turbulence ainsi obtenues à des données observées**. À signaler qu'une des difficultés rencontrées pour la phase de validation de cette formule est le peu d'observations de vent disponibles en altitude et qui plus est en mer.

**Les résultats de la validation** montrent que cette formule de l'intensité de turbulence calculée à partir des données AROME **permet d'accéder à un diagnostic intensité de turbulence comparable à celui obtenu à partir d'observations**.

Nous avons ainsi vérifié que **ce diagnostic est apte à restituer les cycles diurne et mensuel** de la distribution des intensités de turbulence du modèle AROME comparés aux cycles des intensités de turbulence observées en certains points où nous disposons de mesures de vent en altitude (écart-type de vent et force du vent au pas de temps 10 minutes étant nécessaires pour le calcul de l'intensité de turbulence observée).

Pour illustrer cette validation, quelques résultats comparant les données observées et les intensités de turbulence estimées à partir des données AROME sont fournis ci-dessous (voir illustration 7 et tableau 2) pour un mât situé en mer au sud des côtes anglaises disposant de données observées de vent aux niveaux 80 et 100 m sur une période d'un an et demi.



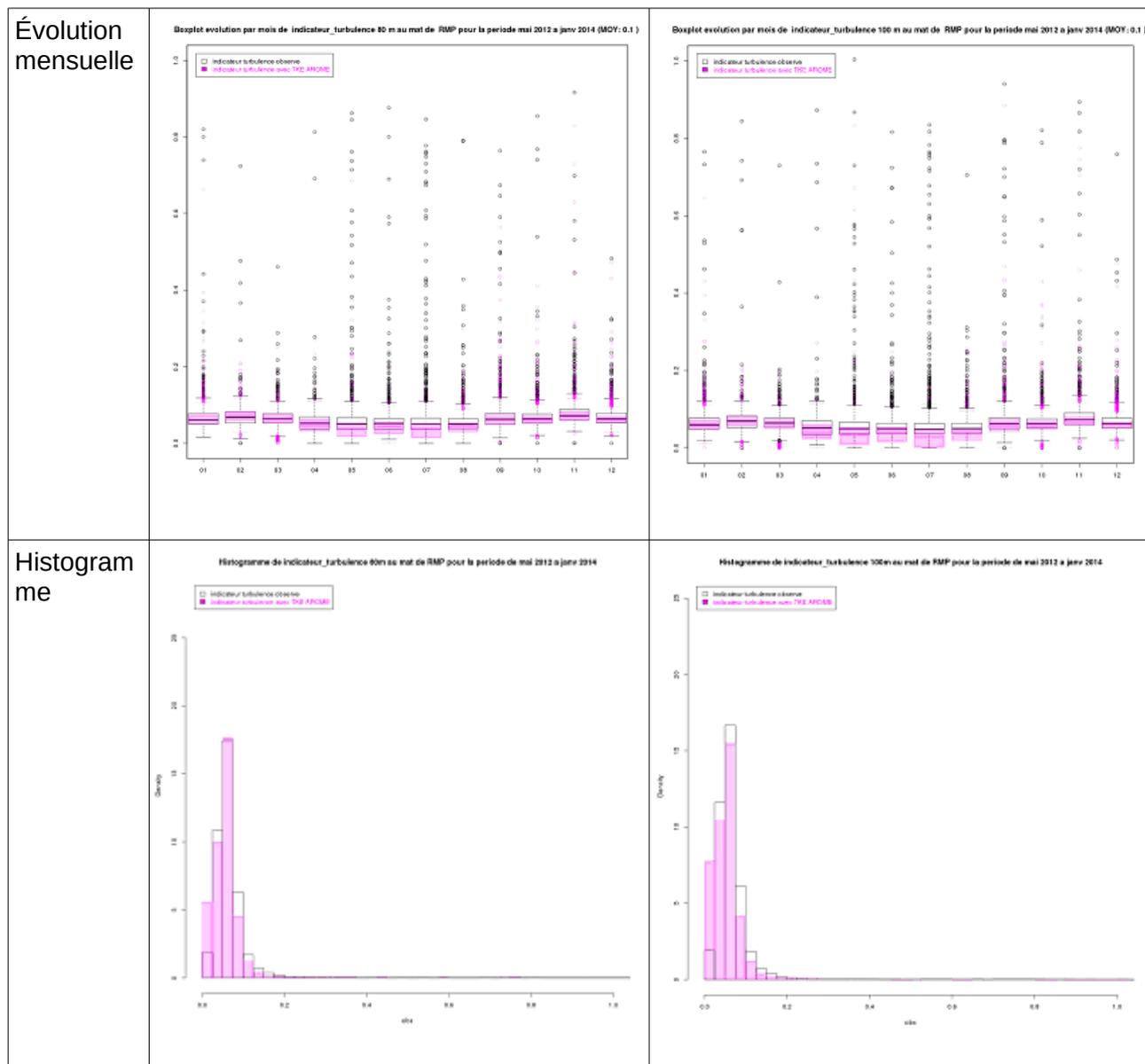


Illustration 7 : comparaison des intensités de turbulence entre données observées et calculées à partir de la formule retenue appliquée aux données AROME au niveau de l'évolution diurne, mensuelle, de l'histogramme aux niveaux 80 m, 100 m pour un mât en mer sur une période commune d'un an et demi

À 80 m	Moy de l'IT	Q25 de l'IT	Q50 de l'IT	Q75 de l'IT	Q90 de l'IT
Obs (84 m)	0.067	0.046	0.059	0.075	0.096
Mod (80 m)	0.057	0.041	0.055	0.068	0.085

À 100 m	Moy de l'IT	Q25 de l'IT	Q50 de l'IT	Q75 de l'IT	Q90 de l'IT
Obs (105 m)	0.067	0.045	0.059	0.075	0.098
Mod (100 m)	0.053	0.034	0.052	0.066	0.085

Tableau 2 : statistiques descriptives des séries des intensités de turbulence (notées IT dans cette étude) à 80 m et à 100 m observées (première ligne) et estimées à partir de la formule retenue (deuxième ligne) pour un mât en mer sur une période commune d'un an et demi

Pour ce mât maritime, la comparaison entre données d'intensité de turbulence observées et issues de la modélisation **montre une bonne concordance entre les cycles et des distributions des séries assez proches**. On note toutefois que la **série des données issues des calculs avec AROME** montre une légère **sous-estimation** (environ 10 %) par rapport à la série des données observées pour cette localisation.

**Pour des points maritimes** comme le montrent les illustrations précédentes de l'évolution diurne, **l'intensité de turbulence ne présente pas de cycle diurne** ; ceci est lié à l'évolution diurne de la TKE beaucoup plus limitée sur mer que sur terre. En général, le vent est moins turbulent sur mer que sur terre. Cette turbulence moindre sur mer que sur terre est en premier lieu due au fait que les variations de température entre les différentes altitudes de l'atmosphère sont moins importantes au-dessus de la mer qu'au-dessus de la terre. Les rayons du soleil pénètrent dans la mer de plusieurs mètres, tandis que sur la terre ferme, le rayonnement solaire ne parvient qu'à chauffer la couche supérieure du sol qui devient alors beaucoup plus chaude. Ainsi, les écarts thermiques entre la surface et l'air étant moins importants sur mer que sur terre, la turbulence y est bien plus faible.

Les comparaisons relatives à l'intensité de turbulence entre données observées et données estimées à partir d'AROME réalisées pour **des points terrestres** ont mis en évidence la présence d'un **cycle diurne de l'intensité de la turbulence** sur terre, cycle comparable à celui de la TKE (voir illustration 8).

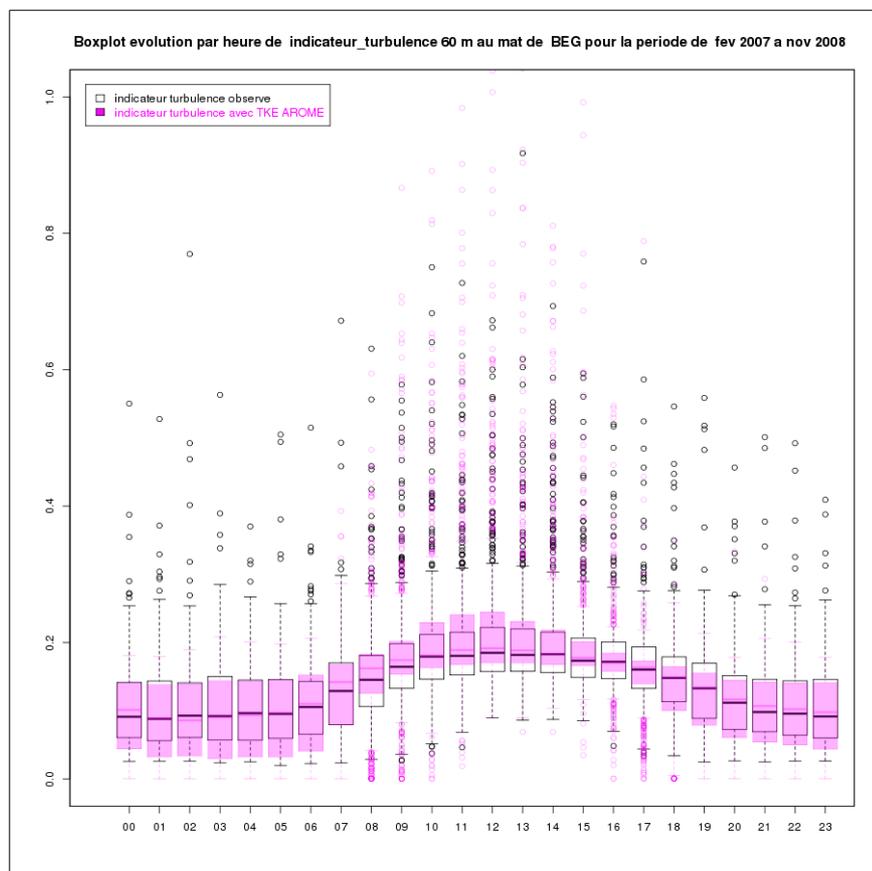


Illustration 8 : comparaison de l'évolution diurne des intensités de turbulence entre données observées (en blanc) et calculées à partir de la formule retenue appliquée aux données AROME (en rose) au niveau 60 m pour un mât sur terre, en région bretonne sur une période commune d'un an et demi

À noter sur ce graphique une bonne cohérence globale entre les cycles diurnes vus par ces deux sources de données avec une légère tendance à une sous-estimation nocturne par les données issues de la modélisation et une surestimation matinale. Les médianes se superposent de manière tout à fait acceptable.

Lors de ces comparaisons effectuées à plusieurs niveaux pour un même point de mesure, il a été observé et vérifié que l'intensité de turbulence diminue lorsque l'altitude augmente. Par ailleurs, la qualité des comparaisons est maintenue.

## 4.2 Rafale à 100 m

### 4.2.1 Formule d'estimation de la rafale à 100 m

En sortie d'AROME, le seul niveau où nous disposons de données de rafales est le niveau 10 m.

La rafale à une altitude supérieure à 10 m n'étant pas disponible dans AROME, nous avons dans le cadre de cette étude **recherché une formule permettant d'accéder à une estimation de la rafale à un niveau d'altitude donné, en l'occurrence pour cette étude 100 m**, niveau correspondant approximativement à la hauteur du moyeu des éoliennes.

Une méthode qui consisterait à chercher à transposer la formule utilisée dans AROME pour le calcul de la rafale à 10 m au niveau 100 m n'est pas possible. En effet, la rafale 10 m dans AROME est calculée selon la formule  $RAF_{10m} = FF_{10m} + 3.5 * \sqrt{TKE_{20m}}$  à chaque pas de temps du modèle une minute, et c'est ensuite le maximum dans l'heure des 60 valeurs de  $RAF_{10m}$  qui correspond au champ rafale 10 m d'AROME. À noter, au passage, que ce choix de calcul a été adopté afin d'être homogène le plus possible à la détermination de la rafale au niveau de l'observation. Nous disposons des sorties AROME sur la période du jeu au pas de temps horaire et non pas au pas de temps une minute, aussi, nous ne pouvons envisager de transposer la formule de calcul de la rafale à 10 m à 100 m.

De fait, pour tenir compte du maximum dans l'heure, la formule de calcul de la rafale à 100 m doit si possible prendre en compte la valeur de la rafale à 10 m.

**Différentes méthodes de calculs de la rafale à 100 m ont été testées.** Comme pour l'intensité de turbulence, une des difficultés pour cet exercice de validation de la formule d'estimation de la rafale en altitude est de disposer d'observations de vent disponibles en altitude et qui plus est en mer.

**Les résultats obtenus des rafales estimées à partir des données d'AROME ont été comparés à des rafales observées.** Les séries des rafales observées étant au pas de temps 10 minutes, les séries des maximums dans l'heure de la rafale ont été construites afin de disposer de séries observées homogènes aux séries des diagnostics des rafales AROME ; ce sont ces séries observées qui ont été comparées aux séries estimées par AROME.

Toutes les formules testées d'estimation de la rafale à 100 m prennent en compte la rafale et le

vent moyen à 10 m ainsi que le vent moyen à 100 m. Certaines formules ajoutent au vent moyen à 100 m la différence entre la rafale à 10 m et le vent moyen à 10 m, différence pondérée ou non par un terme multiplicateur. Parmi ces méthodes, la loi puissance a aussi été testée ainsi qu'une formule plus complexe prenant en compte l'intensité de turbulence.

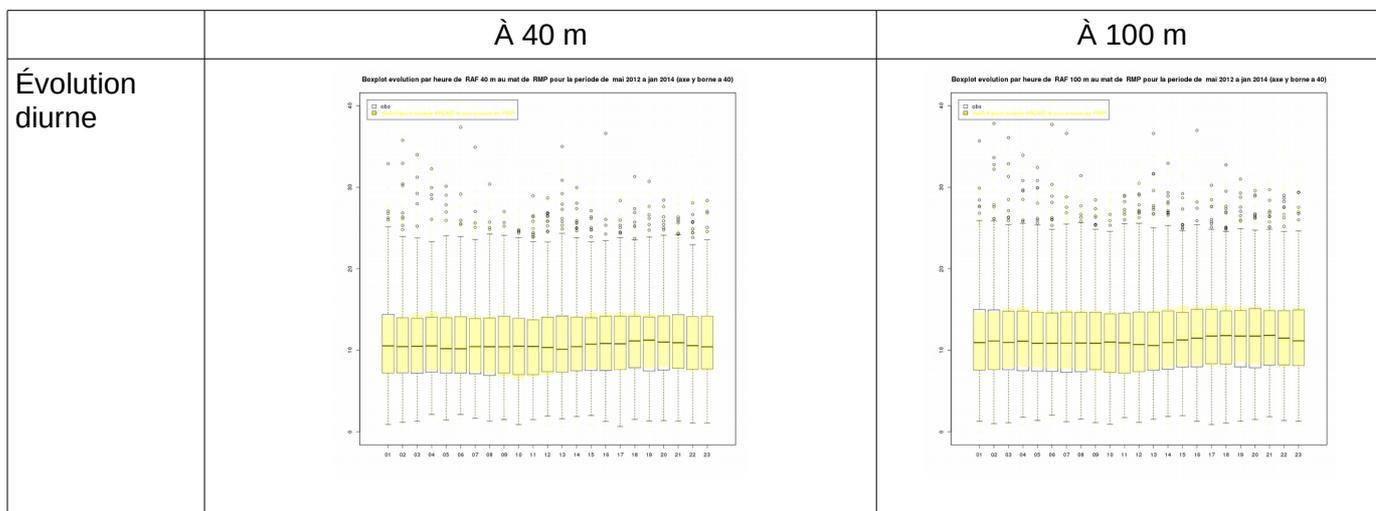
Pour les quelques points d'observations étudiés, les résultats des comparaisons entre les rafales observées en altitude entre 40 et 160 m et les rafales estimées selon ces différentes formules ont mis en avant dans tous les cas la même formule parmi les différentes testées.

Ainsi, ces **comparaisons** nous ont permis de **retenir la formule suivante pour estimer les rafales à 100 m**, qui est :

$$RAF_{100m} = RAF_{10m} - FF_{10m} + FF_{100m}$$

Nous avons vérifié que **ce diagnostic modèle de la rafale à 100 m est apte à restituer les statistiques des rafales horaires à 100 m**, en étudiant **les cycles diurne et mensuel** de la distribution des rafales du modèle AROME comparés aux cycles des rafales observés en certains points où nous disposons de mesures de vent en altitude.

Pour illustrer cette validation, quelques résultats comparant les données observées et les résultats de la formule retenue de la rafale modèle sont fournis ci-dessous (voir illustration 9) pour un mât situé en mer au sud des côtes anglaises disposant de données observées de vent notamment aux niveaux 40 et 100 m sur une période d'un an et demi.



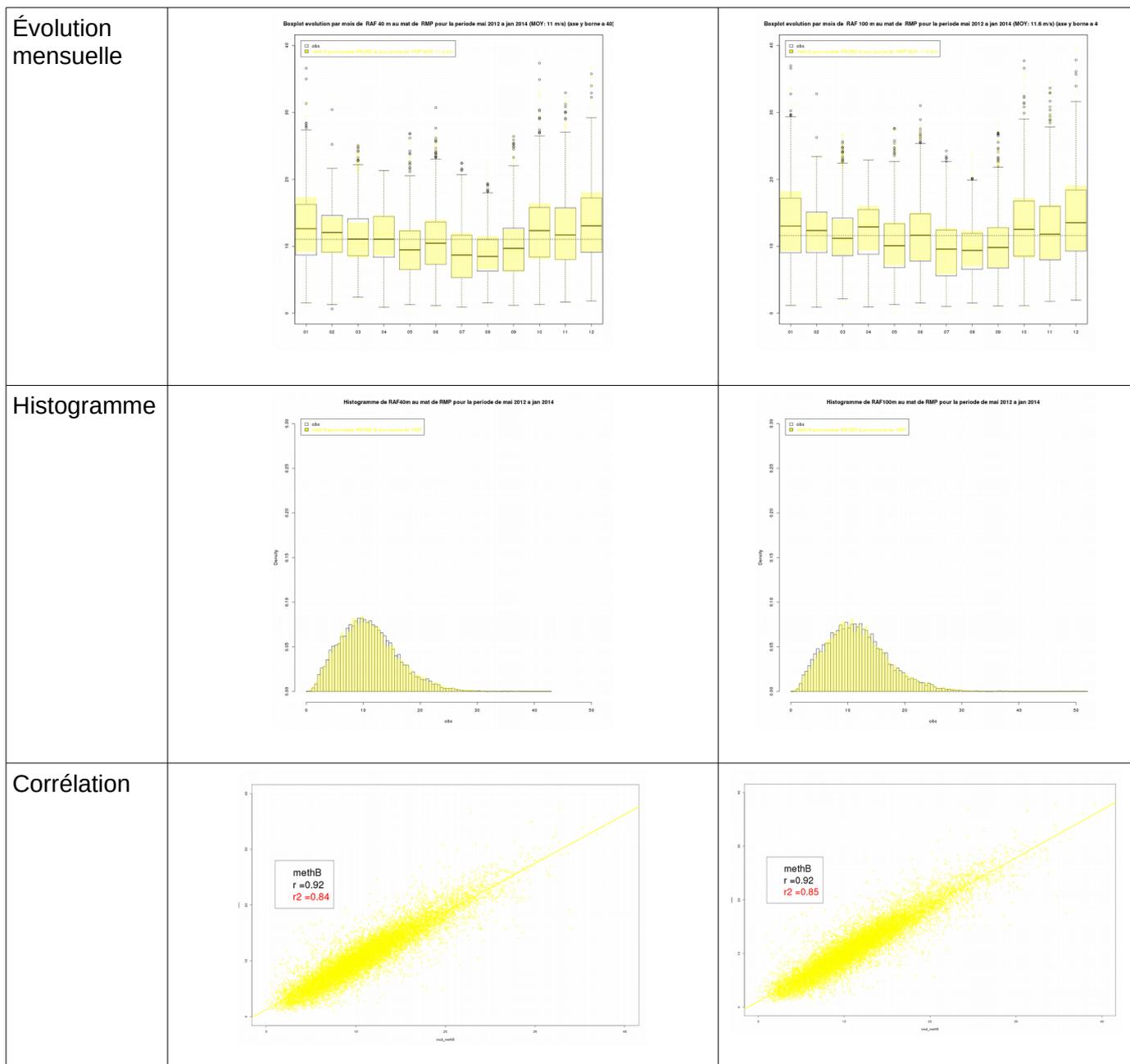


Illustration 9 : comparaison des rafales entre données observées (en blanc) et estimées à partir de la formule retenue appliquée aux données de vent AROME (en jaune) au niveau de l'évolution diurne, mensuelle, de l'histogramme et corrélation aux niveaux 40 m, 100 m pour un mât en mer sur une période commune d'un an et demi

Pour compléter ces graphiques, quelques statistiques descriptives (moyenne et quartiles Q25, Q50, Q75) sont fournies pour ces deux séries comparées (voir tableau 3).

À 40 m	Moy de la rafale m/s	Q25 de la rafale m/s	Q50 de la rafale m/s	Q75 de la rafale m/s
Obs (37 m)	11.0	7.4	10.6	14.1
Mod (40 m)	11.2	7.4	10.6	14.3

À 100 m	Moy de la rafale m/s	Q25 de la rafale m/s	Q50 de la rafale m/s	Q75 de la rafale m/s
Obs (105 m)	11.6	7.7	11.2	14.8
Mod (100 m)	11.8	7.9	11.2	15.1

Tableau 3 : statistiques descriptives des séries des rafales à 40 m et à 100 m observées (première ligne) et estimées à partir de la formule retenue (deuxième ligne) sur une période d'un an et demi

Sur cet exemple, que ce soit pour les séries des rafales observées en altitude ou calculées à partir d'AROME, les rafales augmentent bien quand l'altitude augmente. Ces graphiques et statistiques montrent que **les distributions de ces séries observées ou issues de la modélisation à 40 et 100 m sont très proches**, avec une très bonne corrélation ( $r^2$  de 0.85 à 100 m) entre les séries observées et estimées à partir de la formule retenue appliquée aux données AROME.

Pour les quelques points de mesure étudiés, terrestres ou maritimes, la confrontation des rafales en altitude estimées selon la formule retenue par rapport aux rafales observées conduit à des résultats voisins de ceux ici présentés sur cet exemple avec des  $r^2$  compris entre 0.7 et 0.85, montrant ainsi que **la formule appliquée permet une estimation tout à fait acceptable de la rafale en altitude**.

## 4.2.2 Rafale cinquantennale à 100 m

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

Pour la zone de Dunkerque, pour chaque point de grille, grâce à la formule retenue d'estimation de la rafale à 100 m présentée dans le paragraphe précédent, nous disposons de séries chronologiques horaires de rafales de vent à 100 m entre le 1<sup>er</sup> janvier 2000 et le 31 décembre 2015, soit une période de 16 ans. À partir de ces séries horaires de rafales estimées à 100 m, pour chacun des 247 points de grille de cette zone, les **séries des valeurs maximales quotidiennes des rafales à 100 m** ont été **constituées sur la période 2000-2015**. La durée de cette période (16 ans) est supérieure à la durée de 10 ans minimale nécessaire pour appliquer la méthode de renouvellement utilisée ici, mais elle reste encore assez limitée et les résultats obtenus en termes de rafales cinquantennales à 100 m doivent être pris par conséquent avec précaution.

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

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

À la différence des lois GEV (Generalized Extreme Value), la **loi d'ajustement Pareto Généralisée** ou loi GPD (Generalized Pareto Distribution) qui fait partie des méthodes de renouvellement (aussi appelée méthode « à seuil » utilisant tous les individus supérieurs à un seuil fixé) a pour intérêt de prendre en considération plusieurs maxima annuels et est ainsi bien adaptée aux échantillons assez courts, comme c'est le cas ici. Cette loi utilise tous les individus supérieurs à un seuil pour estimer ses paramètres et les durées de retour. Elle est caractérisée par deux paramètres qui sont le paramètre d'échelle et celui de forme.

Le but de ces méthodes statistiques d'ajustement des valeurs extrêmes est de fournir une information sur les durées de retour ; l'usage est de calculer des quantiles et des intervalles de confiance pour des durées de retour ne dépassant pas deux à quatre fois la taille de l'échantillon ; au-delà, l'incertitude associée aux résultats prend des proportions considérables.

Pour le calcul de la liste des maxima indépendants (c'est-à-dire issus d'épisodes météorologiques indépendants), **nous imposons au moins deux jours d'écart entre deux dates sélectionnées**. La liste des maxima indépendants est donc constituée d'un nombre variable d'événements selon les points de grille, l'intérêt principal de cette sélection est de pouvoir intégrer plusieurs maxima d'une même année.

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

Les calculs de durée de retour nécessitent le choix et l'application d'une loi de distribution ainsi qu'une méthode d'ajustement pour l'estimation des paramètres de la loi. Différentes méthodes d'ajustement existent ; l'ajustement par la méthode du maximum de vraisemblance donne le même poids à tous les éléments de la série et est un choix cohérent pour l'estimation de quantiles sur un large spectre de durées de retour (5 ans, 10 ans, ...) ; pour un travail sur les valeurs extrêmes avec un calcul de durée de retour cinquantennale comme c'est le cas ici, l'ajustement par la méthode des moments est plus efficace. Cette méthode des moments pondérés (ou méthode L-moments) repose sur le principe que certaines statistiques de l'échantillon (moyenne, variance, ...) correspondent à celles des paramètres.

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

Pour chaque point de grille de la zone de Dunkerque, l'échantillon pour les calculs de durée de retour est constitué à partir de l'ensemble des événements de rafales à 100 m quotidiennes supérieurs à un seuil donné. Dans le cas présent, ce seuil est pris à 28 m/s, ce qui permet de conserver en général une moyenne de deux à cinq événements par an. Les calculs des durées de retour se font sur ces échantillons ainsi constitués par point de grille. Pour mettre en œuvre la loi de Pareto, l'échantillon est constitué de valeurs dépassant un certain seuil ; ce seuil correspond au seuil optimal au-dessus duquel la distribution relève de la théorie des valeurs extrêmes. Cette détection du seuil est effectuée de manière automatique selon la méthode « MRLP » (Mean

Residual Life Plot – graphique de la valeur moyenne des restes) en recherchant à partir de quand ce graphe de la valeur moyenne des restes varie linéairement en fonction du seuil. Les quantiles associés à la durée de retour 50 ans sont ensuite calculés pour chaque point de grille par application de la loi d'ajustement Pareto ainsi que les bornes de l'intervalle de confiance à 70 %.

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

Ce paramètre **exposant du cisaillement de vent** (appelé aussi wind shear) est plus facile à calculer à partir des données AROME que les diagnostics précédents (intensité de turbulence et rafale à 100 m) car la formule appliquée aux mesures peut l'être directement aux paramètres correspondants du modèle.

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

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

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

Le coefficient  $\alpha$  de cisaillement vertical de vent **dépend de la rugosité du sol**. C'est un nombre sans dimension qui varie selon la nature du terrain. Dans la littérature, des valeurs standards du coefficient  $\alpha$  sont proposées (voir tableau 4) mais sans que soit précisée la couche verticale associée.

Nature du terrain	Exposant $\alpha$
Plat : neige, glace, mer, marécages, herbes courtes	0.08 à 0.12
Mer	0.13
Peu accidenté : champs et pâturages, cultures	0.13 à 0.16
Rivage	0.16
Plaine	0.20
Accidenté : bois, zones peu habitées	0.20 à 0.23
Plaine boisée	0.24
Très accidenté : villes	0.25 à 0.4

Tableau 4 : valeurs de l'exposant  $\alpha$  en fonction de la nature du terrain (source <http://eolienne.f4jr.org/vent>)

Les sites les plus intéressants pour la production éolienne sont ceux pour lesquels l'exposant  $\alpha$  est faible : cela correspond à des sites peu ou pas accidentés. Dans de tels lieux, les forces du vent près du sol sont élevées et la variation de la vitesse de vent avec l'altitude est faible (les forces de vent en haut et en bas des éoliennes diffèrent peu) ; ainsi, les contraintes cycliques sur les pales des éoliennes sont moins fortes.

## 5 Résultats des diagnostics de la turbulence

### 5.1 Pour la zone de Dunkerque

La géographie physique et océanique de la zone de Dunkerque a été présentée en détail dans le livrable du lot 1 sur « l'Analyse du risque décennal des forces de vent et des hauteurs de vague sur la zone de Dunkerque », paragraphe 2.

La zone de Dunkerque étudiée couvre le domaine allant de 51°N, 2.15 °E (coin sud-ouest du domaine) à 51.3°N, 2.6°E (coin nord-est du domaine) et est représentée par 247 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. Il est à préciser que pour produire ces cartes des interpolations et lissages ont été effectués à partir des données calculées en points de grille. Il est également à noter que, sur ces cartes, figurent les zones prévues d'implantation des éoliennes avec la zone délimitée en pointillés bleus, correspondant à la première zone dont les coordonnées nous ont été fournies ainsi que la zone A délimitée en vert et la zone B délimitée en orange pour lesquelles les coordonnées nous ont été communiquées fin décembre.

#### 5.1.1 Intensité de turbulence

Pour les 247 points de grille AROME de la zone de Dunkerque, les séries des intensités de turbulence sont calculées à un niveau donné selon la formule  $IT_{AROME} = \frac{\sqrt{2 * (2/3) * TKE_{AROME}}}{FF_{AROME}}$ .

Pour **chacun des points de grille de cette zone**, la **moyenne et les valeurs de Q90 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°**. L'intérêt de la connaissance du Q90 a été mentionné par les porteurs de projets d'éoliens lors de la réunion du 15 septembre 2016 pilotée par la DGEC.

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 valeurs extrêmes et donc les Q90. 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.

Ces données sont disponibles dans les fichiers de nom : [Stat\\_IT\\_ZoneDNK\\_Nyy.txt](#), où yy=40 ou 100 ou 160 m.

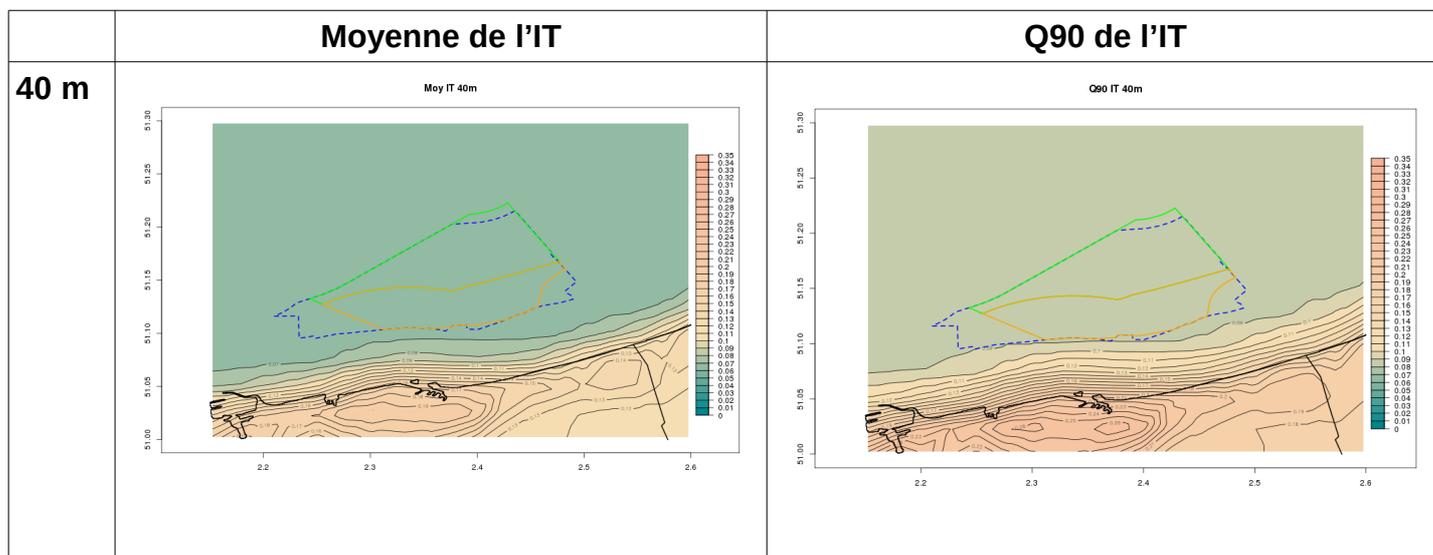
Chacun de ces fichiers (1 par niveau) débute par une ligne entête puis comporte une ligne par point de grille, soit un total de 248 lignes par fichier.

Chacun de ces fichiers comporte 28 colonnes qui sont :

Latitude (en degrés décimaux) Longitude (en degrés décimaux) Moyenne de l'IT tous secteurs confondus (sans unité) Moyenne de l'IT secteur 000 (sans unité) Moyenne de l'IT secteur 030 (sans unité) Moyenne de l'IT secteur 060 (sans unité) Moyenne de l'IT secteur 090 (sans unité) Moyenne de l'IT secteur 120 (sans unité) Moyenne de l'IT secteur 150 (sans unité) Moyenne de l'IT secteur 180 (sans unité) Moyenne de l'IT secteur 210 (sans unité) Moyenne de l'IT secteur 240 (sans unité) Moyenne de l'IT secteur 270 (sans unité) Moyenne de l'IT secteur 300 (sans unité) Moyenne de l'IT secteur 330 (sans unité) Q90 de l'IT tous secteurs confondus (sans unité) Q90 de l'IT secteur 000 (sans unité) Q90 de l'IT secteur 030 (sans unité) Q90 de l'IT secteur 060 (sans unité) Q90 de l'IT secteur 090 (sans unité) Q90 de l'IT secteur 120 (sans unité) Q90 de l'IT secteur 150 (sans unité) Q90 de l'IT secteur 180 (sans unité) Q90 de l'IT secteur 210 (sans unité) Q90 de l'IT secteur 240 (sans unité) Q90 de l'IT secteurs 270 (sans unité) Q90 de l'IT secteur 300 (sans unité) Q90 de l'IT secteur 330 (sans unité)

Le séparateur de champs est l'espace, le caractère de décimale est le point.

Les cartes des moyennes et du Q90 de l'intensité de turbulence calculées à partir des données AROME pour les niveaux 40, 100, 160 m sont fournies ci-dessous (voir illustration 10).



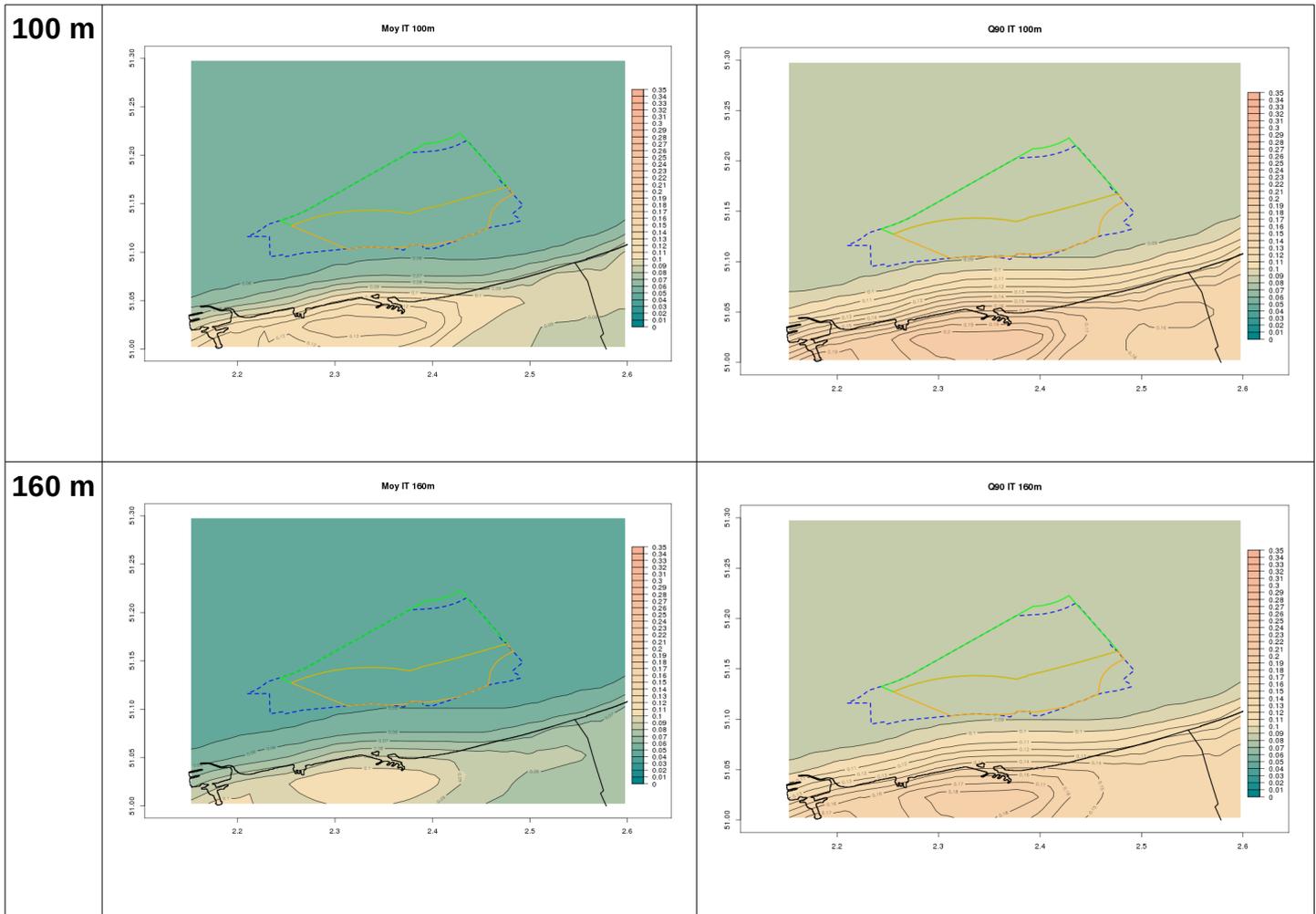


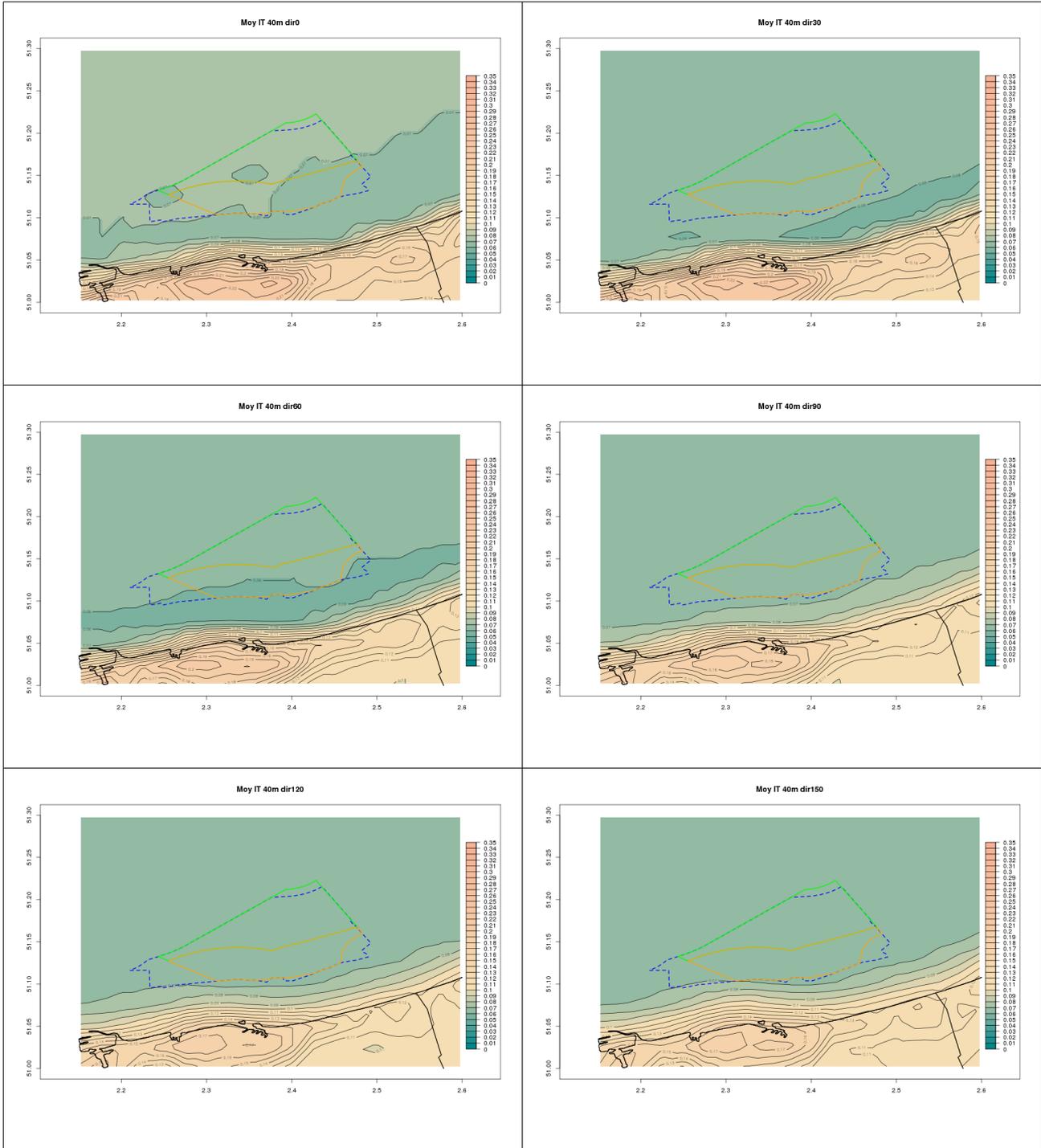
Illustration 10 : cartes des moyennes (colonne de gauche) et Q90 (colonne de droite) de l'intensité de turbulence (notée IT dans cette étude) aux niveaux 40 m, 100 m, 160 m tous secteurs confondus pour la zone de Dunkerque, calculées à partir des données AROME (2000-2015)

L'analyse sommaire de ces cartes montre bien que, **pour un paramètre statistique donné (moyenne ou Q90), l'intensité de turbulence est plus importante à 40 m, qu'à 100 m et 160 m.** Ceci se voit bien sur les gradients des isolignes, nettement plus serrés à 40 m qu'à 160 m. 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 bleu), nous voyons ainsi que la moyenne de l'intensité de turbulence est inférieure à 7 % à 40 m, à 6 % à 100 m, à 5 % 160 m et à ces hauteurs-là, le Q90 de l'intensité de turbulence est inférieur à 9 %.

Les cartes des moyennes et du Q90 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 (voir illustrations 11 à 16).



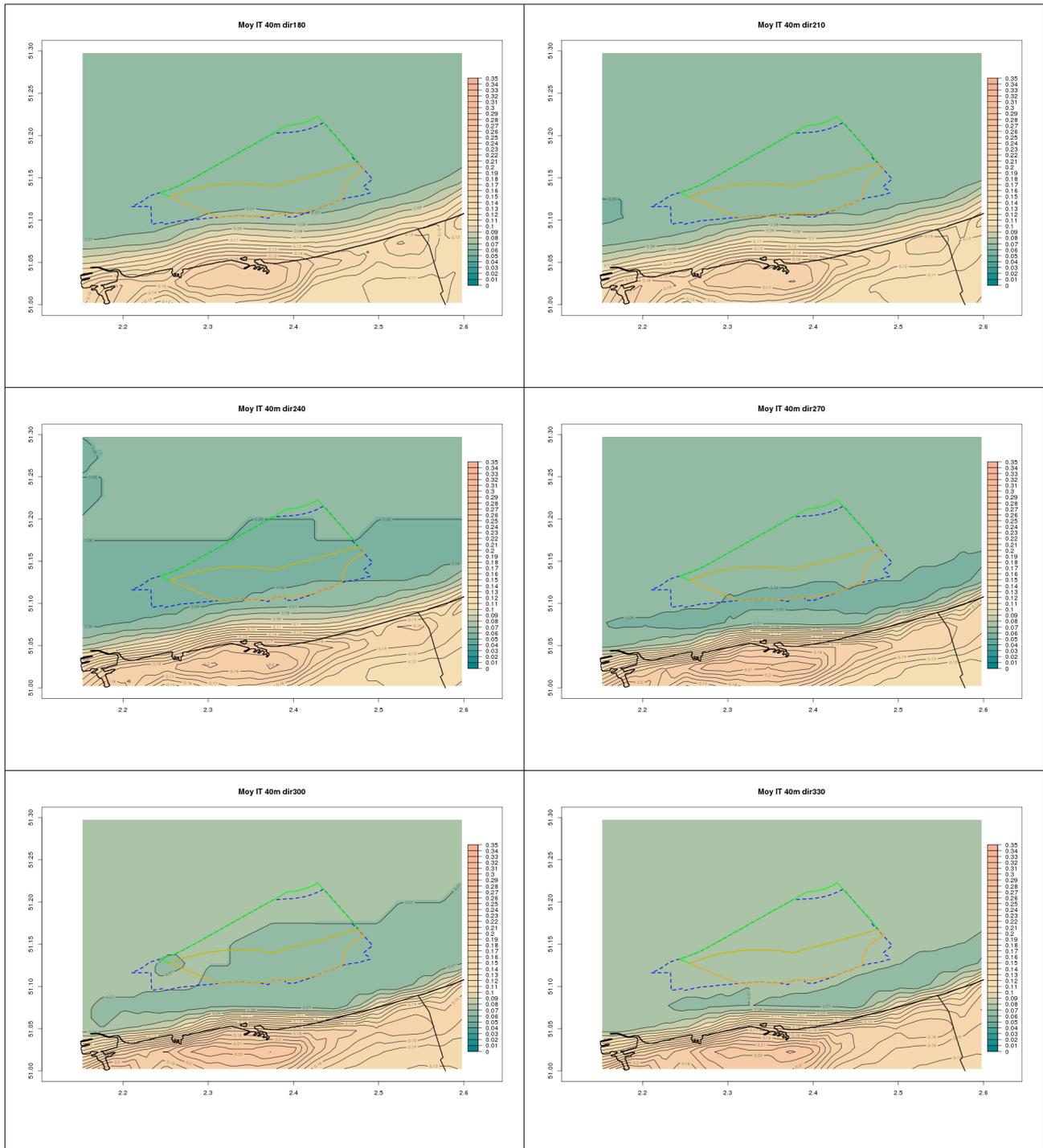
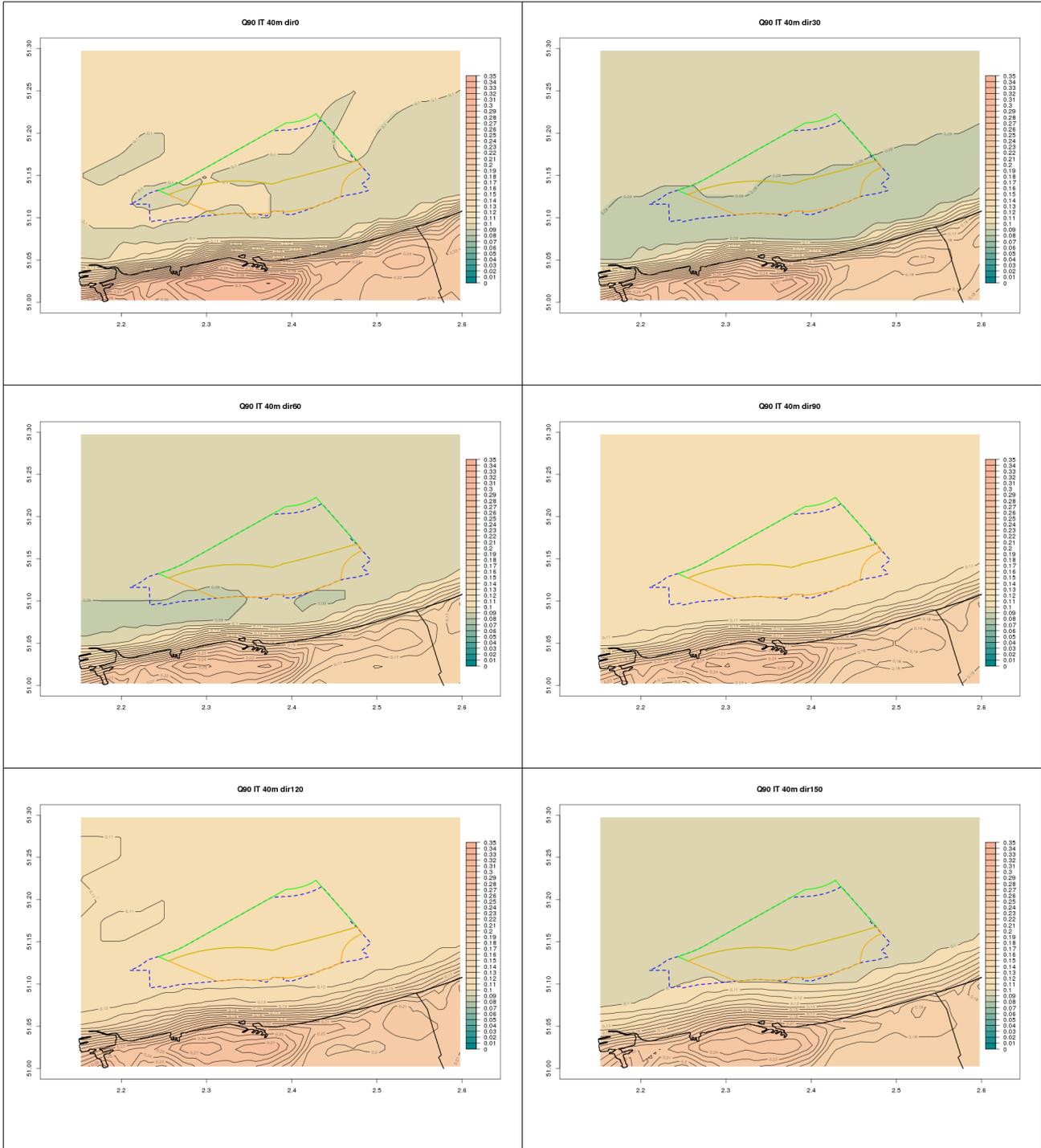


Illustration 11 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par secteur de direction de 30° pour la zone de Dunkerque, calculées à partir des données AROME (2000-2015)



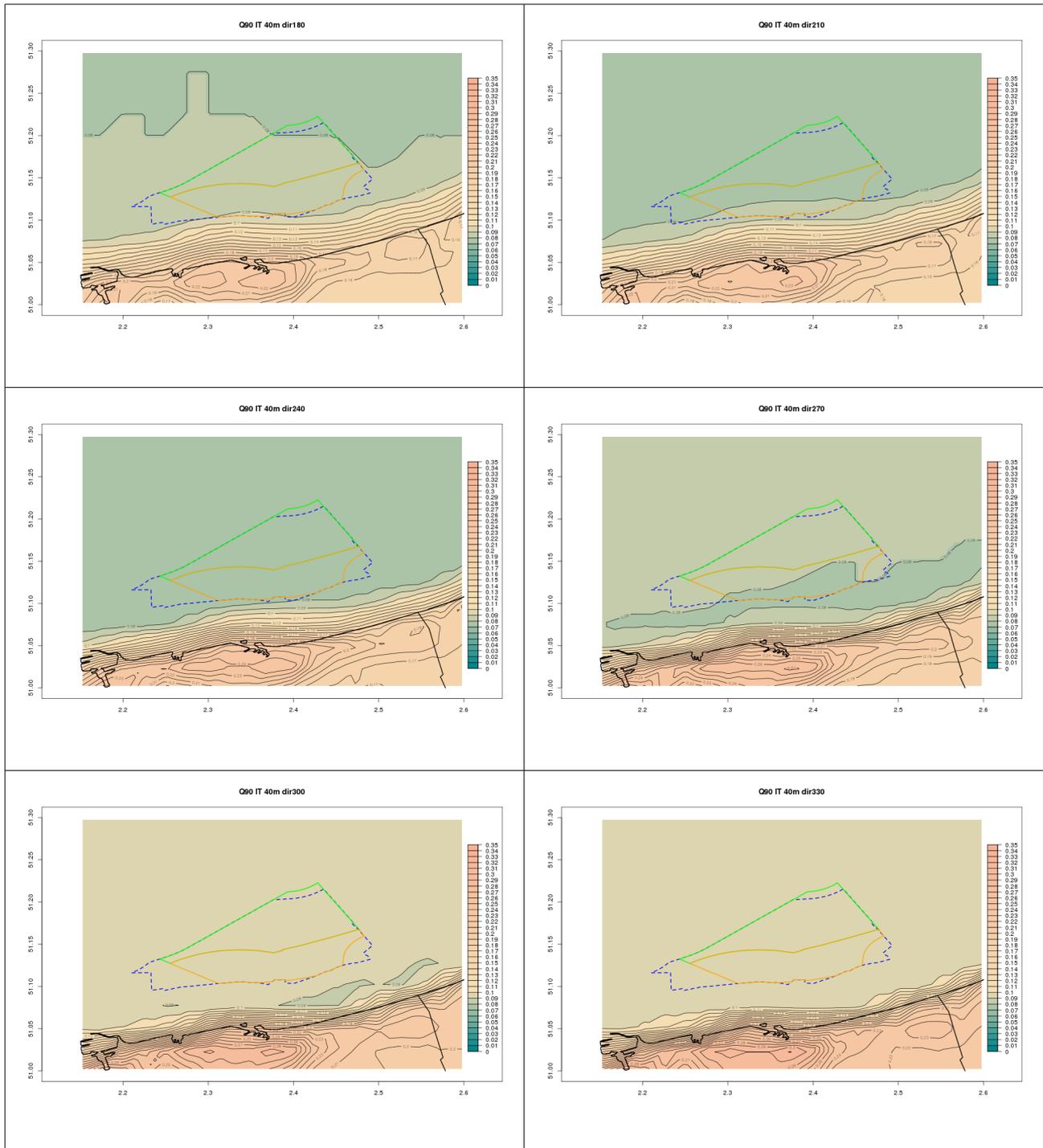
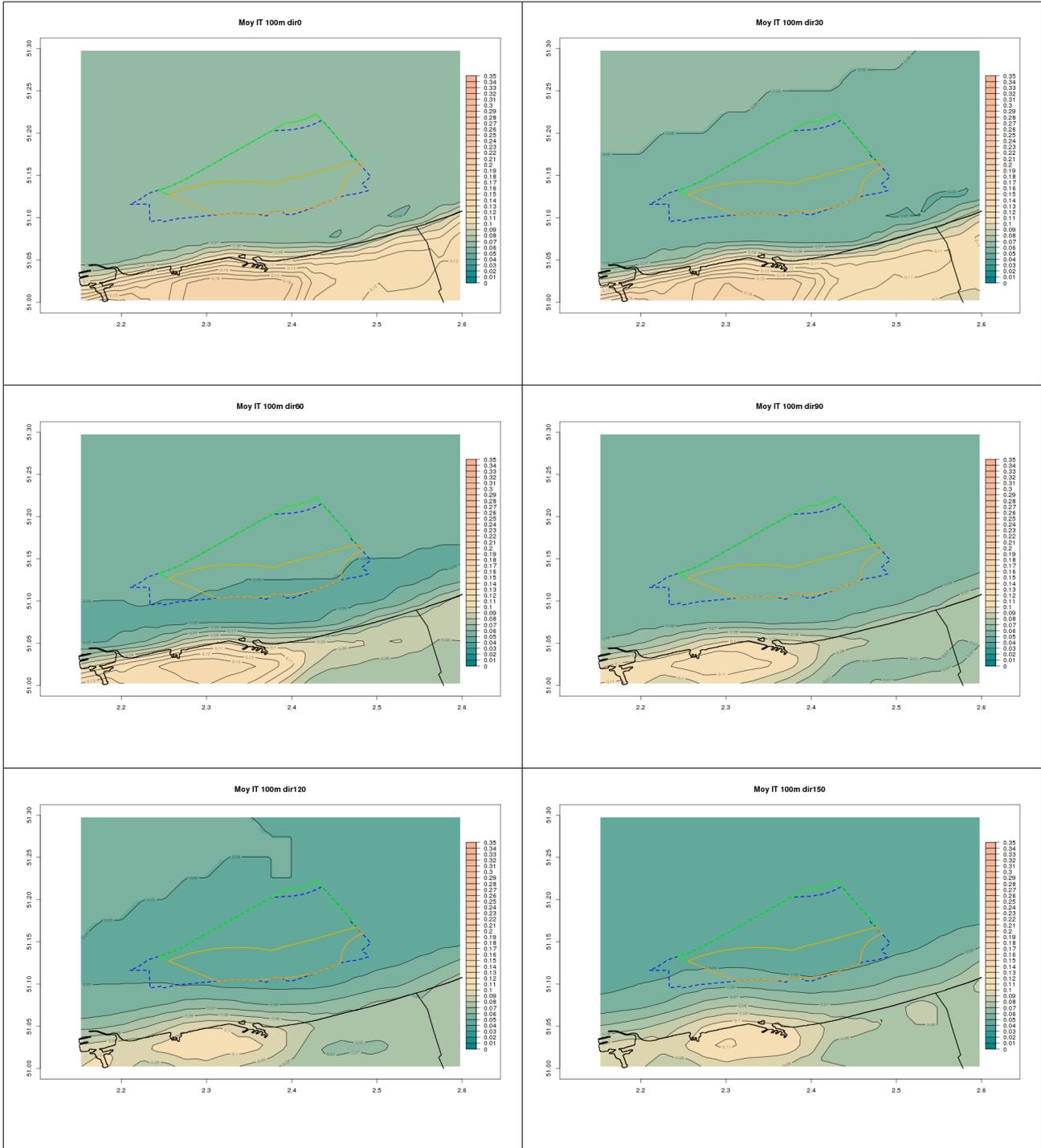


Illustration 12 : cartes des Q90 de l'intensité de turbulence au niveau 40 m par secteur de direction de 30° pour la zone de Dunkerque, calculés à partir des données AROME (2000-2015)



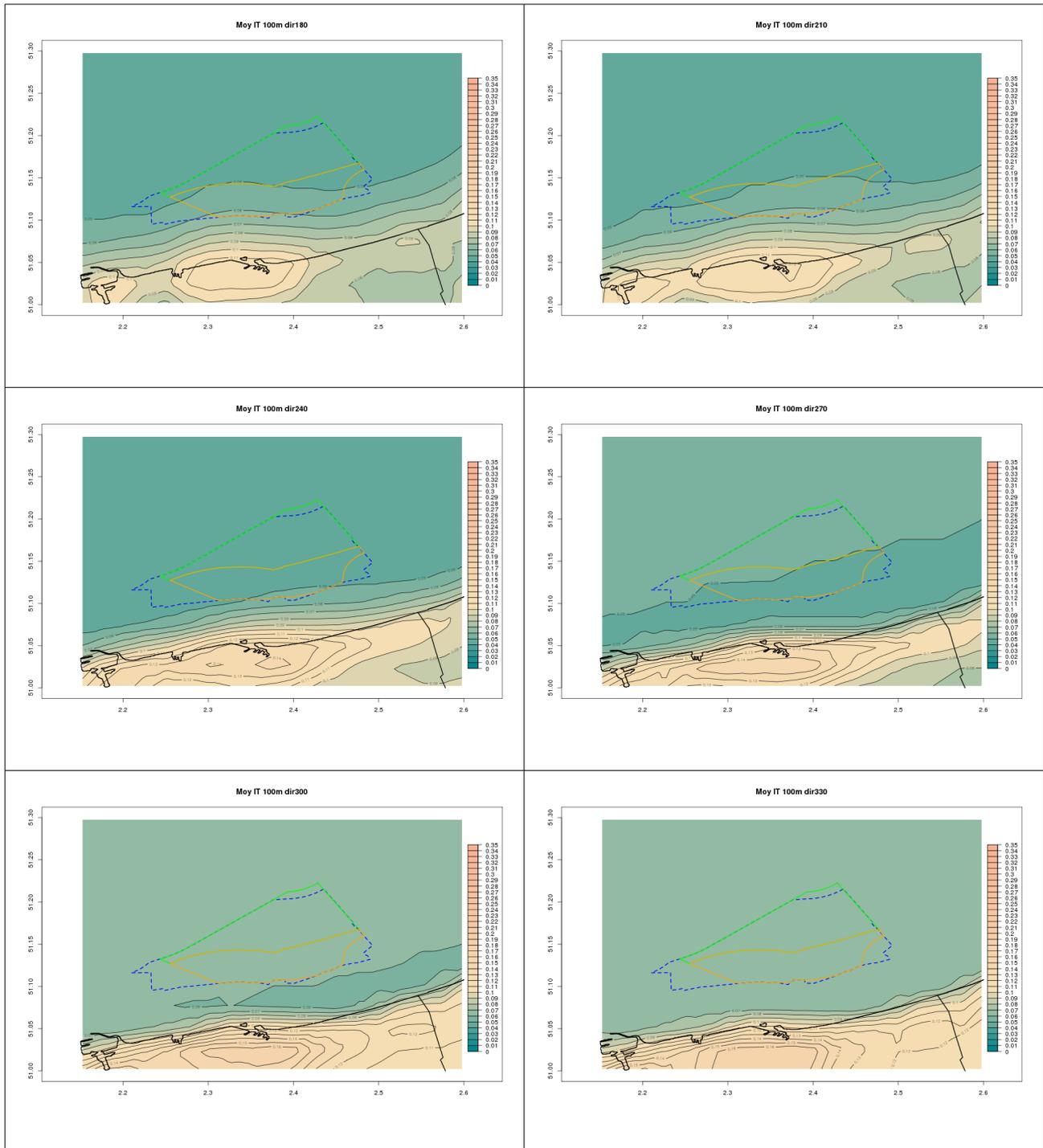
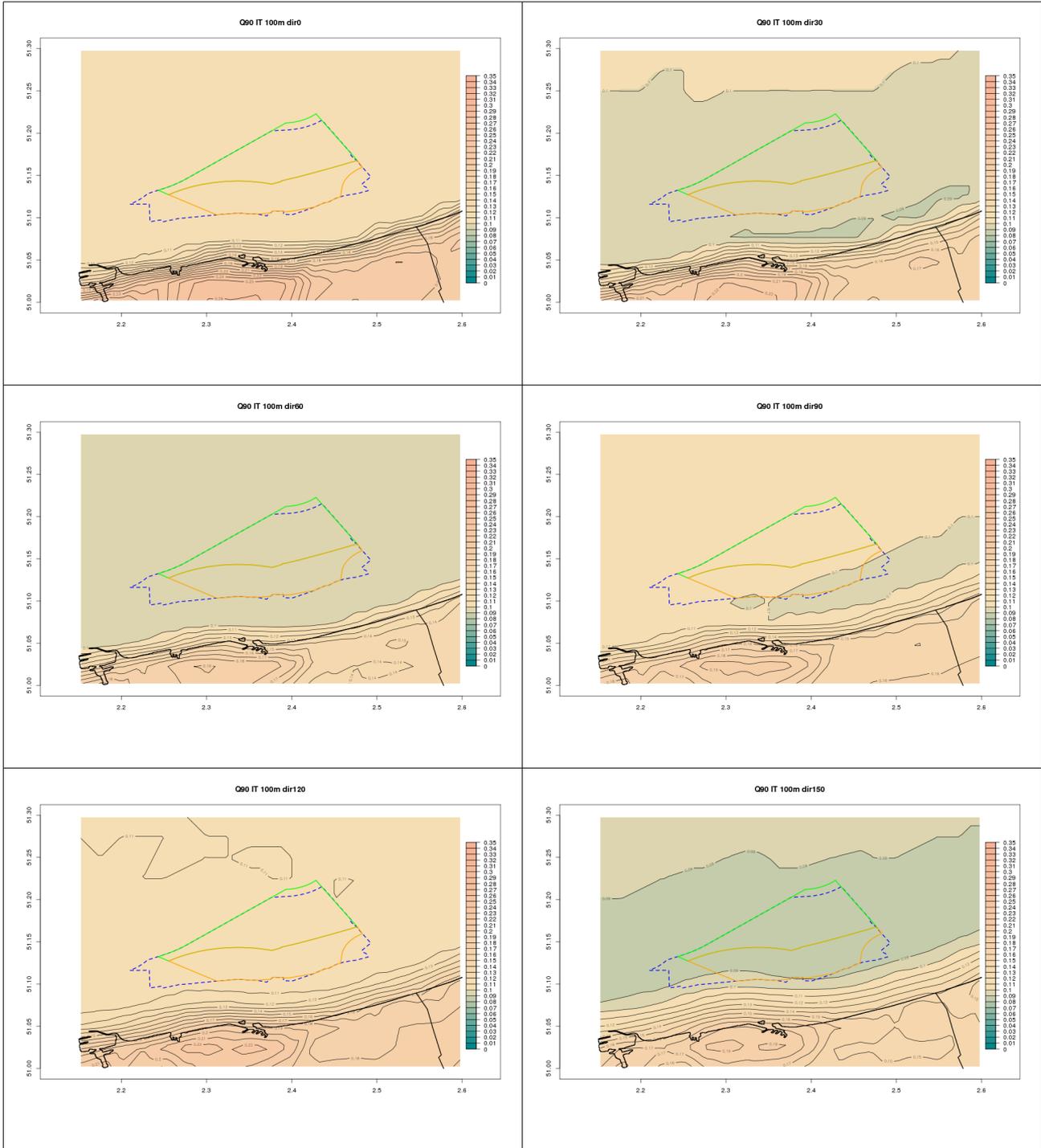


Illustration 13 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par secteur de direction de 30° pour la zone de Dunkerque, calculées à partir des données AROME (2000-2015)



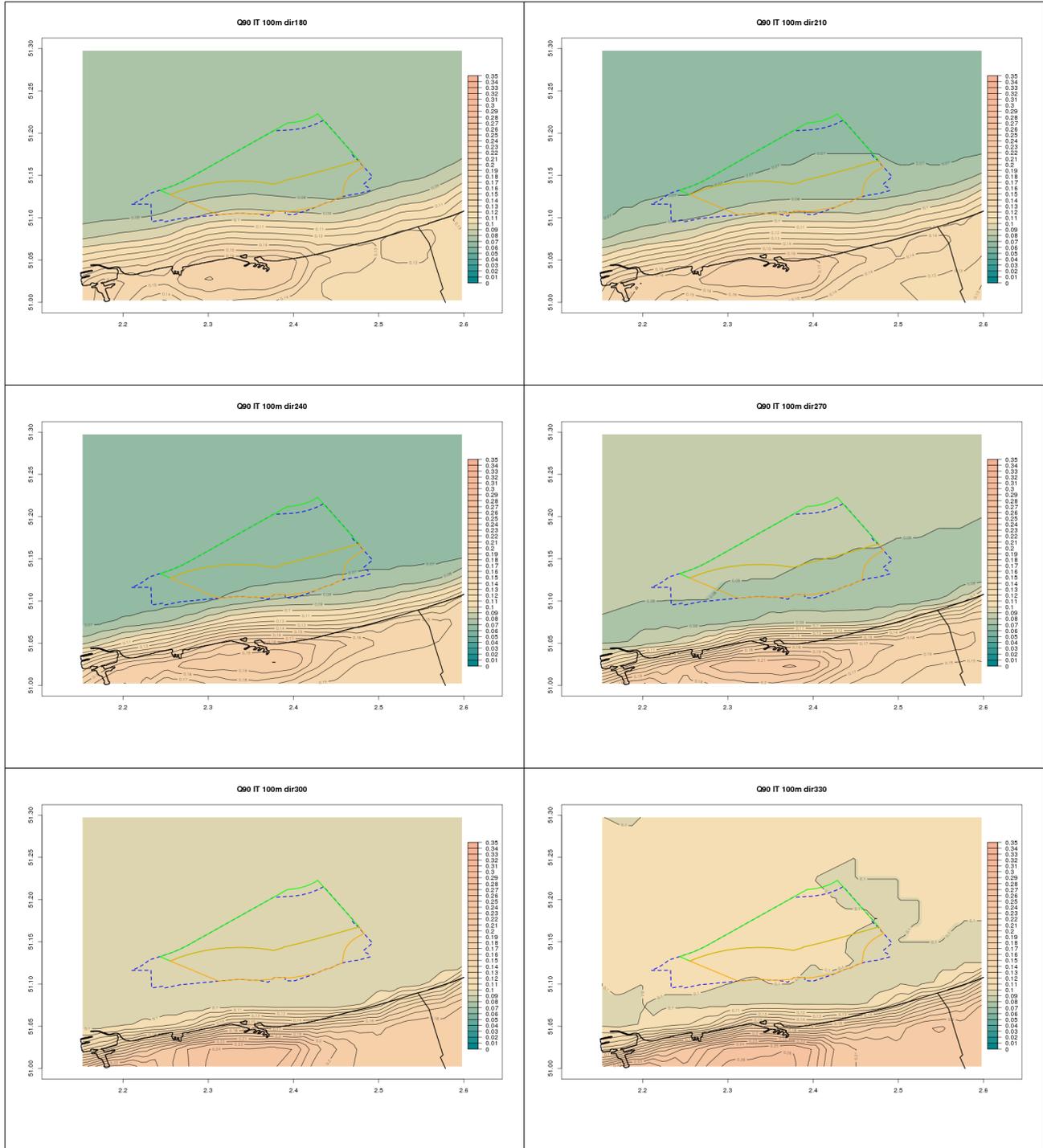
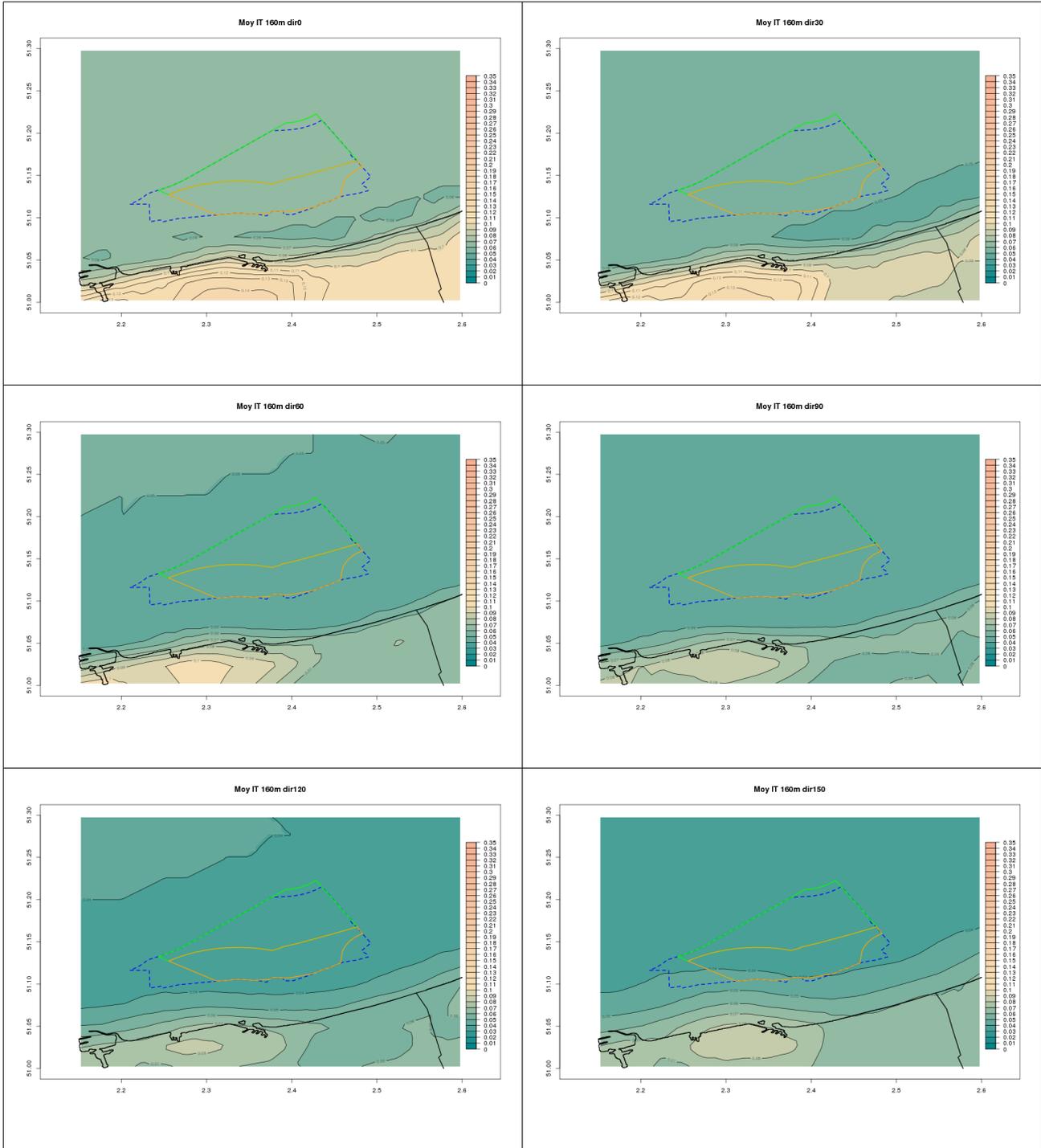


Illustration 14 : cartes des Q90 de l'intensité de turbulence au niveau 100 m par secteur de direction de 30° pour la zone de Dunkerque, calculés à partir des données AROME (2000-2015)



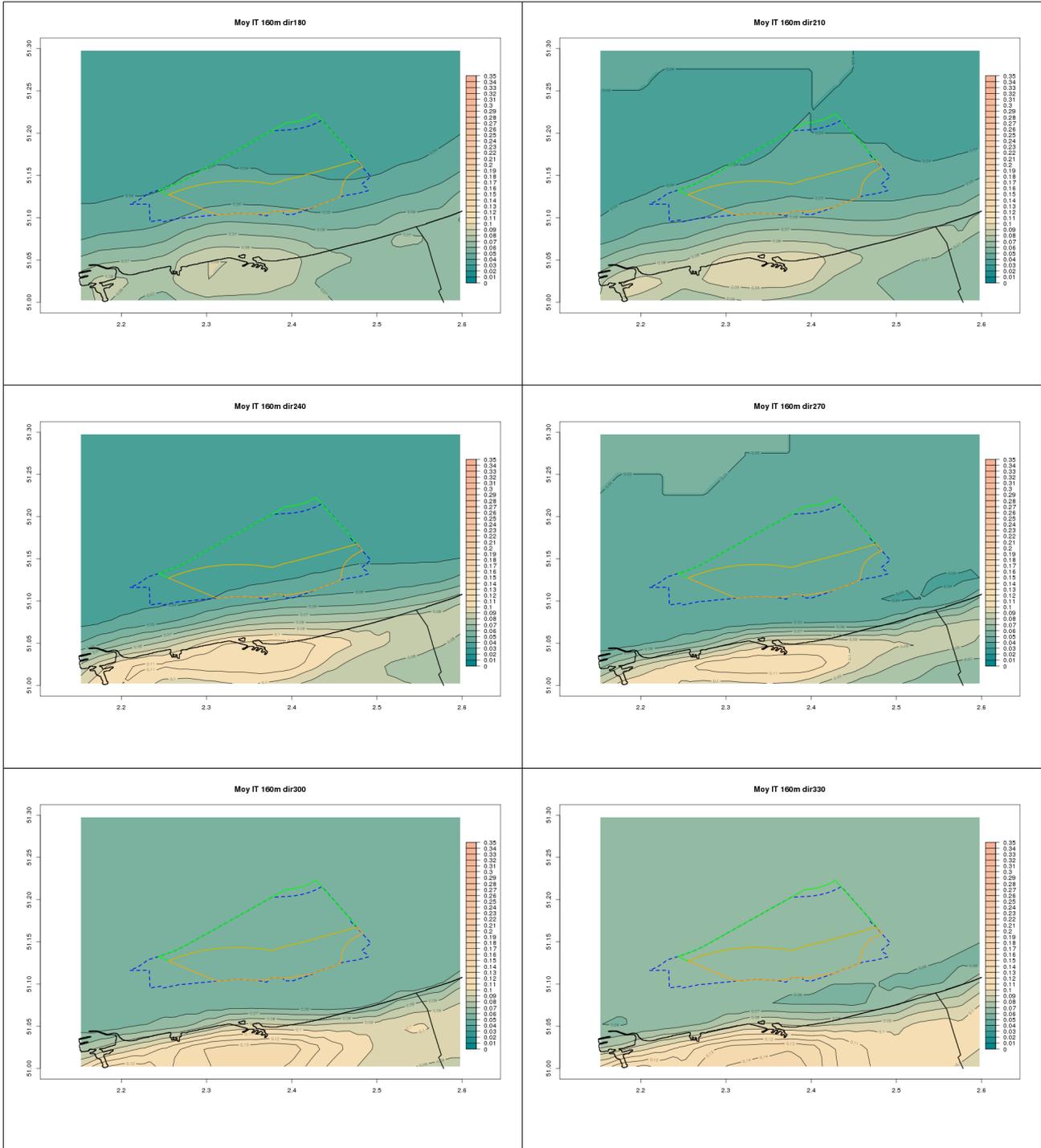
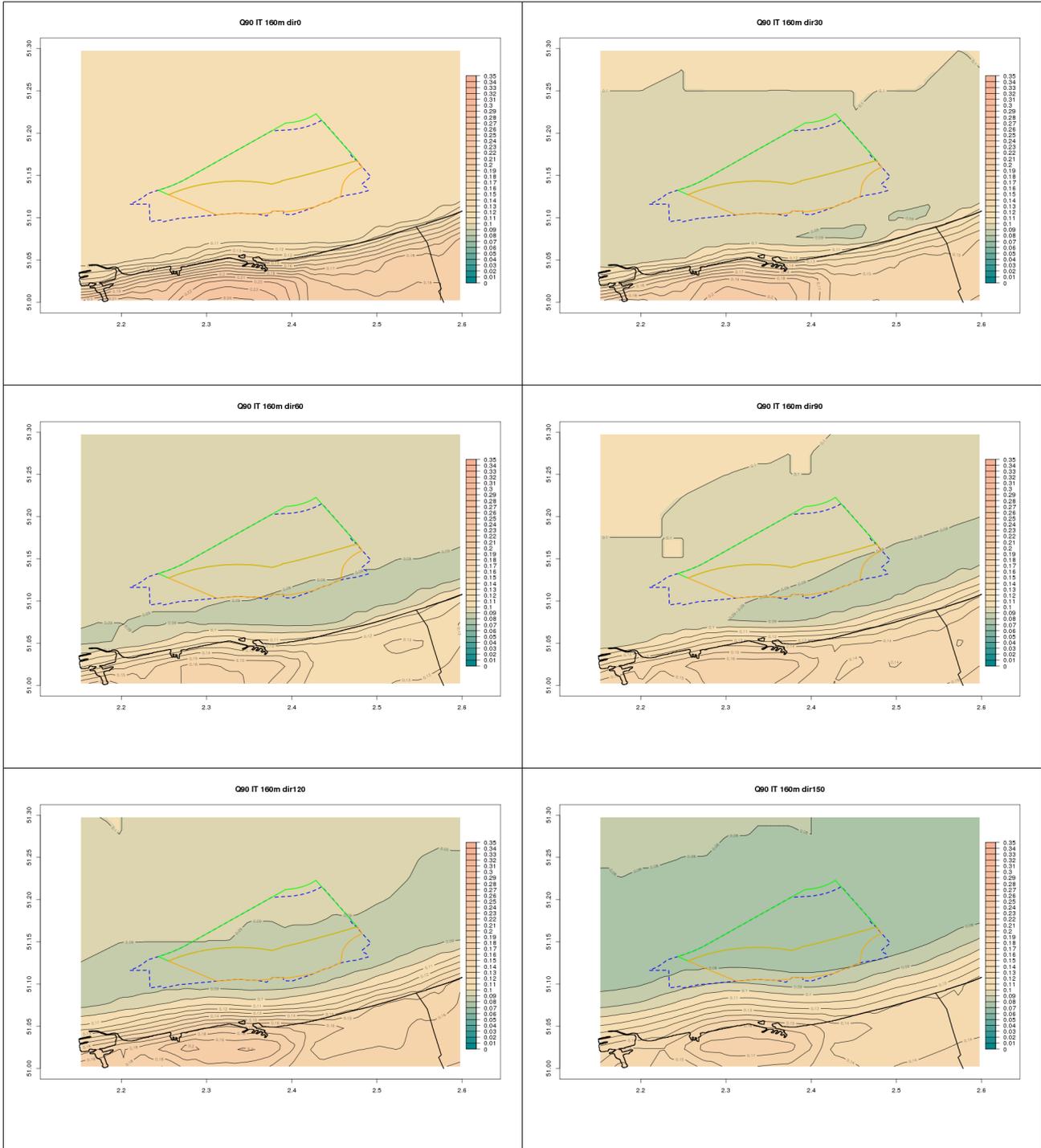


Illustration 15 : cartes des moyennes de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par secteur de direction de 30° pour la zone de Dunkerque, calculées à partir des données AROME (2000-2015)



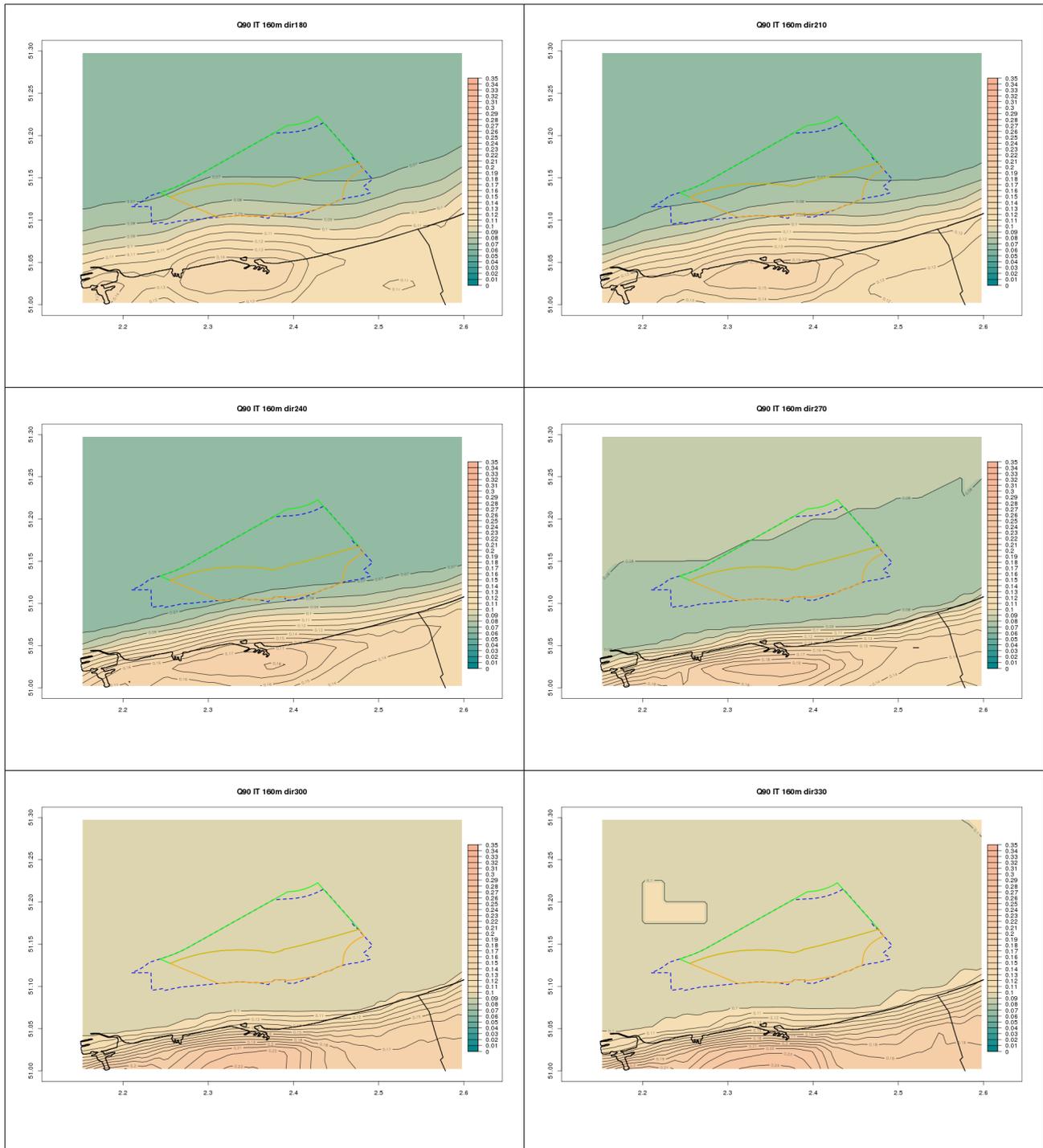


Illustration 16 : cartes des Q90 de l'intensité de turbulence au niveau 160 m par secteur de direction de 30° pour la zone de Dunkerque, calculés à partir des données AROME (2000-2015)

Ces cartes de moyenne et de Q90 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.**

### 5.1.2 Rafale à 100 m

Pour les 247 points de grille AROME de la zone de Dunkerque, les **séries chronologiques horaires des rafales estimées à 100 m** ont été **calculées** à partir de la formule

$$RAF_{100m} = RAF_{10m} - FF_{10m} + FF_{100m}$$
 et sont fournies dans les fichiers ascii de nom :

[ECGC16ansDGEC100\\_DNK0\[Numpt\]\\_N100\\_estFFmax\\_MetreParSeconde.txt](#)

avec [Numpt] variant de 1 à 247.

Chacun de ces fichiers de 140 066 lignes comporte 2 colonnes qui sont pour la première la date au format AAAAMMJJHH (l'heure HH étant exprimée en UTC) et pour la deuxième la rafale à 100 m en m/s.

Le séparateur de champs est l'espace et le caractère de décimale le point.

Pour l'ensemble des points de la zone de Dunkerque, les **quantiles des rafales à 100 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 4.2.2.

Ces données sont disponibles dans le fichier de nom : [DR50\\_RAF100\\_gpd\\_TpsSepar2.csv](#)

Ce fichier comporte une ligne entête puis une ligne de données par point de grille, soit un total de 247 lignes par fichier et 7 colonnes qui sont :

Numéro du point de grille (sans unité) Latitude (en degrés décimaux) Longitude (en degrés décimaux)  
Rafale à 100 m pour la DR 50 ans (m/s et décimales) Borne inférieure à 70 % de la rafale à 100 m pour la DR 50 ans (m/s et décimales) Borne supérieure à 70 % de la rafale à 100 m pour la DR 50 ans (m/s et décimales) Pseudo-code qualité (sans unité)

Dans la colonne intitulée « Pseudo-code qualité », les valeurs rencontrées sont A ou P, avec A pour un ajustement acceptable présentant un coefficient de forme k inférieur à 0.4 et P pour un ajustement critique avec coefficient de forme k supérieur à 0.4 et pour lequel les quantiles obtenus sont à considérer avec extrême précaution.

Le séparateur de champs est le point-virgule, le caractère de décimale est le point.

Les cartes obtenues des valeurs des quantiles, des bornes inférieures et supérieures des rafales à 100 m de durée de retour 50 ans sont fournies ci-dessous (voir illustrations 17 à 19).

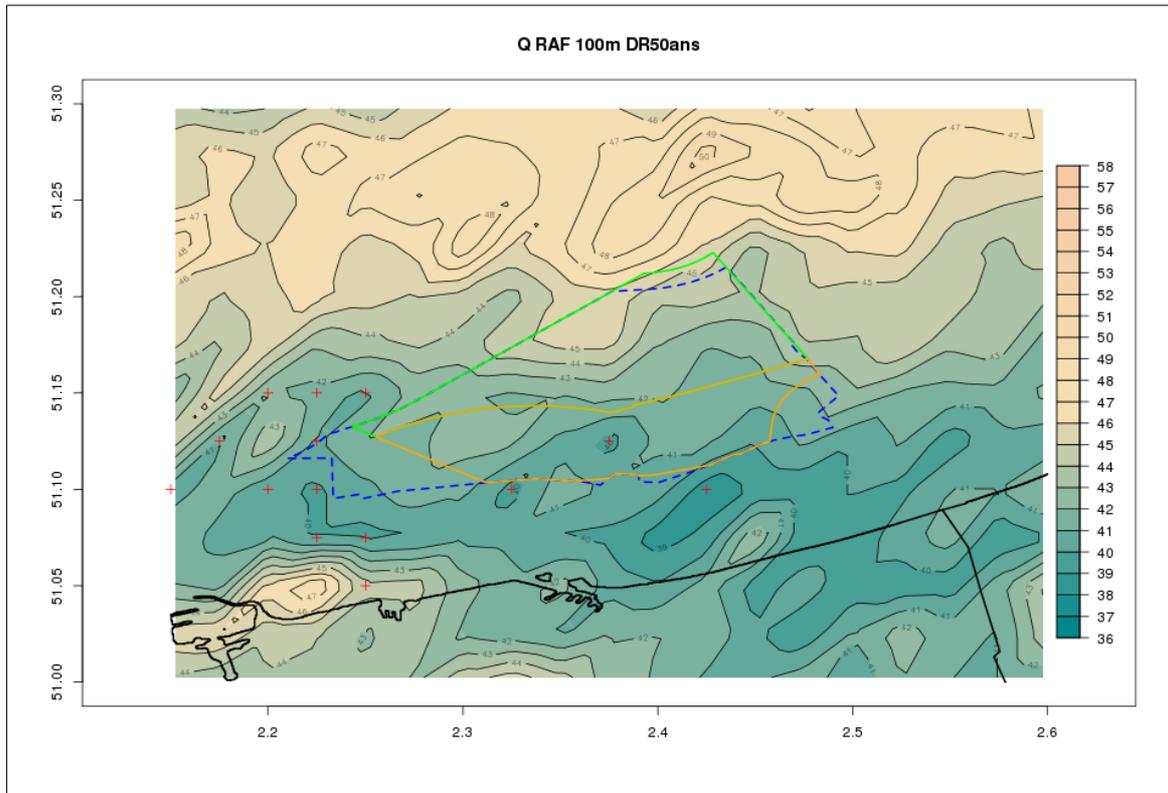


Illustration 17 : carte des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 100 m pour la zone de Dunkerque, calculés à partir des données AROME (2000-2015)

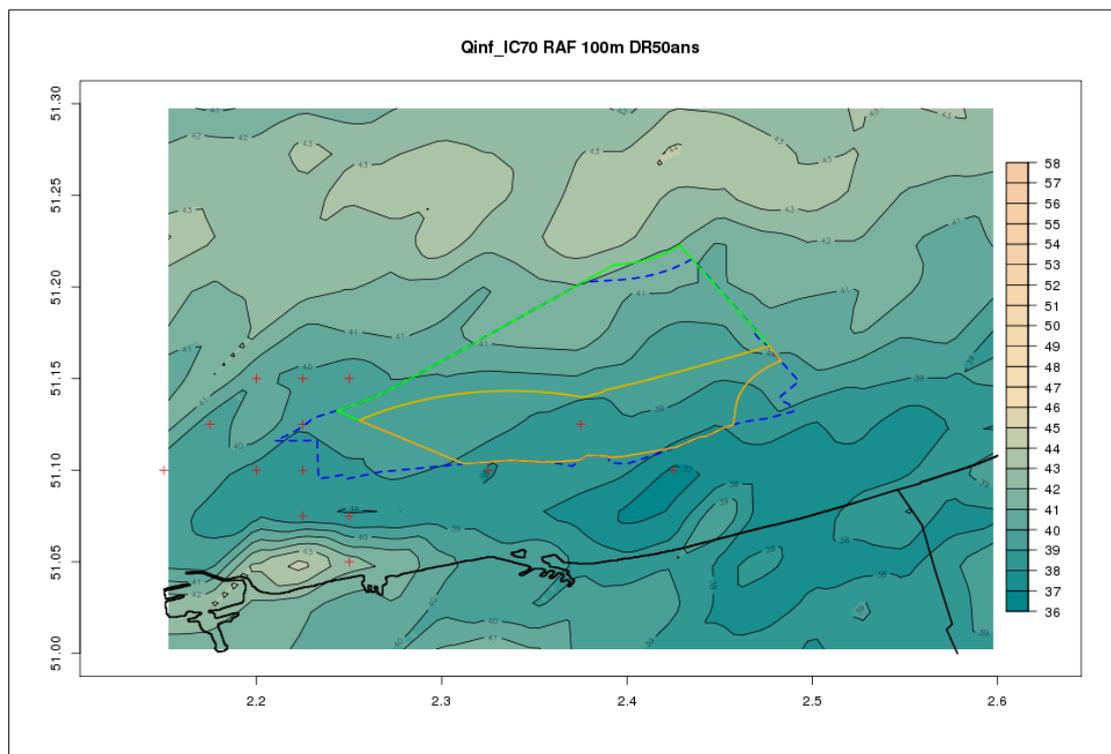


Illustration 18 : carte des bornes inférieures des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 100 m pour l'intervalle de confiance à 70 % pour la zone de Dunkerque, calculées à partir des données AROME (2000-2015)

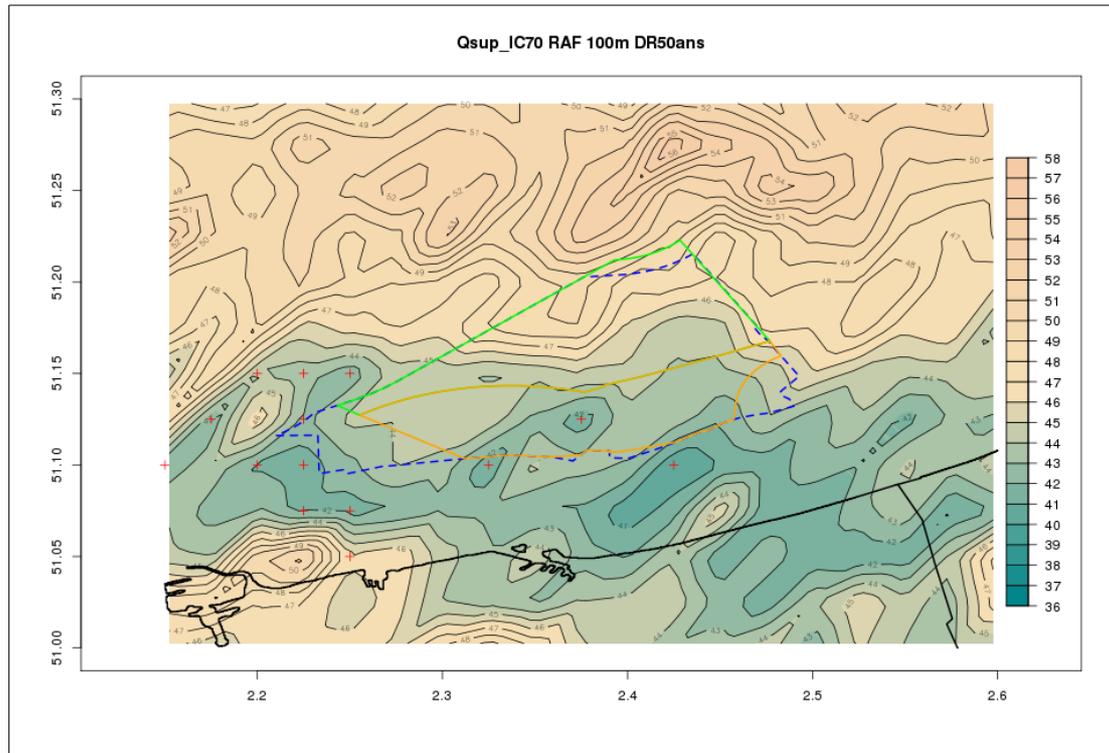


Illustration 19 : carte des bornes supérieures des quantiles de durées de retour 50 ans des rafales estimées à 100 m pour l'intervalle de confiance à 70 % pour la zone de Dunkerque, calculées à partir des données AROME (2000-2015)

Sur ces cartes, certains points de grille ont été annotés d'une croix rouge. Se concentrant majoritairement à l'ouest de la zone bleue, ces points correspondent à des points de grille où le coefficient de forme de la loi Pareto est supérieur à 0.4 (compris entre 0.4 et 0.57). Des valeurs estimées du facteur de forme  $k$  trop grandes (au-delà de 0.4 en valeur absolue) correspondent en général à des distributions non réalistes et conduisent à une incertitude des résultats obtenus encore plus forte. Ces points sont repérables dans le fichier de données fourni nommé [DR50\\_RAF100\\_gpd\\_TpsSepar2.csv](#) avec en colonne 7 un code égal à P (ajustement critique avec coefficient de forme  $k$  supérieur à 0.4 et donc à considérer avec extrême précaution).

Sur la **zone d'implantation** délimitée en pointillés bleus, les **rafales cinquantennales à 100 m** sont **plus fortes dans la partie nord que dans la partie sud** et présentent des **valeurs comprises entre 40 et 46 m/s**.

Pour le quantile, la borne inférieure et la borne supérieure des rafales à 100 m, ce gradient nord-sud s'observe avec des valeurs plus fortes au nord qu'au sud, que ce soit dans les zones d'implantation matérialisées par les contours vert ou orange.

Les **bornes inférieures à l'intervalle de confiance à 70 % des rafales à 100 m** sont **comprises entre 39 et 42 m/s pour la zone d'implantation « nord »** matérialisée par le contour vert et **entre 38 et 40 m/s pour la zone d'implantation « sud »** matérialisée par le contour orange. Les quantiles des **bornes supérieures de l'intervalle de confiance à 70 %** sont compris quant à eux **entre 44 et 50 m/s sur cette zone délimitée en vert et 42 et 45 m/s pour cette zone délimitée en orange plus au sud**.

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 à 100 m sur cette zone de Dunkerque.

À signaler que dans le domaine des durées de retour notamment pour les précipitations, Météo-France commence à utiliser de nouvelles méthodes de calculs plus sophistiquées de type locale-régionale. L'avantage de ces méthodes est de considérer que le maximum peut n'être pas forcément localisé toujours au même endroit et va ainsi prendre en compte la corrélation spatiale des maxima avec des cercles d'influence. La transposition au vent de cette méthode locale-régionale n'a pas encore été évaluée à Météo-France. Cette méthode n'a donc pas été appliquée dans le cadre de cette étude mais constitue une perspective éventuelle pour consolider ces premiers résultats si besoin était.

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

Pour les 247 points de grille AROME de la zone de Dunkerque, à partir des séries des forces de vent sur 16 ans (période 2000-2015), 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°, avec une différenciation jour/nuit de cet indicateur.**

Pour les données calculées en distinguant le jour et la nuit, la distinction jour/nuit est effectuée de la façon suivante : les données du jour sont celles correspondantes 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, 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 de nom : [Alpha\\_ZoneDNK\\_40\\_160.txt](#),

[Alpha\\_ZoneDNK\\_40\\_100.txt](#), [Alpha\\_ZoneDNK\\_100\\_160.txt](#)

Chacun de ces fichiers (1 par couche) débute par une ligne entête puis comporte une ligne par point de grille, soit un total de 248 lignes par fichier.

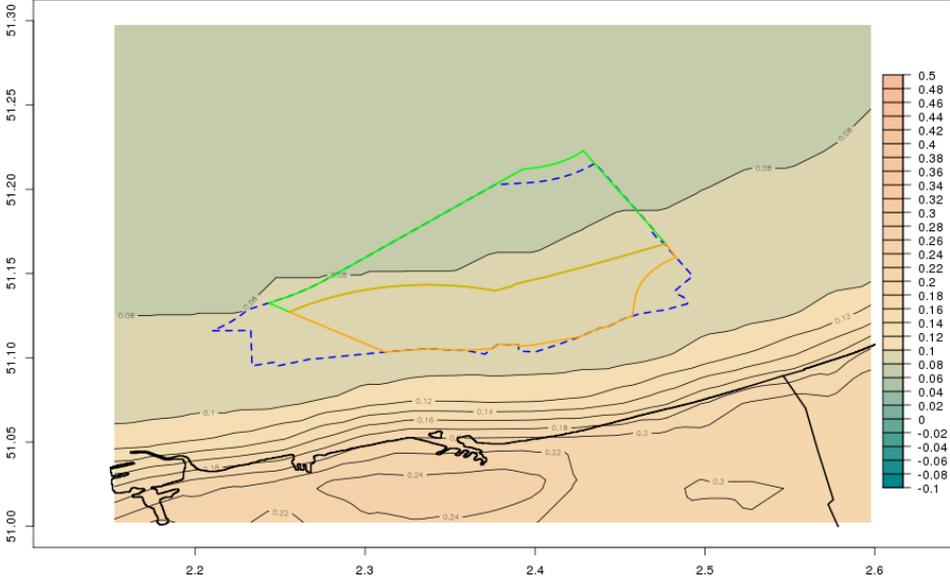
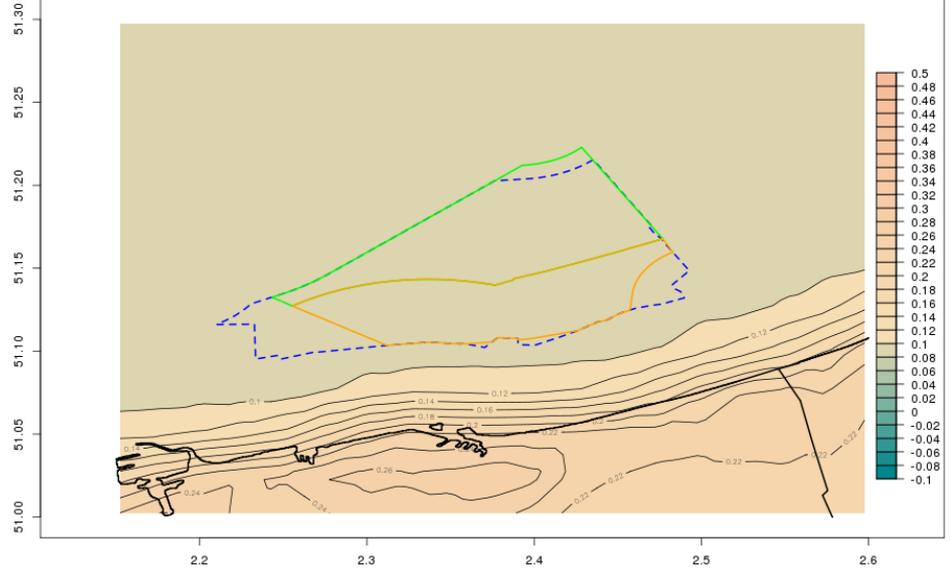
Chacun de ces fichiers comporte 41 colonnes qui sont :

Latitude (en degrés décimaux) Longitude (en degrés décimaux) Alpha jour de la couche tous secteurs confondus (sans unité) Alpha jour de la couche secteur 000 (sans unité) Alpha jour de la couche secteur 030 (sans unité) Alpha jour de la couche secteur 060 (sans unité) Alpha jour de la couche secteur 090 (sans unité) Alpha jour de la couche secteur 120 (sans unité) Alpha jour de la couche secteur 150 (sans unité) Alpha jour de la couche secteur 180 (sans unité) Alpha jour de la couche secteur 210 (sans unité) Alpha jour de la couche secteur 240 (sans unité) Alpha jour de la couche secteur 270 (sans unité) Alpha jour de la

couche secteur 300 (sans unité) Alpha jour de la couche secteur 330 (sans unité) Alpha nuit de la couche tous secteurs confondus (sans unité) Alpha nuit de la couche secteur 000 (sans unité) Alpha nuit de la couche secteur 030 (sans unité) Alpha nuit de la couche secteur 060 (sans unité) Alpha nuit de la couche secteur 090 (sans unité) Alpha nuit de la couche secteur 120 (sans unité) Alpha nuit de la couche secteur 150 (sans unité) Alpha nuit de la couche secteur 180 (sans unité) Alpha nuit de la couche secteur 210 (sans unité) Alpha nuit de la couche secteur 240 (sans unité) Alpha nuit de la couche secteur 270 (sans unité) Alpha nuit de la couche secteur 300 (sans unité) Alpha nuit de la couche secteur 330 (sans unité) Alpha de la couche tous secteurs et jour/nuit confondus (sans unité) Alpha sans distinction jour/nuit de la couche secteur 000 (sans unité) Alpha sans distinction jour/nuit de la couche secteur 030 (sans unité) Alpha sans distinction jour/nuit de la couche secteur 060 (sans unité) Alpha sans distinction jour/nuit de la couche secteur 090 (sans unité) Alpha sans distinction jour/nuit de la couche secteur 120 (sans unité) Alpha sans distinction jour/nuit de la couche secteur 150 (sans unité) Alpha sans distinction jour/nuit de la couche secteur 180 (sans unité) Alpha sans distinction jour/nuit de la couche secteur 210 (sans unité) Alpha sans distinction jour/nuit de la couche secteur 240 (sans unité) Alpha sans distinction jour/nuit de la couche secteur 270 (sans unité) Alpha sans distinction jour/nuit de la couche secteur 300 (sans unité) Alpha sans distinction jour/nuit de la couche secteur 330 (sans unité)

Le séparateur de champs est l'espace, le caractère de décimale est le point.

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 Dunkerque, calculé à partir des séries des forces du vent d'AROME sur la période 2000-2015, sont fournies ci-dessous (voir illustration 20).

	Coefficient $\alpha$ de cisailment vertical de la force du vent
Couche 40-160 m	<p style="text-align: center;">Alpha tous secteurs couche 40_160m</p> 
Couche 40-100 m	<p style="text-align: center;">Alpha tous secteurs couche 40_100m</p> 

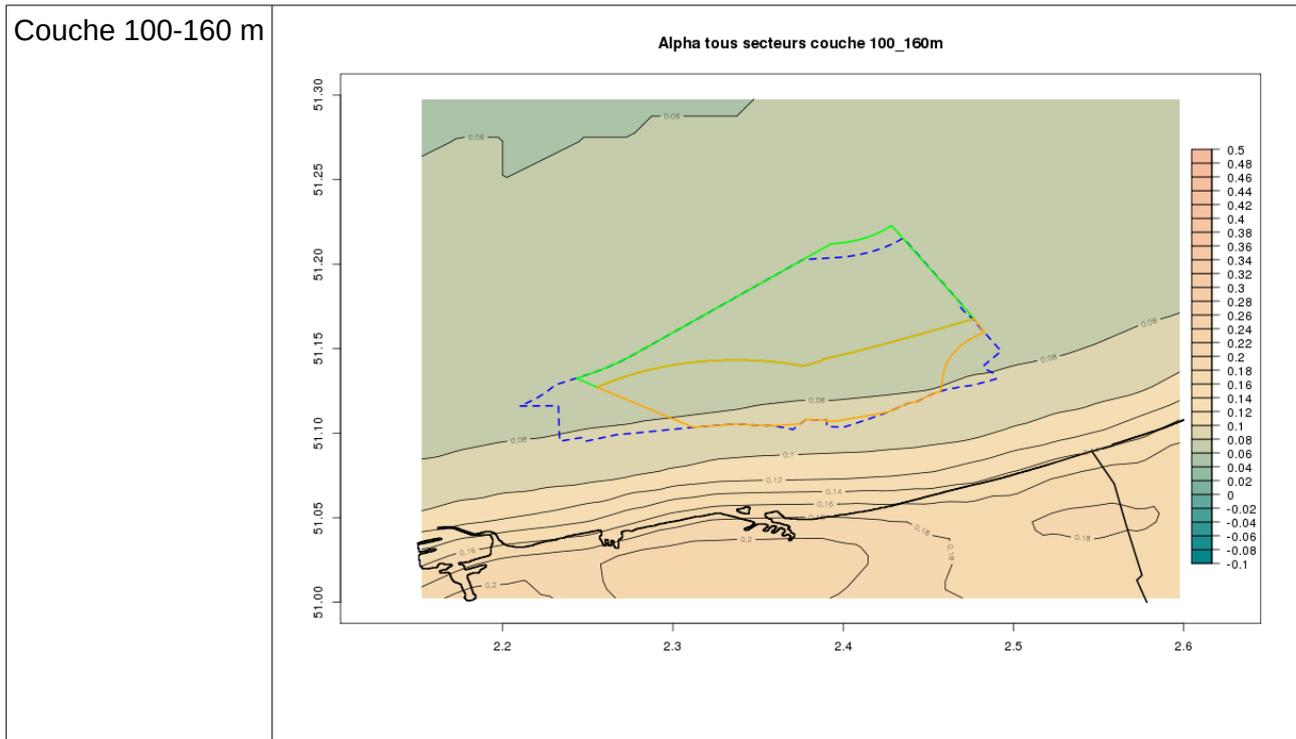


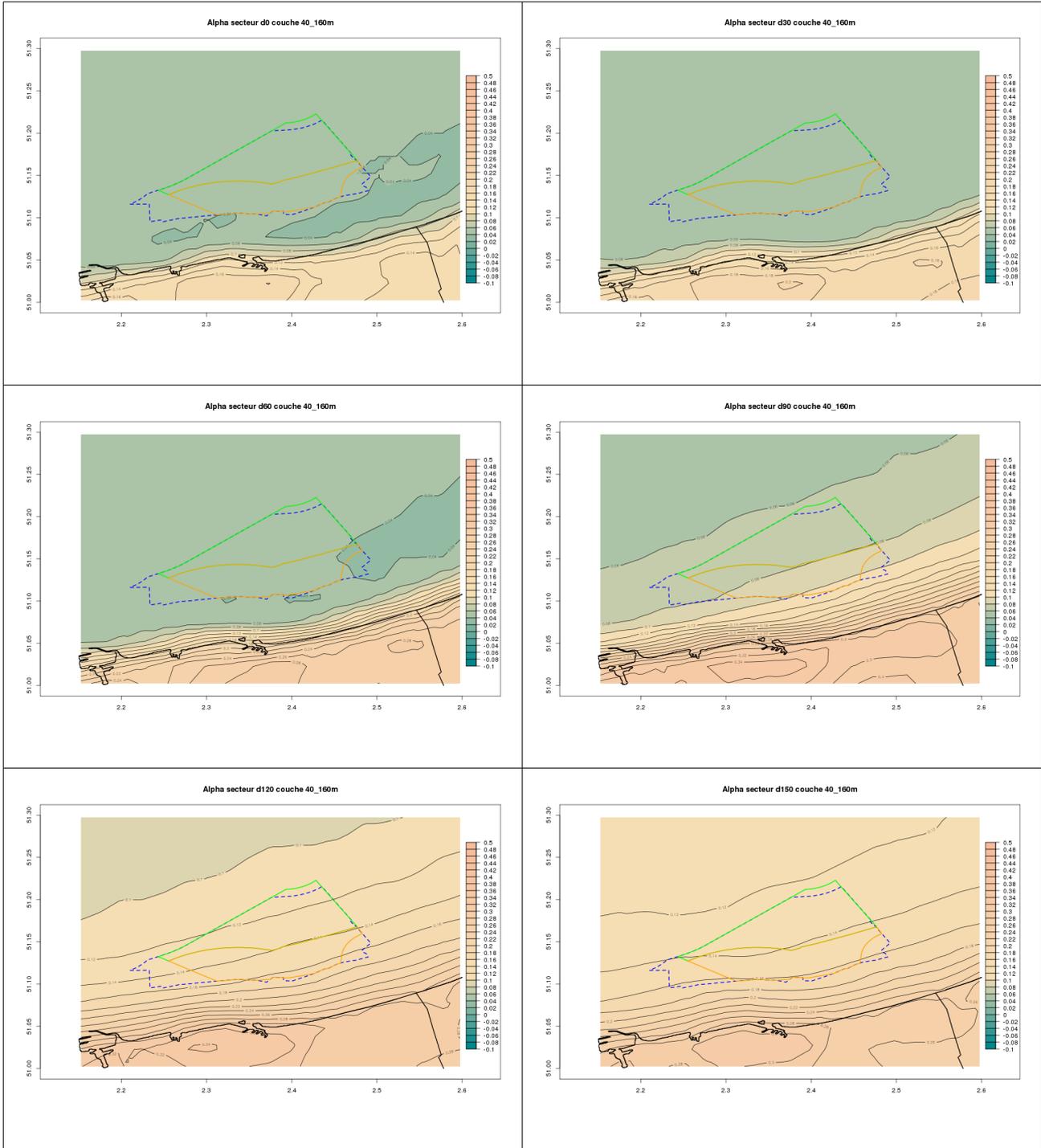
Illustration 20 : cartes du coefficient  $\alpha$  de cisaillement de vent pour les couches 40-160 m, 40-100 m, 100-160 m tous secteurs confondus pour la zone de Dunkerque, calculé à partir des forces du vent AROME (2000-2015)

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

Sur la zone d'implantation prévue des éoliennes matérialisée en pointillés bleus, tous secteurs de vent confondus, le coefficient  $\alpha$  de cisaillement vertical de la force du vent est de l'ordre de 0.08 dans la couche 40-160 m, avec des valeurs un peu plus faibles dans le nord de la zone que dans le sud. Ce coefficient est compris entre 0.08 et 0.10 dans la couche 40-100 m et entre 0.06 et 0.08 du nord au sud de la zone dans la couche la plus haute étudiée ici entre 100-160 m.

D'autre part, quel que soit le niveau considéré (40, 100, 160 m), ces cartes mettent bien également en évidence **des coefficients  $\alpha$  de cisaillement vertical de la force du vent moins élevés sur mer que sur terre.**

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  $30^\circ$  pour la zone de Dunkerque, calculé à partir des séries des forces du vent issues d'AROME sur la période 2000-2015, sont fournies ci-après (voir illustrations 21 à 23).



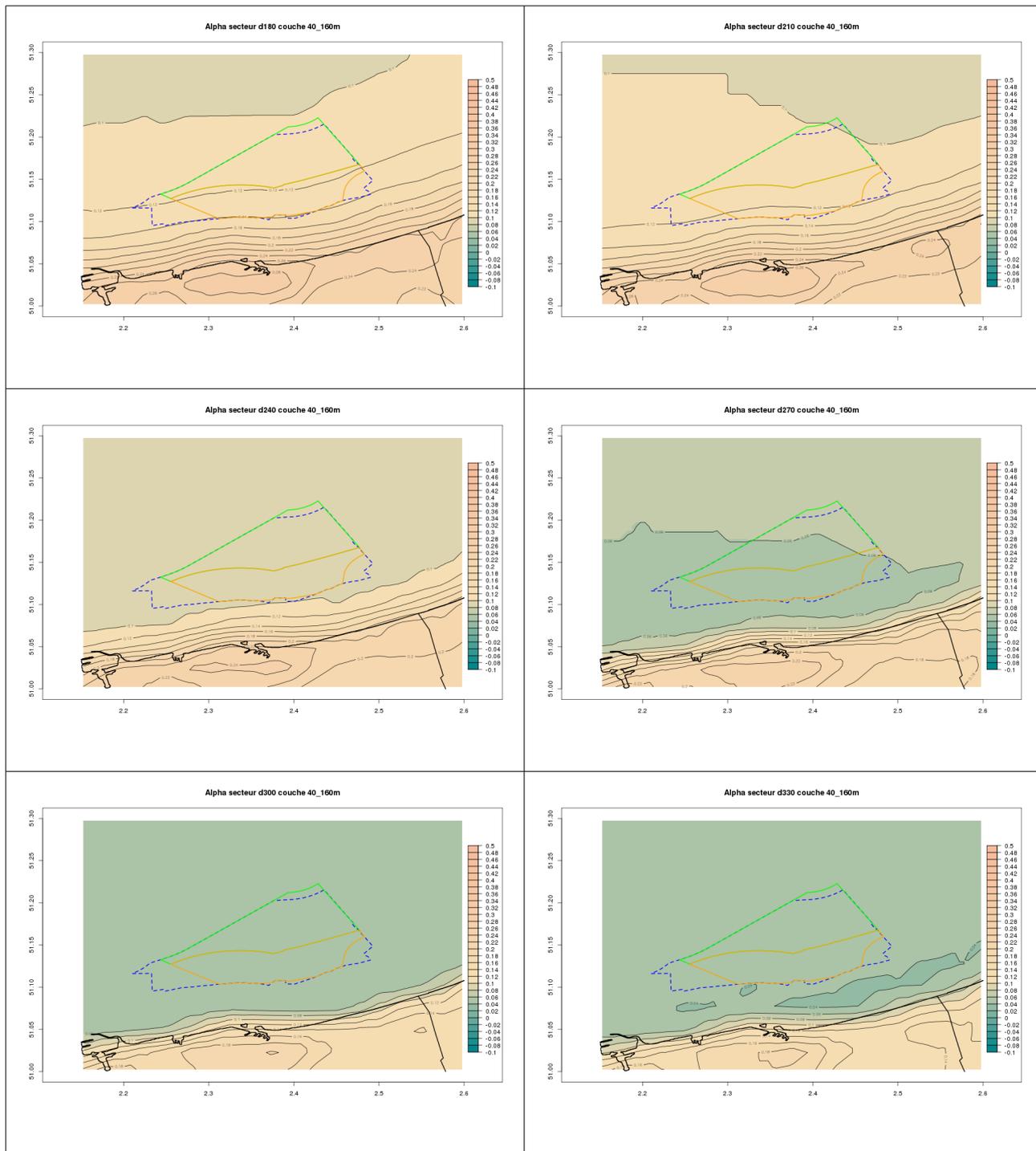
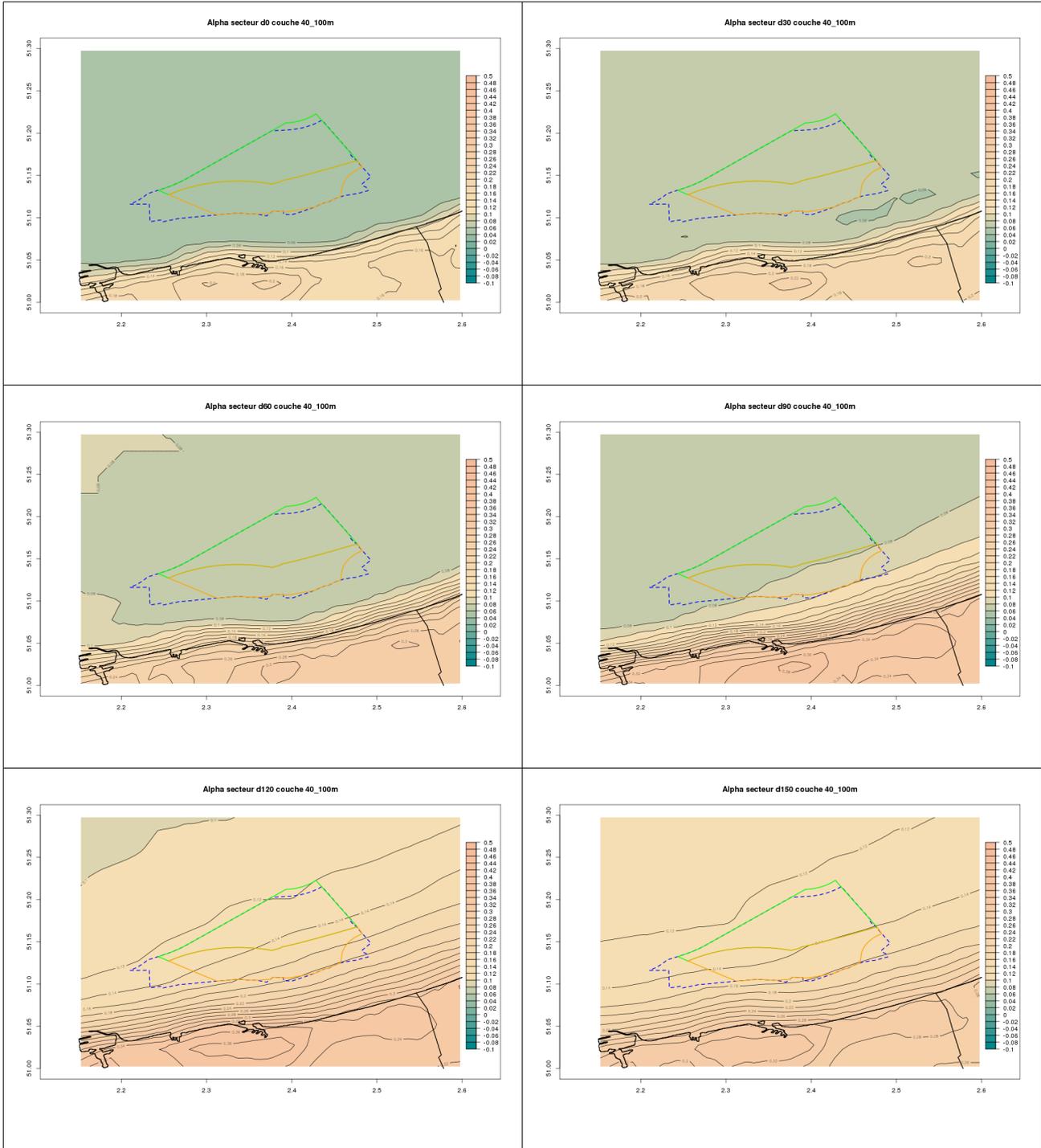


Illustration 21 : cartes du coefficient  $\alpha$  de cisaillement de vent pour la couche 40-160 m par secteur de direction de  $30^\circ$  pour la zone de Dunkerque, calculé à partir du profil moyen du vent AROME (2000-2015)



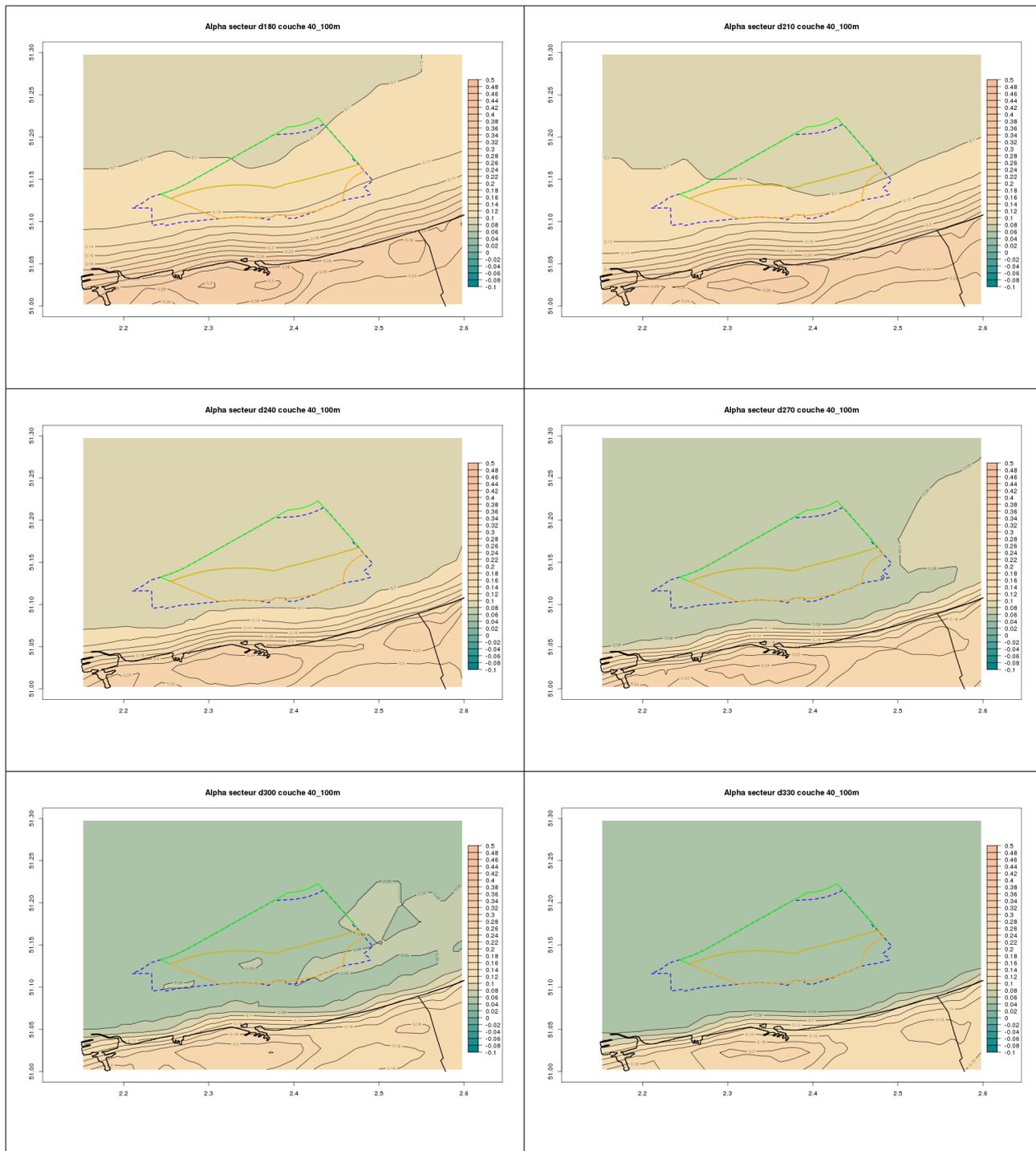
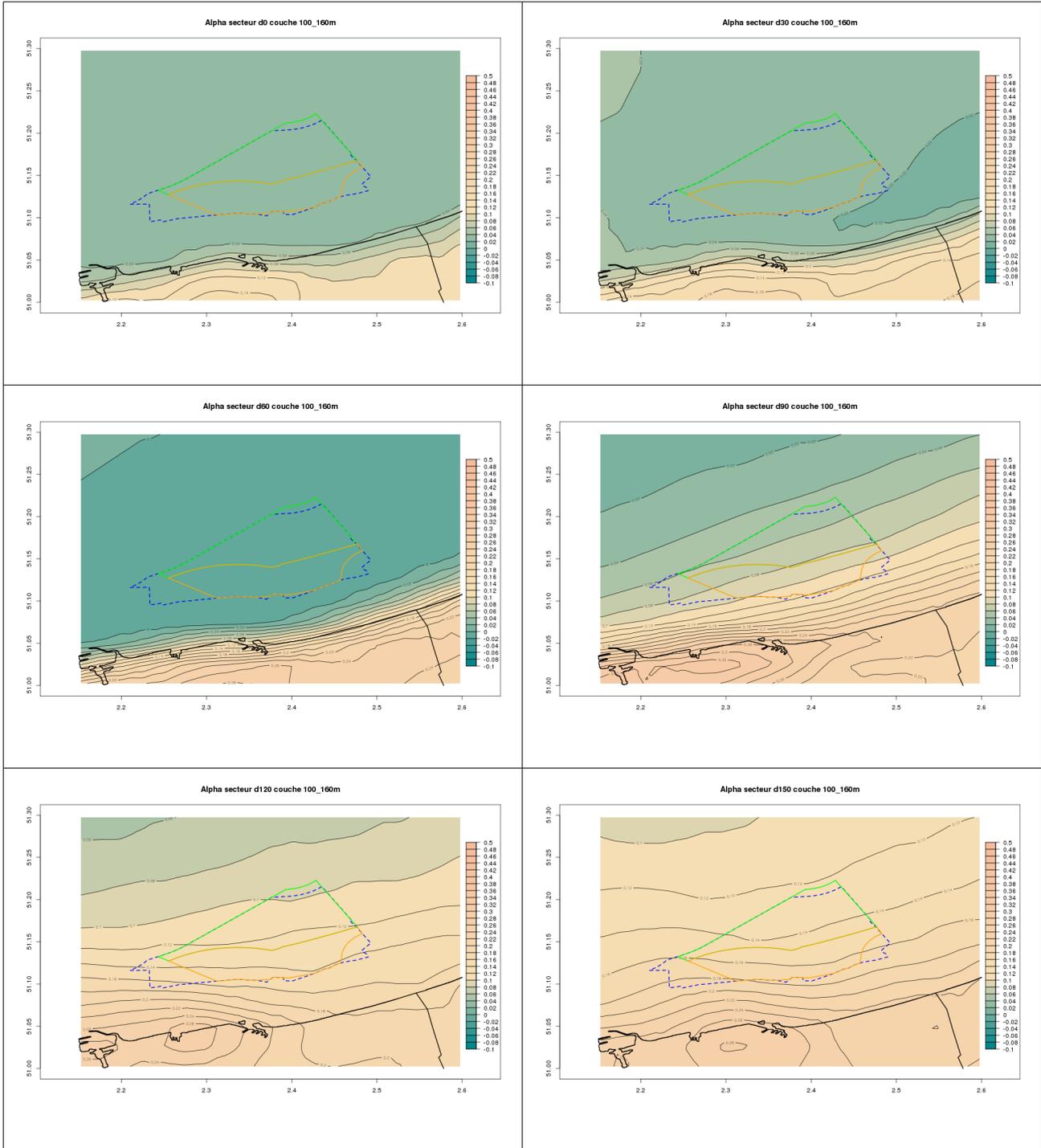


Illustration 22 : cartes du coefficient  $\alpha$  de cisaillement de vent pour la couche 40-100 m par secteur de direction de 30° pour la zone de Dunkerque, calculé à partir du profil moyen du vent AROME (2000-2015)



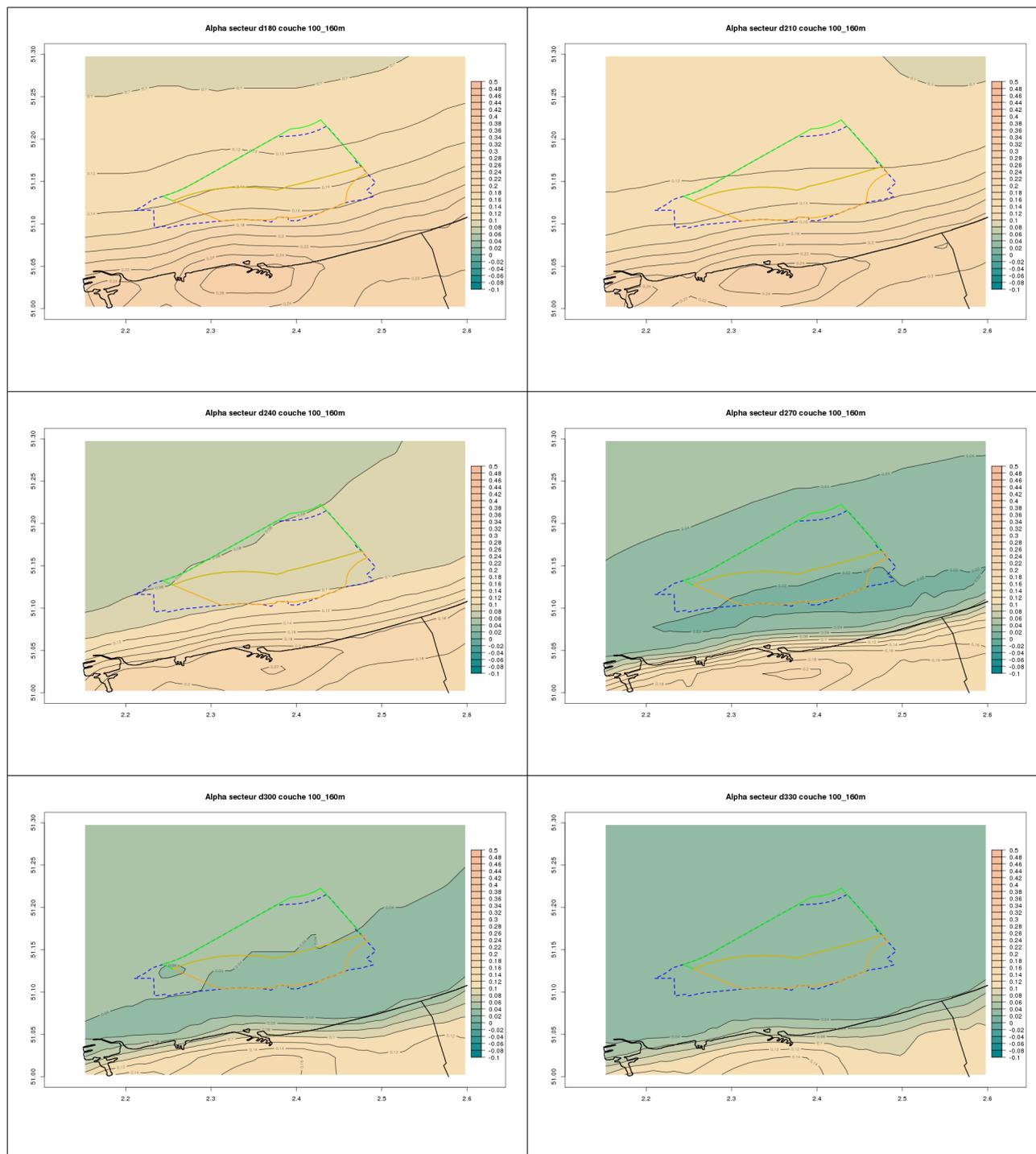


Illustration 23 : cartes du coefficient  $\alpha$  de cisaillement de vent pour la couche 100-160 m par secteur de direction de  $30^\circ$  pour la zone de Dunkerque, calculé à partir du profil moyen du vent AROME (2000-2015)

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.

## 5.2 Pour la bande littorale

### 5.2.1 Intensité de turbulence

Pour la bande littorale, les **moyennes de l'intensité de turbulence** aux niveaux **40, 100 et 160 m** ont été calculées et sont cartographiées ci-dessous.

Ces données sont disponibles dans les fichiers de nom : [Metropole\\_A2000-2015\\_IT\\_Nyy\\_MOY\\_All.csv](#), où  $yy=40$  ou  $100$  ou  $160$  m.

Chacun de ces fichiers (1 par niveau) débute par une ligne entête puis comporte une ligne par point de grille, soit un total de 34 275 lignes par fichier.

Chacun de ces fichiers comporte 3 colonnes qui sont :

Latitude (en degrés décimaux) Longitude (en degrés décimaux) Moyenne de l'intensité de turbulence (sans unité)

Le séparateur de champs est le point virgule, le caractère de décimale est la virgule.

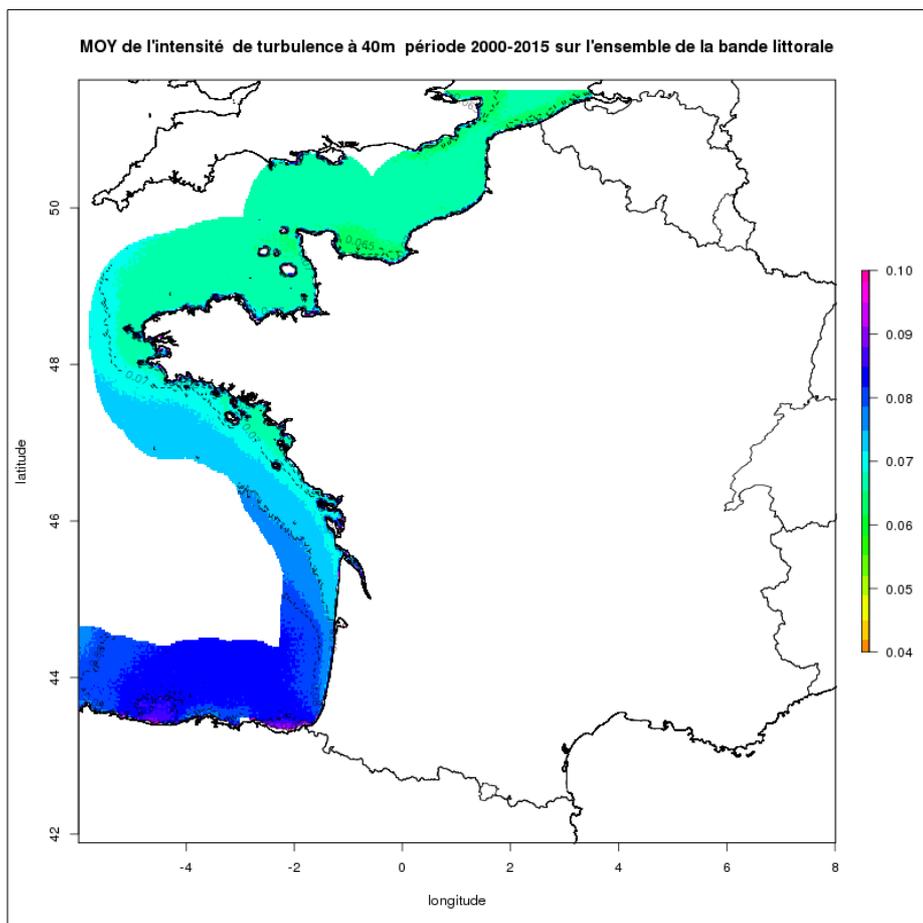


Illustration 24 : carte de la moyenne de l'intensité de turbulence au niveau 40 m sur la bande littorale, calculée à partir des données AROME (2000-2015)

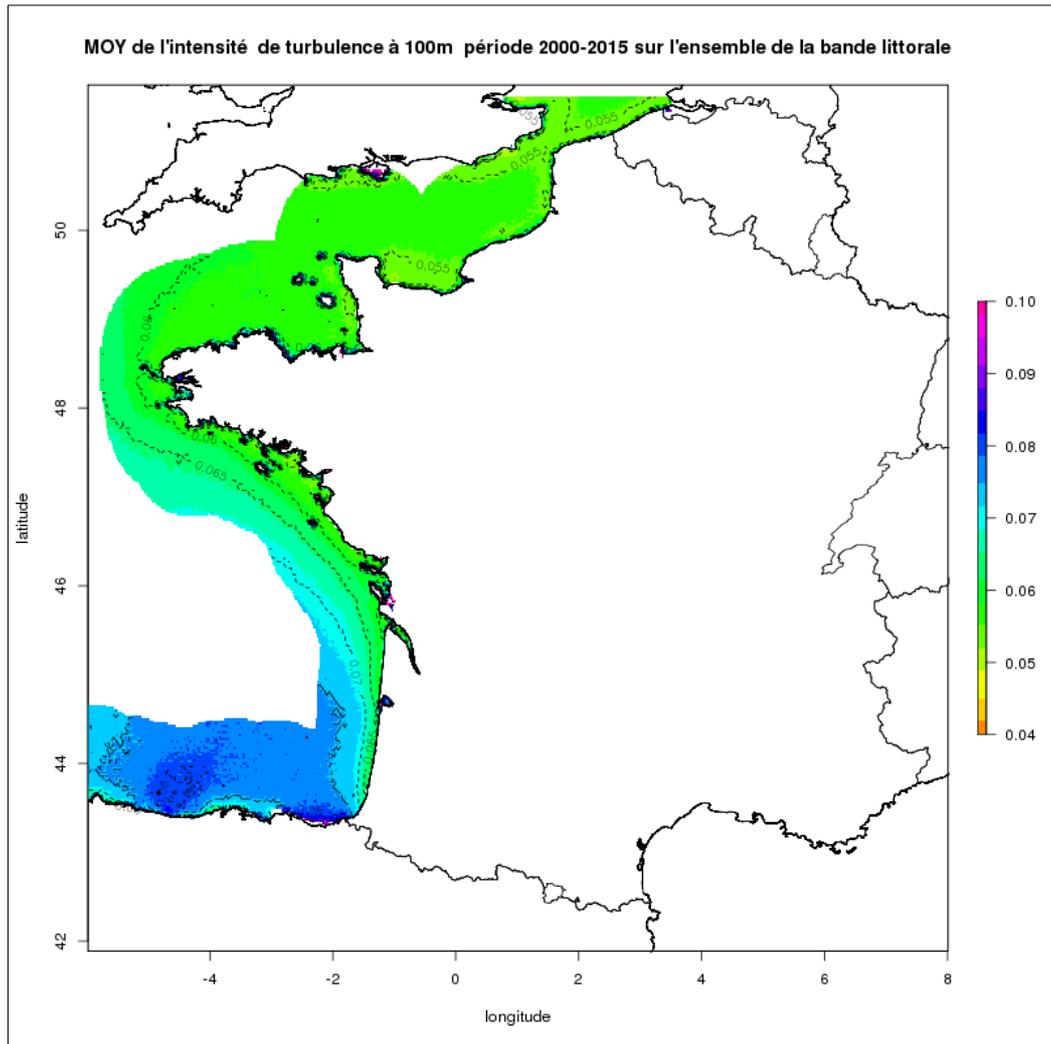


Illustration 25 : carte de la moyenne de l'intensité de turbulence au niveau 100 m sur la bande littorale, calculée à partir des données AROME (2000-2015)

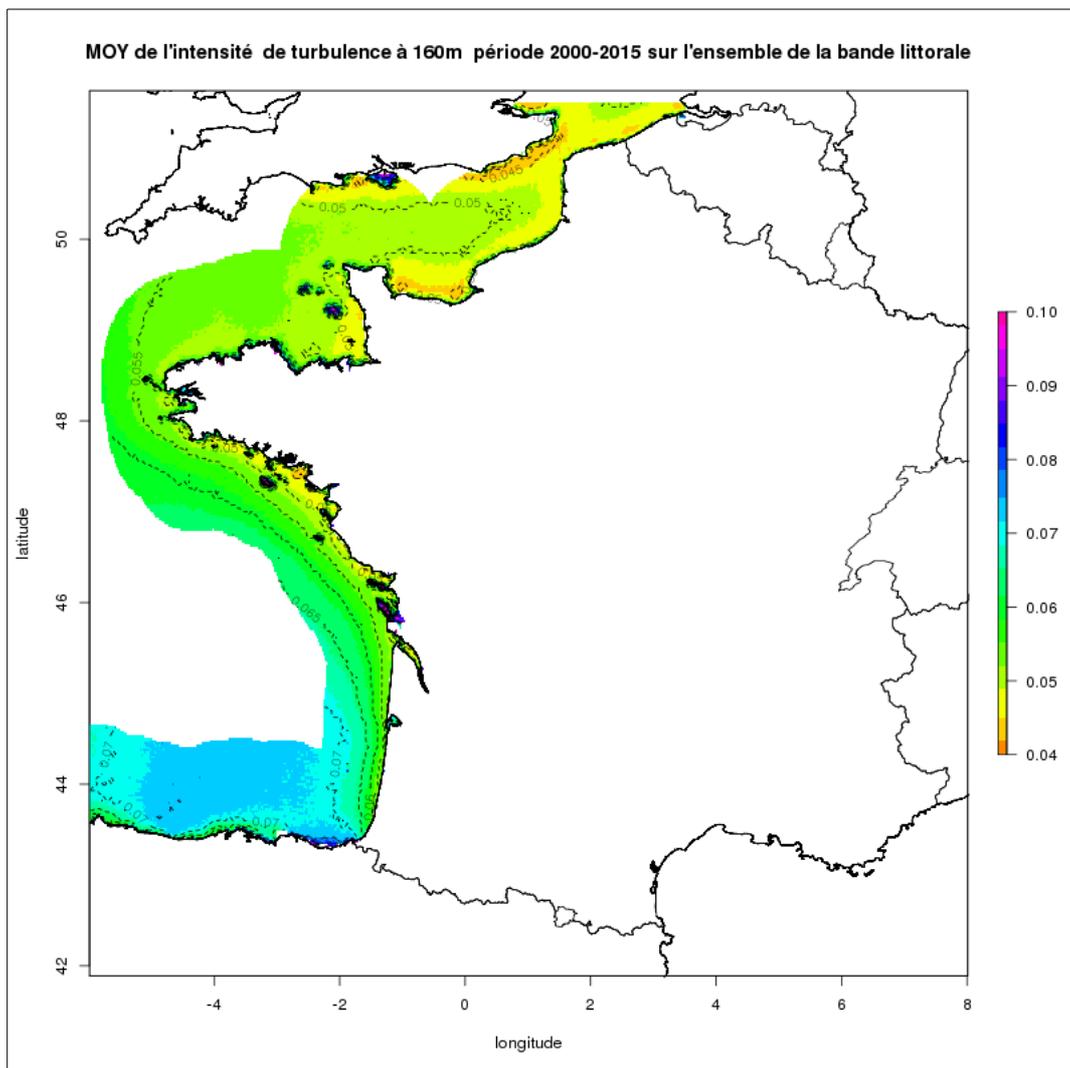


Illustration 26 : carte de la moyenne de l'intensité de turbulence au niveau 160 m sur la bande littorale, calculée à partir des données AROME (2000-2015)

L'analyse sommaire de ces cartes montre bien que la **moyenne de l'intensité de turbulence est plus importante à 40 m, qu'à 100 m et 160 m**, illustrant ainsi bien la **diminution de l'intensité de turbulence quand l'altitude augmente**.

Quel que soit le niveau considéré (40, 100, 160 m), ces cartes mettent en évidence des intensités de turbulence plus faibles en pleine mer que sur les côtes.

Pour le domaine maritime étudié allant de l'Atlantique à la Mer du Nord en passant par la Manche, les intensités de turbulence les plus élevées sont rencontrées dans le Golfe de Gascogne.

## 5.2.2 Rafale à 100 m

Pour la bande littorale, la **moyenne** et le **maximum** des **rafales estimées à 100 m** ont été calculées sur la période 2000-2015 et sont cartographiées ci-dessous.

Ces données sont disponibles dans les fichiers de nom :

[Metropole\\_A2000-2015\\_estFFmax\\_N100\\_MOY\\_All.csv](#) et

[Metropole\\_A2000-2015\\_estFFmax\\_N100\\_MAX\\_All.csv](#).

Chacun de ces fichiers (1 par niveau) débute par une ligne entête puis comporte une ligne par point de grille, soit un total de 34 275 lignes par fichier.

Le fichier [Metropole\\_A2000-2015\\_estFFmax\\_N100\\_MOY\\_All.csv](#) comporte 3 colonnes qui sont :

Latitude (en degrés décimaux) Longitude (en degrés décimaux) Moyenne de la rafale estimée à 100 m (m/s et décimale)

Le fichier [Metropole\\_A2000-2015\\_estFFmax\\_N100\\_MAX\\_All.csv](#) comporte 3 colonnes qui sont :

Latitude (en degrés décimaux) Longitude (en degrés décimaux) Maximum de la rafale estimée à 100 m (m/s et décimale)

Le séparateur de champs est le point virgule, le caractère de décimale est la virgule.

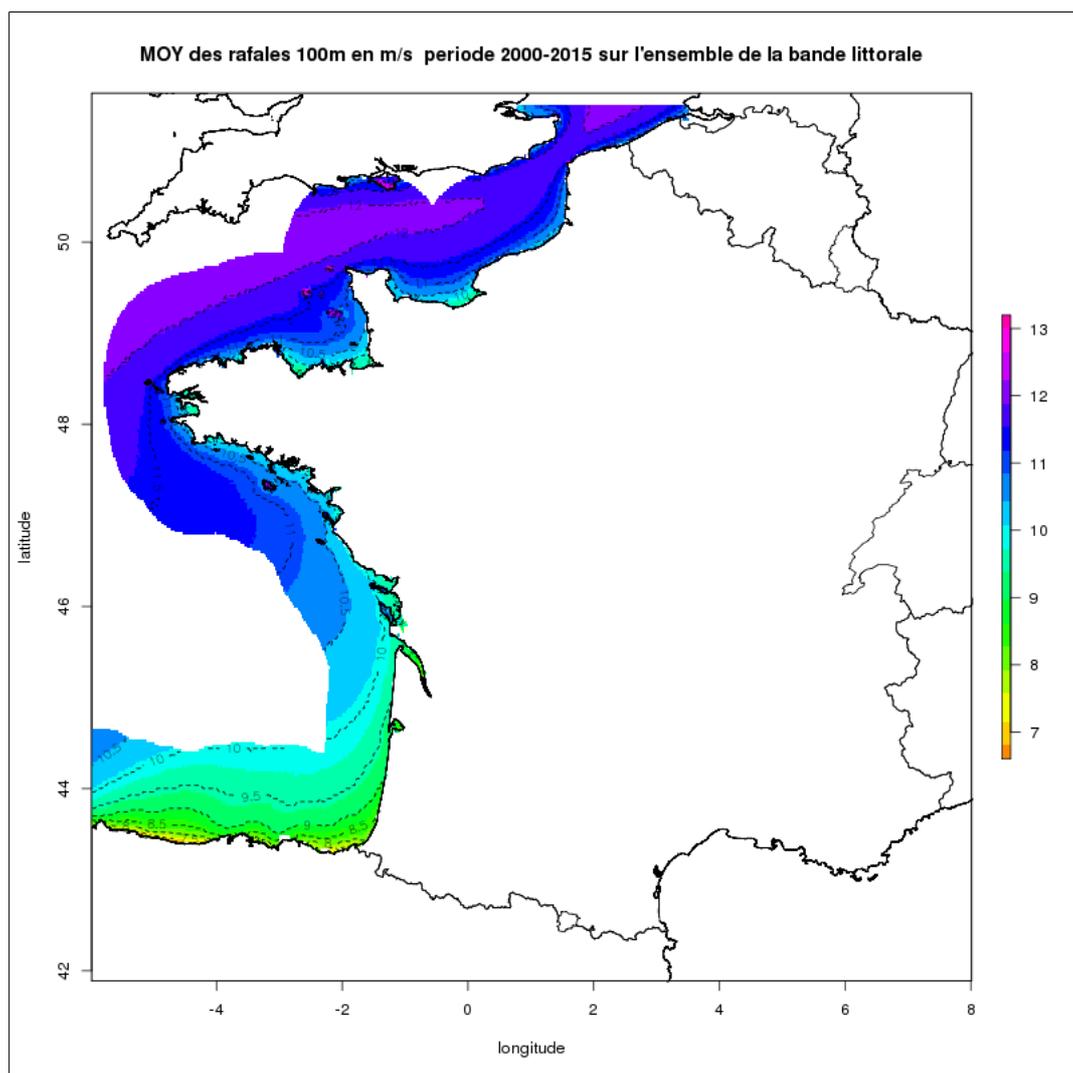


Illustration 27 : carte de la moyenne des rafales à 100 m sur la bande littorale, calculée à partir des données AROME (2000-2015)

Cette carte montre que la moyenne des rafales à 100 m est plus forte en Manche et Mer du Nord que dans le golfe de Gascogne. La répartition spatiale est voisine de celle du vent moyen à 100 m.

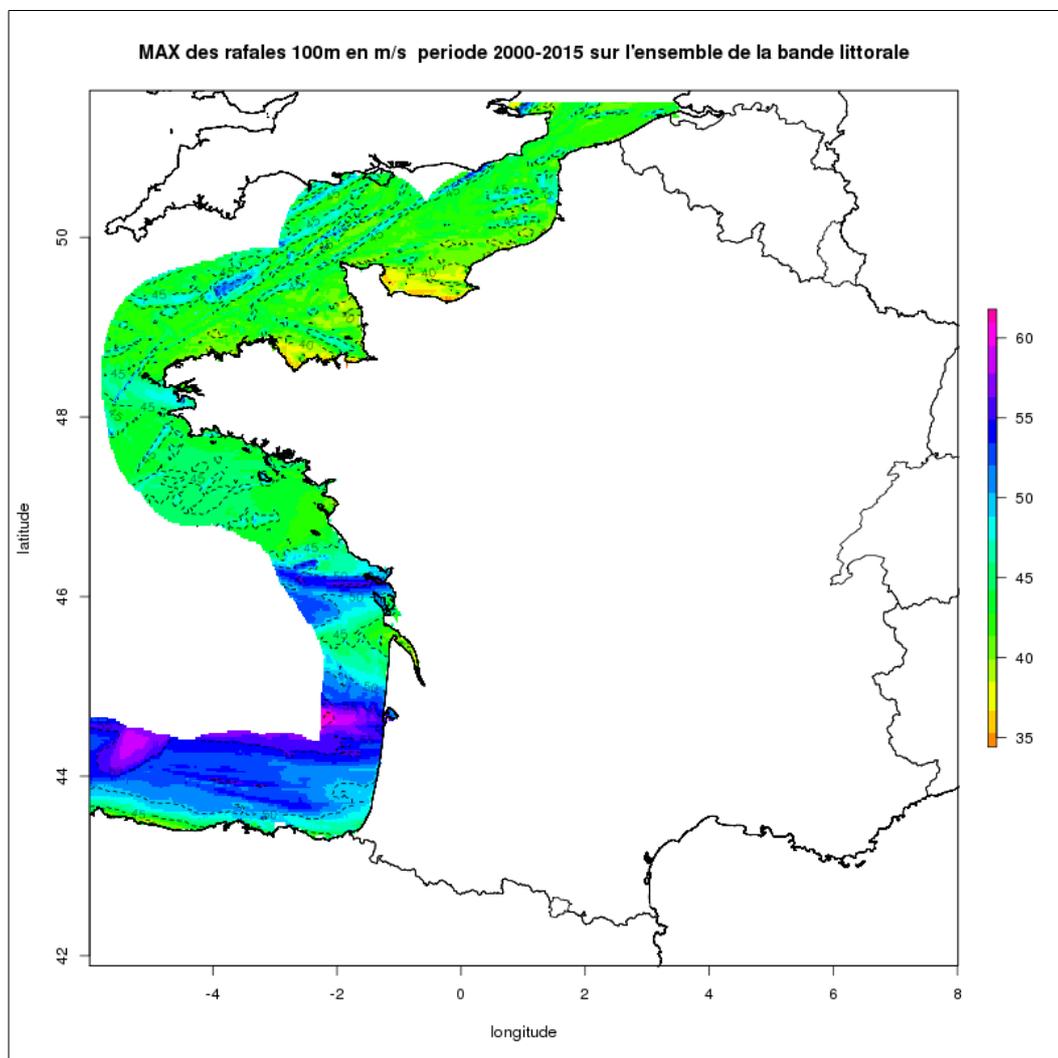


Illustration 28 : carte du maximum des rafales à 100 m sur la bande littorale, calculé à partir des données AROME (2000-2015)

Cette carte montre le maximum des rafales à 100 m issu de l'historique des données des rafales estimées à 100 m. Sur la période étudiée 2000-2015, les rafales maximales se rencontrent sur la zone sud de l'océan Atlantique de la côte vendéenne au Golfe de Gascogne ; elles sont à associer à la tempête Xynthia du 27 au 28 février 2010 avec l'axe bien visible au large de la Charente-Maritime ainsi qu'à la tempête Klaus du 24 janvier 2009 liée à une dépression creuse sur le Golfe de Gascogne.

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

Pour la bande littorale, le **coefficient  $\alpha$  de cisaillement de la force du vent sur la couche 40 – 160 m** est calculé à partir des **profils moyens de vent d'AROME** sur la période 2000-2014. Ces

données sont fournies et cartographiées ci-dessous.

Ces données sont disponibles dans le fichier de nom :  
[Metropole\\_A2000-2014\\_Alpha\\_40\\_160\\_All.csv](#).

Ce fichier débute par une ligne entête puis comporte une ligne par point de grille, soit un total de 34 275 lignes par fichier.

Il comporte 3 colonnes qui sont :

Latitude (en degrés décimaux) Longitude (en degrés décimaux) Alpha (sans unité)

Le séparateur de champs est le point virgule, le caractère de décimale est la virgule.

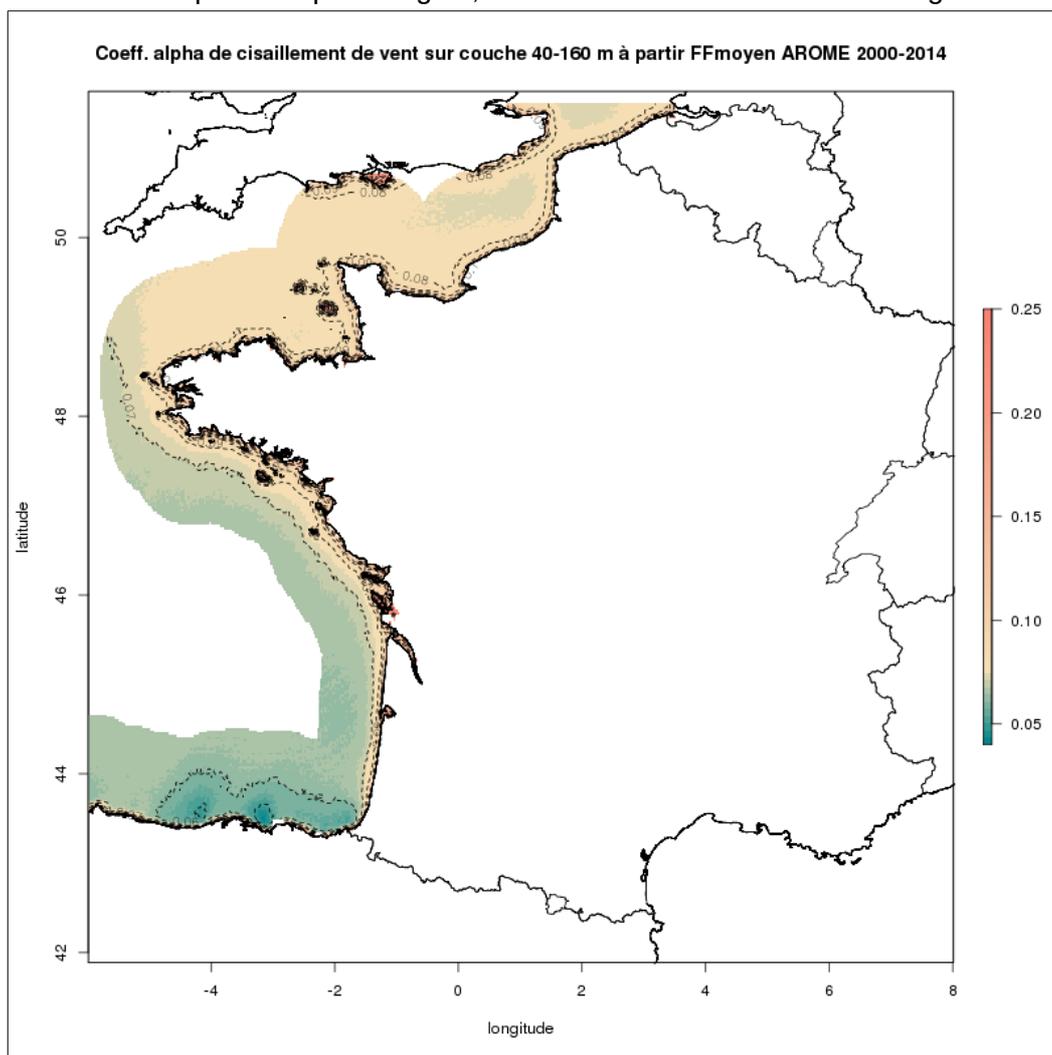


Illustration 29 : carte du coefficient  $\alpha$  de cisaillement de vent pour la couche 40-160 m tous secteurs confondus sur la bande littorale, calculé à partir du profil moyen du vent AROME (2000-2014)

Cette carte du **coefficient  $\alpha$  de cisaillement vertical de la force du vent** montre **une croissance de ce paramètre de la mer vers les côtes**, ce qui est tout à fait conforme au constat d'une turbulence plus forte sur terre que sur mer et aux valeurs du coefficient  $\alpha$  rencontrées dans la littérature sur le sujet.

## 6 Incertitudes associées aux données fournies

Tous les calculs effectués dans le cadre de ce lot l'ont été à partir de la base de données horaires d'AROME sur la période 2000-2015 (ou 2000-2014 pour l'exposant du cisaillement de vent sur la bande littorale). Ainsi, une source d'incertitude de ces résultats est liée notamment à **l'incertitude associée aux variables issues du modèle AROME entrant en jeu pour le calcul des indicateurs de turbulence** ici fournis.

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

### 6.1 Incertitude sur les intensités de turbulence estimées

La formule retenue pour le calcul de l'intensité de turbulence prend en compte les variables TKE et FF d'AROME à un niveau d'altitude donné. La qualité des intensités de turbulence estimées dépend ainsi de la qualité de ces paramètres AROME. Des évaluations de champs relatifs à la couche limite d'AROME et à la TKE ont été réalisées sur le domaine terrestre (comme lors de la campagne de mesure BLLAST [Couvreur et al, 2016]) mais on ne dispose pas d'évaluation spécifique sur le domaine maritime.

La **comparaison des intensités de turbulence** issues des données observées et estimées par AROME pour un point en mer (résultats présentés au paragraphe 4.1) a montré une **sous-estimation** (d'environ 10 %) **des séries estimées par rapport à la série des données observées**. Une comparaison similaire réalisée pour deux points sur terre à des hauteurs à 50 ou 100 m sur une période d'un an et demi montre également une sous-estimation des séries estimées, qui est de l'ordre de 5 % au niveau de la moyenne et de la valeur du Q90 de l'intensité de turbulence.

### 6.2 Incertitude sur l'estimation des rafales

La rafale d'AROME à 10 m est issue d'un diagnostic dont la formule de calcul est  $RAF_{10m} = FF_{10m} + 3.5 * \sqrt{TKE_{20m}}$  avec  $FF_{10m}$  le vent moyen à 10 m,  $TKE_{20m}$  l'énergie cinétique turbulente à 20 m. La force du vent à 10 m intervenant dans la formule de calcul de la rafale à 10 m, il est intéressant de fournir ici **quelques éléments sur la qualité du vent à 10 m dans**

**AROME.** Météo-France suit en routine la qualité du vent à 10 m dans AROME sur terre. La comparaison par rapport aux observations du vent à 10 m issues des SYNOP (messages d'observation en surface circulant sur le système mondial de télécommunication de l'Organisation Météorologique Mondiale) montre, au niveau de la direction, un biais inférieur en moyenne à  $-3^\circ$  et une erreur quadratique moyenne inférieure à  $35^\circ$  en moyenne ; au niveau de la force du vent, on constate un biais inférieur en moyenne à  $-0.3$  m/s en force du vent et une erreur quadratique moyenne de l'intensité du vent inférieure à  $1.7$  m/s en moyenne. Le vent sur terre et dans les basses couches (près du sol) est davantage entaché d'erreur que le vent plus haut et sur mer, du fait d'une représentation partielle des spécificités du terrain dans le modèle à résolution horizontale  $2.5$  km. On sait actuellement qu'AROME surestime les rafales à 10 m dans certaines situations convectives et qu'il les sous-estime plutôt dans des cas de vents régionaux tels que le Mistral et la Tramontane.

Quant aux rafales à 100 m 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 à 100 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 à 100 m en off-shore nécessiterait un calcul de score par rapport à des observations de vent à 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** avec :

- des corrélations très correctes entre les séries des rafales à 100 m estimées et observées, avec un coefficient de  $r^2$  compris entre 0.7 et 0.85,
- des écarts sur les moyennes et quartiles Q25, Q50, Q75 entre les valeurs estimées à partir du modèle AROME et les valeurs observées en valeur absolue entre moins de 2 % (voir paragraphe 4.2.1 avec les statistiques obtenues pour un mât au sud des côtes anglaises avec des différences au plus de 0.3 m/s entre séries observées et estimées) et au plus de 9 % pour un point terrestre étudié (0.9 m/s pour un Q75), avec une tendance plutôt à la surestimation des rafales à 100 m par les séries estimées,
- des évolutions diurnes et mensuelles observées sur les séries mesurées bien reproduites sur les séries issues de la modélisation.

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

Concernant les rafales cinquantennales calculées sur la zone de Dunkerque, elles l'ont été à partir de séries d'une durée de 16 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 16 ans, il est ainsi possible de calculer des quantiles associés à des durées de retour de 50 ans, mais nous sommes à la limite de la durée de retour calculable ; aussi, les résultats obtenus en termes de rafales cinquantennales à 100 m doivent être pris par conséquent avec précaution. Pour certains points de grille de cette zone, l'ajustement par la loi Pareto conduisant à des coefficients de forme supérieur à 0.4 (compris entre 0.4 et 0.57), les résultats issus de ces calculs à ces points de grille doivent être pris avec une précaution encore plus grande.

La **valeur de la rafale cinquantennale à 100 m 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 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 au niveau 100 m.

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

Le coefficient  $\alpha$  de cisaillement de vent de la couche 40 – 160 m sur la bande littorale a été calculé en prenant en compte la force du vent moyen à 40 m et à 160 m. **Basé sur un profil moyen de vent**, ce coefficient donne une **idée générale du cisaillement vertical de la force du vent entre deux niveaux** qui sont, ici, en l'occurrence 40 m (correspondant en gros au bas des pales) et 160 m (haut des pales).

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].

## 7 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. Ces **indicateurs de turbulence** sont **l'intensité de turbulence, la rafale à 100 m, 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 2000-2015** permet de calculer des statistiques de ces différents indicateurs de la turbulence. Pour l'intensité de la turbulence et la rafale à 100 m, une **phase préliminaire et non négligeable** a été **l'obtention de formules** permettant de calculer à partir des données AROME des diagnostics comparables pour ces grandeurs à des données observées ainsi que la recherche d'observations de vent en altitude afin de procéder à la **validation** de ces formules **en comparant les diagnostics modèle ainsi obtenus avec des mesures**. Une des difficultés de cet exercice de validation est de disposer de données de vent en altitude et qui plus est sur mer.

Pour l'intensité de turbulence, les rafales à 100 m et l'exposant du cisaillement vertical du vent, des statistiques sont fournies sur une large bande littorale allant de la Mer du Nord à l'Atlantique, ainsi que sur la zone de Dunkerque avec une analyse plus fine de ces résultats par secteurs de direction de 30° sur cette zone spécifique. 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. Le tableau suivant (voir tableau 5) récapitule l'ensemble des données et fichiers fournis dans le cadre de ces travaux sur la turbulence atmosphérique.

Indicateur de turbulence	Formule de calcul	Zone de Dunkerque (247 points de grille)	Bande Littorale (34 274 points de grille)
Intensité de turbulence	<p>À un niveau donné :</p> $IT_{AROME} = \frac{\sqrt{2 * (2/3) * TKE_{AROME}}}{FF_{AROME}}$	<p>moyenne et Q90 de l'intensité de turbulence globale et par direction de 30° aux niveaux 40, 100, 160 m par points de grille (voir paragraphe 5.1.1)</p> <p>↳ 3 fichiers (1 par niveau) de 28 colonnes contenant ces résultats : <a href="#">Stat_IT_ZoneDNK_Nyy.txt</a>, où yy=40 ou 100 ou 160 m</p> <p>Séparateur de champs : espace Caractère de décimale : point</p>	<p>moyenne de l'intensité de turbulence aux niveaux 40, 100, 160 m par points de grille (voir paragraphe 5.2.1)</p> <p>↳ 3 fichiers (1 par niveau) de 3 colonnes contenant ces résultats :</p> <p><a href="#">Metropole_A2000-2015_IT_Nyy_MOY_All.csv</a>, où yy=40 ou 100 ou 160 m</p> <p>Séparateur de champs : point virgule Caractère de décimale : virgule</p>
Rafale à 100 m	$RAF_{100m} = RAF_{10m} - FF_{10m} + FF_{100m}$ <p>méthode de calcul de la rafale à 100 m de durée de retour 50 ans : loi Pareto avec méthode des moments et méthode mrlp pour détermination du seuil</p>	<p>- séries chronologiques horaires des rafales estimées à 100 m par points de grille (voir paragraphe 5.1.2)</p> <p>↳ 247 fichiers de 2 colonnes avec ces séries : <a href="#">ECGC16ansDGEC100_DNK0[Numpt]_N100_estFFmax_MetreParSeconde.txt</a> avec Numpt=[1,247]</p> <p>Séparateur de champs : espace Caractère de décimale : point</p> <p>- quantiles des DR50 des rafales à 100 m, bornes inférieures et supérieures pour l'intervalle de confiance de 70 %</p> <p>↳ 1 fichier de 7 colonnes contenant ces résultats : <a href="#">DR50_RAF100_gpd_TpsSepar2.csv</a></p> <p>Séparateur de champs : point-virgule Caractère de décimale : point</p>	<p>moyenne et maximum des rafales à 100 m (voir paragraphe 5.2.2)</p> <p>↳ 2 fichiers de 3 colonnes avec ces résultats : <a href="#">Metropole_A2000-2015_estFFmax_N100_MOY_All.csv</a> <a href="#">Metropole_A2000-2015_estFFmax_N100_MAX_All.csv</a></p> <p>Séparateur de champs : point virgule Caractère de décimale : virgule</p>

<p>Exposant <math>\alpha</math> de cisaillement vertical de la force du vent</p>	<p>Sur la couche <math>Z_1</math>-<math>Z_2</math> :</p> $\alpha = \frac{\ln(FF_2/FF_1)}{\ln(Z_2/Z_1)}$	<p>exposant du cisaillement de vent avec différenciation jour/nuit et par direction de 30° pour les couches 40-100, 100-160, 40-160 m (voir paragraphe 5.1.3)</p> <p>↳ 3 fichiers (1 par couche) de 41 colonnes contenant ces résultats :</p> <p><a href="#">Alpha_ZoneDNK_40_160.txt</a>,  <a href="#">Alpha_ZoneDNK_40_100.txt</a>,  <a href="#">Alpha_ZoneDNK_100_160.txt</a></p> <p>Séparateur de champs : espace                  Caractère de décimale : point</p>	<p>exposant du cisaillement de vent pour la couche 40- 160 m (voir paragraphe 5.2.3)</p> <p>↳ 1 fichier de 3 colonnes avec ces résultats : <a href="#">Metropole_A2000-2014_Alpha_40_160_All.csv</a>.</p> <p>Séparateur de champs : point virgule                  Caractère de décimale : virgule</p>
--	---	--	--

Tableau 5 : récapitulatif de l'ensemble des données et fichiers fournis dans le cadre des présents travaux sur la turbulence atmosphérique.

## 8 Remerciements pour la mise à disposition de données

Météo-France remercie la DGA, notamment l'équipe technique DGA Techniques terrestres, pour cette collaboration et le soutien à cette étude par la mise à disposition de mesures de vent lidar entre janvier 2015 et octobre 2016 entre 40 et 160 m à la station de Bourges.

Ces travaux ont bénéficié des données de vents entre 50 et 100 m au large des côtes sud de l'Angleterre, fournies gracieusement par Crown Estate, propriétaire des données, <http://www.marinedataexchange.co.uk/>, sur la période de mai 2012 à janvier 2014.

## 9 Bibliographie

Couvreur 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

Cuxart, J., P. Bougeault, et J.-L. Redelsperger, 2000, *A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations*, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 126, 1–30, 2000.

De Moor G, *Couche limite atmosphérique et turbulence : les bases de la micrométéorologie dynamique*, Cours et manuels n°13, 2000

Dubois C., Faucou E., Barthod M., Pouponneau B., Pourret V., Mestre O., Martinoni-Lapierre S., Sorel M. : *Combining National Meteorological meso-scale data modelling and CFD, for wind power plant production assessments* - European Wind Energy Conference 2015.

Hadjira Schmitt-Foudhil, *Météorologie de la couche limite atmosphérique, module environnement atmosphérique et qualité de l'air*, CEREA, novembre 2010, [http://cerca.enpc.fr/fich/support\\_cours/POLU1\\_2010-2011/cours\\_CLA\\_2\\_nov\\_2010\\_HSF\\_final.pdf](http://cerca.enpc.fr/fich/support_cours/POLU1_2010-2011/cours_CLA_2_nov_2010_HSF_final.pdf)

Honnert R., Masson V., and Couvreux F., 2011 : *A Diagnostic for Evaluating the Representation of Turbulence in Atmospheric Models at the Kilometric Scale*. Journal of the Atmospheric Sciences, 68, p.3112-3131

Honnert R. and Masson V., 2014 : *What is the smallest physically acceptable scale for 1D turbulence schemes ?* Front. Earth Sci. 2 :27. doi : 10.3389/feart.2014.00027

MEASNET Procedure : *Evaluation of Site-Specific Wind Conditions*, Version 2, April 2016

*Norme internationale de classification des éoliennes* IEC 61400-3, édition 1.0, 2009-02

Peña A., Floors R., Sathe A., Gryning S.-E., Wagner R., Courtney M. S., Larsén X. G., Hahmann A. N., Hasager C.B., *Ten Years of Boundary-Layer and Wind-Power Meteorology at Høvsøre*,

Denmark, *Boundary-Layer Meteorol* (2016) 158:1–26, DOI 10.1007/s10546-015-0079-8

Seigneur C., Cours SGE, Modélisation de la pollution atmosphérique, Dynamique, Cerea

Seity Y., Brousseau P., Malardel S., Hello G., Benard P., Bouttier F., Lac C., Masson V., *The AROME-France Convective-Scale Operational Model*, Monthly weather review, American Meteorological Society, volume 139, mars 2011, DOI: 10.1175/2010MWR3425.1

Stull R., *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers, 1988

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

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

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

Zhang 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

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

---

## FIN DU DOCUMENT

---