



Annexe I

Choix méthodologiques des estimateurs de rafale et indice de turbulence

Volet R&D Lot 3 : analyse des risques de turbulence

Version 1.0 du 31/03/2021

Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES) Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC)	@ guillaume.rouviere@developpement-durable.gouv.fr	 MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE
	☎ 01.40.81.20.98	
Chargé d'affaires : M. Christophe Jacolin	@ christophe.jacolin@meteo.fr ☎ 05 61 07 86 85	
Coordination technique : Mme Béatrice Pouponneau	@ beatrice.pouponneau@meteo.fr ☎ 05 61 07 85 97	



Évolutions successives

Référence	Date	Version	Évolution
Annexe I estimateurs de rafale et indice de turbulence	21/12/2020	V1	Création

Signatures

	Nom	Service	Signature
Rédacteur(s)	Olivier Roulle	DSM/CS/DC	
Relecteur(s)	B. Pouponneau	DSM/CS/DC	
Approbateur(s)			

RÉSUMÉ

Dans le cadre de la convention pluriannuelle Météo-France / MTES [DGEC] n° MF/2019/5100/00, une étude a été menée sur la validation dans le rejeu AROME d'un estimateur d'intensité de rafales, celle d'un estimateur de direction de rafales ainsi que celle d'un estimateur de l'intensité de turbulence.

L'estimateur de direction des rafales consiste à prendre pour direction de la rafale maximale celle du vent horaire. Cet estimateur est validé, avec une erreur de moins de ± 15 degrés dans la quasi-totalité des cas.

Concernant l'estimateur d'intensité des rafales, la comparaison à 100 m avec le mât Rampion des valeurs obtenues par la méthode de propagation de l'écart entre le vent maximal et le vent moyen à 10 m donne de bons résultats. Mais les résultats sont mitigés pour les LIDARS sur mer sans que l'on puisse savoir si c'est dû au comportement du rejeu AROME ou bien lié à un problème de qualité de la mesure du LIDAR sur mer.

La validation de l'estimateur du calcul de l'intensité de turbulence sur le rejeu AROME est entachée par la faible confiance accordée à la mesure de la dispersion par le LIDAR en mer. Compte-tenu des difficultés à valider cet indicateur pour les niveaux verticaux les plus hauts, il ne nous paraît pas opportun de livrer des intensités de turbulence au-dessus de 160 mètres.

Table des matières

1	Introduction.....	6
2	Objectif du document.....	6
3	Jeux de données :.....	7
4	Estimateur de la direction du vent maximal.....	7
4.1	Hypothèse.....	7
4.2	Erreur commise.....	7
5	Calcul de la vitesse maximale du vent.....	9
5.1	Hypothèse.....	9
5.2	Erreur commise.....	10
6	Calcul de l'intensité de turbulence.....	14
6.1	Hypothèse.....	14
6.2	Erreur commise.....	15

Index des illustrations

Illustration 1: Direction du vent AROME versus direction du vent maximal pour le LIDAR d'Oléron, à 200 m.....	8
Illustration 2: Répartition de l'erreur sur la vitesse maximale horaire du vent en fonction de la force du vent moyen à 200 m, pour Oléron à gauche et Dunkerque à droite.....	11
Illustration 3: Oléron, 200 m – Distribution des vitesses maximales de vent pour le rejeu et le LIDAR.....	13
Illustration 4: Dunkerque, 200 m – Distribution des vitesses maximales de vent pour le rejeu et le LIDAR.....	14
Illustration 5: Comparaison rejeu/LIDAR de la moyenne de l'intensité de turbulence à 100 m pour Oléron à gauche et pour Rampion à droite – Quantile 70 pour le rejeu et le LIDAR ou le mât pour les vents de 15 m/s.....	16
Illustration 6: Distribution de IT rejeu et IT LIDAR – CLA < 200 m à gauche, CLA ≥ 200 m à droite.....	17
Illustration 7: Oléron, 200 m – Différence de comportement du rejeu par rapport au LIDAR A gauche couche limite ≥ 200 m, à droite couche limite < 200 m.....	18



Index des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques des sites de mesures.....	7
Tableau 2: Médiane de l'erreur de direction entre la direction à l'heure ronde du rejeu et la direction du vent maximal horaire du LIDAR.....	8
Tableau 3: Quelques éléments statistiques (en m/s) de comparaison entre la vitesse maximale calculée à partir du rejeu AROME et celle mesurée par les LIDARS, à une hauteur de 200 m (vents ≥ 3 m/s).....	11
Tableau 4: Oléron, 200 m : statistiques sur l'erreur en fonction de classes de vitesse de vent.....	12
Tableau 5: Dunkerque, 200 m : statistiques sur l'erreur en fonction de classes de vitesse de vent.....	13
Tableau 6: Percentile 70 % de l'intensité de turbulence pour les vents d'environ 15 m/s...	17

1 Introduction

Dans le cadre de la convention pluriannuelle Météo-France / MTES [DGEC] n° MF/2019/5100/00, et de manière à couvrir l'ajout de niveaux hauteurs ou diagnostics supplémentaires dans les lots d'études, un volet R&D a été identifié dans le lot 3. Il porte sur les points suivants :

1. validation de l'estimateur d'intensité (défini lors de l'étude Lot 3 sur Dunkerque) de rafale pour des hauteurs supérieures à 160 m,
2. création et validation d'un estimateur de direction de rafale,
3. la validation de l'estimateur de l'intensité de turbulence (défini lors de l'étude Lot 3 sur Dunkerque).

Ce document présente le travail préliminaire qui a été conduit pour choisir et qualifier les estimateurs de rafale et d'intensité de turbulence retenus pour la réalisation du lot 3.

2 Objectif du document

Les calculs de champs pour les besoins du secteur de l'énergie éolienne n'étaient effectués jusqu'à présent qu'à des hauteurs inférieures à 160 mètres et les vérifications des méthodes de calcul de certains paramètres à partir des sorties du modèle AROME n'avaient été menées que sur des zones terrestres.

Plusieurs méthodes appliquées sur les données du rejeu AROME ont pu alors être vérifiées sur terre et pour des hauteurs ne dépassant pas 140 mètres au cours d'études antérieures :

1. la méthode qui consiste à supposer que, pour un niveau donné, la direction du vent maximal dans l'heure est identique à celle du vent moyen à l'heure ronde ;
2. celle qui consiste à supposer que la vitesse maximale du vent à un niveau donné est fonction d'une relation stable et simple entre la vitesse du vent moyen à ce même niveau, la vitesse du vent moyen et celle du vent maximal à 10 mètres ;
3. et enfin celle qui consiste à supposer que l'intensité de turbulence à un niveau donné peut être calculée simplement à partir de l'énergie cinétique turbulente TKE et la vitesse moyenne du vent au même niveau.

Une étude complémentaire a donc été menée pour vérifier les algorithmes appliqués au rejeu AROME en les comparant à des données en altitude, en mettant l'accent sur les données en mer et à des hauteurs à plus de 150 mètres.

Cette étude a été réalisée à partir des LIDARS d'Oléron et Dunkerque, mais aussi de Bourges, Lannemezan, Palaiseau, ainsi qu'à partir des mâts de Béganne et Rampion. Pour chacun des sites, les valeurs du rejeu AROME au point de grille le plus proche du site (et représentatif) ont été

comparées aux mesures des sites sur la période de validité de la mesure.

3 Jeux de données :

Les données mesurées sont de deux types : les mâts équipés et les LIDARS « vent ». Les caractéristiques des LIDARS et mâts utilisés sont consignées dans le tableau ci-après :

Site	Type	latitude	longitude	Date de début	Date de fin	Niveaux exploitables
Dunkerque	LIDAR	51,161	2,360	24/11/2016	23/11/2017	40, 60, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180 et 200 m
Oléron	LIDAR	45,833	0,000	01/09/2017	31/08/2018	40, 60, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180 et 200 m
Béganne	mât	47,596	— 2,240	21/02/2007	10/11/2008	30, 45, 60 et 70.5 m
Bourges	LIDAR	47,063	2,442	25/01/2015	05/04/2017	40, 65, 80, 105, 130, 155, 180, 205, 230, 255, 280 et 305 m
Landes	LIDAR	44,420	0,000	04/09/2019	25/05/2020	40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 et 220 m
Bourges2	LIDAR	47,063	2,442	01/09/2017	23/08/2018	40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 et 200 m
Rampion	mât	50,688	— 0,343	13/05/2012	21/01/2014	37, 61, 84 et 105 m
Palaiseau	LIDAR	48,713	2,216	01/01/2017	28/09/2020	40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 250 et 290 m

Tableau 1: Caractéristiques des sites de mesures

4 Estimateur de la direction du vent maximal

4.1 Hypothèse

Dans AROME, la rafale du vent à 10 m est définie à partir d'un diagnostic, calculé à chaque pas de temps du modèle (environ 50 secondes), et dont on prend la valeur maximale dans l'heure qui précède l'heure ronde.

La direction affectée à cette rafale 10 m est celle du vent moyen à 10 m à ce même pas de temps du modèle.

Au-dessus de 10 m, le rejeu AROME ne dispose pas de direction du vent au moment où sa vitesse est maximale dans l'heure. L'hypothèse que nous faisons consiste à dire que cette direction reste très proche de celle du vent à l'heure ronde. L'étude ici a donc essentiellement consisté à estimer l'erreur commise en comparant la direction du vent du rejeu AROME à l'heure ronde à la direction du vent maximal mesuré par le LIDAR dans l'heure.

4.2 Erreur commise

Quand on étudie la distribution de l'erreur de direction du vent en fonction de la force du vent

observé, ici à partir des campagnes de mesures Lidar au large de Dunkerque et Oléron, à 200 m de hauteur, on constate que l'hypothèse est vraisemblable lorsque les vents sont modérés à forts.

	Vitesse du vent moyen en m/s						
	[0,3[	[3,6[	[6,9[	[9,12[	[12,15[	[15,20[	[20,∞[
Dunkerque	25,5	10,6	7,9	6,9	6,7	6,8	9,6
Oléron	26,3	12,0	7,9	5,1	4,8	4,8	3,8

Tableau 2: Médiane de l'erreur de direction entre la direction à l'heure ronde du rejeu et la direction du vent maximal horaire du LIDAR

Ainsi pour les vents faibles, inférieurs à 3 m/s, l'erreur de direction est supérieure à 25-26 degrés dans 1 cas sur 2 et supérieure à 50 degrés environ dans 1 cas sur 4. Mais cette erreur de direction diminue fortement lorsque la vitesse de vent augmente.

DD AROME versus DX LIDAR pour Oléron à 200 m

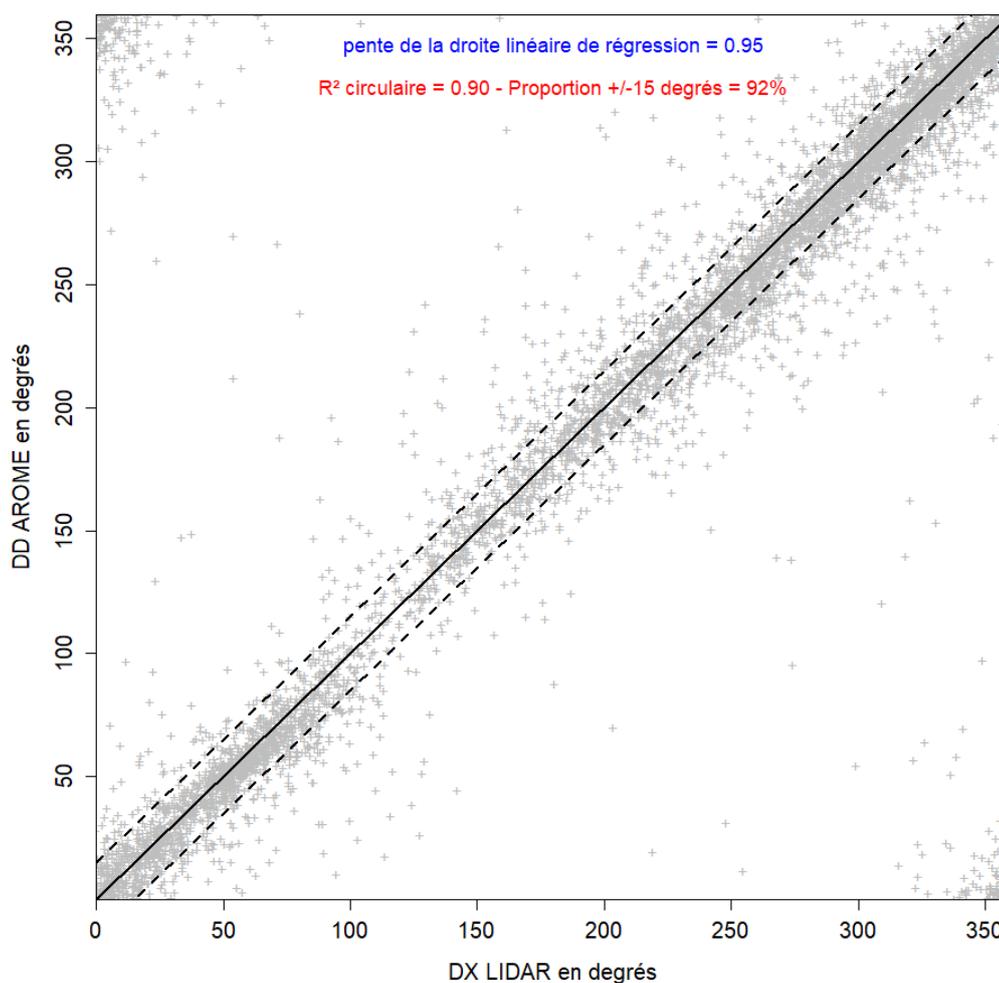


Illustration 1: Direction du vent AROME versus direction du vent maximal pour le LIDAR d'Oléron, à 200 m

Le graphique ci-dessus illustre sur l'exemple d'Oléron à 200 m l'erreur commise en prenant dans le rejeu AROME comme direction du vent maximal la direction du vent à l'heure ronde. La comparaison est effectuée entre cette direction dans le rejeu en ordonnée et la direction correspondante du vent maximal horaire dans les données du LIDAR.

Les accumulations de points dans les coins en haut à gauche et en bas à droite s'expliquent par le caractère circulaire de la donnée où la direction 360 degrés est en fait très proche des directions proches de 0. Ces « fausses erreurs » pénalisent le calcul du coefficient de corrélation, c'est pourquoi un coefficient de corrélation circulaire est calculé, tenant compte du caractère circulaire de la donnée. Il est indiqué en rouge dans le graphique, ici il vaut 0,90. Nous indiquons dans ce graphique, en bleu, la valeur du coefficient directeur de la droite de régression qui passe par l'origine. Plus ce coefficient se rapproche de 1, plus les points sont « centrés » en moyenne sur la diagonale. Dans le graphique, nous dessinons en trait noir continu la diagonale et en traits tiretés noir de part et d'autre une parallèle à +15 et -15. Les points qui se trouvent à l'intérieur représentent alors des erreurs de moins de 30 degrés (15 degrés de part et d'autre). La proportion de points entre ces deux lignes en tireté est indiquée en rouge, juste après le coefficient de corrélation circulaire.

Nous remarquons que la quasi-totalité des points se situe entre ces deux droites tiretées (92 % pour Oléron à 200 m).

5 Calcul de la vitesse maximale du vent

5.1 Hypothèse

Nous ne disposons de la vitesse maximale du vent instantané dans l'heure précédant l'heure ronde que pour la hauteur 10 mètres. Or nous avons besoin de cette vitesse maximale à des hauteurs supérieures. Pour obtenir cette vitesse maximale à une hauteur z , parmi les hypothèses testées lors du lot 3 Dunkerque sur le potentiel éolien, celle qui a donné les meilleurs résultats faisait intervenir la vitesse moyenne à une hauteur z et l'écart entre les vitesses maximale et moyenne du vent à 10 mètres, soit :

$$(1) \quad FX_z = FF_z + (FX_{10m} - FF_{10m})$$

Nous avons voulu consolider cette hypothèse sur davantage de sites, et en particulier en mer et au-dessus de 150 m, en comparant les valeurs maximales horaires du site avec celles calculées pour le rejeu.

Une autre méthode a été testée qui consistait à calculer la vitesse maximale en multipliant la vitesse du vent moyen par un coefficient. Ce coefficient a été fixé à 1,4 après une analyse des rapports FX/FF pour plusieurs sites et plusieurs hauteurs, donnant des résultats compris entre 1,3 et 1,45.

La méthode pour estimer les rafales à hauteur z en faisant la somme du vent moyen à cette hauteur et de l'écart entre rafale et vent moyen à 10 m ajouté) donne des résultats corrects sur terre, mais plus partagés sur mer.

Par continuité avec ce qui se faisait jusqu'à présent, et dans la mesure où l'étude ne permet pas de proposer un estimateur de FX nettement meilleur, le choix a été de ne pas utiliser la méthode du coefficient, mais de quantifier l'erreur commise avec la méthode faisant intervenir la vitesse moyenne et les vitesses moyennes et maximales du vent à 10 mètres.

5.2 Erreur commise

Le terme d'erreur fait ici référence à un écart entre l'estimateur AROME de la rafale en altitude avec des observations de rafales en altitude. Ces observations sont supposées non entachées d'erreur (notamment le rapport de validation des lidars flottants utilisés ici ne quantifie pas les erreurs sur le vent de rafale).

L'erreur commise est synthétisée au travers de différents indicateurs statistiques :

q5 : valeur sous laquelle se situe 5 % des erreurs les plus faibles

q10 : valeur sous laquelle se situe 10 % des erreurs les plus faibles

q25 : valeur sous laquelle se situe 25 % des erreurs les plus faibles

q50 : médiane des erreurs

q75 : valeur au-dessus de laquelle se situe 25 % des erreurs les plus fortes

q90 : valeur au-dessus de laquelle se situe 10 % des erreurs les plus fortes

q95 : valeur au-dessus de laquelle se situe 5 % des erreurs les plus fortes

IQ : interquartile, défini par q75 – q25

biais : le biais est défini par la formule :
$$BIAIS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - O_i)$$

avec

X_i : $i^{\text{ème}}$ valeur du rejeu

O_i : $i^{\text{ème}}$ valeur mesurée (mât ou LIDAR)

Le biais est négatif si en moyenne le rejeu AROME sous-estime la valeur, et positif en cas de surestimation.

Avec les mêmes notations X_i et O_i nous définissons l'EAM et la RMSE.

EAM : l'erreur absolue moyenne est définie par :
$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_i - O_i|$$

RMSE : l'erreur quadratique moyenne est définie par $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - O_i)^2}$

De plus, nous définissons l'écart-type de l'écart $E_i = (X_i - O_i)$ par :

$$SD = SIGMA = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E}_i)^2}$$

avec \bar{E}_i la moyenne des écarts c'est-à-dire le biais.

	q25	q50	q75	IQ	biais	EAM	RMSE	min	q5	q10	q90	q95	max	Taille échantillon
Dunkerque	-2,2	-1,1	0,0	2,2	-1,2	1,7	2,2	-21,0	-4,2	-3,4	1,0	1,6	6,5	6036
Oléron	-3,2	-1,8	-0,6	2,6	-2,0	2,4	3,2	-44,5	-6,1	-4,8	0,5	1,3	9,7	5535
Landes	-1,2	0,3	1,7	2,9	0,2	1,9	2,4	-16,5	-3,7	-2,7	3,0	3,9	10,5	3628
Bourges (2)	-1,8	-0,5	0,9	2,6	-0,5	1,7	2,2	-13,0	-4,0	-3,1	2,1	2,9	17,0	4686

Tableau 3: Quelques éléments statistiques (en m/s) de comparaison entre la vitesse maximale calculée à partir du rejeu AROME et celle mesurée par les LIDARS, à une hauteur de 200 m (vents > 3 m/s)

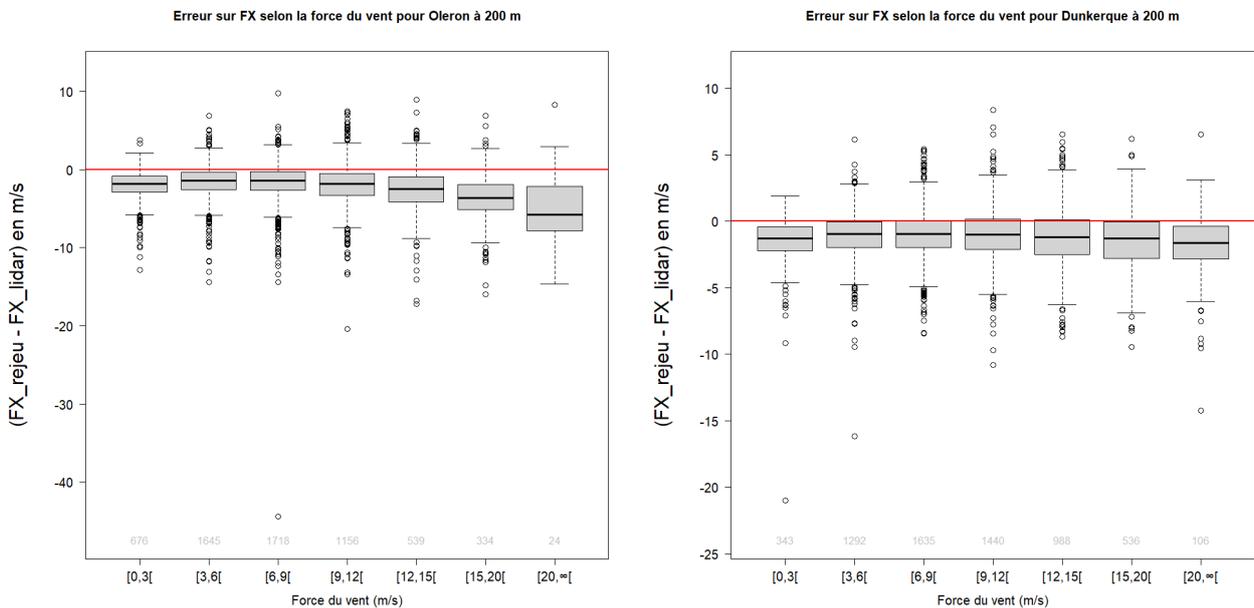


Illustration 2: Répartition de l'erreur sur la vitesse maximale horaire du vent en fonction de la force du vent moyen à 200 m, pour Oléron à gauche et Dunkerque à droite

Les boîtes à moustaches permettent de situer statistiquement les erreurs les plus fréquentes dans les valeurs de vent les plus élevées, et au contraire des erreurs réduites entre 3 et 9 m/s.

Les deux tableaux ci-dessous indiquent quelques paramètres statistiques pour Oléron puis Dunkerque, à 200 m, et par classe de vent : le biais, l'écart-type et la RMSE, ainsi que les valeurs

relatives de ces calculs d'erreurs, exprimées en pourcentage. Dans les formules de définition statistique des erreurs relatives, l'entité $X_i - O_i$ est remplacée par $\frac{X_i - O_i}{O_i}$ avec

X_i vitesse du vent maximal du rejeu

O_i vitesse du vent maximal mesuré.

Oléron :

Vitesse en m/s	biais	Biais relatif	écart-type	Écart-type relatif	RMSE	RMSE relative	Taille échantillon
[0,3[	-2,0	-31 %	1,9	26 %	2,7	41 %	676
[3,6[	-1,5	-15 %	2,0	23 %	2,5	27 %	1645
[6,9[	-1,6	-11 %	2,3	17 %	2,8	21 %	1718
[9,12[	-2,0	-11 %	2,5	16 %	3,2	20 %	1156
[12,15[	-2,6	-12 %	2,8	14 %	3,8	18 %	539
[15,20[	-3,6	-14 %	3,0	11 %	4,7	18 %	334
[20,[	-4,9	-13 %	5,0	16 %	6,9	21 %	24

Tableau 4: Oléron, 200 m : statistiques sur l'erreur en fonction de classes de vitesse de vent

Les scores obtenus prennent en compte les erreurs moyennes pour l'ensemble des couples.

Néanmoins d'un point de vue climatologique, c'est plutôt la comparaison entre le comportement statistique de chaque échantillon qui peut être analysé, par exemple en regardant leur distribution :

FX Oleron - Niveau 200 m : Rejeu versus LIDAR

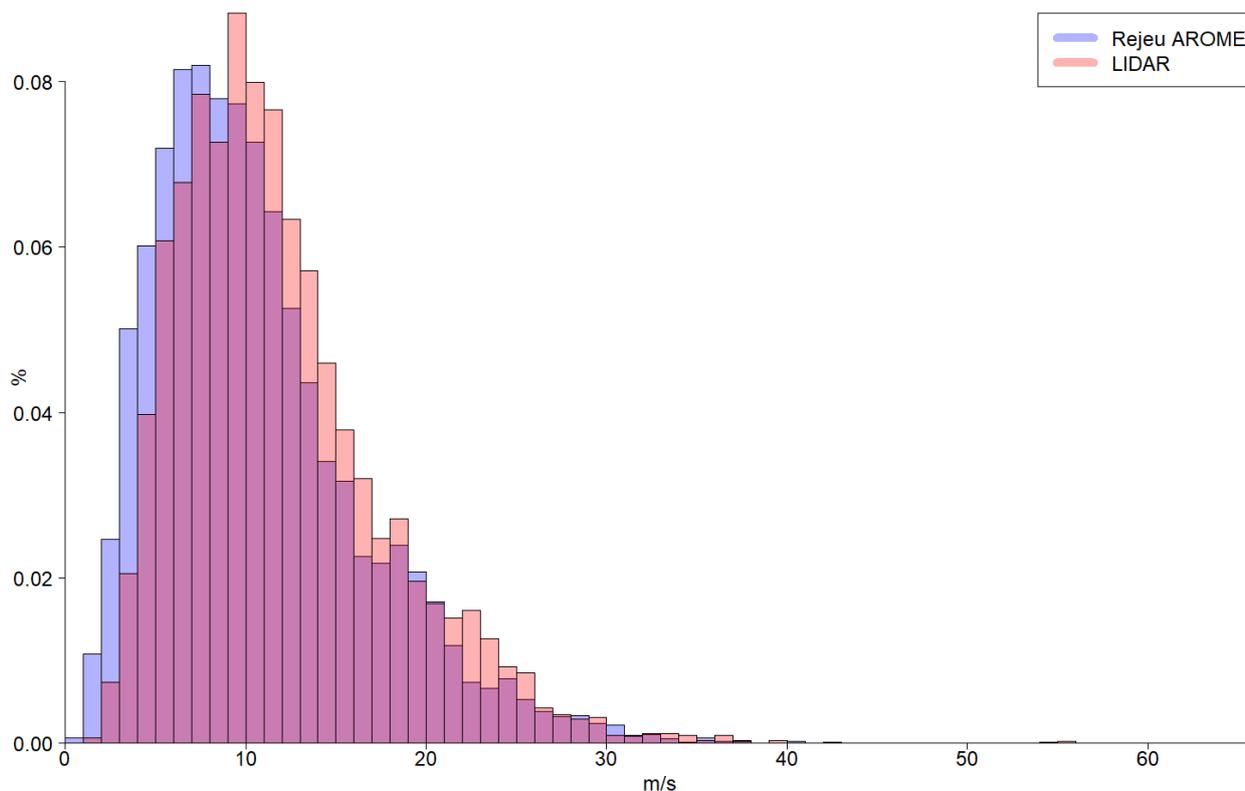


Illustration 3: Oléron, 200 m – Distribution des vitesses maximales de vent pour le rejeu et le LIDAR

Dunkerque :

Vitesse en m/s	biais	Biais relatif	écart-type	Écart-type relatif	RMSE	RMSE relative	Taille échantillon
[0,3[	-1,5	-24 %	1,9	27 %	2,4	36 %	343
[3,6[	-1,1	-10 %	1,6	23 %	2,0	25 %	1292
[6,9[	-1,0	-7 %	1,7	17 %	2,0	18 %	1635
[9,12[	-1,0	-6 %	1,8	16 %	2,1	17 %	1440
[12,15[	-1,2	-6 %	2,1	12 %	2,4	13 %	988
[15,20[	-1,5	-6 %	2,2	10 %	2,6	11 %	536
[20,[	-1,9	-6 %	2,7	8 %	3,3	10 %	106

Tableau 5: Dunkerque, 200 m : statistiques sur l'erreur en fonction de classes de vitesse de vent

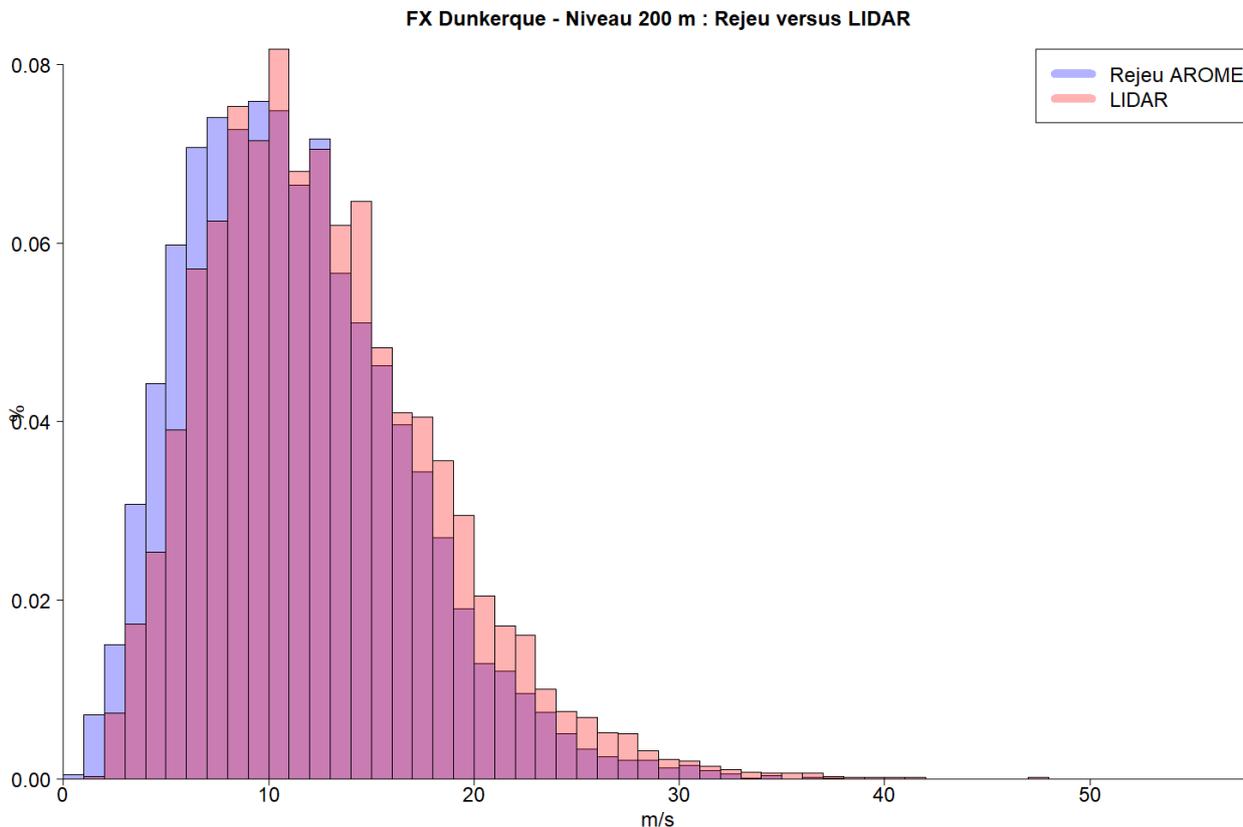


Illustration 4: Dunkerque, 200 m – Distribution des vitesses maximales de vent pour le rejeu et le LIDAR

Sur ces deux exemples, pour les vents du LIDAR supérieurs à 2 m/s, les scores statistiques « appairés » pour Oléron et Dunkerque laissent apparaître une erreur relative d'AROME sur l'estimation de l'intensité de la rafale de l'ordre de 15 à 25 %.

Les distributions, quant à elles, sont proches malgré le biais visible dans les deux illustrations ci-dessus avec une sous-estimation du rejeu par rapport au LIDAR.

Pourtant la comparaison à 100 m avec le mât Rampion des valeurs obtenues par cette méthode de propagation de l'écart entre le vent maximal et le vent moyen à 10 m donne de bons résultats. Le fait que ces résultats soient mitigés pour les LIDARS sur mer nous interpelle : est-ce dû au comportement du rejeu AROME ? Ou bien cela provient-il d'un problème de qualité de la mesure du LIDAR sur mer ? Notre analyse ne peut aller plus loin, sans disposer de mesure en mer réalisée par mât.

6 Calcul de l'intensité de turbulence

6.1 Hypothèse

Lorsque nous disposons de l'écart-type du vent horizontal et du vent horizontal, comme c'est le

cas pour les LIDARS, l'intensité de turbulence est calculée tout simplement comme le rapport entre ces deux grandeurs. Le rejeu AROME ne disposant pas de l'écart-type du vent, nous sommes donc amenés à estimer cette intensité de turbulence à partir de l'énergie cinétique turbulente (TKE) fournie par le modèle et de la force du vent moyen selon la formule :

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

Pour l'étude du lot 3 sur Dunkerque, il avait été montré sur quelques sites terrestres et sans dépasser le niveau 140 m que cet estimateur donnait des résultats convenables, notamment du point de vue statistique : distributions comparables, évolution diurne bien rendue...

L'hypothèse ici est de supposer que ces résultats convenables restent vrais à des hauteurs supérieures à 150 m et sur mer.

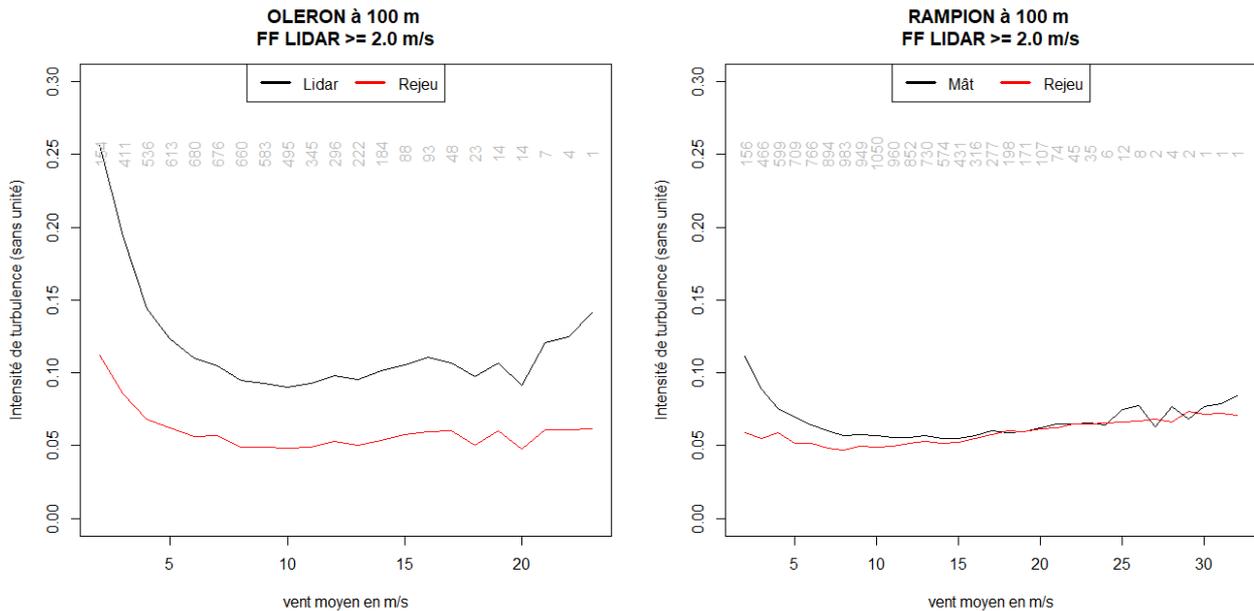
6.2 Erreur commise

Le terme d'erreur fait ici référence à un écart entre l'estimateur AROME de l'indice de turbulence en altitude avec des observations de cet indice en altitude. Ces observations sont supposées non entachées d'erreur. Toutefois, lorsqu'il s'agit d'observations par lidar flottant, le rapport de validation des lidars flottants utilisés ici relève une propension des observations de turbulence issues des mesures par lidar flottant à sur-estimer de façon importante la turbulence par rapport à ce qui est mesuré depuis un mât de mesure, et d'avoir une corrélation médiocre avec ces observations anémométriques. **Dans ce cas, l'erreur (ou plutôt l'écart) indiqué dans ce chapitre pour les comparaisons aux observations lidar flottant, sont à considérer plutôt comme une information, qu'une qualification.**

L'étude a été réalisée avec les données de nombreux sites, que ce soit des LIDARS ou des mâts équipés, qu'ils soient sur terre ou sur mer, et ceci avec toutes les hauteurs de mesures disponibles. Dans certains cas, par exemple pour Rampion (mât en mer), les résultats étaient excellents, dans d'autres cas, par exemple Oléron, ils étaient très médiocres.

Des recherches bibliographiques et échanges avec les spécialistes du LIDAR (Léosphère) nous amènent à reconsidérer la qualité de la mesure, par un LIDAR sur mer, de l'écart-type de l'intensité du vent. Ce problème de qualité n'affecte pas la mesure du vent lui-même, mais la dispersion de son intensité, paramètre qui permet le calcul de l'intensité de turbulence qui devrait être la référence comparée au calcul effectué pour le rejeu AROME à partir de la TKE.

Dans les graphiques ci-dessous, les vents inférieurs à 2 m/s ont été retirés de l'échantillon.



Q70 REJEU = 0.08 Q70 LIDAR = 0.12 ÉCART = -0.032

Q70 REJEU = 0.06 Q70 MÂT = 0.06 ÉCART = -0.004

Illustration 5: Comparaison rejeu/LIDAR de la moyenne de l'intensité de turbulence à 100 m pour Oléron à gauche et pour Rampion à droite – Quantile 70 pour le rejeu et le LIDAR ou le mât pour les vents de 15 m/s

Comme nous pouvons le voir ci-dessus, le contraste entre les deux résultats pour Oléron et Rampion est très important.

Pour Oléron, le modèle et le LIDAR suivent les mêmes tendances (le signal est semble-t-il bien diagnostiqué dans les deux cas), seul un écart important distingue leurs valeurs, avec des valeurs plus élevées pour le lidar flottant.

Les quantiles 70 des intensités de turbulence pour le rejeu et pour le LIDAR sont présentés pour les vents autour de 15 m/s, ainsi que leur écart. Celui-ci est négatif, ce qui signifie que l'intensité « mesurée » est plus forte que l'intensité simulée du rejeu. L'écart relatif atteint environ 30 % pour Oléron et 7 % pour Rampion.

Compte-tenu de la faible confiance que nous pouvons accorder à la mesure de la dispersion par le LIDAR en mer, nous considérerons dans un premier temps¹ que la référence LIDAR n'est pas fiable sur mer.

Les résultats obtenus pour Rampion et dans une moindre mesure pour les LIDARS sur terre continuent de valider la méthode de calcul de l'intensité de turbulence à partir de l'énergie cinétique turbulente TKE et le vent moyen du rejeu.

Sont donnés ci-après, pour les hauteurs de 100 et 200 m, les valeurs du percentile 70 pour les forces de vent de 15 m/s, pour les observations et le rejeu AROME.

¹ L'étude pourrait être poursuivie pour le lot 3 de l'AO5, si des mesures en mer par mât sont mises à disposition pour nos travaux..

	Type	À 100 m				A 200 m			
		Rejeu	LIDAR ou mât	Écart	Écart relatif	Rejeu	LIDAR ou mât	Écart	Écart relatif
Dunkerque	LIDAR	0,074	0,078	-0,004	-5%	0,062	0,074	-0,011	-15%
Oléron	LIDAR	0,084	0,116	-0,032	-28%	0,072	0,113	-0,041	-36%
Bourges	LIDAR	0,160	0,132	0,028	21%	0,108	0,081	0,027	33%
Bourges (2)	LIDAR	0,176	0,155	0,021	14%	0,122	0,098	0,025	26%
Landes	LIDAR	0,178	0,148	0,030	20%	0,136	0,105	0,027	26%
Palaiseau	LIDAR	0,160	0,189	-0,029	-15%	0,116	0,132	-0,016	-12%
Rampion	MÂT	0,059	0,063	-0,004	-6%	-	-	-	-

Tableau 6: Percentile 70 % de l'intensité de turbulence pour les vents d'environ 15 m/s

Il faut toutefois noter que la taille des échantillons pour les vents autour de 15 m/s est faible (de l'ordre de la centaine), les valeurs dans le tableau ci-dessus sont dépendantes de l'échantillon utilisé.

Une étude complémentaire du comportement de la CLA (Couche Limite Atmosphérique) dans le modèle AROME montre que cette couche limite est inférieure à la hauteur 200 m dans plus de 35 % des cas, que ce soit pour le point de grille proche de Dunkerque ou d'Oléron. Dans ce cas, la TKE à ce niveau est très faible, ainsi que l'intensité de turbulence, et nous retrouvons ce pic de fréquence pour les valeurs de IT rejeu proches de 0. Le comportement n'est pas du tout le même lorsqu'on s'intéresse à l'intensité de turbulence calculée à partir des paramètres du LIDAR pour ces mêmes dates où la couche limite est inférieure à 200 m comme on peut le voir dans l'illustration ci-après.

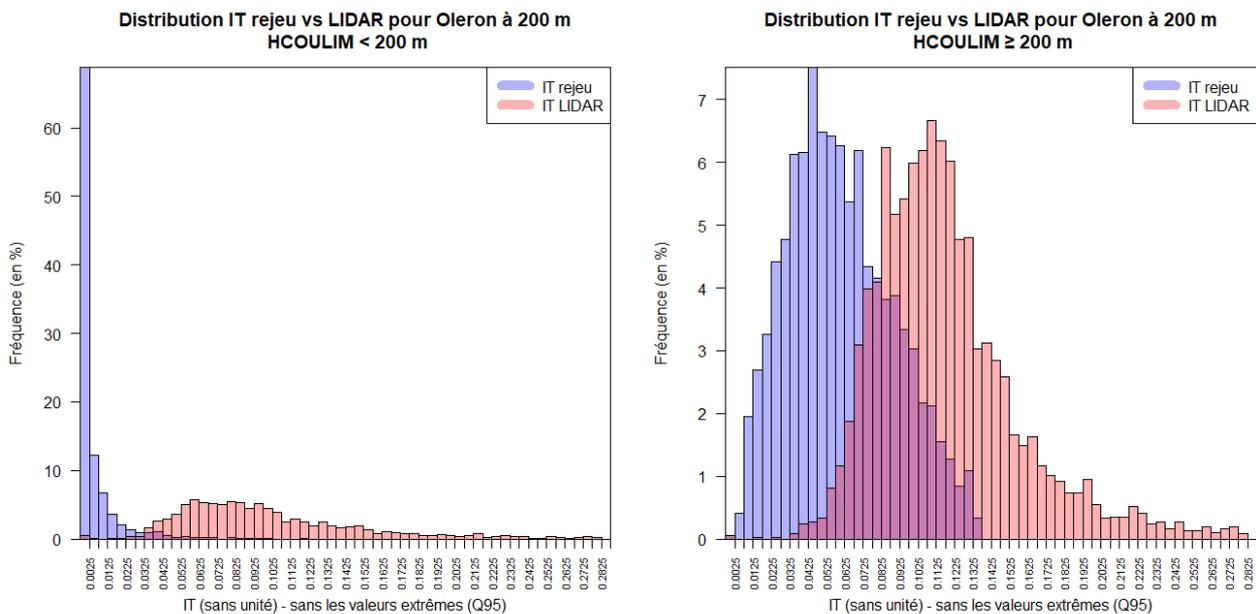
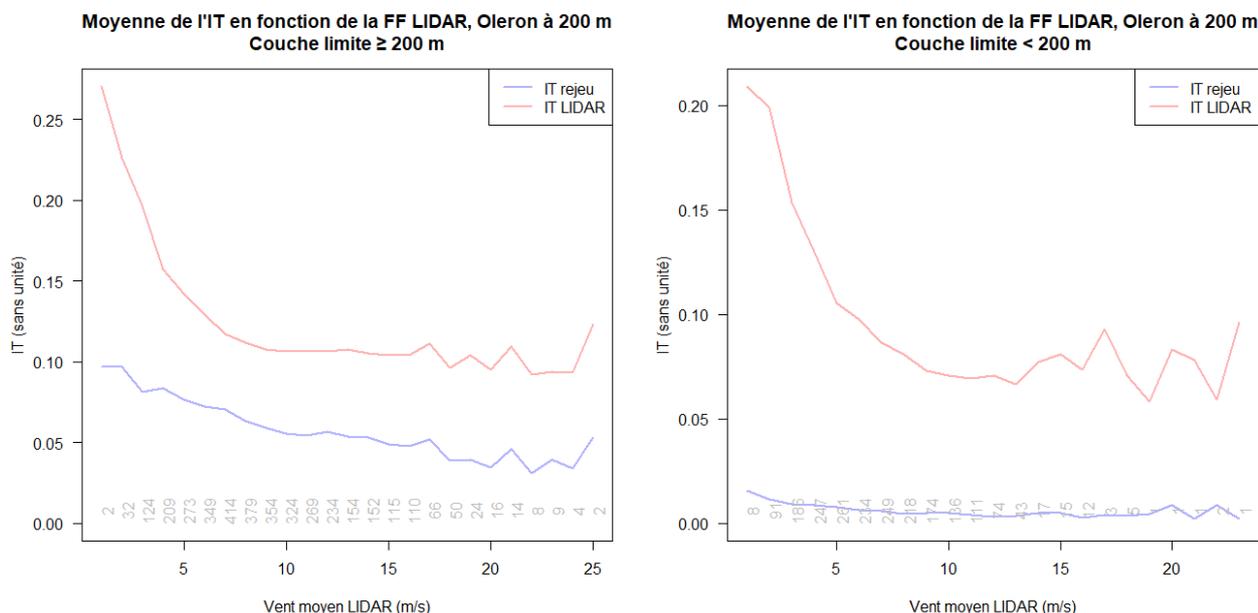


Illustration 6: Distribution de IT rejeu et IT LIDAR – CLA < 200 m à gauche, CLA ≥ 200 m à droite



*Illustration 7: Oléron, 200 m – Différence de comportement du rejeu par rapport au LIDAR
A gauche couche limite ≥ 200 m, à droite couche limite < 200 m*

Nous savons que nous ne pouvons pas accorder beaucoup de confiance à la mesure de l'intensité de turbulence par un LIDAR en mer, mais nous retrouvons le même type de graphiques pour Rampion ou Bourges, avec un pic de fréquence d'IT quasi-nulles pour le rejeu et pas pour la mesure (mât ou LIDAR ici). Il s'agit donc probablement d'un tout autre problème de représentation de la couche limite dans le modèle.

Ainsi, nous rencontrons deux incertitudes de taille pour valider le calcul de l'intensité de turbulence à partir du rejeu AROME : un problème documenté de qualité de l'intensité de turbulence du LIDAR sur mer d'une part, et un comportement curieux du modèle dans sa détermination de la hauteur de la couche limite et par conséquent dans le calcul de l'intensité de turbulence d'autre part.

Compte-tenu de ces problèmes, il ne nous paraît pas opportun de livrer des intensités de turbulence au-dessus de 160 mètres. Des études complémentaires sont nécessaires, à partir notamment de données en mer sur des mâts instrumentés et à des niveaux supérieurs à 160 m.

FIN DU DOCUMENT