



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Rapport d'étude



Projet de parc éolien off-shore au large de Fécamp

AO8 Lot4 - Rapport final



Version 1 du 11/04/2023

<p>Client : Direction Générale de l'Énergie et du Climat du Ministère de la Transition Écologique</p>	<p>@ [REDACTED] ① [REDACTED]</p>	 <p>MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE <i>Liberté Égalité Fraternité</i></p>
<p>Responsable commercial : Météo-France D2C Toulouse</p>	<p>@ christophe.jacolin@meteo.fr ① [REDACTED]</p>	 <p>METEO FRANCE</p>
<p>Responsable technique : Météo France DSM/CS/DC</p>	<p>@ raphael.legrand@meteo.fr ① [REDACTED]</p>	

- page laissée intentionnellement vide -

Documents de référence antérieurs

	Intitulé	Référence	Date	Version
DR1	Projet de parc éolien off-shore au large de Dunkerque	Rapport_final_DGEC_Dunkerque	09/02/2018	V6
DR2	Projet de parc éolien off-shore au large de l'île d'Oléron	Rapport_final_12mois_DGEC_Oleron	04/12/2018	V2

Évolutions successives

Référence	Date	Version	Évolution
AO8_Fecamp_Lot4_Rapport-final_V1_20230420	02/05/2022	V1	Livraison Rapport intermédiaire (6 mois)

Signatures

	Nom	Service
Rédacteurs	Sébastien Delecray Éric Balcon	DSM/CS/ÉNERGIE DIRO/CM/BREST
Relecteurs	Raphaël Legrand Julie Capo Gérard Doligez	DSM/CS/DC DSM/CS/ÉNERGIE DIROP/MAR
Approbateur	Raphaël Legrand	DSM/CS/DC

Table des matières

1	Contexte	1
1.1	Zone d'étude	1
1.2	Descriptif de la solution retenue pour l'acquisition des mesures sur site	4
2	Méthodologie appliquée	7
2.1	Type de données fournies par le LiDAR	8
2.2	Les outils statistiques	9
2.2.1	Affectation d'un code qualité aux séries DD, FF et FXI	9
2.2.1.1	Seuils de référence	9
2.2.1.2	Détermination des seuils adaptés au LiDAR	10
2.2.1.3	Codes qualité	10
2.2.2	Statistiques de contrôle de la mesure	11
3	Analyse des données de vent mesuré par le LiDAR	13
3.1	Suivi des données	13
3.1.1	Disponibilité des données brutes	13
3.1.2	Monitoring des données FF brutes	17
3.1.3	Monitoring des erreurs	18
3.2	Retour sur des cas de données manquantes ou douteuses	20
3.3	Statistiques de contrôle et descriptives de la mesure	21
3.3.1	Statistiques de contrôle de la mesure	21
3.3.2	Statistiques descriptives du vent mesuré	24
3.3.2.1	Vent moyen horizontal à 100 m du LiDAR	24
3.3.2.2	Distributions	26
3.3.2.3	Variation diurne de la force du vent horizontal (données horaires)	27
3.3.2.4	Variation mensuelle de la force du vent horizontal (données horaires)	28
3.3.2.5	Roses des vents (données horaires)	31
3.3.2.6	Profils verticaux de vent (données horaires)	32
3.3.2.7	Cisaillement du vent (données 10 minutes)	33
3.3.2.8	Analyse des risques de turbulence atmosphérique à 100 m	35
3.3.2.9	Séries horaires FF et FXI à 100 m	36
4	Analyse des données de vent mesuré par l'anémomètre	38
5	Conclusion	41
6	Bibliographie	41
	Annexes	42

Liste des illustrations

Illustration 1 : Situation géographique de la zone (source www.geoportail.gouv.fr)	1
Illustration 2 : Roses des vents annuelle et saisonnières de la station d'Octeville (76481001) sur la période 2001/2020	3
Illustration 3 : Carte marine du large de Fécamp (source portail Data - SHOM)	3
Illustration 4 : Emplacement du LiDAR et de la zone d'étude du futur parc éolien (source OpenStreetMap)	4
Illustration 5 : Photo de la plateforme de mesure	5
Illustration 6 : Photo du LiDAR	6
Illustration 7 : Localisation des points de grille AROME (source OpenStreetMap)	8
Illustration 8 : Exemple de tableau mensuel de disponibilité des données pour chacun des 31 jours (abscisses) du mois d'août de l'année 2022 sur chacune des heures de la journée (ordonnées). Les numéros de chaque case représente le nombres de données 10min disponibles (6 étant la meilleure disponibilité).	14
Illustration 9 : Monitoring des données 10 minutes sur les 11 niveaux de mesure (à gauche) et comparaison avec le modèle à 100 m (à droite)	17
Illustration 10 : Monitoring des erreurs de forces (courbe bleue) et de directions (courbe rouge)	19
Illustration 11 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) du LiDAR avec le modèle	21
Illustration 12 : Diagramme « quantile-quantile »	22
Illustration 13 : Répartitions des écarts de directions du LiDAR en fonction de l'heure (à gauche) et de la direction (à droite)	22
Illustration 14 : Dépassements des seuils de force (à gauche) et de direction (à droite) du vent du LiDAR	23
Illustration 15 : Distributions des vents horaires du LiDAR	26
Illustration 16 : Répartitions horaires des forces du vent du LiDAR	27
Illustration 17 : Répartitions mensuelles des forces du vent du LiDAR ; la largeur des boîtes à moustaches est fonction du nombre de données	28
Illustration 18 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite)	31
Illustration 19 : Profils des vents avec quantiles du LiDAR	32
Illustration 20 : Cisaillement des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite)	33
Illustration 21 : Exposant du cisaillement de vent du LiDAR	34
Illustration 22 : Turbulence du lidar	35
Illustration 23 : Séries FF et FXI à 100 m du LiDAR	37
Illustration 24 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) de l'anémomètre avec le modèle	39
Illustration 25 : Distribution des vents horaires de l'anémomètre (à gauche) et diagramme « quantile-quantile » (à droite)	40
Illustration 26 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'anémomètre	40
Illustration 27 : Anasyg du lundi 24 mai à 00 UTC	43
Illustration 28 : Comparaison des mesures du Lidar de Fécamp avec le modèle AROME les 23 et 24 mai 2021	43
Illustration 29 : Analyse Isofront du jeudi 21 octobre 2021 à 00 UTC	44
Illustration 30 : Comparaison des mesures du Lidar de Fécamp avec le modèle AROME les 20 et 21 octobre 2021	45

Illustration 31 : Comparaison des mesures du Lidar de Fécamp avec le modèle AROME les 20 et 21 octobre 2021	45
Illustration 32: préiso du 18 février 2022 à 12h UTC	46
Illustration 33: Comparaison des mesures du Lidar de Fécamp avec le modèle AROME du 17 et 19 février 2022	46
Illustration 34: moyenne glissante sur 24h des biais entre le Lidar de Fécamp et le modèle AROME (17 et 18 février 2022)	47
Illustration 35 : Roses des vents au printemps 2021 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station d'Octeville	48
Illustration 36 : Roses des vents à l'été 2021 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station d'Octeville	49
Illustration 37 : Roses des vents à l'automne 2021 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station d'Octeville	50
Illustration 38 : Roses des vents à l'hiver 2021/2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station d'Octeville	50
Illustration 39 : Roses des vents au printemps 2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station d'Octeville	51
Illustration 40 : Roses des vents à l'été 2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station d'Octeville	52
Illustration 41 : Roses des vents de septembre 2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station d'Octeville	52
Illustration 42 : Anomalies mensuelles de températures minimales et maximales de mars 2021 à septembre 2022 à la station d'Octeville - Période de référence : 1991 - 2020	54
Illustration 43 : Cumuls mensuels de précipitations de mars 2021 à septembre 2022 à la station d'Octeville (histogrammes en vert) et normale de précipitations (segments en vert) - Période de référence : 1991 - 2020	55

Liste des tableaux

Tableau 1 : Taux de présence (en %) des données (DD,FF) 10 minutes du LiDAR. Les cases colorées en vert ou rouge indiquent respectivement la validité ou l'invalidité par rapport aux deux KPI.	15
Tableau 2 : Récapitulatif des problèmes techniques rencontrés sur le LiDAR	20
Tableau 3: Classes de vitesses par mois. Taux « brut » (en italique) et « reconstitué » (en gras) du LiDAR	25
Tableau 4: Valeurs de l'exposant α en fonction de la nature du terrain (source http://eolienne.f4jr.org/vent)	34



Glossaire

Abréviation	Signification
OLidar	Données d'observation au point Lidar
MLidar	Données modèle au point Lidar
FF	Vent moyenné sur 10 minutes (en m/s et 1/10)
DD	Direction du vent moyenné sur 10 minutes (en °)
FXI	Maximum du vent instantané sur 10 minutes, également nommé rafale (en m/s)

1 Contexte

La Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC) a sollicité Météo-France pour la réalisation d'études de vent dans la zone de l'AO8 Normandie – secteur «Fécamp» (cf. Illustration 1). Le but est d'identifier et de lever les risques susceptibles de se présenter dans la zone retenue comme favorable au développement de l'éolien off-shore.

Ces études sont le préalable au lancement d'un appel d'offres éolien en mer conduit par la DGEC.

L'objet de ce rapport consiste au suivi/contrôle de la mesure sur site à partir d'un appareil de type LiDAR pour différentes hauteurs d'intérêt dont la hauteur 100 m revêtant un caractère important pour la production éolienne. Ce rapport traite des dix-neuf mois de mesure qui ont été nécessaires à la validation de la campagne. Celle-ci devait initialement débiter le 1^{er} novembre 2020 mais suite au retournement de la bouée, le LiDAR a dû être changé et la campagne a donc été reportée. Elle débute officiellement à compter du 2 mars 2021 et s'est terminée le 4 octobre 2022.

1.1 Zone d'étude

Le futur parc éolien se situe sur une zone au large de Fécamp.

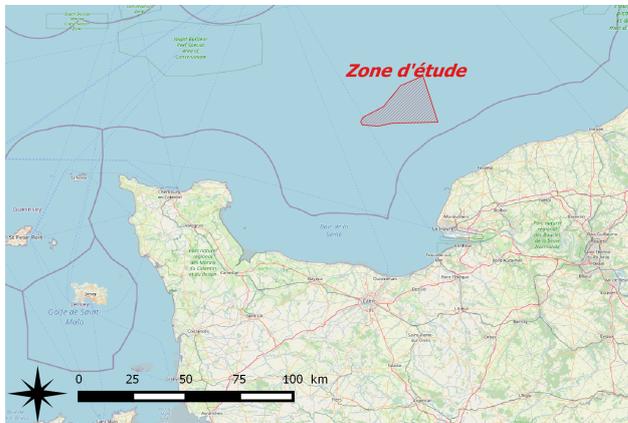


Illustration 1 : Situation géographique de la zone
(source www.geoportail.gouv.fr)

Cette zone est caractérisée d'un point de vue météorologique par :

- un flux dominant d'Ouest-Sud-Ouest généré par la circulation des dépressions sur l'Atlantique Nord et la Manche, pouvant générer des vents forts, notamment lors de tempêtes automnales et hivernales ;
- un flux modéré d'Est-Nord-Est se mettant en place lors de l'établissement d'un anticyclone puissant sur les îles britanniques ou la Scandinavie. Cette situation peut être observée en toute saison mais est plus fréquente au printemps, avec quelques cas où le vent peut être fort ;
- un secteur Nord-Nord-Ouest moins fréquent mais pouvant donner des vents assez forts après le passage des perturbations automnales et hivernales ;
- un impact ponctuel du continent par effet de brise du fait d'une distance certaine entre la zone d'étude et les côtes de Seine-Maritime.

Météo-France dispose de deux stations de mesure distantes de quelques dizaines de kilomètres mais localisées près des côtes, l'une à Octeville, l'autre à Vinnemerville. Dans cette étude, nous retiendrons le poste d'Octeville qui est le plus représentatif de la zone d'étude.

Le point de mesure d'Octeville se trouve à 94 mètres d'altitude, à la pointe Ouest du département de la Seine Maritime. Cette station permet d'avoir une information sur le vent dans le secteur de la zone d'étude.

Par ailleurs, Météo-France dispose d'un Centre spécialisé Marine & Offshore à Brest au sein duquel travaillent des experts de la prévision et de la climatologie dans le milieu maritime. Il se dégage, de leur expertise terrain, les caractéristiques suivantes pour le vent Octeville observé sur la période 2001-2020 :

- les périodes de vent calme ($< 1,5$ m/s) sont assez fréquentes sur l'année (6.1%) en étant un peu plus fréquentes l'été (7.3%) et moins observées l'hiver (4.6%). Les allures générales des roses de vent sont proches en automne et hiver avec une nette prédominance des vents de Sud-Ouest puis Est à Nord-Est ; en été l'axe principal des vents est orienté Ouest-Est alors qu'au printemps, le vent d'Est à Nord-Est devient légèrement prédominant par rapport au secteur Sud-Ouest ;
- les vents de Sud-Est sont les moins fréquents tout au long de l'année ;
- les vents les plus forts peuvent venir de toutes les directions en dehors du secteur Sud-Est.

1 Contexte

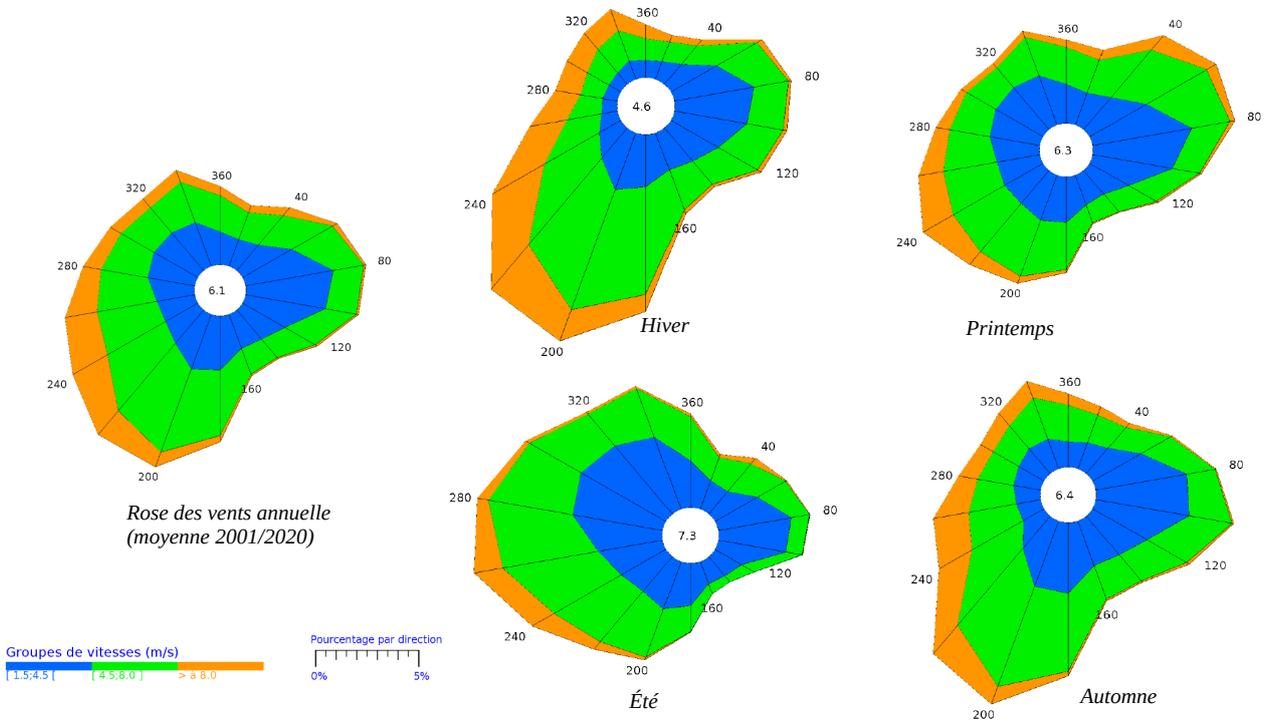


Illustration 2 : Roses des vents annuelle et saisonnières de la station d'Octeville (76481001) sur la période 2001/2020

D'un point de vue de la géographie marine, la zone d'étude se situe au niveau du plateau continental de faible pente vers le large et d'une profondeur d'une quarantaine de mètres. Les fonds sont réguliers.

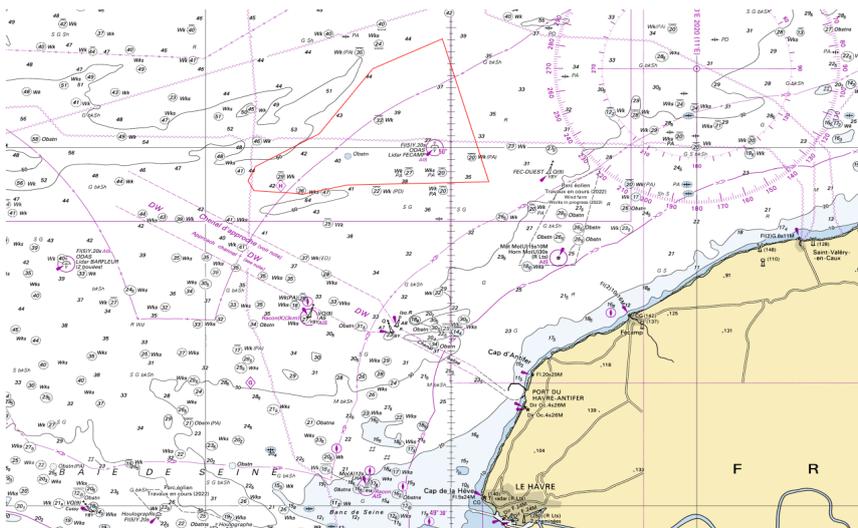


Illustration 3 : Carte marine du large de Fécamp (source portail Data - SHOM)

Afin d'assurer l'acquisition et le suivi des mesures sur site, Météo-France a retenu un prestataire assurant la fourniture de données relatives à l'observation du vent en mer au moyen d'un système flottant équipé d'une mesure de type LiDAR. La campagne de mesures est réalisée à proximité du point de coordonnées WGS84 Lon : -0,0334° Lat : 50,00°. Les coordonnées exactes du point de mesure sont disponibles dans les fichiers de données brutes produites. La bouée LiDAR a en effet un rayon théorique maximal de 80 m de déplacement autour de son point d'ancrage.



Illustration 4 : Emplacement du LiDAR et de la zone d'étude du futur parc éolien (source OpenStreetMap)

1.2 Descriptif de la solution retenue pour l'acquisition des mesures sur site

Cette section décrit plus précisément les équipements déployés aux points de mesure.

La solution retenue par Météo-France est une plateforme flottante permettant une complète autonomie offshore grâce aux énergies renouvelables (houle + soleil) et une grande stabilité pour la précision de mesure de vent. Elle est supervisée et bénéficie des ressources techniques et humaines pour mener à bien l'ensemble des opérations nécessaires garantissant la meilleure disponibilité des données enregistrées.



Illustration 5 : Photo de la plateforme de mesure

La plateforme flottante embarque des instruments pour effectuer différentes mesures :

- de vent en altitude ;
- de paramètres atmosphériques au niveau de la plateforme (vent, température, pression, humidité) ;
- de paramètres océanographiques (états de mer, courants marins, hauteurs d'eau).

La mesure de vent en altitude est réalisée à l'aide d'un LiDAR (Light Detection And Ranging) de chez LEOSPHERE : Windcube V2 Offshore 8.66 pour bouée, modèle WLS866-4 (les caractéristiques techniques de l'appareil sont décrites dans le document « WindCube_WLS866_Specification.pdf » faisant partie du livrable dont Météo-France a la charge). Ce LiDAR envoie une impulsion laser infrarouge vers l'atmosphère. Quatre faisceaux sont envoyés successivement dans les quatre directions cardinales formant un cône de 28°. Un cinquième faisceau vertical permet de vérifier et préciser les mesures. Les impulsions laser sont rétrodiffusées par les particules (poussières, gouttes d'eau, aérosol...) circulant selon la vitesse du vent. Ces impulsions permettent de calculer la vitesse et la direction du vent sur la base du décalage de leur longueur d'onde dû à l'effet Doppler. Ces mesures peuvent être réalisées sur 11 hauteurs différentes, de 40 à 200 mètres.

Dans le cadre de l'acquisition et du suivi de la mesure durant cette campagne, les hauteurs considérées sont les suivantes : 40, 50, 60, 80, 100, 120, 140, 150, 160, 180 et 200 m.



Illustration 6 : Photo du LiDAR

Le système a été conçu pour fonctionner dans des conditions de mer difficiles. Les limites de performance du LiDAR en termes de correction du mouvement sont d'une inclinaison maximale de +/- 25° (limite de la technologie développée par LEOSPHERE). Compte tenu de ses dimensions, les mesures de gîtes maximales observées sur la plateforme n'ont jamais dépassé 18° et garantissent donc une plage de fonctionnement optimale et complète du LiDAR.

Les paramètres atmosphériques au niveau de la bouée sont mesurés à l'aide d'une station météo multi-capteurs « MaxiMet GMX500 » (les caractéristiques techniques de l'appareil sont décrites dans le document « Maximet_GMX500_Specification.pdf » faisant partie du livrable dont Météo-France a la charge). La vitesse et la direction du vent sont en particulier mesurées par un anémomètre à ultrasons. A noter que la mesure de vent se fait au point le plus haut de la bouée (environ 4m au-dessus du niveau de la mer) sans toutefois pouvoir être réalisée à 10m (norme de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM)¹) : le haubanage d'un mât à vent n'étant techniquement pas réalisable sur la bouée sans interférer avec les faisceaux LiDAR. Le positionnement de l'anémomètre a donc été pensé pour obtenir le meilleur compromis entre la qualité des différentes mesures et les contraintes techniques.

Enfin, la plateforme est également équipée d'un houlographe (les caractéristiques techniques de l'appareil sont décrites dans le document « AANDERAA_Motus_Wave_Sensor_5729_Specification.pdf »), d'un courantomètre fournissant des informations à différents niveaux de profondeurs (caractéristiques techniques décrites dans le document « AANDERAA_DCPS_Specification.pdf ») et d'un profondimètre (caractéristiques techniques décrites dans le document « Echange_Specification.pdf ». L'analyse de ces différents paramètres océanographiques fait l'objet d'un rapport spécifique rédigé par le Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM).

¹ Norme OMM pour le vent : le vent est mesuré à 10 m de hauteur car la rugosité du sol provoque de fortes turbulences, ce qui peut se traduire par une erreur en termes de vitesse et de direction

2 Méthodologie appliquée

Ce chapitre expose la méthodologie utilisée par Météo-France pour établir les éléments du suivi et contrôle des données fournies par le LiDAR.

Météo-France réalise un contrôle approfondi des données fournies par le LiDAR avec :

- un suivi au fil de l'eau de la disponibilité des données,
- un contrôle consistant à vérifier les valeurs mesurées au regard de données fournies par des sites voisins ou par le modèle météorologique AROME (au pas de temps horaire) de Météo-France.

À l'issue de ce contrôle approfondi, Météo-France délivre un code qualité associé aux données fournies par le LiDAR.

Afin de pouvoir valider les données fournies par le LiDAR, Météo-France s'appuiera sur les données de son modèle météorologique à maille fine AROME qui dispose notamment des hauteurs suivantes: 10, 20, 50, 75, 100, 150 et 200 m. Ces données au pas de temps horaire sont la meilleure représentation de l'état de l'atmosphère à un instant donné car elles combinent une prévision récente (qui donne une première ébauche du vent qu'il fait) avec toutes les observations du même instant. C'est à partir de cet état initial que le modèle va calculer l'évolution des paramètres météorologiques sur la grille en 3 dimensions du modèle qui représente l'atmosphère, en s'appuyant sur les lois physiques qui régissent son comportement.

Météo-France ne fournira pas dans ce livrable d'estimation du vent maximal (rafale) à des niveaux autres que 10 m.

Nous allons décrire les différents types de données LiDAR, puis une présentation des outils statistiques. Une description des données du modèle de prévision numérique AROME est disponible dans [Chatel et al., V1, 2021].

2.1 Type de données fournies par le LiDAR

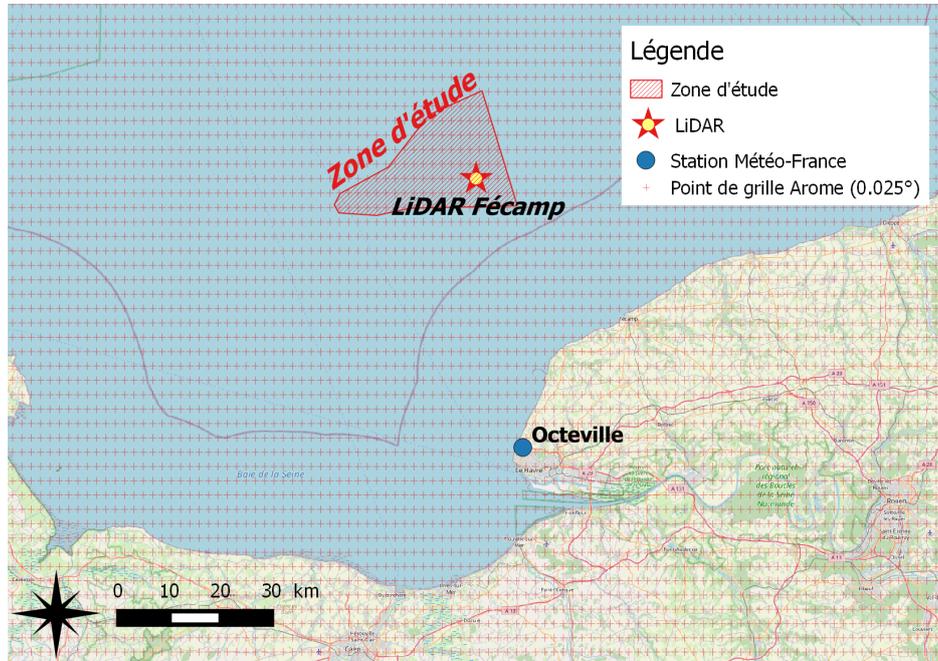


Illustration 7 : Localisation des points de grille AROME (source OpenStreetMap)

Pour chaque hauteur de mesures, le LiDAR fournit, en heures UTC, 2 types de données au format ASCII :

- Les données **reconstituées**
 - Données moyennées sur 10 minutes non corrigées (fichiers *.sta) et corrigées par la prise en compte du mouvement du LiDAR par rapport au nord magnétique (fichiers *lidar_{N}.csv). Ces données reconstituées sont calculées à partir des données dites brutes (cf paragraphe ci dessous). Les données reconstituées incluent :
 - Vitesse en m/s et direction du vent horizontal moyennées sur 10 minutes, ainsi que le minimum, le maximum, et l'écart type sur ces mêmes 10 minutes,
 - Vitesse verticale en m/s du vent moyennée, minimum, maximum et écart type sur 10 minutes.
- Les données **brutes** (1 seconde)
 - Données brutes non corrigées du nord magnétique (fichiers *.rtd),
 - Données de cap du LiDAR (fichiers *trimble_{N}.csv).

Les autres données présentes dans ces trames sont :

- Nombre de mises en route automatiques du balai d'essuie-glace indiquant le nettoyage du capteur ;

- Rapport signal sur bruit (CNR) du LiDAR : valeur minimale et moyenne (pour les données reconstituées et les données brutes). Cette mesure permet de quantifier la qualité du signal et de la mesure ;
- Disponibilité des mesures des données reconstituées (*data_availability*) : cette valeur est donnée en pourcentage et indique le taux de données brutes (autrement-dit, les données au pas de temps seconde) utilisé pour l'élaboration de la donnée reconstituée (moyennée sur 10 minutes). Pour Météo-France, la donnée reconstituée est dite fiable lorsqu'au moins 30% des données brutes sont présentes. Les fichiers *.sta et *.csv présentent cette valeur permettant de juger directement de la fiabilité de la mesure pour chaque niveau de hauteur.

À noter que la position (latitude, longitude) du LiDAR est disponible dans les fichiers de la station météo.

Pour plus de détail sur les formats de données, se référer à la notice du livrable des données brutes.

2.2 Les outils statistiques

Le contrôle et l'analyse des mesures de vent du LiDAR et de l'anémomètre ont été menés grâce à l'utilisation de statistiques descriptives permettant de rendre compte d'un volume relativement important de données.

2.2.1 Affectation d'un code qualité aux séries DD, FF et FXI

Afin de caractériser au mieux les mesures du vent à 100 m au regard de la modélisation AROME, des codes qualité ont été affectés aux paramètres du vent moyen et du vent maximal.

Dans la suite de l'étude, pour plus de facilité, ces paramètres seront notés :

- FF : Vent moyenné sur 10 minutes (en m/s et 1/10)
- DD : Direction du vent moyenné sur 10 minutes (en °)
- FXI : Maximum du vent instantané sur 10 minutes, également nommé rafale (en m/s)

Les paramètres FF et DD dits « horaires » correspondent aux valeurs calculées sur les 10 dernières minutes précédant l'heure ronde. Le paramètre FXI « horaire » correspond au maximum des FXI de l'heure.

À noter que le paramètre DXI (direction du vent instantané) n'est pas traité. C'est un paramètre non mesuré par le LiDAR et non disponible via le modèle AROME de Météo-France.

2.2.1.1 Seuils de référence

L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) est une institution spécialisée des Nations Unies dont un des principaux rôles est la standardisation des mesures météorologiques.

L'OMM a défini des seuils au-delà desquels une série mensuelle de valeurs quotidiennes observées est qualifiée de douteuse par rapport au modèle. Il faut au moins 20 observations quotidiennes dans le mois où les erreurs de forces et de directions suivent respectivement les conditions :

$$|FF_{\text{observation}} - FF_{\text{modèle}}| > 5 \text{ m/s} \quad \text{et} \quad |DD_{\text{observation}} - DD_{\text{modèle}}| > 50^\circ$$

Au sein de Météo-France, la division COMPAS (CONtrôle et Monitoring, Prévisibilité, Adaptation Statistique, Gestion des Cycles Opérationnels et Support Informatique) a défini des critères plus stricts en considérant une période de seulement 15 jours. Pour que la série de données quotidiennes soit qualifiée de douteuse, il faut au moins 10 observations quotidiennes arrivées à temps dans le cycle d'assimilation du modèle où :

$$|FF_{\text{observation}} - FF_{\text{modèle}}| > 4 \text{ m/s} \quad \text{et} \quad |DD_{\text{observation}} - DD_{\text{modèle}}| > 30^\circ$$

2.2.1.2 Détermination des seuils adaptés au LiDAR

Nous avons souhaité utiliser des critères plus ou moins semblables afin de contrôler les données du LiDAR. La problématique n'est pas tout à fait la même car les données du LiDAR ne sont pas préalablement assimilées par le modèle.

Cependant, nous faisons le choix de considérer toutes les données horaires disponibles et **nous partons de l'hypothèse très stricte qu'une donnée horaire FF ou DD d'observation à 10 m est qualifiée de douteuse si respectivement :**

$$|FF_{\text{observation}} - FF_{\text{modèle}}| > 3 \text{ m/s} \quad \text{ou} \quad |DD_{\text{observation}} - DD_{\text{modèle}}| > 30^\circ$$

Afin d'extrapoler la condition sur la force à la hauteur 100 m du LiDAR, nous nous appuyons sur notre expérience lors de précédentes campagnes de mesures d'un appareil de type LiDAR auxquelles Météo-France a participé (cf. « Documents de référence antérieurs » p 3).

Une donnée horaire FF ou DD d'observation à 100 m sera qualifiée de douteuse si respectivement :

$$|FF_{\text{observation}} - FF_{\text{modèle}}| > 5 \text{ m/s} \quad \text{ou} \quad |DD_{\text{observation}} - DD_{\text{modèle}}| > 30^\circ$$

2.2.1.3 Codes qualité

Dans un premier temps, pour toutes les hauteurs, on affecte automatiquement un code qualité à chaque donnée DD, FF et FXI du LiDAR.

- '0' : la donnée est manquante.
- '1' : la donnée est présente.

Séries DD, FF :

Afin de disposer de séries DD et FF horaires complètes au niveau 100 m, toute donnée manquante devra être estimée. Si le manque est ponctuel (une seule échéance manquante), on effectuera une simple moyenne des mesures précédente et suivante à laquelle on donnera le code qualité '2'. Pour des périodes plus importantes, on remplacera par les données du modèle AROME en donnant aux nouvelles valeurs, le code qualité '21'.

Pour une donnée dite douteuse (cf. seuils au §2.2.1.2), on affectera le code qualité '3'.

Après expertise, les séries DD et FF horaires du LiDAR à 100 m disposeront donc du code qualité suivant :

- '1' : la donnée est validée.

- '2' : la donnée est estimée par interpolation linéaire.
- '21' : la donnée est estimée par une donnée modèle.
- '3' : la donnée est douteuse (car elle s'écarte des seuils fixés).
- '31' : La donnée est douteuse car elle a un taux de validité inférieur à 30%. Le taux de validité correspond au nombre de données secondes disponibles pour obtenir une valeur moyennée sur une période de 10 minutes (cf. §2.2). On affectera le code 3 si cette donnée s'écarte également des seuils fixés.
- '99' : La donnée est douteuse car elle ne peut pas être comparée avec le modèle (donnée modèle absente).

Chaque donnée de la série horaire de vent à 100 m est donc accompagnée de l'un des codes qualité présentés ci-dessus.

Série FXI :

La série FXI horaire à 100 m sera déterminée à partir du maximum des six données FXI 10 min. En cas de manque, les données FXI ne seront pas estimées. La série disposera du code qualité suivant :

- '0' : la donnée est absente (car toutes les données 10 min sont absentes).
- '1' : la donnée est présente (car toutes les données 10 min sont présentes).
- '3' : la donnée est douteuse (car au moins une des six données 10 min de l'heure précédente est absente).

On notera que le code qualité '3' douteux, ne prend pas le même sens que pour les séries DD et FF. Il signifie ici que la donnée est potentiellement sous-estimée.

Les codes qualités définis ci-dessus sont fournis dans le fichier « SerieLidarH100_Fecamp_20210302-20221004.csv »

2.2.2 Statistiques de contrôle de la mesure

Afin de contrôler la qualité des données du LiDAR, Météo-France a souhaité dans un premier temps comparer de façon statistique les données des sites voisins du LiDAR avec le modèle AROME.

Sur un échantillon de taille N , afin de comparer les données d'observation O_i aux données modèle M_i , nous utilisons les scores couramment utilisés par la division COMPAS.

- **L'erreur moyenne, ou biais** caractérise l'erreur systématique du modèle :

$$Biais = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)$$

Plus il est proche de 0, plus le modèle est proche « en moyenne » des observations.

- **L'erreur quadratique moyenne** mesure la distance entre le modèle et la référence :

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}$$

Plus elle est proche de 0, plus le modèle est proche de la référence.

- **L'écart-type** caractérise la précision du modèle :

$$ECT = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)\right)^2}$$

Plus il est proche de 0, meilleur est le modèle. À noter que les 3 scores précédemment définis vérifient l'équation suivante : $ECT^2 = EQM^2 - Biais^2$

- **Le coefficient de corrélation linéaire de Pearson** permettant de rendre compte de la relation linéaire qui lie les deux variables :

$$Cor = \frac{N \left(\sum_{i=1}^N M_i O_i \right) - \left(\sum_{i=1}^N M_i \right) \left(\sum_{i=1}^N O_i \right)}{\sqrt{\left[N \sum_{i=1}^N M_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N M_i \right)^2 \right] \left[N \sum_{i=1}^N O_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N O_i \right)^2 \right]}}$$

Plus il est proche de 1, meilleure est la corrélation.

3 Analyse des données de vent mesuré par le LiDAR

Les différentes statistiques traitées dans cette partie se font uniquement à partir des données brutes du LiDAR **(excepté lorsqu'il en est fait mention, les données estimées ne sont pas prises en compte)**. Les heures sont toujours exprimées en UTC.

Dans la suite du rapport, afin de faciliter la dénomination des données nous utiliserons le code suivant :

- OLidar : Données d'observation au point LiDAR
- MLidar : Données modèle au point LiDAR

3.1 Suivi des données

3.1.1 Disponibilité des données brutes

Nous ne présentons dans ce rapport que le contrôle des séries FF et DD moyennées sur 10 minutes, représentatives, d'un point de vue météorologique, du vent « moyen ». La série de vent instantané FXI fait l'objet d'un simple contrôle de présence des données et n'est donc pas monitorée de façon approfondie.

Dans le cadre de la comparaison avec le modèle au pas de temps horaire, nous nous intéresserons plus particulièrement à la série des 10 dernières minutes de l'heure, représentative du vent moyen horaire.

La présence des données du LiDAR est rapidement vérifiée aux différents niveaux à l'aide de tableaux mensuels indiquant le nombre de données 10 minutes disponibles par heure (cf. Illustration 8). Une donnée absente (force et/ou direction) sur les 10 minutes précédant l'heure ronde est signalée par un astérisque. Pour le niveau 100 m, elle devra faire l'objet d'une estimation.

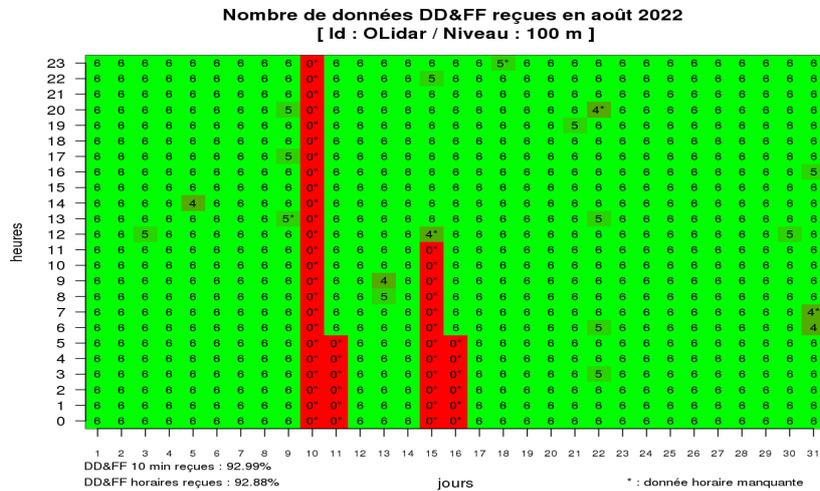


Illustration 8 : Exemple de tableau mensuel de disponibilité des données pour chacun des 31 jours (abscisses) du mois d'août de l'année 2022 sur chacune des heures de la journée (ordonnées). Les numéros de chaque case représente le nombres de données 10min disponibles (6 étant la meilleure disponibilité).

Le taux de présence des données du LiDAR décroît naturellement avec l'altitude, les nuages bas créant un obstacle à la mesure. La disponibilité des données à 200m est par exemple inférieure d'environ 10% à celle du niveau le plus proche du sol, à savoir 40m (cf. Tableau 1).

Pour le suivi de la campagne de mesure, nous utilisons les seuils préconisés par le « Carbon Trust ».

Deux taux de performance (« Key Performance Indicators » ou KPI) sont particulièrement surveillés :

- « KPI mensuel » : Le taux mensuel de disponibilité des données aux niveaux 60, 100 et 160 m doit être supérieur à 80 %.
- « KPI global » : Le taux de disponibilité sur l'ensemble de la campagne doit être supérieur à 85 %.

3 Analyse des données de vent mesuré par le LiDAR



	2021									
	mars (30J)	avril	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov	déc
200 m	92,94	82,96	88,58	61,23	41,4	79,3	91,37	96,48	74,28	23,95
180 m	95,14	87,22	92,18	70,49	45,14	83,2	95,49	98,61	79,44	29,59
160 m	96,34	90,12	95	79,42	47,27	86,81	97,59	99,33	83,12	35,98
150 m	96,6	91,06	96,35	82,73	48,21	88,13	98,03	99,46	84,81	39,36
140 m	96,94	91,5	97,38	85,72	49,1	89,02	98,38	99,62	85,53	42,23
120 m	97,04	92,64	98,68	90,39	50,18	90,86	98,94	99,69	87,01	45,92
100 m	97,13	93,17	98,99	94,19	51,12	91,55	99,47	99,73	86,62	46,48
80 m	97,2	92,22	98,95	96,71	51,77	91,69	99,63	99,75	84,21	43,46
60 m	97,31	90,76	99,15	96,85	51,84	91,69	99,65	99,62	80,79	42,65
50 m	97,48	89,44	99,17	96,99	51,9	91,51	99,58	99,48	78,68	42,29
40 m	97,5	88,5	99,22	97,43	51,95	91,51	99,47	99,28	78,22	42,41
MOY (60, 100 et 160 m)	96,93	91,35	97,72	90,15	50,07	90,02	98,9	99,56	83,51	41,7

2022										MOY période totale (580J)	MOY Sans prise en compte Janv à Mai 2022 (429J)
jan	fév	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept	oct (4J)		
Période dévalidée											
24,35	45,39	25,92	23,75	39,9	96,88	92,23	90,37	93,68	92,88	66,95	79,38
30,42	50,45	28,49	28,73	43,73	97,08	93,1	90,99	93,87	93,40	70,53	82,64
37,3	55,01	31,27	33,29	47,51	97,04	93,46	92,09	93,96	93,40	73,60	85,20
40,7	56,92	33,45	36,13	48,88	96,97	93,46	92,52	93,96	93,40	74,95	86,20
42,94	58,51	35,62	38,56	49,91	97,25	93,46	92,79	93,98	93,40	76,04	87,00
46,28	60,52	39,72	43,5	51,88	97,73	93,5	92,94	94	93,40	77,77	88,18
46,75	61,43	42,41	45,95	53,34	97,73	93,53	92,99	94	93,40	78,56	88,69
44,47	61,09	45,45	45,49	53,2	97,73	93,5	93,01	94	93,40	78,40	88,49
40,17	61,36	46,82	43,45	51,93	97,73	93,53	92,99	94	93,40	77,81	88,12
37,66	62,72	48,21	42,96	51,7	97,73	93,53	93,01	94	93,23	77,58	87,85
36,22	63,72	48,52	42,66	51,97	97,73	93,53	92,99	94	93,23	77,51	87,78
41,41	59,27	40,17	40,9	50,93	97,5	93,5	92,69	93,99	93,40	76,66	87,34

Tableau 1 : Taux de présence (en %) des données (DD,FF) 10 minutes du LiDAR. Les cases colorées en vert ou rouge indiquent respectivement la validité ou l'invalidité par rapport aux deux KPI.

Cette campagne de mesure a rencontré un problème technique majeur au niveau de la chaîne laser du lidar embarqué sur la bouée. Plusieurs faisceaux laser se sont montrés défaillants de façon intermittente à partir du mois de janvier 2022. La réparation de cet équipement n'était techniquement pas possible directement sur la bouée en mer. Une nouvelle bouée avec des capteurs neufs a pu être déployée mi-mai 2022 en remplacement de la bouée défectueuse (cf 3.2).

Les mois sur la période de janvier à mai 2022 ont été dévalidés en raison du faible taux de disponibilité des données. La campagne suite au déploiement de la nouvelle bouée a ensuite été prolongée jusqu'au 04 octobre 2022, date à laquelle les critères KPI sont atteints pour les 3 niveaux 60, 100 et 160m.

Remarque :

Des données ont pu être mesurées sur la période janvier – mai 2022 car le dysfonctionnement des faisceaux s'est avéré récurrent mais intermittent. Les données de FF et DD récoltées sur les plages de fonctionnement par comparaison au modèle AROME semblent de bonne qualité, soit un code 1 (cf 2.2.1.2 et 2.2.1.3). Peu d'entre elles figurent comme douteuses. A contrario, les données de rafales FXI sont apparues régulièrement comme aberrantes. (cf Tableau 2)

Il convient de noter que la période impactée par le problème technique inclut une bonne partie de la saison hivernale qui peut-être soumise à des vents forts. Les données de FF et DD bien que disparates durant ces 5 mois apportent donc des informations d'autant plus pertinentes.

Pour ces raisons, seul le paramètre FXI a été complètement dévalidé. En revanche, le choix a été fait de conserver au maximum les données observées par le lidar de FF et DD pour établir les statistiques présentées dans ce rapport et pour constituer la série correspondante de mesures à 100m (fichier « SerieLidarH100_Fecamp_20210302-20221004.csv »), malgré la dévalidation de ces 5 mois pour le calcul des KPI.

3.1.2 Monitoring des données FF brutes

Un suivi de l'ensemble des données du LiDAR et du modèle est effectué au fil de l'eau grâce à la production de graphiques de monitoring. Ils permettent en amont de rapidement vérifier la cohérence des données avec la situation synoptique. Les graphiques ci-dessous présentent les relevés du vent moyen du LiDAR les 20 et 21 octobre 2021. Ils montrent le passage de la tempête AURORE. On note une bonne, voire très bonne corrélation entre l'observation LiDAR et le modèle aussi bien dans la chronologie que l'intensité des phénomènes. On note toutefois un pic de vent enregistré plus élevé d'environ 5 m/s par rapport au modèle, ainsi qu'une dévente un peu plus marquée juste avant ce pic. Ceci peut s'expliquer par la résolution temporelle du modèle limitée à 1 heure, insuffisante pour séquencer finement le passage d'une dépression aussi mobile et creuse.

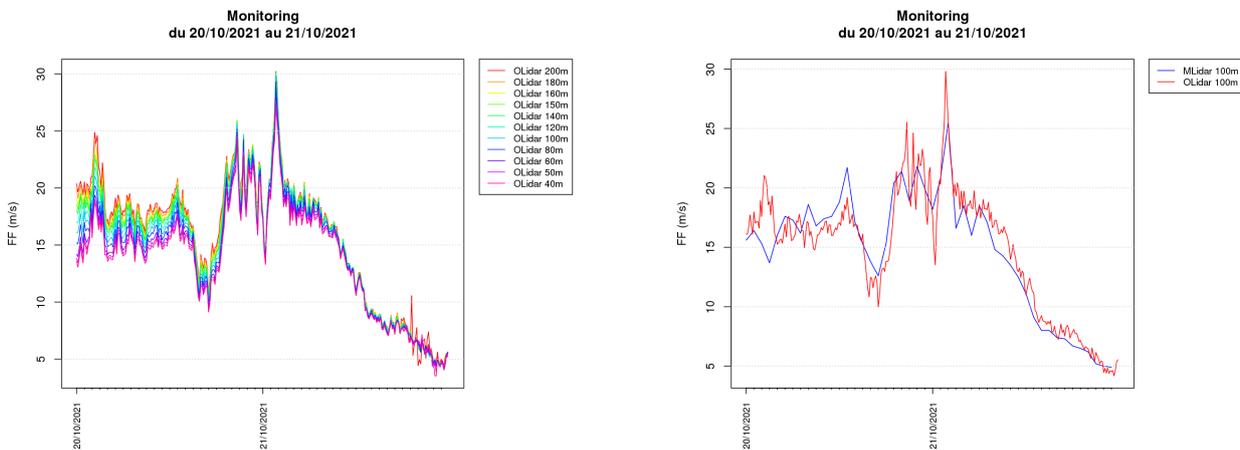


Illustration 9 : Monitoring des données 10 minutes sur les 11 niveaux de mesure (à gauche) et comparaison avec le modèle à 100 m (à droite)

3.1.3 Monitoring des erreurs

Les précédentes campagnes de mesures d'un appareil de type LiDAR auxquelles Météo-France a participé ont montré que le LiDAR ne mesure pas de façon très fiable les très faibles forces de vent (valeurs inférieures à 3 m/s). Dans la suite de l'étude, nous ne travaillerons donc que sur les forces supérieures ou égales à 3 m/s (à la fois pour les données modèle et les données d'observation).

Nous effectuons un suivi mensuel des moyennes glissantes sur 24 heures des erreurs sur les forces FF et les directions DD afin de déceler d'éventuelles dérives. Les éventuels 'pics d'erreur' ainsi détectés doivent être interprétés avec précaution, notamment pour les directions. Un pic d'erreur peut être dû à plusieurs raisons :

- lors d'une période de vents faibles, le vent est par nature sans secteur bien établi et donc avec des directions fluctuantes. Il n'est pas anormal de constater dans ce cas de potentielles grosses différences de directions avec le modèle ;
- une absence partielle de données sur la période glissante de 24 heures. Si peu de données ont été enregistrées durant 24 heures, une seule erreur en direction peut alors prendre un poids important dans le résultat ;
- une dérive du lidar marquée des erreurs en direction alors que le vent est soutenu.

L'exemple ci-dessous de monitoring pour avril 2021 est une bonne illustration. La période la plus ventée du mois du 21 au 25 avril montre des résultats très bons et très inférieurs aux seuils fixés (cf. § 2.2.1.1). L'erreur est de seulement 1m/s concernant les forces, et de moins de 10° concernant les directions. Les deux pics en direction à première vue importants, ne remettent pas en question la bonne qualité des données du lidar.

Les graphiques de monitoring mis à disposition dans le livrable accompagnant ce rapport sont donc à mettre en regard avec le code qualité des données lidar et avec la force du vent moyen. Ces informations peuvent être retrouvées dans le fichier `SerieLidarH100_Fecamp_20210302-20221004.csv`

**Moyennes glissantes sur 24 h des erreurs (valeurs absolues des biais)
"OLidar(100m)-MLidar(100m)",
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s**

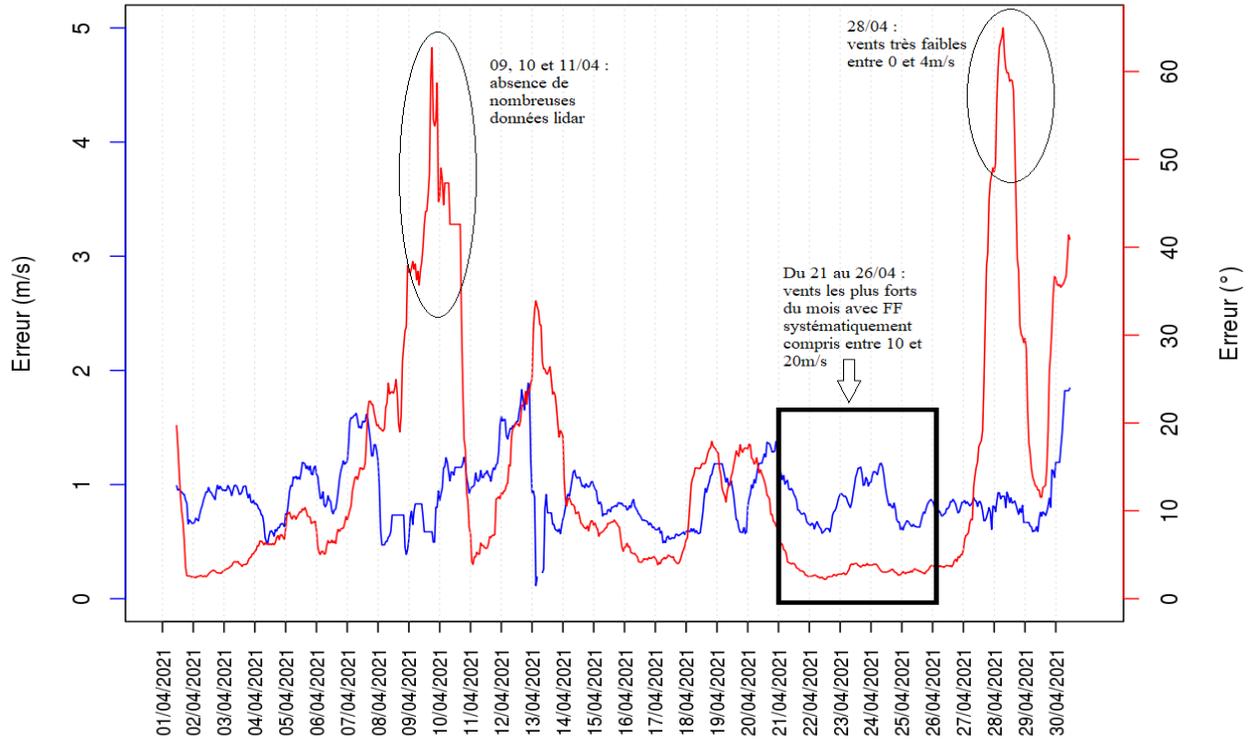


Illustration 10 : Monitoring des erreurs de forces (courbe bleue) et de directions (courbe rouge)

3.2 Retour sur des cas de données manquantes ou douteuses

Le LiDAR fournit moins de données d'observations lorsque l'altitude augmente, les nuages bas créant un obstacle à la mesure. Au-dessus de 150 m, les manques deviennent plus nombreux.

Dans le cadre de notre étude nous effectuons un suivi plus précis des données qui posent problème et de leur cause (technique ou météorologique), pour les niveaux inférieurs à 100 m.

	Incidents techniques impactant la mesure du LiDAR
Mars 2021	Réception des données à compter du 02/03.
Avril 2021	RAS
Mai 2021	RAS
Juin 2021	Problème de mauvaise disponibilité en altitude lié à la faible concentration d'aérosols dans l'atmosphère représentée par un faible CNR.
Juillet 2021	Manques du 05/07 au 19/07 en raison d'un dysfonctionnement de l'ordinateur à bord de la bouée qui collecte et traite les données.
Août 2021	Manques du 14/08 au 15/08 en raison d'un problème sur le serveur.
Septembre 2021	RAS
Octobre 2021	RAS
Novembre 2021	Début d'un dysfonctionnement sur la chaîne laser le 24/11/2021 : En fonctionnement nominal le lidar utilise 4 faisceaux pour effectuer les mesures. (cf 1.2) Un des 4 faisceaux a cessé de fonctionner à partir du 24/11/2021. Grâce à un post-traitement des 3 faisceaux restants fonctionnels, il a toutefois été possible de reconstituer les données de direction et de force du vent moyen. En revanche, il n'a pas été possible par cette méthode de recalculer des valeurs de rafales fiables. Le paramètre « rafales » est donc indisponible sur la période 24/11/2021 – 16/05/2022.
Décembre 2021	Défaut d'alimentation électrique du 24 décembre 2021 au 14 janvier 2022 : aucune donnée n'a pu être mesurée et enregistrée sur cette période.
Janvier 2022 – Mai 2022	Aggravation du dysfonctionnement de la chaîne laser : En plus du faisceau défaillant depuis novembre, des faisceaux supplémentaires ont cessé de fonctionner par intermittence et de façon aléatoire, rendant dès lors toute reconstitution de données impossibles. La période de janvier à mai 2022 a été fortement impactée avec des taux de présence des données lidar oscillant entre 40 et 60% seulement selon les mois.
Mai 2022	Remplacement de la bouée de mesure par une nouvelle bouée le 16/05/2022
Juin 2022 – Octobre 2022	RAS

Tableau 2 : Récapitulatif des problèmes techniques rencontrés sur le LiDAR

L'analyse d'une situation météorologique ayant pu impacter les mesures horaires du LiDAR figure en Annexe 1.

3.3 Statistiques de contrôle et descriptives de la mesure

3.3.1 Statistiques de contrôle de la mesure

Dans cette partie, nous réalisons la comparaison des mesures horaires du LiDAR avec le point de grille le plus proche du modèle AROME.

4% des valeurs enregistrées par le LiDAR sortent des seuils fixés, à savoir un écart de force de vent supérieur à 5 m/s et/ou un écart en direction supérieur à 30° (cf. Illustration 11) :

- L'essentiel des dépassements de seuil concerne le critère de direction (*croix oranges sur le graphique de gauche*) pour des forces de vent faible ce qui s'explique par le fait que le flux dans ces situations n'est pas clairement établi, le vent prenant un caractère « variable ». Les écarts en direction se font d'autant plus rares que la force du vent considérée est importante (quasiment aucun cas pour de vents de plus de 10 m/s) ;
- Les dépassements de seuil pour le seul critère de force du vent sont quant à eux très marginaux (seulement 0,5 % des mesures)

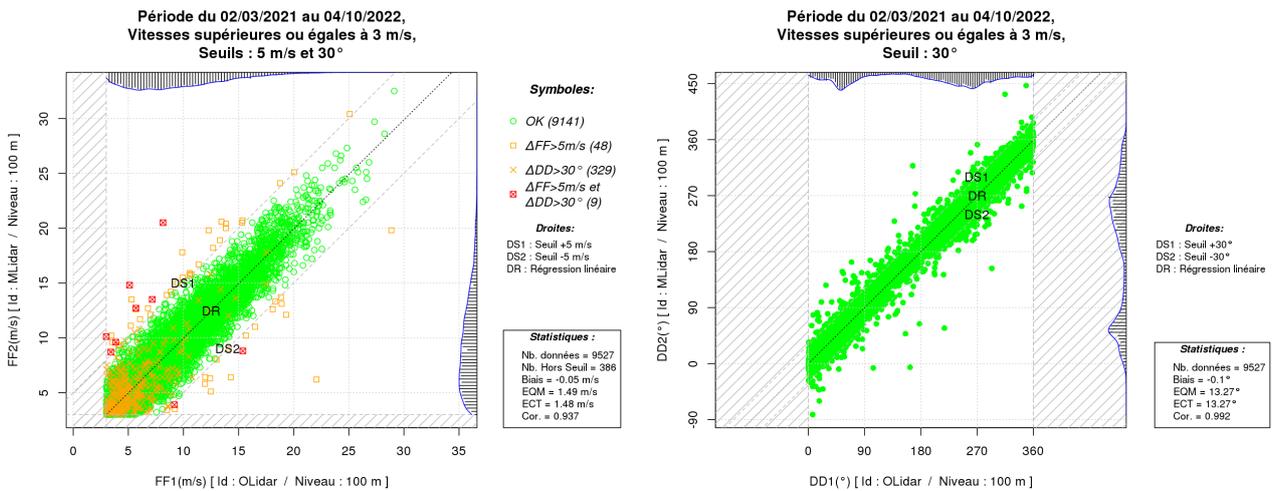


Illustration 11 : Comparisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) du LiDAR avec le modèle

Le diagramme « quantile-quantile » des forces de vent du LiDAR et du modèle AROME ci-dessous présente des points parfaitement alignés sur la première bissectrice jusqu'au percentile 95. Pour les percentiles 95 à 99, la corrélation reste également très bonne (moins de 1m/s). Le seul réel écart se résume à la valeur maximale, avec une différence de l'ordre de 3 m/s entre l'échantillon observé et celui du modèle AROME. Précisons que, malgré cet écart, la force maximale modélisée durant toute la campagne par AROME se produit exactement à la même date et à la même heure que le maximum de la série de données enregistrée par le lidar (le 18/02/2022 à 13h lors du passage de la tempête EUNICE), ce qui montre la bonne cohérence temporelle des phénomènes entre l'observation et le modèle. De plus, cet écart de 3m/s est à mettre en regard avec la valeur elle-même de la force du vent (d'environ 30 m/s), soit une erreur d'estimation de seulement 10 %.

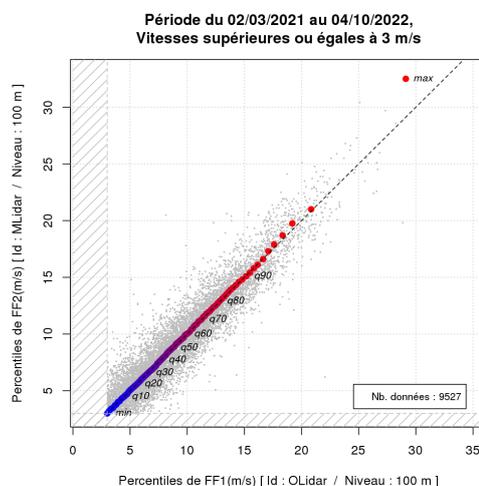


Illustration 12 : Diagramme « quantile-quantile »

Quelle que soit l'heure, le modèle vis à vis des observations ne présente quasiment aucun biais sur les directions (intervalles inter-quartiles compris entre -7 et +7°). Suivant la direction considérée, on note un très léger biais pour les secteurs sud et sud-est (de l'ordre de 2,5°) (cf. Illustration 13).

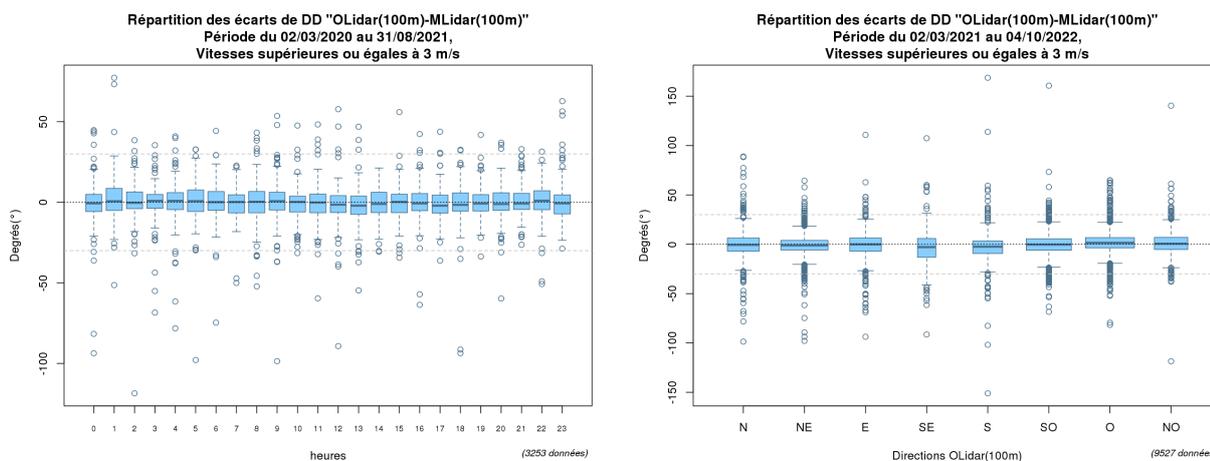


Illustration 13 : Répartitions des écarts de directions du LiDAR en fonction de l'heure (à gauche) et de la direction (à droite)

3 Analyse des données de vent mesuré par le LiDAR



D'une manière générale, quel que soit le secteur, les dépassements du seuil pour la force du vent (écart supérieur à 5 m/s entre le LiDAR et le modèle), restent très rares : ils représentent moins de 1% des cas (cf. Illustration 14 à gauche). Les écarts négatifs (valeur du modèle supérieure à la valeur observée par le lidar) sont un peu plus nombreux que les écarts positifs. Ceci va dans le sens du très léger biais de -0,05m/s noté dans le premier graphique de ce paragraphe (*illustration 11*).

Pour des vitesses supérieures à 6 m/s, on enregistre des dépassements du seuil de direction (écart supérieur à 30° entre le LiDAR et le modèle) dans moins de 5 % des cas. On note aussi que plus le flux est établi avec des vitesses de vent importantes, moins les erreurs de directions surviennent. Par exemple, aucun cas de dépassement ne s'est produit sur les 325 cas de vents les plus forts durant la campagne (supérieurs à 18m/s). A contrario, il est rappelé que plus le vent est faible et plus celui-ci a tendance à prendre un caractère variable sans secteur bien défini. Ceci explique le nombre plus important d'écarts pour les vitesses les plus faibles (cf. Illustration 14 à droite).

Au-dessus de chaque histogramme de cette illustration sont indiqués deux nombres : le nombre de cas franchissant le seuil pour la gamme de force de vent indiquée en abscisse, puis en dessous le nombre total de mesures pour cette même force de vent.

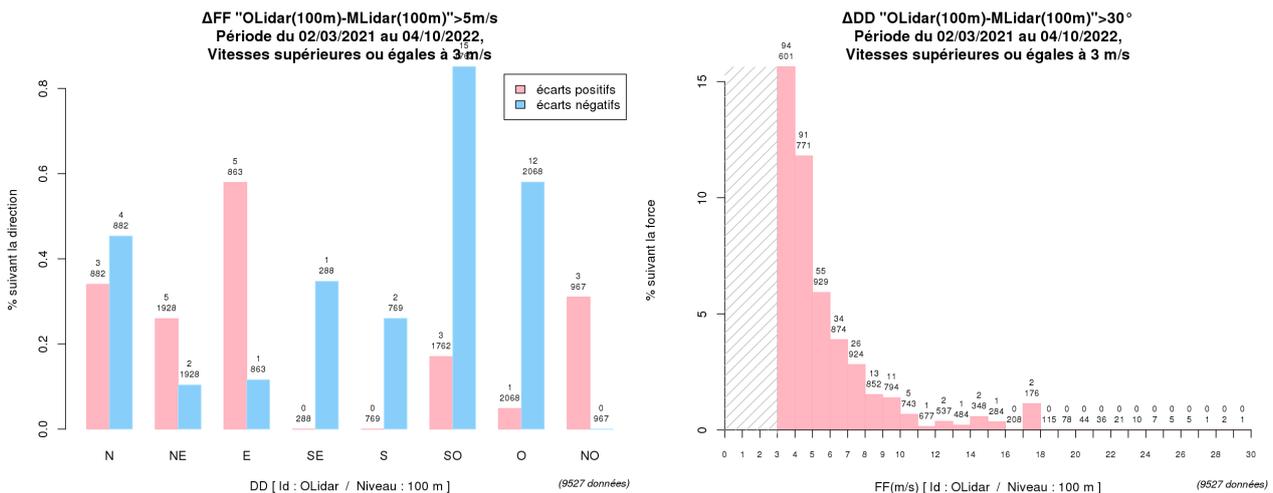


Illustration 14 : Dépassements des seuils de force (à gauche) et de direction (à droite) du vent du LiDAR

3.3.2 Statistiques descriptives du vent mesuré

En préambule, afin de se faire une idée plus précise des conditions météorologiques rencontrées durant la campagne de mesure, une description détaillée de la climatologie saisonnière figure en Annexe 4 .

3.3.2.1 Vent moyen horizontal à 100 m du LiDAR

La campagne de mesure a permis de mesurer des données moyennées sur 10 minutes, représentatives, d'un point de vue météorologique, du vent « moyen ». La plupart des graphiques présentés dans ce rapport sont quant à eux basés sur les données horaires uniquement (soit les données moyennées sur les 10 dernières minutes avant l'heure ronde) pour permettre la comparaison avec le modèle AROME (cf 3.1.1)

Sur l'ensemble de la campagne, le tableau suivant permet de constater que les forces de vent se distribuent de manière identique que l'on regarde les données mesurées toutes les 10 minutes ou seulement les données horaires (cf ligne total du tableau 3). Plus en détail, certains écarts entre les 2 distributions peuvent apparaître lors des mois de décembre 2021, mars 2022 et avril 2022. Ces mois ont toutefois été impactés par des problèmes techniques ayant empêché les mesures du lidar de façon récurrente (cf Tableau 2). Pour les autres mois, quelle que soit la classe de vitesse, ces taux ne diffèrent pas de plus de 1,5 %.

Dans ce tableau, le taux « brut » correspond à l'ensemble des données 10 minutes du LiDAR, et le taux « reconstitué » aux données horaires de la série reconstituée (LiDAR + comblement des périodes sans mesures par le modèle).

Année	Mois	Nombre de cas	0 à 3 m/s	3 à 5 m/s	5 à 10 m/s	10 à 15 m/s	15 à 20 m/s	20 à 25 m/s	25 à 30 m/s	30 à 35 m/s
2021	3	4222	5,3 %	15,1 %	40,7 %	25,5 %	10,9 %	2,4 %	0,1 %	
		714	5,6 %	14,3 %	41,2 %	25,5 %	11,3 %	2%	0,1 %	
	4	4131	18,6 %	16,3 %	30,5 %	24,9 %	9,7 %	0,1 %		
		720	17,6 %	17,1 %	31,2 %	24,7 %	9,3 %			
	5	4419	7,3 %	7,9 %	35,2 %	37,1 %	10,8 %	1,7 %		
		744	7,1 %	7,9 %	34,8 %	38,3 %	10,1 %	1,7 %		
	6	4079	19,7 %	27,8 %	37,1 %	11%	4,4 %			
		720	21,1 %	27,5 %	36,7 %	10,3 %	4,4 %			
	7	2322	17,1 %	15,2 %	39,8 %	20,8 %	6,5 %	0,6 %		
		744	15,5 %	16,9 %	45,3 %	16,8 %	4,6 %	0,9 %		
	8	4088	9,7 %	11,6 %	46,6 %	29,4 %	2,7 %			
		744	11%	13,4 %	45%	28%	2,6 %			
9	4297	11,6 %	17,3 %	43,2 %	25,1 %	2,8 %	0,1 %			
	720	11,2 %	17,9 %	43,1 %	24,9 %	2,8 %	0,1 %			
10	4452	4,3 %	11,2 %	40,4 %	27,2 %	15,2 %	1,3 %	0,4 %		
	744	4,2 %	11,6 %	40,5 %	27,4 %	14,9 %	0,9 %	0,5 %		
11	3742	4,2 %	14,5 %	43,5 %	24,3 %	11%	2,5 %			
	720	6,4 %	14,7 %	44,6 %	22,9 %	10,1 %	1,2 %			
12	2077	0,3 %	2,3 %	25,7 %	43,3 %	25,1 %	3,4 %			
	744	1,9 %	6%	38,3 %	32,4 %	18,3 %	3,1 %			

3 Analyse des données de vent mesuré par le LiDAR

2022	1	2183	<i>10%</i>	<i>18,1 %</i>	<i>47,7 %</i>	<i>18,6 %</i>	<i>5,6 %</i>				
		744	9,1 %	17,2 %	37%	23,8 %	12,1 %	0,8 %			
	2	2482	<i>1,6 %</i>	<i>1,9 %</i>	<i>22,1 %</i>	<i>38,8 %</i>	<i>22,8 %</i>	<i>10,9 %</i>	<i>1,8 %</i>	<i>0,1 %</i>	
		672	1,2 %	3,1 %	24,4 %	40,2 %	19,5 %	10,1 %	1,5 %		
	3	1896	<i>2,8 %</i>	<i>8,2 %</i>	<i>45,1 %</i>	<i>35,5 %</i>	<i>8,2 %</i>	<i>0,1 %</i>			
		744	2,8 %	6,6 %	44,1 %	41,3 %	5,1 %	0,1 %			
	4	1986	<i>3,7 %</i>	<i>8,9 %</i>	<i>30%</i>	<i>34,2 %</i>	<i>19,6 %</i>	<i>3,4 %</i>	<i>0,1 %</i>		
		720	5,7 %	11%	34,3 %	37,2 %	10,3 %	1,4 %	0,1 %		
	5	2993	<i>14,9 %</i>	<i>15,2 %</i>	<i>49,3 %</i>	<i>19,4 %</i>	<i>1,2 %</i>				
		744	12,1 %	17,2 %	48,3 %	21,1 %	1,3 %				
	6	4222	<i>12,6 %</i>	<i>19,2 %</i>	<i>40,6 %</i>	<i>23,1 %</i>	<i>4,5 %</i>	<i>0%</i>			
		720	12,1 %	19,3 %	41,1 %	23,1 %	4,4 %				
	7	4175	<i>11,9 %</i>	<i>21,6 %</i>	<i>50,1 %</i>	<i>16,1 %</i>	<i>0,2 %</i>				
		744	12%	21%	51,6 %	15,3 %	0,1 %				
	8	4151	<i>9,7 %</i>	<i>21,3 %</i>	<i>47,3 %</i>	<i>20,4 %</i>	<i>1,4 %</i>				
		744	10,1 %	19,8 %	46,1 %	22,2 %	1,9 %				
	9	4061	<i>8,7 %</i>	<i>21,5 %</i>	<i>42,9 %</i>	<i>23,8 %</i>	<i>3,1 %</i>	<i>0%</i>			
		720	8,8 %	21,1 %	42,6 %	23,1 %	3,9 %	0,6 %			
	10 (4J)	538	<i>14,5 %</i>	<i>17,1 %</i>	<i>39,8 %</i>	<i>24,7 %</i>	<i>3,9 %</i>				
		96	12,5 %	15,6 %	35,4 %	30,2 %	6,2 %				
Total	66516	<i>9,7 %</i>	<i>15,4 %</i>	<i>40,5 %</i>	<i>25,4 %</i>	<i>7,8 %</i>	<i>1,1 %</i>	<i>0,1 %</i>	<i>0,0 %</i>		
	13962	9,3 %	15,0 %	40,6 %	26,2 %	7,7 %	1,2 %	0,1 %	0,0 %		

Tableau 3: Classes de vitesses par mois. Taux « brut » (en italique) et « reconstitué » (en gras) du LiDAR

3.3.2.2 Distributions

Les distributions statistiques horaires des observations et du modèle à 100 m sont très proches (cf. Illustration 15). Hormis pour les percentiles les plus élevés ($\geq Q90$), les quantiles apparaissant ci-dessous dans l'encart sont parfaitement identiques, ce qui est remarquable. Comme indiqué précédemment, la valeur maximale quant à elle ne diffère que de 3,4m/s (ce qui représente un écart faible de l'ordre de 10 % alors que l'on ne considère qu'une seule et unique valeur).

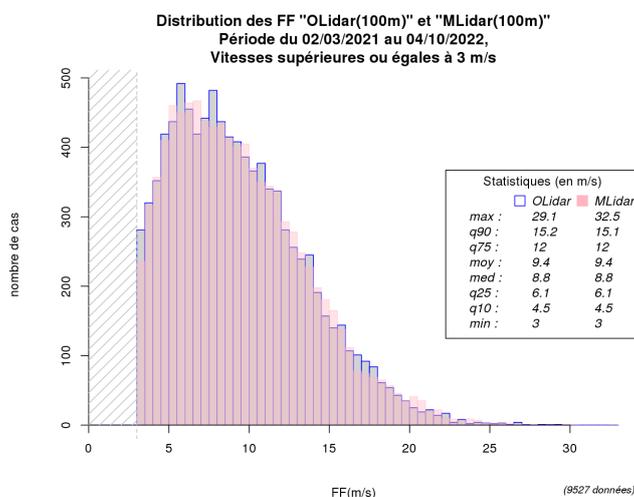


Illustration 15 : Distributions des vents horaires du LiDAR

Les distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100 m figurent en Annexe 5.

3.3.2.3 Variation diurne de la force du vent horizontal (données horaires)

On constate sur la figure ci-dessous un léger cycle diurne. En milieu de journée (globalement de 10h à 14h UTC), les médianes horaires des observations et du modèle sont légèrement inférieures à la médiane de la période totale. En soirée et en première partie de nuit, on observe l'effet inverse.

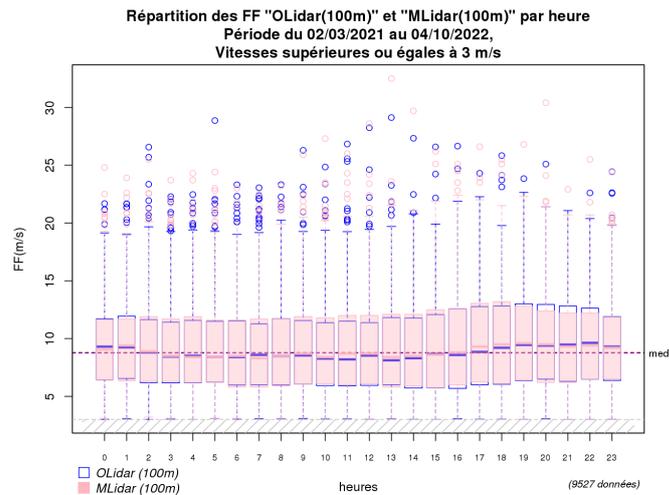


Illustration 16 : Répartitions horaires des forces du vent du LiDAR

Les répartitions horaires, par mois, des forces de vent du LiDAR à 100 m figurent en Annexe 6.

3.3.2.4 Variation mensuelle de la force du vent horizontal (données horaires)

Des disparités sur les répartitions mensuelles de force de vent existent (cf. Illustration 17).

Il est intéressant de noter que les boîtes à moustaches issues des données du modèle sont très proches de celles issues du lidar attestant une nouvelle fois la très bonne corrélation des mesures. Les différences entre les boîtes à moustaches aux mois de juillet 2021 et février 2022 peuvent s'expliquer par le peu de données mesurées par le lidar à ces périodes (cf 3.2).

Assez logiquement, les vents les plus forts en fréquence apparaissent pour des mois hivernaux (décembre 2021 et février 2022 pour lesquels les intervalles inter-quartiles sont bien au-dessus de la médiane des forces de vent sur l'ensemble de la campagne). A contrario, la période estivale de 2022 est en dessous de la médiane de l'ensemble avec 75 % des vents ne dépassant pas 10 m/s environ. Le mois de janvier 2022 apparaît quant à lui comme assez singulier dans cette série. En effet, ce mois a été particulièrement calme avec des vents bien en deçà de la normale (cf Tableau 4).

Précisons que la ligne pointillée dans cette illustration montre la médiane des forces de vent sur l'ensemble des 19 mois de la campagne mais ne doit pas être confondue avec une normale climatologique. Par conséquent, l'illustration 17 doit être mise en regard avec le tableau 4 pour ne pas commettre d'erreur d'interprétation. Par exemple, le mois d'avril 2022 a été conforme à la normale au niveau de la station de mesure d'Octeville, il n'a donc pas été plus venté que d'habitude à cette période de l'année. Or, la période de la campagne a été en moyenne moins ventée que la norme. Ainsi, des mois conformes à la normale peuvent apparaître au-dessus de la médiane de l'illustration 17.

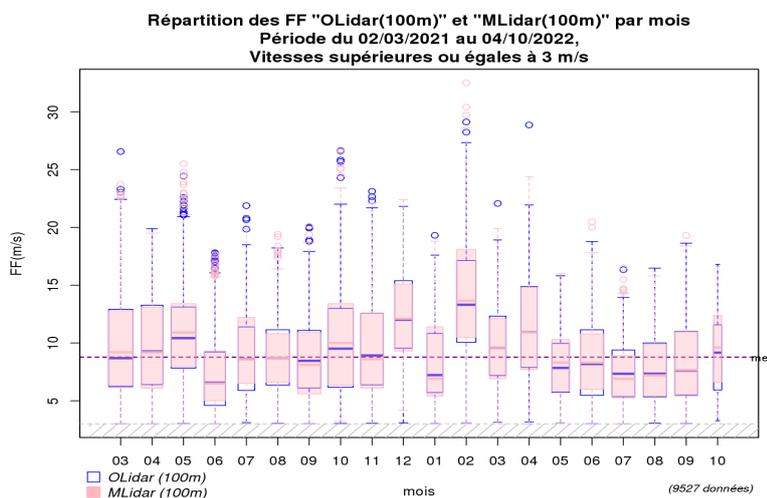


Illustration 17 : Répartitions mensuelles des forces du vent du LiDAR ; la largeur des boîtes à moustaches est fonction du nombre de données

Afin de comparer de manière plus générale la période de la campagne de mesure à la climatologie, nous avons effectué une analyse fréquentielle mensuelle de la vitesse du vent horaire à la station d'Octeville (station de référence la plus proche du LiDAR).

Au regard de la climatologie :

- les mois du printemps 2021 ont été assez contrastés avec un mois de mars globalement peu venteux, un mois d'avril moyennement venteux avec plus de vent modéré que la normale, et enfin un mois de mai assez agité avec trois fois plus de vent fort que la normale.
- L'été et l'automne 2021 ont été plutôt calmes à l'exception du mois d'août 2021 marqué par le passage de perturbations peu actives (ces situations entraînant plus de vents modérés que la normale).
- Lors de l'hiver 2021-2022, le mois calme de janvier 2021 contraste avec le mois de décembre 2021 (avec deux fois plus de vents forts que la normale) et surtout le mois de février 2022 marqué par le passage de plusieurs tempêtes comme EUNICE et FRANKLIN (presque un tiers des vents au cours de ce mois ont été des vents > 8 m/s).
- Le mois de mars 2022 a connu 4 fois moins de vents forts qu'en moyenne. Le mois d'avril est quant à lui conforme à la normale.
- Les derniers mois de la campagne de mai 2022 à septembre 2022 ont été peu ventés avec moins de vents forts et surtout moins de vents modérés (entre 4.5 et 8.0 m/s) au profit de vents faibles (< 4.5 m/s).
- Au total, la période de la campagne de mesure s'avère en moyenne moins ventée que la normale. Le pourcentage de vents les plus forts est conforme, mais les périodes de vents modérés ont été substantiellement moins nombreuses qu'à l'accoutumée.

.

Vitesses en m/s	2021									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
> 8	13,9 <i>14,1</i>	7,4 <i>6,5</i>	5,9 <i>16,4</i>	4,4 <i>1,1</i>	5,4 <i>5,0</i>	5,8 <i>4,8</i>	8,9 <i>3,1</i>	10,9 <i>10,5</i>	15,4 <i>15,1</i>	11,0 <i>21,6</i>
[4.5, 8.0[	40,7 <i>29,2</i>	37,0 <i>43,2</i>	38,5 <i>40,6</i>	36,8 <i>16,0</i>	40,3 <i>28,2</i>	37,7 <i>43,7</i>	36,1 <i>29,0</i>	43,7 <i>37,2</i>	43,1 <i>32,9</i>	40,6 <i>36,8</i>
[1.5, 4.5[	39,7 <i>48,3</i>	48,6 <i>40,1</i>	49,1 <i>40,2</i>	52,4 <i>69,2</i>	47,5 <i>58,3</i>	48,1 <i>41,4</i>	47,6 <i>60,6</i>	39,5 <i>45,8</i>	36,7 <i>41,1</i>	42,7 <i>39,5</i>
[0, 1.5[	5,7 <i>8,4</i>	7,0 <i>10,2</i>	6,5 <i>2,8</i>	6,4 <i>13,7</i>	6,8 <i>8,5</i>	8,4 <i>10,1</i>	7,4 <i>7,3</i>	5,9 <i>6,5</i>	4,8 <i>10,9</i>	5,7 <i>2,1</i>

Vitesses en m/s	2022									Total campagne
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
> 8	17,8 <i>13,9</i>	17,4 <i>29,1</i>	13,9 <i>3,5</i>	7,4 <i>10,1</i>	5,9 <i>1,7</i>	4,4 <i>2,8</i>	5,4 <i>1,5</i>	5,8 <i>3,5</i>	8,9 <i>9,4</i>	9,2 <i>9,0</i>
[4.5, 8.0[	45,2 <i>26,4</i>	42,6 <i>41,7</i>	40,7 <i>40,6</i>	37,0 <i>40,7</i>	38,5 <i>30,6</i>	36,8 <i>30,4</i>	40,3 <i>33,3</i>	37,7 <i>34,9</i>	36,1 <i>28,3</i>	39,4 <i>33,8</i>
[1.5, 4.5[	33,3 <i>49,0</i>	35,0 <i>23,6</i>	39,7 <i>54,4</i>	48,6 <i>44,9</i>	49,1 <i>62,8</i>	52,4 <i>59,0</i>	47,5 <i>56,3</i>	48,1 <i>53,8</i>	47,6 <i>51,8</i>	45,0 <i>49,7</i>
[0, 1.5[	3,7 <i>10,7</i>	5,0 <i>5,6</i>	5,7 <i>1,5</i>	7,0 <i>4,3</i>	6,5 <i>4,9</i>	6,4 <i>7,8</i>	6,8 <i>8,9</i>	8,4 <i>7,8</i>	7,4 <i>10,5</i>	6,4 <i>7,5</i>

Tableau 4 : Statistiques 2001-2020 (en gras, en %) et valeurs 2020 (en italique, en %) des forces de vent de la station d'Octeville ; surlignages rouge et bleu : excédent et déficit de plus de 5 % par rapport à la normale

Rappel : Une analyse détaillée de la climatologie saisonnière, présentant les différences de vents par secteurs, figure en Annexe 4 .

3.3.2.5 Roses des vents (données horaires)

Pour une meilleure lisibilité, nous faisons le choix de représenter ci-dessous les roses des vents à 100 m en seulement 4 classes de vents. À noter que la rose des vents observés est réalisée ici à partir de toutes les données brutes **horaires** disponibles (**données inférieures à 3 m/s comprises**).

La rose des vents issue des données modélisées par le modèle AROME (à droite dans l'illustration ci-dessous) coïncide parfaitement avec la rose des vents obtenue à partir des données observées par le LiDAR (à gauche dans l'illustration ci-dessous).

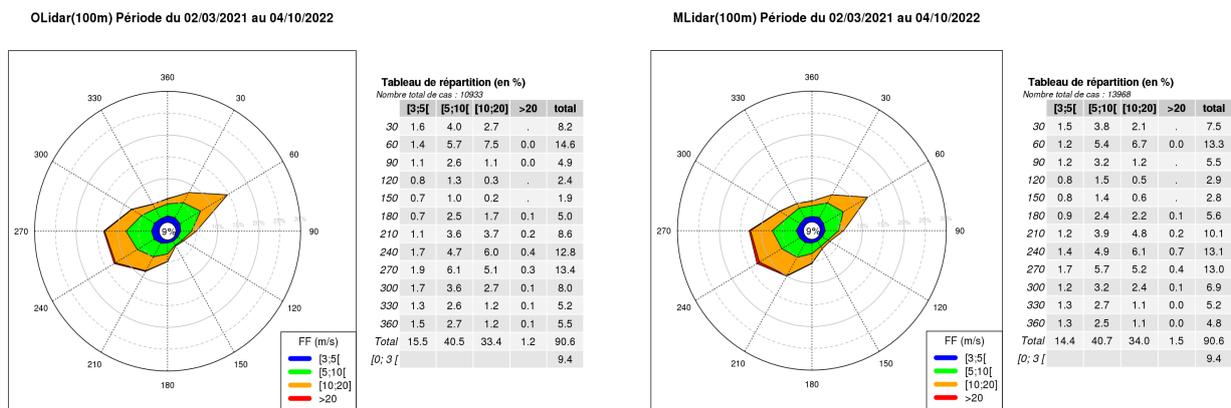


Illustration 18 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite)

Le tableau de contingence détaillé, présentant les forces de vents du LiDAR par classes de 1 m/s et par secteur de 30°, figure en Annexe 7.

Les roses des vents mensuelles élaborées à partir de toutes les données brutes **10 minutes** figurent en Annexe 8.

3.3.2.6 Profils verticaux de vent (données horaires)

Comme pour les roses des vents, **nous avons ici fait le choix de considérer toutes les données horaires du LiDAR.**

On constate que durant la période de la campagne de mesures, les profils horaires observés sur la couche allant de 40 m à 200 m sont parfaitement cohérents avec les profils modélisés. Les quantiles sont quasiment superposés. Les différences sur les profils de valeurs maximales sont à considérer avec précaution. En effet, ces courbes sont obtenues avec une seule et unique valeur par niveau. Rappelons aussi que l'écart d'environ 3m/s entre 100 et 160m ne représente une erreur que de l'ordre de 10 %.

Par ailleurs, de 40 m à 160 m, les vitesses du profil moyen observé (profil bleu en pointillés) correspondent parfaitement à celles du profil moyen modélisé par AROME (profil rouge en pointillés). Il est intéressant de noter que ces 2 profils représentatifs de la période de la campagne de mesure sont tous deux inférieurs à tous niveaux à la climatologie sur 20 ans issue du modèle AROME (profil vert en pointillés).

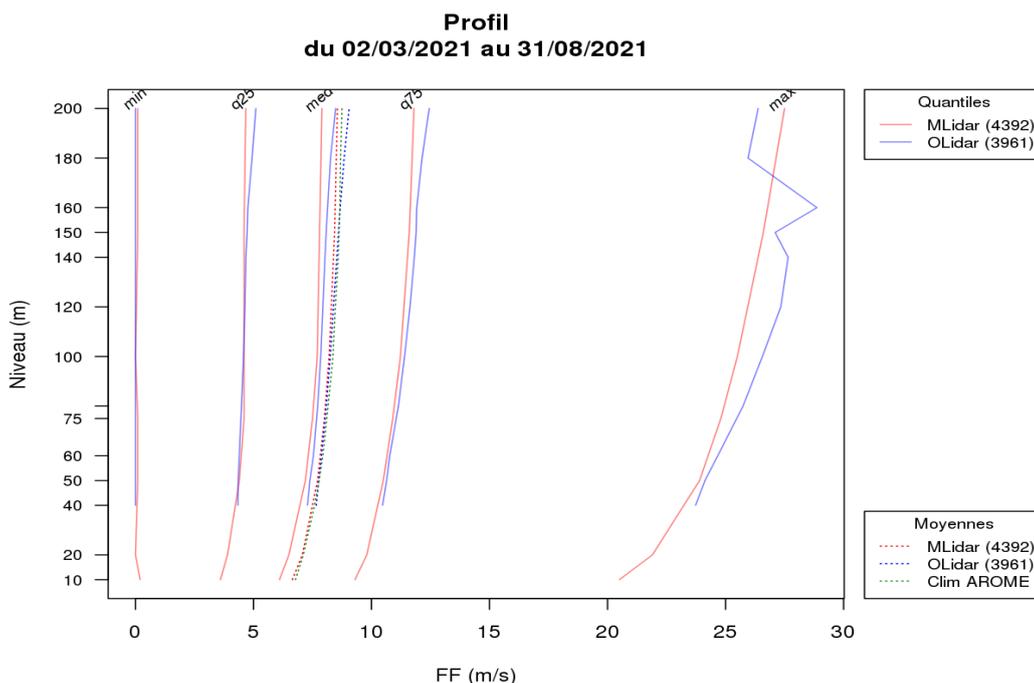


Illustration 19 : Profils des vents avec quantiles du LiDAR

Les profils, par mois, des forces de vent du LiDAR figurent en Annexe 9.

3.3.2.7 Cisaillement du vent (données 10 minutes)

Entre les niveaux 40 m et 160 m, on observe un cisaillement de vent du LiDAR d'environ 1 m/s pour les directions de sud-ouest à ouest (cf. Illustration 20). Ces directions témoignent du passage des fronts des perturbations océaniques qui créent du cisaillement en altitude. Nous avons décidé de représenter le cisaillement de vent du modèle entre les niveaux disponibles les plus proches, 50 m et 150 m. Sans grande surprise, on constate que les caractéristiques sont comparables avec toutefois un cisaillement légèrement plus important pour le secteur sud pour le modèle.

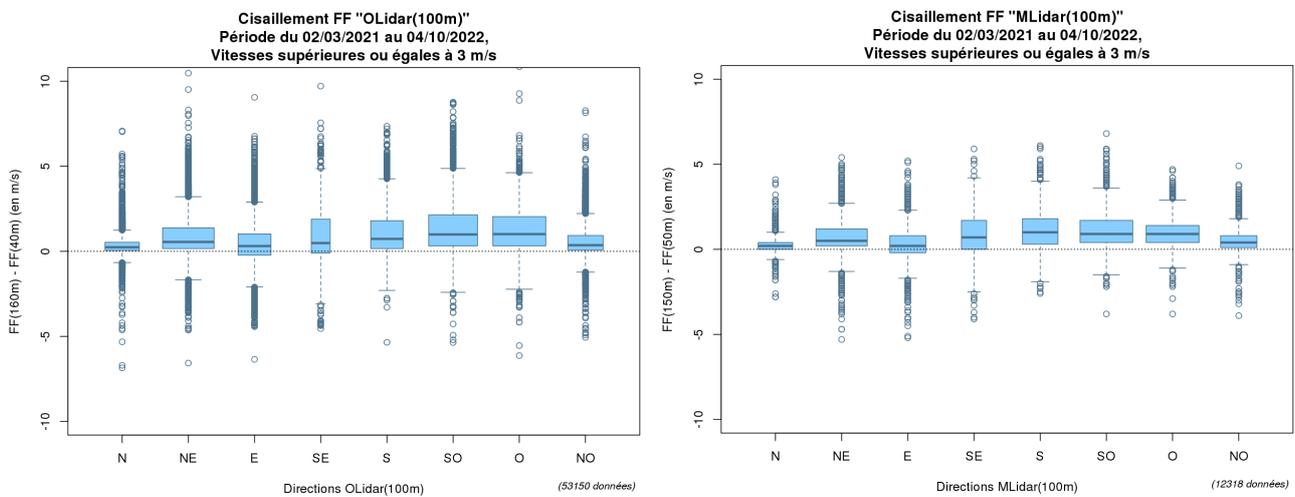


Illustration 20 : Cisaillement des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite)

Afin de se faire une idée plus précise de la situation, nous avons décidé de travailler avec **le coefficient α « exposant du cisaillement de vent (wind shear exponent) »** :

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

où FF1 est la force du vent en m/s au niveau 1 (niveau bas), FF2 la force du vent en m/s au niveau 2 (niveau haut), Z1 l'altitude en m au niveau 1 (niveau bas), Z2 l'altitude en m au niveau 2 (niveau haut).

Le coefficient α 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 α sont proposées (voir tableau ci-après) mais sans que soit précisée la couche verticale associée.

Nature du terrain	Exposant α
Plat : neige, glace, mer, marécages, herbes courtes	0.08 à 0.12
Mer formée	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 α 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 α 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 mécaniques sur les pales des éoliennes sont moins fortes.

Nous calculons et représentons sur l'illustration 21 le coefficient α de cisaillement par secteur de 30° pour la couche [40 m - 160 m] en faisant une distinction entre le jour (7h à 18h UTC) et la nuit (19h à 6h UTC). Les valeurs les plus faibles de l'indicateur α (inférieures à 0,05) correspondent aux situations non perturbées.

Pour les vents de secteur sud à ouest, où le coefficient α est le plus fort, on ne constate pas de cycle diurne évident. En revanche, pour les secteurs nord-est à sud-est et les secteurs nord/nord-ouest, le cisaillement est plus important la nuit que le jour. Pour les secteurs est à sud-est, ceci peut s'expliquer par un possible effet de brise accentuant le cisaillement nocturne (brise de terre la nuit amplifiant les vents de secteurs sud-est et brise de mer le jour atténuant ceux-ci).

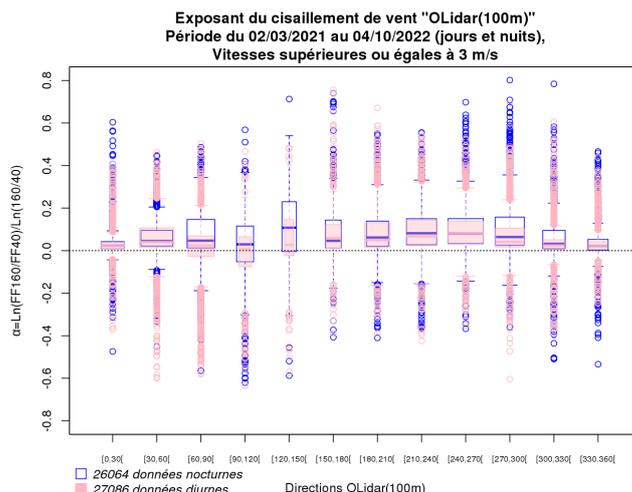


Illustration 21 : Exposant du cisaillement de vent du LiDAR

Les figures de l'exposant du cisaillement sur les périodes mensuelles se trouvent en Annexe 10.

3.3.2.8 Analyse des risques de turbulence atmosphérique à 100 m

L'intensité de turbulence est égale au rapport de l'écart type du vent sur 10 minutes sur le vent moyen de ces 10 minutes :

$$Tu = \frac{\sigma_{FF}}{FF}$$

Comme indiqué au § 3.2 , le dysfonctionnement d'un des faisceaux laser a empêché la mesure du vent instantané sur la période allant du 24/11 au 16/05/2022, date du remplacement de la bouée. Par conséquent, la qualité des données d'écart-type du vent sur 10 minutes a également été impactée. Pour cette raison, Météo-France a fait le choix d'écarter ces données sur la période en question. Les boîtes à moustaches de l'illustration 22 sont donc établies à partir des données du mois de mars 2021 au mois de novembre 2021 et des données du mois de mai 2021 au mois d'octobre 2022. « Les effets » éventuels de situations tempétueuses hivernales (et turbulentes) ne peuvent donc pas être pris en compte.

A partir de l'échantillon disponible, on constate que les vents de secteur nord/nord-est à nord-ouest présentent une intensité de turbulence plus forte que pour les autres directions.

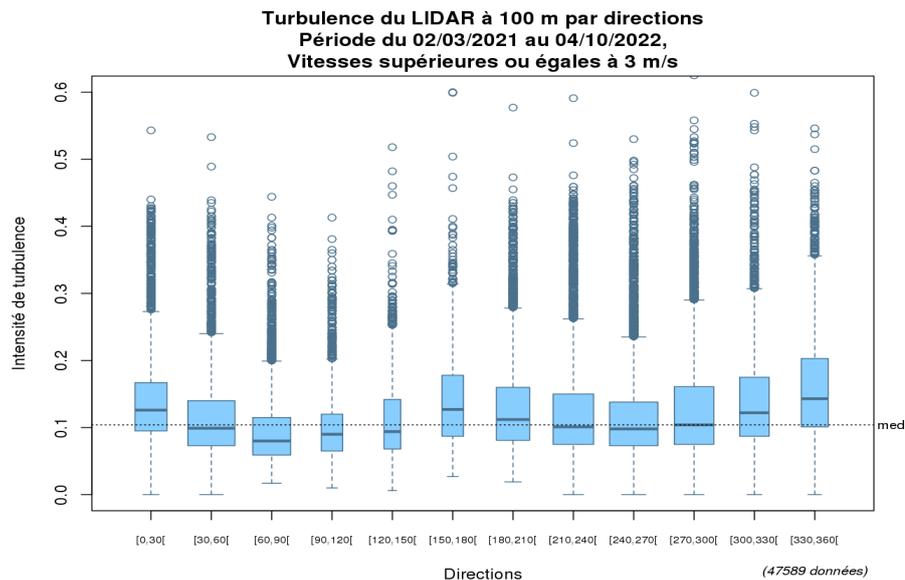


Illustration 22 : Turbulence du lidar

Les boîtes à moustaches mensuelles de l'intensité de turbulence du vent du LiDAR à 100 m suivant les directions figurent en Annexe 11.

3.3.2.9 Séries horaires FF et FXI à 100 m

Comme indiqué au § 3.2 , le dysfonctionnement d'un des faisceaux laser a empêché la mesure de rafales sur la période allant du 24/11/2021 au 16/05/2022, date du remplacement de la bouée.

Les séries horaires FF (vent moyen observé **ou estimé**) et FXI (vent maximal calculé) sont très cohérentes sur le reste de la campagne mais il convient de garder à l'esprit que la comparaison n'a pas été possible en période hivernale, soit durant les mois les plus soumis aux vents forts en général.

3 Analyse des données de vent mesuré par le LiDAR

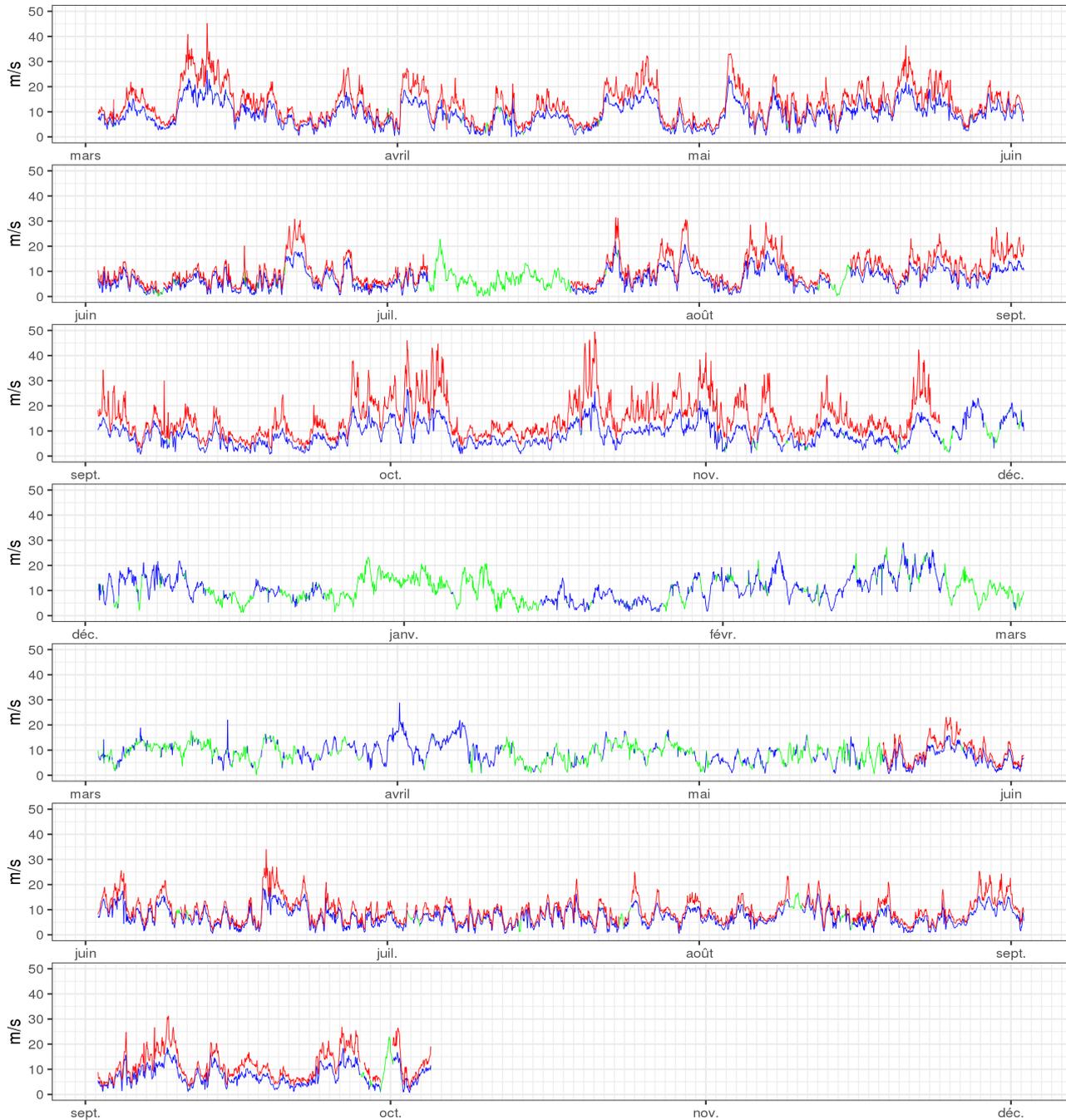


Illustration 23 : Séries FF et FXI à 100 m du LiDAR

Météo-France fournit au travers du fichier « SerieLidarH100_Fecamp_20210302-20221004.csv » les séries de données horaires de vent à 100 m comportant le vent moyen (FF et DD) et la vitesse du vent maximal (FXI) pour la période du 02/03/2021 au 04/10/2022. Ces paramètres sont accompagnés des codes qualité QFF, QDD et QFXI (cf. §2.2.1.3 Codes qualité).

4 Analyse des données de vent mesuré par l'anémomètre

Nous effectuons des contrôles semblables à ceux du LiDAR sur la présence et la cohérence des données de vent de surface mesuré par l'anémomètre en considérant les seuils d'erreurs de forces et de directions respectivement de 3 m/s et 30° (cf. §2.2.1.2 p10).

L'anémomètre étant installé sur la bouée à une hauteur de 4 m au-dessus de la mer (point le plus haut de la bouée), nous avons extrapolé les vitesses du vent à 10 m à l'aide de la formule logarithmique suivante :

$$FF_{10m} = FF_{4m} \times \frac{\log(10/0,0002)}{\log(4/0,0002)} \quad 2$$

Remarque : Météo-France a fait le choix de dévalider les données de l'anémomètre sur la période décembre 2021 – 16 janvier 2022. Suite au travail d'expertise de Météo-France, les données de direction de l'anémomètre, en particulier pour les vents de secteur nord sont apparues douteuses. Une difficulté de reconstitution de la direction du vent a été confirmée après vérification par le prestataire de mesures. Ainsi les graphiques qui suivent dans cette partie 4 ne prennent donc pas en compte les données mesurées durant cette période.

Les fichiers bruts sur décembre 2021 et début janvier 2022 sont fournis dans le livrable de données car les forces de vent sont considérées quant à elles exploitables. A contrario, Météo-France recommande de ne pas prendre en compte les directions de vent également présentes dans les fichiers de données brutes pour l'anémomètre durant cette période.

16 % des valeurs enregistrées par l'anémomètre (hors période décembre 2021 - mi-janvier 2022) sortent des seuils fixés. Ceci peut paraître nettement plus important que pour le LiDAR (5 %). Toutefois :

- comme cela est précisé précédemment, les valeurs de l'anémomètre sont extrapolées de 4 à 10 mètres de hauteur ce qui reste moins précis qu'une mesure directe à 10 mètres (impossible pour des raisons techniques) ;
- le seuil de force considéré est plus strict que pour le lidar (écart de 3 m/s contre 5 m/s). Les dépassements constatés restent acceptables et n'excèdent quasiment jamais les 5 m/s (un écart de plus de 5 m/s n'est relevé que dans seulement 0,3 % des cas contre 0,5 % des cas pour le lidar) ;
- enfin, les dépassements sont essentiellement dus au seuil de direction. La majorité de ces dépassements correspondent à des forces plutôt faibles dans des situations de vent variable sans secteur de vent bien établi.

2 Emeis, S., & Turk, M. (2007). Comparison of logarithmic wind profiles and power law wind profiles and their applicability for offshore wind profiles. In Wind energy (pp. 61-64). Springer, Berlin, Heidelberg.

4 Analyse des données de vent mesuré par l'anémomètre

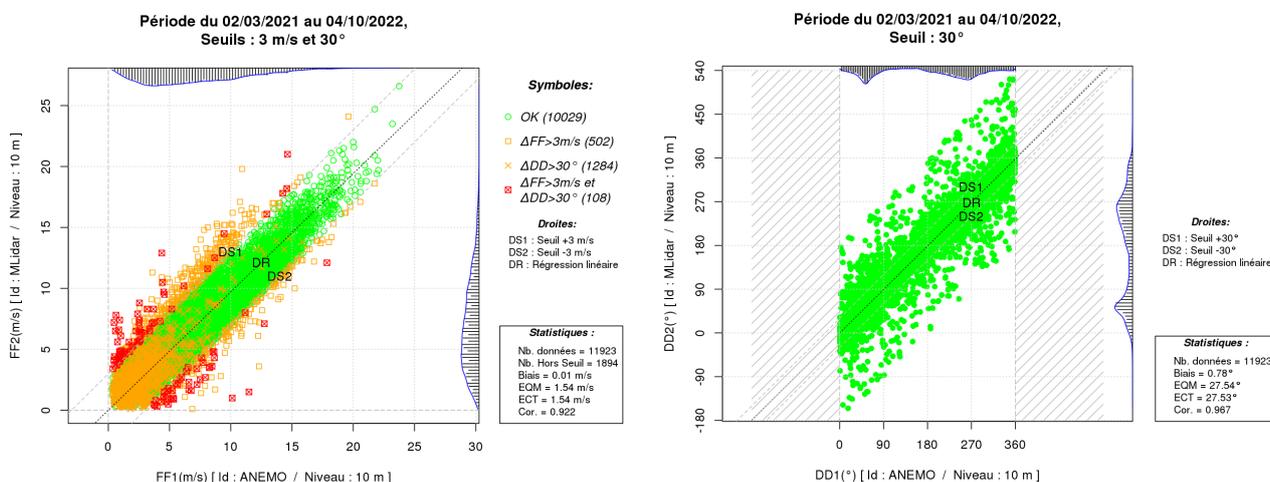


Illustration 24 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) de l'anémomètre avec le modèle

Les distributions statistiques horaires des observations et du modèle à 10 m sont très proches (graphique de gauche de l'illustration 25). Les quantiles apparaissant ci-dessous ne diffèrent pas de plus de 0,5 m/s. Nous pouvons toutefois noter un peu plus de cas pour les vents les plus faibles (< 4m/s) pour l'anémomètre et a contrario un peu moins de cas entre 5 et 10 m/s.

Le diagramme « quantile-quantile » des forces de vent de l'anémomètre présente des points alignés sur la première bissectrice, seule la valeur maximale s'en écarte.

Les résultats de l'anémomètre sont tout à fait bons mais il convient de garder à l'esprit que la période de mesure a été amputée d'une durée d'un mois et demi en plein hiver (notamment décembre 2021 qui a été venté), le comportement de certains vents les plus forts pouvant donc ne pas figurer dans ces distributions.

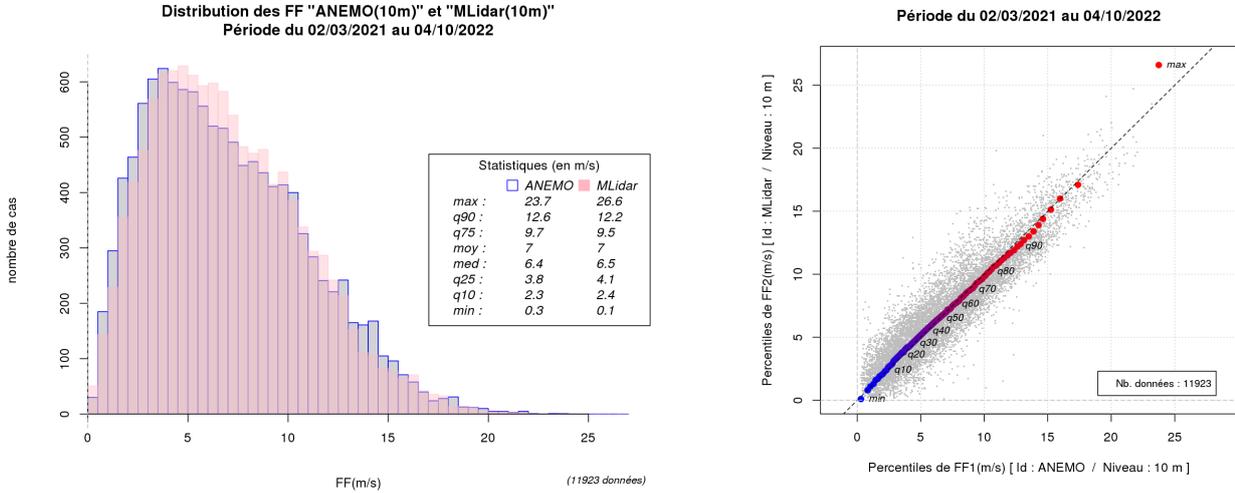


Illustration 25 : Distribution des vents horaires de l'anémomètre (à gauche) et diagramme « quantile-quantile » (à droite)

La rose des vents de l'anémomètre est très proche de celle du modèle AROME à 10 m. Elle présente toutefois de légères différences avec notamment, comme vu précédemment, un peu plus de vents faibles et moins de vents compris sur la page 5 à 10 m/s.

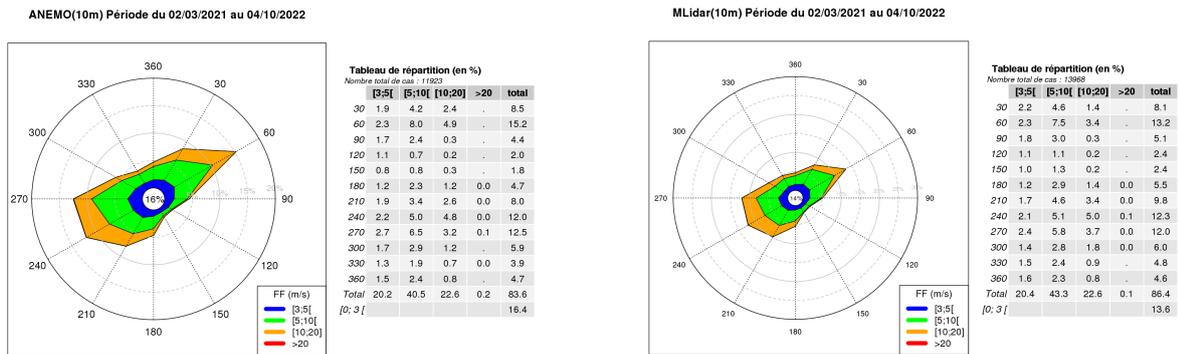


Illustration 26 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'anémomètre

5 Conclusion

Au cours de la campagne, nous avons assuré un monitoring au fil de l'eau de la disponibilité des données LiDAR, ainsi qu'un contrôle entre les valeurs mesurées et les données fournies par les sites voisins ou par le modèle météorologique AROME.

Le monitoring du LiDAR a permis de contrôler la présence des données sur les 11 niveaux de mesure et plus précisément, de vérifier à l'aide de statistiques descriptives, la cohérence des observations de force et de direction à 100 m.

Ce travail a conduit à :

- détecter la faible disponibilité des mesures de vent du lidar à partir du mois de décembre 2021 ;
- détecter la dérive progressive des valeurs enregistrées pour certains paramètres en raison de problèmes techniques : vent mesuré par la station météorologique au niveau de la bouée en décembre 2021 et début janvier 2022, rafales mesurées en altitude par le lidar sur les différents niveaux sur la période novembre 2021 à mai 2022 ;
- invalider les paramètres précédents de l'échantillon de données retenues pour ce rapport ;
- procéder au remplacement de la bouée en cours de campagne.

Sur la base des données disponibles, nous avons ensuite pu établir que les mesures de vent de surface et d'altitude effectuées sur la zone d'étude au large de Fécamp étaient parfaitement cohérentes avec les données du modèle AROME. Vu le nombre réduit de données observées durant la période hivernale (cette période de l'année étant en général la plus ventée) les conclusions pourraient évoluer avec l'ajout de données hivernales supplémentaires.

Suite à ce travail de contrôle, des séries complètes de vent horaires à 100 m ont pu être créées et estimées sur les périodes manquantes (notamment entre décembre 2021 et mai 2022).

6 Bibliographie

Chatel, V., Dalphiné, A., Merle, R., Mezdour, A., Rouchy, N., Roulle, O., Joly B., Pouponneau B. et Legrand R. : Projet de parc éolien off-shore, Note technique Lots 1, 2 et 3, V1 , 2021

Annexes

Table des annexes

Annexe 1 : Situation des 23 et 24 mai 2021 (phénomènes orageux).....	43
Annexe 2 : Situation des 20 et 21 octobre 2021 (tempête Aurore).....	44
Annexe 3 : Situation du 18 février 2022 (tempête Eunice).....	46
.....	47
Annexe 4 : Climatologie du 1 ^{er} mars 2021 au 30 septembre 2022.....	48
Annexe 5 : Distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	56
Annexe 6 : Répartitions horaires par mois des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	60
Annexe 7 : Tableau de contingence des forces de vent du LiDAR.....	64
Annexe 8 : Roses des vents mensuelles du LiDAR à 100m (données brutes).....	65
Annexe 9 : Profils de vent du LiDAR.....	69
Annexe 10 : Cisaillement du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	73
Annexe 11 : Turbulence du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	77

Annexe 1 : Situation des 23 et 24 mai 2021 (phénomènes orageux)

Une petite dépression à 1000hPa vient s'installer sur la Manche générant un gradient relativement resserré pour la saison sur la Bretagne et la Normandie. Cette dépression s'accompagne d'une perturbation active suivie d'une forte instabilité avec une traîne orageuse.

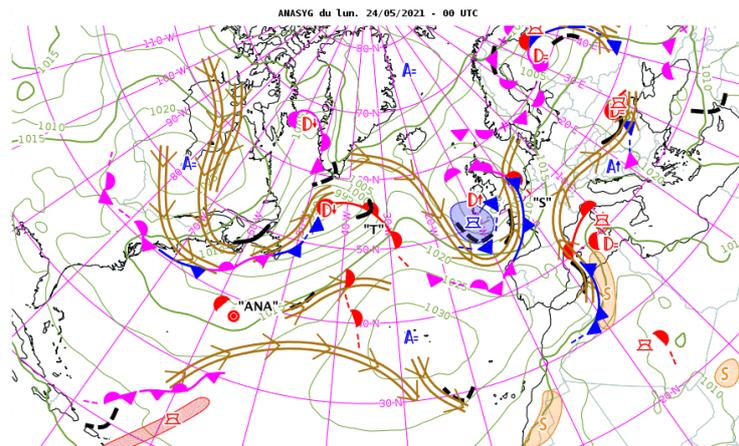


Illustration 27 : Anasyg du lundi 24 mai à 00 UTC

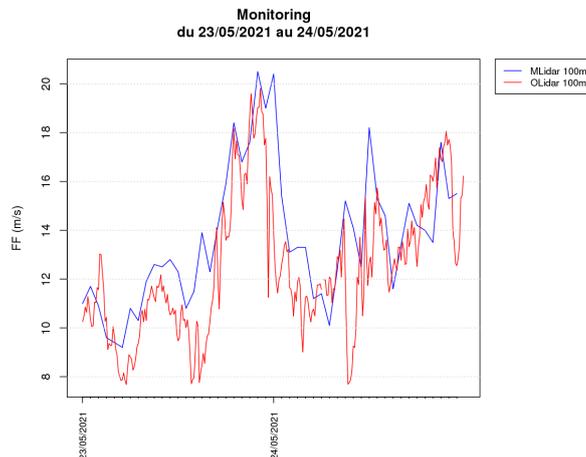


Illustration 28 : Comparaison des mesures du Lidar de Fécamp avec le modèle AROME les 23 et 24 mai 2021

On notera une très bonne corrélation entre les observations et les sorties du modèle AROME non seulement en termes d'intensité mais également dans le domaine temporel. La résolution temporelle des observations, bien meilleure que celle du modèle, fait toutefois bien apparaître des variations plus rapides liés aux phénomènes locaux (averses, grains, ...).

Annexe 2 : Situation des 20 et 21 octobre 2021 (tempête Aurore)

Première tempête automnale de 2021, la tempête « Aurore » aborde la Bretagne le 20 octobre en fin d'après-midi, donnant des vents violents, puis se décale dans la nuit vers l'est en gardant une force très soutenue. Les vents tempétueux concernent toute la moitié nord de l'hexagone, et en particulier la Normandie avec des rafales de secteur Nord-Ouest enregistrées dans la nuit à 48,6 m/s (175 km/h) à Fécamp et 41,7 m/s (150 km/h) à Octeville.

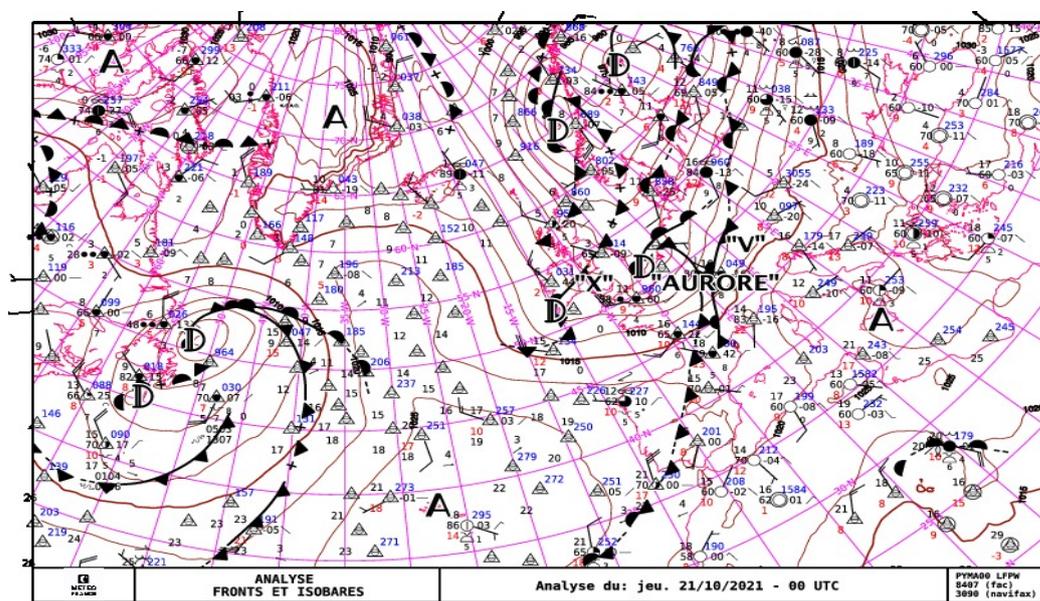


Illustration 29 : Analyse Isofront du jeudi 21 octobre 2021 à 00 UTC

La comparaison entre l'enregistrement du Lidar de Fécamp et le modèle AROME ne fait pas apparaître d'anomalie particulière avec une excellente convergence temporelle et d'intensité entre observation et modélisation. Au maximum d'intensité de la tempête, on note toutefois un pic de vent enregistré plus élevé d'environ 5 m/s par rapport au modèle, ainsi qu'une déviate un peu plus marquée juste avant ce pic. Ceci peut s'expliquer par la résolution temporelle du modèle limitée à 1 heure, insuffisante pour séquencer finement le passage d'une dépression aussi mobile et creuse.

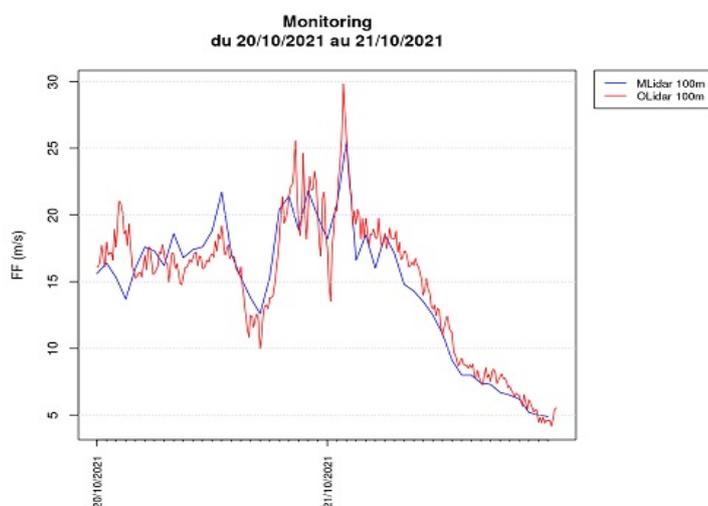


Illustration 30 : Comparaison des mesures du Lidar de Fécamp avec le modèle AROME les 20 et 21 octobre 2021

La moyenne glissante sur 24h des biais entre la mesure du vent Lidar à 100 m et le modèle AROME confirme ce faible écart entre observation et modélisation, avec un biais d'intensité (courbe bleue) inférieur à 1 m/s et de direction du vent (courbe rouge) proche de zéro degré.

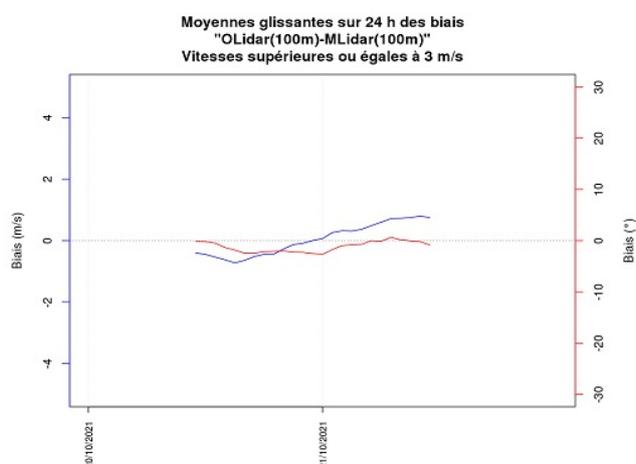


Illustration 31 : Comparaison des mesures du Lidar de Fécamp avec le modèle AROME les 20 et 21 octobre 2021

Annexe 3 : Situation du 18 février 2022 (tempête Eunice)

Une dépression nommée « Eunice » circule en début de matinée sur l'Irlande (973 hPa), atteint l'Écosse en milieu de journée, et s'évacue vers le Danemark en soirée. Le département de Seine-Maritime est placé en vigilance orange pour vent violent et risque de submersion. Le vent de Sud-Ouest à Ouest se renforce progressivement sur la Manche pour atteindre son maximum en tout début d'après-midi. La station d'Octeville enregistre des rafales jusqu'à 31,8 m/s (115 km/h).

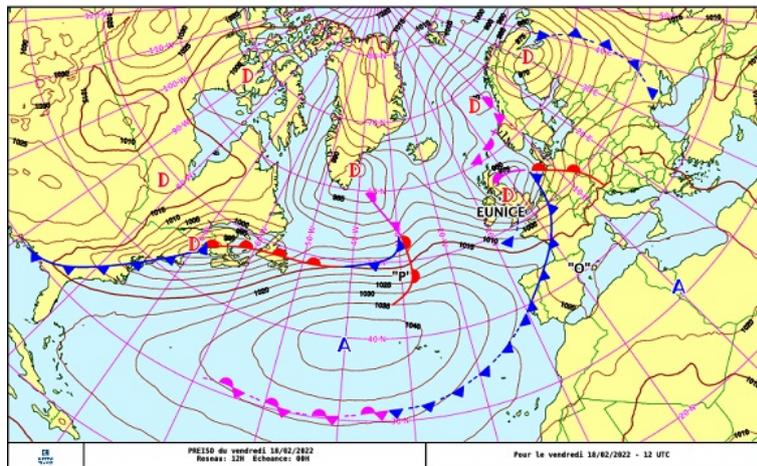


Illustration 32: préiso du 18 février 2022 à 12h UTC

On notera, ici aussi, une excellente corrélation entre le vent observé et la modélisation AROME, que ce soit en termes d'intensité ou de temporalité. En entrant un peu plus dans le détail, on peut toutefois remarquer quelques écarts le 18 dans l'après-midi, probablement liés à des passages instables (averses, grains, orages) à l'arrière de la perturbation. La résolution temporelle du modèle ne permet pas de voir les phénomènes de courte durée enregistrés par les capteurs.

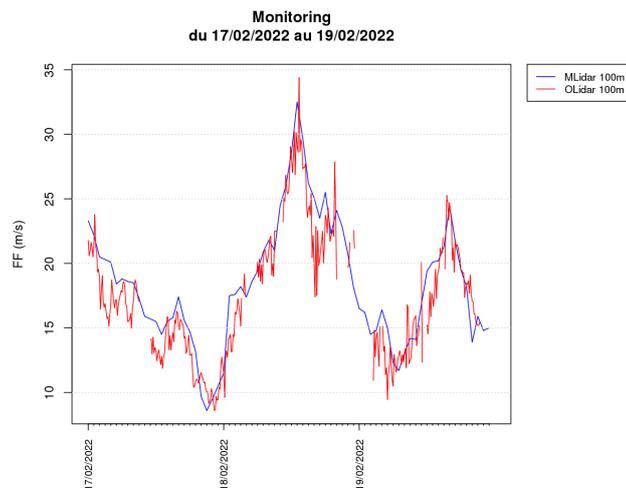


Illustration 33: Comparaison des mesures du Lidar de Fécamp avec le modèle AROME du 17 et 19 février 2022

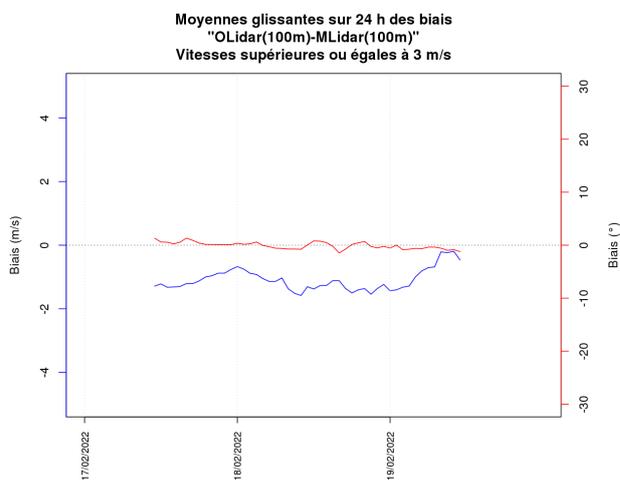


Illustration 34: moyenne glissante sur 24h des biais entre le Lidar de Fécamp et le modèle AROME (17 et 18 février 2022)

La moyenne glissante sur 24h des biais entre la mesure du vent Lidar à 100 m et le modèle AROME confirme ce faible écart entre observation et modélisation.

Ainsi le biais constaté est généralement compris entre 1 et 1,5 m/s pour l'intensité (courbe bleue), et proche de zéro pour la direction du vent (courbe rouge).

Annexe 4 : Climatologie du 1^{er} mars 2021 au 30 septembre 2022

La station météorologique de référence pour qualifier la climatologie de la zone étudiée est située à Octeville. La période sur laquelle portent les statistiques s'étend de 2001 à 2020.

1) Le vent

a) Analyse du printemps 2021 (mois de mars à mai)

Les roses de vent observé durant le printemps 2021 et celles des périodes printanières 2001-2020 sont très similaires. Dans le détail, les vents d'Est à Nord-Est ont été un peu plus fréquents en 2021 (28.9 % soit +8.6%) et un peu plus forts que la normale. Ceci est observé au détriment des vents d'un peu toutes les autres directions comprises entre le Sud-Ouest et le Nord-Ouest.

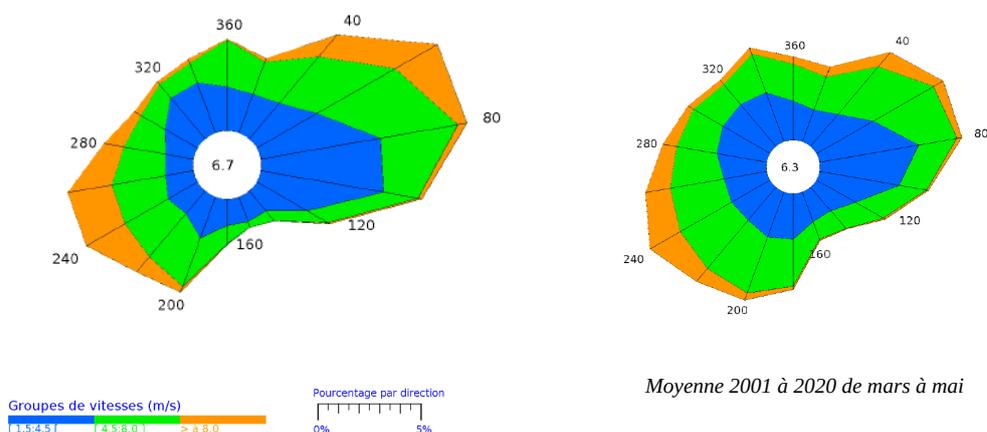


Illustration 35 : Roses des vents au printemps 2021 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station d'Octeville

b) Analyse de l'été 2021 (juin à août)

Si du secteur Sud-Ouest au secteur Nord-Ouest, les observations de l'été 2021 sont parfaitement conformes aux statistiques sur 20 ans, les vents de secteur Nord à Nord-Est se sont montrés plus présents que la normale.

Ainsi, ces directions ont été observées lors de l'été 2021 dans 16.0 % des cas, soit +4.7 % par rapport à la normale 2001-2020.

Par ailleurs, les vents ont soufflé globalement un peu moins fort en juin et août 2021, sans excès particulier.

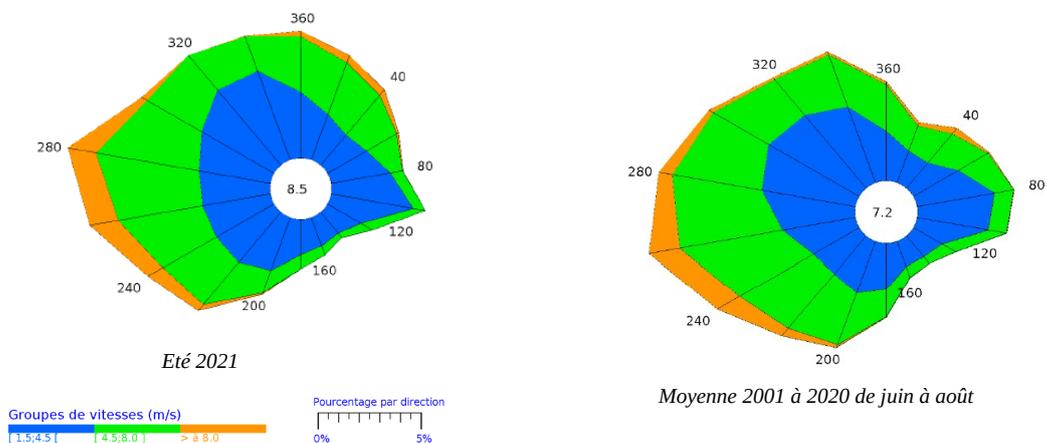


Illustration 36 : Roses des vents à l'été 2021 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station d'Octeville

c) Analyse de l'automne 2021 (septembre à novembre)

La rose de vent observé de l'automne 2021 reste assez proche des moyennes automnales 2001-2021.

On note toutefois une composante Sud-Ouest un peu plus marquée que la normale 2001-2020 (+4,1%) au détriment des secteurs Sud à Sud-Sud-Ouest un moins représentés (-4,5%). On retrouve également des vents de secteur Nord à Nord-Est un peu plus présents que la normale (+4,5%), contrebalancés par des secteurs Est et Nord-Ouest légèrement moins fréquents.

Les vents ont été globalement moins forts en 2021 par rapport aux statistiques 2001-2020. A noter toutefois le passage de la tempête « Aurore » les 20 et 21 Octobre 2021 (détaillée ci-dessus).

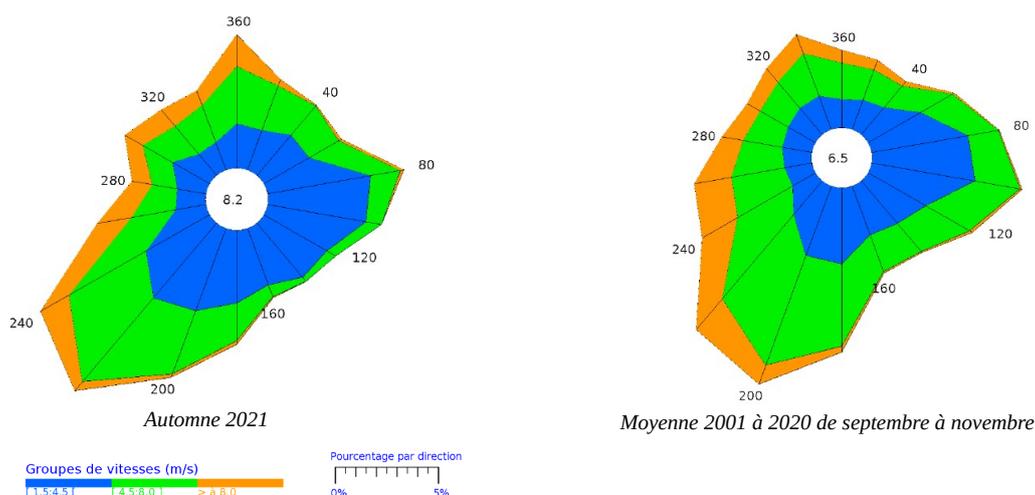


Illustration 37 : Roses des vents à l'automne 2021 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station d'Octeville

d) Analyse de l'hiver 2021-2022 (décembre 2021 à février 2022)

On remarque sur la rose des vents observés un secteur Sud-Ouest à Ouest plus marqué (+11,8%) que sur la rose des normales hivernales 2001-2020, ainsi qu'un secteur Nord à Nord-Ouest également plus présent (+5.5%). Ceci est compensé par une moindre fréquence des vents soufflant d'un large secteur Sud (-10,4%) ainsi que Nord-Est (-10.8%).

La bascule relative du vent dominant vers le secteur Sud-Ouest est associée à un renforcement global de son intensité sur ce même secteur de vent. Ceci s'explique en grande partie par le passage de 3 tempêtes au mois de février (Dudley, Eunice et Franklin). La tempête Eunice est détaillée en Annexe 3.

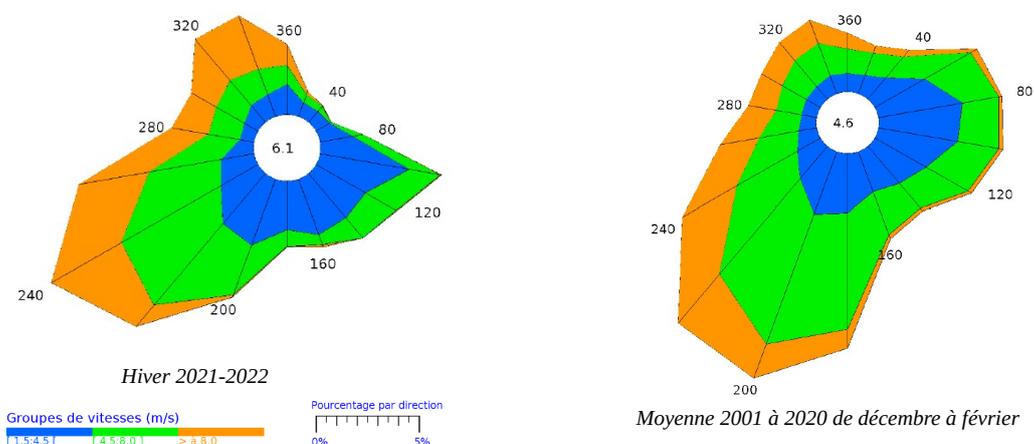


Illustration 38 : Roses des vents à l'hiver 2021/2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station d'Octeville

e) Analyse du printemps 2022 (mars à mai)

Sur cette saison printanière, la rose de vent issue de l'observation est assez similaire à celle issue des normales 2001-2020 sur la même période. On note cependant sur la rose des vents observés une plus grande fréquence des secteurs Est à Sud-Est (+6,9 %) ainsi que Nord à Nord-Est (+5,0 %). Ceci impacte quasiment tous les autres directions de vent, en particulier les secteurs Sud, Sud-Ouest et Ouest qui se trouvent sous représentés par rapport aux statistiques sur 20 ans.

Malgré une fréquence de vent calme un peu moins élevée que la normale, on constate que les vents ont soufflé globalement moins fort sur l'ensemble de la saison. Pas d'évènement météo particulièrement remarquable en ce qui concerne le vent.

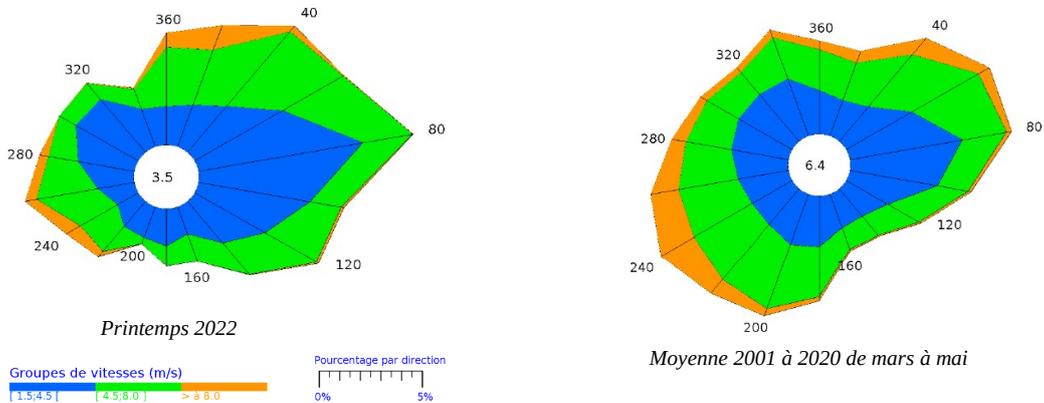


Illustration 39 : Roses des vents au printemps 2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station d'Octeville

f) Analyse de l'été 2022 (juin à août)

Les vents observés durant l'été 2022 sont assez différents des statistiques établies sur la période 2001-2020. On remarque ainsi une sous-représentation assez importante des vents d'un large secteur Ouest (-11,1%), ainsi que de secteur Sud (-7,0 %). En contrepartie, on observe une fréquence nettement plus élevée des vents de secteur Est (+11,1%) et, dans une moindre mesure, de secteur Nord à Nord-Ouest (+4,0 %).

Les intensités de vents observés sont en revanche globalement proches des normales estivales 2001-2020, avec un vent qui est resté assez calme sur l'ensemble de l'été.

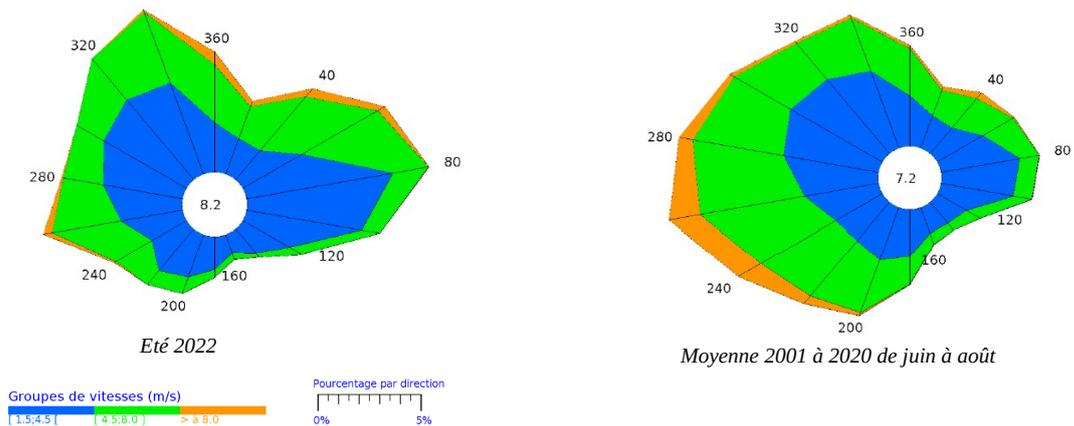


Illustration 40 : Roses des vents à l'été 2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station d'Octeville

g) Analyse de septembre 2022

Le mois de septembre 2022 est caractérisé par un trio de secteurs de vents à peu près équivalents en fréquence : Large secteur Nord (28,1% des cas), Sud-Sud-Ouest (23,9%) et secteur Est (21,9%). Il est à noter que le secteur Ouest est nettement sous-représenté par rapport aux normales de septembre sur 20 ans (-12,7%), tandis que les secteurs Nord-Ouest à Nord-Nord-Est, ainsi que Sud à Sud-Sud-Est sont plus fréquents que la moyenne mensuelle (respectivement +8,8 % et +5,3 %).

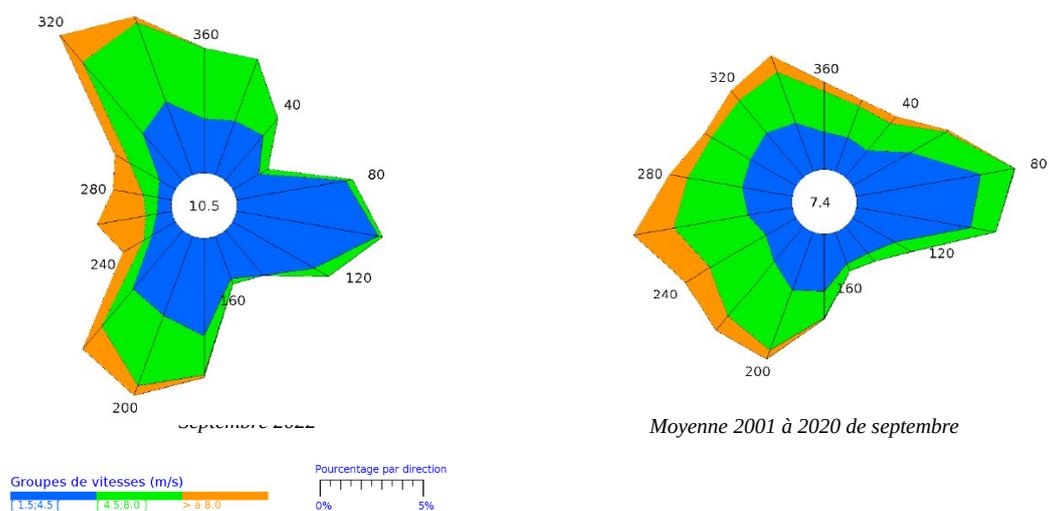


Illustration 41 : Roses des vents de septembre 2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station d'Octeville
Les intensités de vent sont globalement un peu plus faibles que les normales 2001-2020 pour un mois de septembre.

c) Tempêtes

Sur la période d'étude, les vents forts (supérieurs ou égaux à 28 m/s) sont légèrement au-delà de la moyenne, à savoir 7 évènements. Statistiquement, on observe en moyenne 2,5 tempêtes par an sur le site étudié.

Date	Forces maxi du vent à Octeville	Surnom (s'il existe)
20 octobre 2021	28,3 m/s	Aurore
21 octobre 2021	41,7 m/s	
8 janvier 2022	29,4 m/s	
13 février 2022	28,0 m/s	
18 février 2022	31,8 m/s	Eunice
20 février 2022	28,7 m/s	Franklin
24 février 2022	31,9 m/s	

Sur les 7 cas listés, 5 se sont produits sur les mois de janvier et février 2022 dont 4 évènements sur une période très courte, entre le 13 et le 24 février 2022.

La situation la plus notable de la période concerne le passage de la tempête Aurore (décrite en Annexe 2) avec des pointes de vent enregistrées jusqu'à presque 42 m/s le 21 octobre 2021.

2) Les températures

De mars à août 2021, on observe une assez grande variabilité des températures autour des normales. A partir de Septembre 2021, les températures sont globalement au-dessus des normales, en particulier les mois de février, mars puis juin à août 2022 très excédentaires.

Plus précisément, les températures maximales sont proches des normales 1991-2020 en mars, juin et juillet 2021, déficitaires en avril (-1,7°C), mai (-1,2°C) et août (-1.8°C). En revanche, l'excès de température est notable en 2022, particulièrement en mars (+3.3°C), juillet (+2.9°C) et août 2022 (+3.3°C).

Les températures minimales sont déficitaires de mars à mai 2021 (-2,9°C en avril), assez proche des normales de juin à novembre 2021 puis globalement excédentaire de décembre 2021 à septembre 2022 (+2.0°C en décembre, et +2.2°C en février).

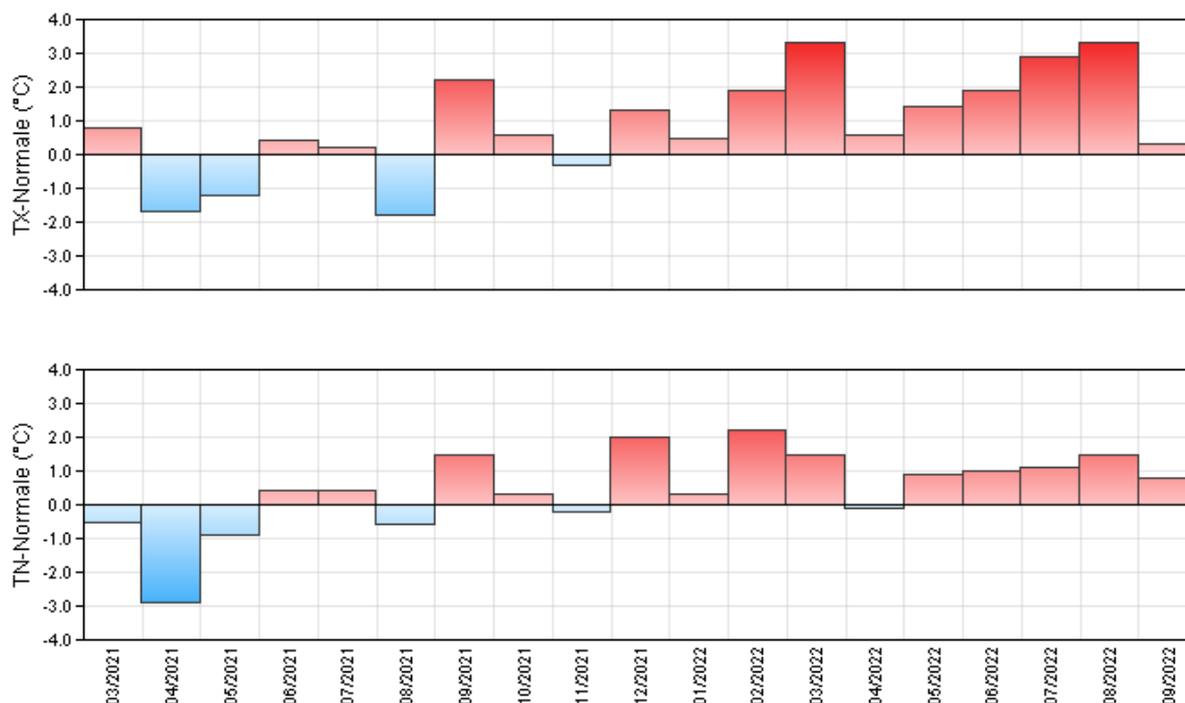


Illustration 42 : Anomalies mensuelles de températures minimales et maximales de mars 2021 à septembre 2022 à la station d'Octeville - Période de référence : 1991 - 2020

3) Les précipitations

Cette période débute par des mois de mars et avril 2021 secs à très secs (-57 % en avril avec 18,5 mm). L'année 2021 se poursuit par 3 mois excédentaires (+79 % en juin avec 102,1 mm) avant de retrouver des mois d'août et septembre nettement déficitaires (-56 % en septembre avec 28,7 mm). L'année 2021 se termine avec des mois d'octobre et novembre assez secs (-26 % en novembre avec 64,7 mm) et un mois de décembre proche des normales (99.7 mm).

Par la suite, une période de mois sec à très secs s'étale de janvier à août 2022 avec des déficits pluviométriques variant entre 20 % (avril) et 85 % (août). Sur ces 8 mois consécutifs de sécheresse le déficit global atteint presque 51 % avec un cumul de précipitations de 225 mm contre 457 mm en moyenne sur la même période.

Le mois de septembre 2022, nettement excédentaire (+79,5 % pour 117,6 mm) comblera partiellement le déficit des mois antérieurs.

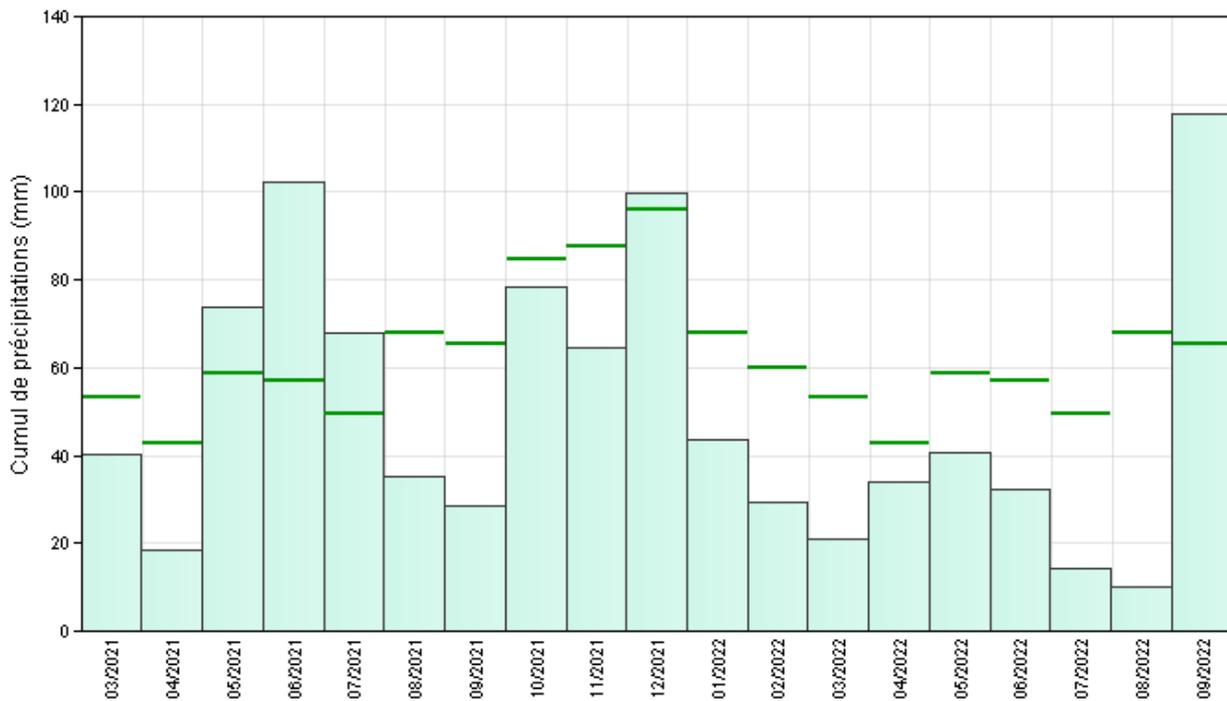
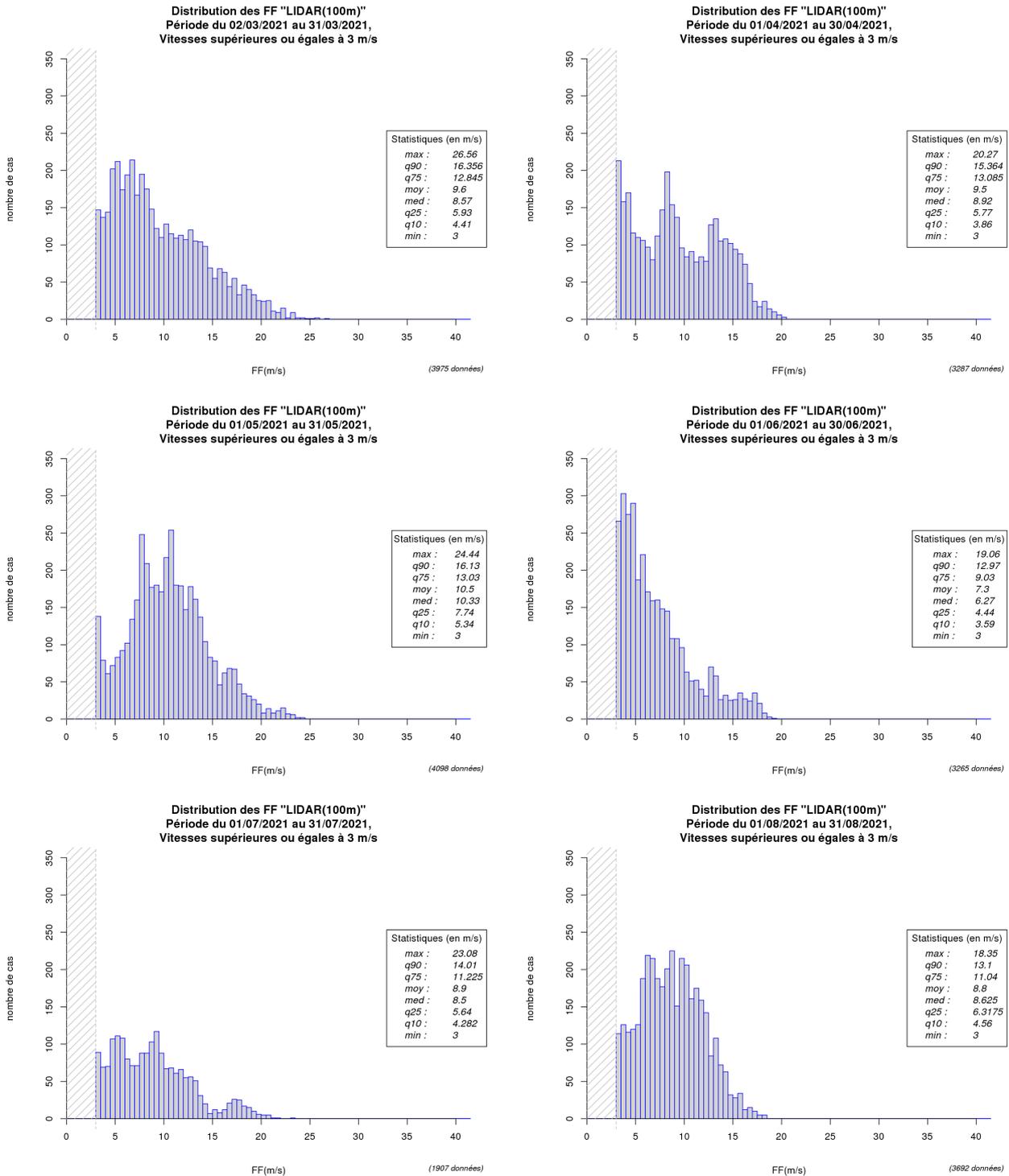
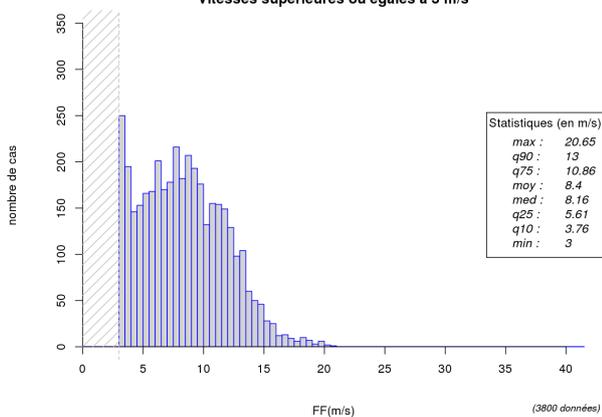


Illustration 43 : Cumuls mensuels de précipitations de mars 2021 à septembre 2022 à la station d'Octeville (histogrammes en vert) et normale de précipitations (segments en vert) - Période de référence : 1991 - 2020

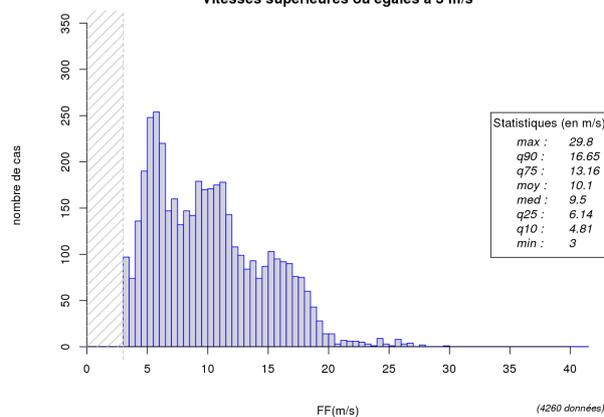
Annexe 5 : Distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)



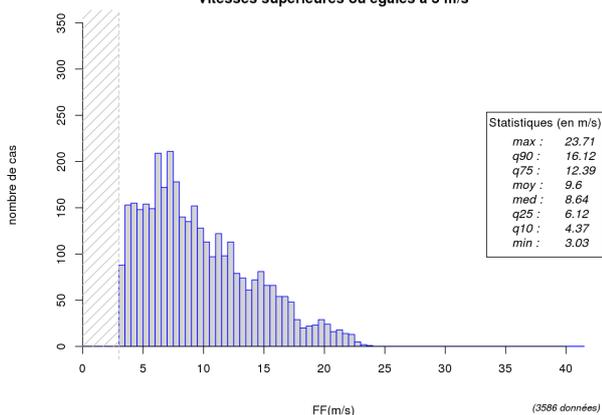
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/09/2021 au 30/09/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



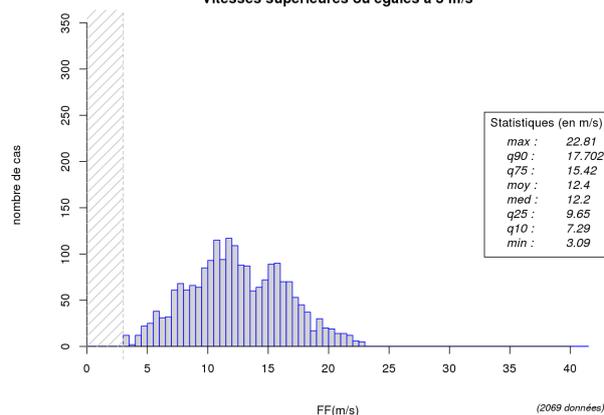
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/10/2021 au 31/10/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



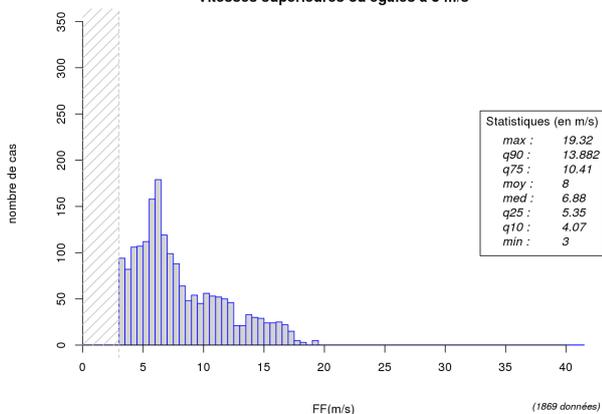
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/11/2021 au 30/11/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



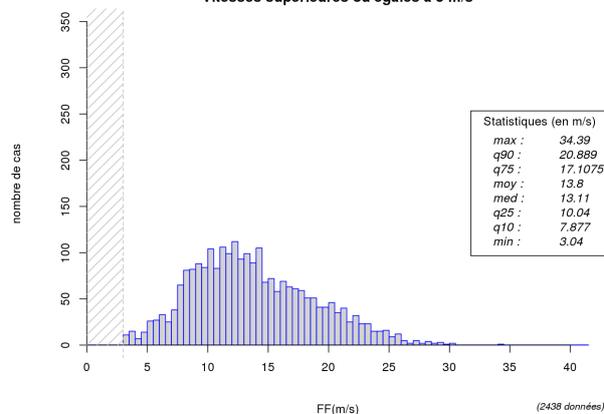
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/12/2021 au 31/12/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



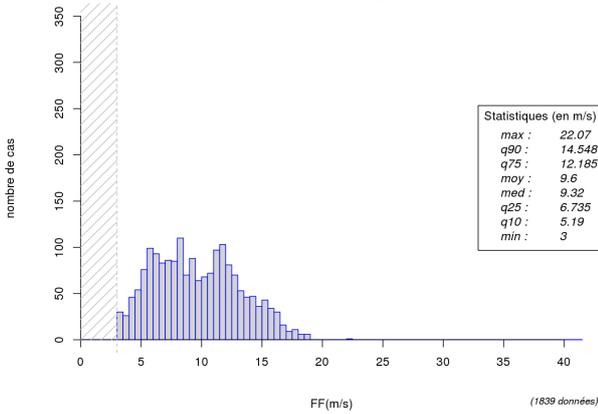
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/01/2022 au 31/01/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



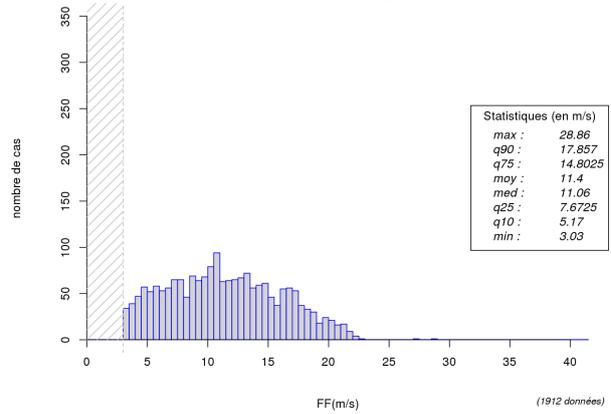
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/02/2022 au 28/02/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



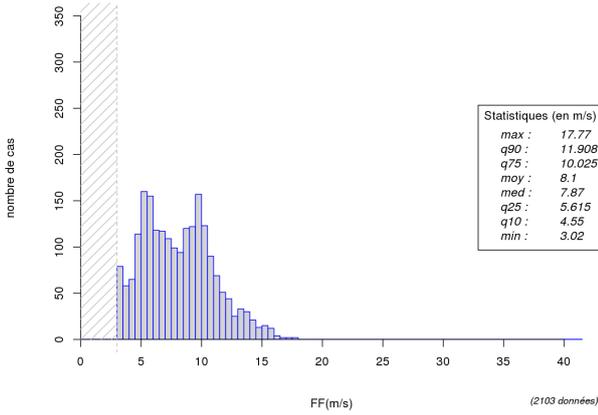
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/03/2022 au 31/03/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



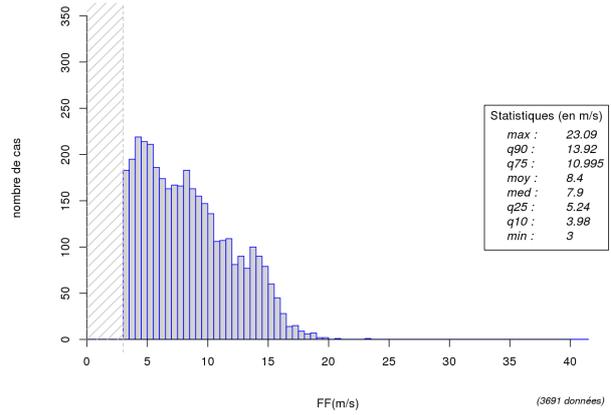
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/04/2022 au 30/04/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



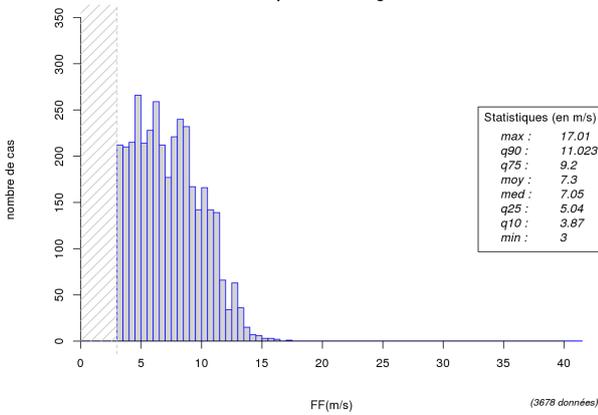
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/05/2022 au 31/05/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



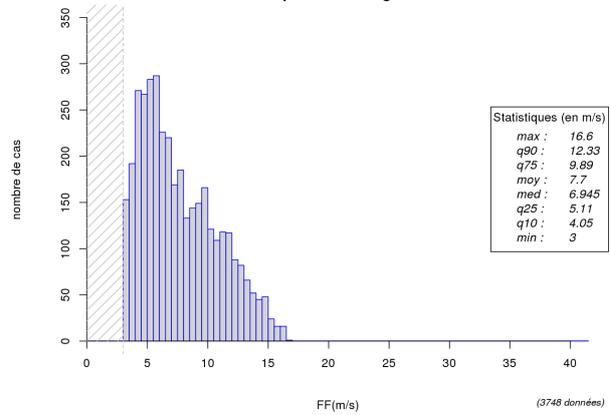
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/06/2022 au 30/06/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



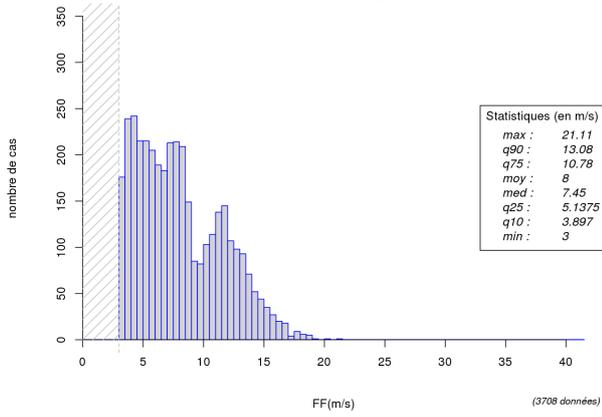
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/07/2022 au 31/07/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



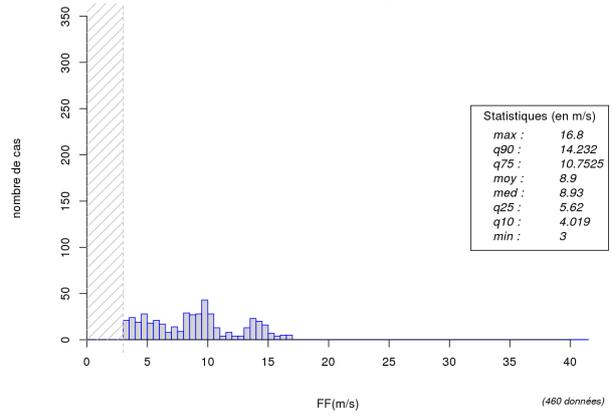
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/08/2022 au 31/08/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/09/2022 au 30/09/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s

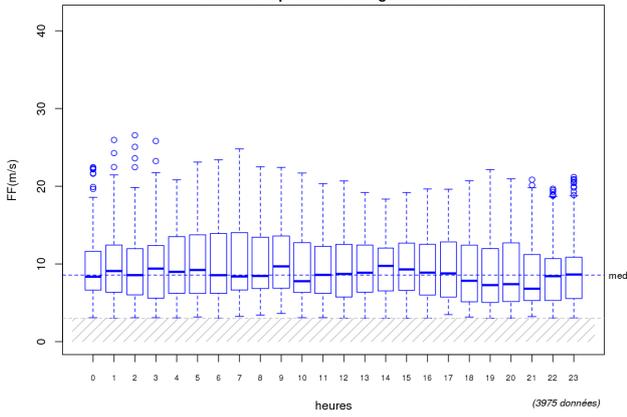


Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/10/2022 au 04/10/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s

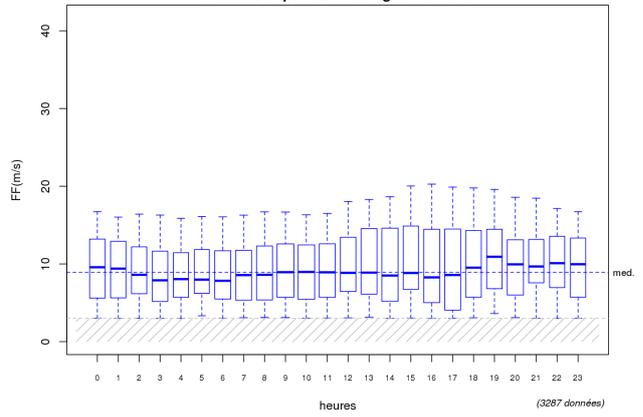


Annexe 6 : Répartitions horaires par mois des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)

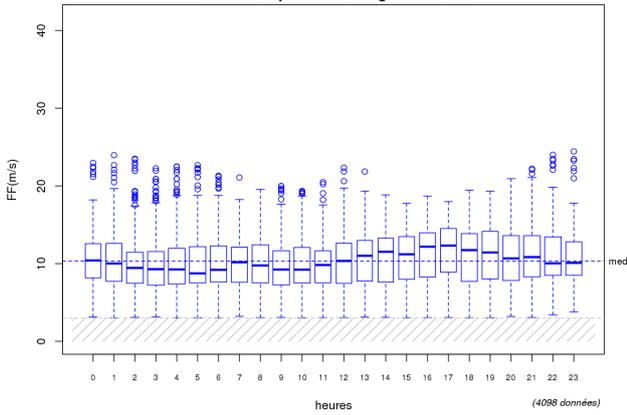
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 02/03/2021 au 31/03/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



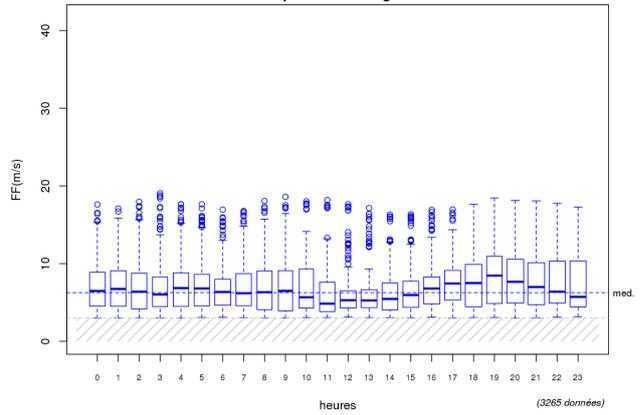
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/04/2021 au 30/04/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



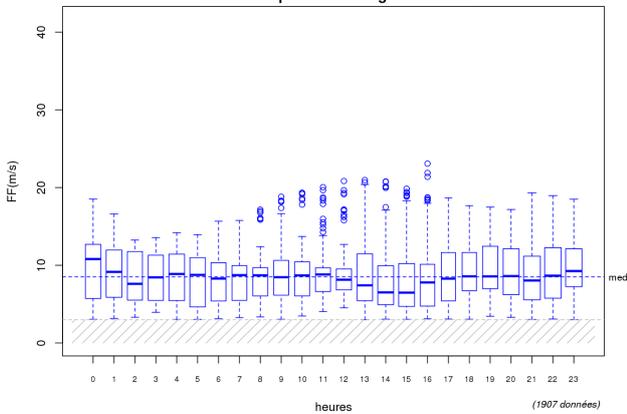
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/05/2021 au 31/05/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



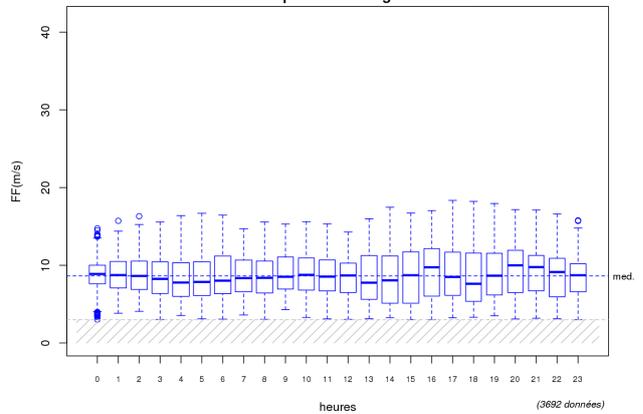
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/06/2021 au 30/06/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



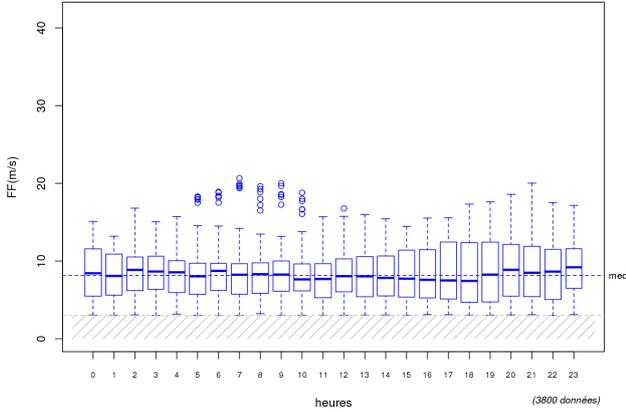
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/07/2021 au 31/07/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



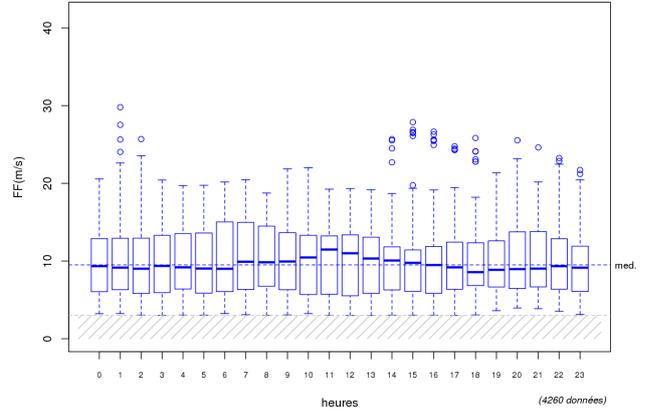
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/08/2021 au 31/08/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



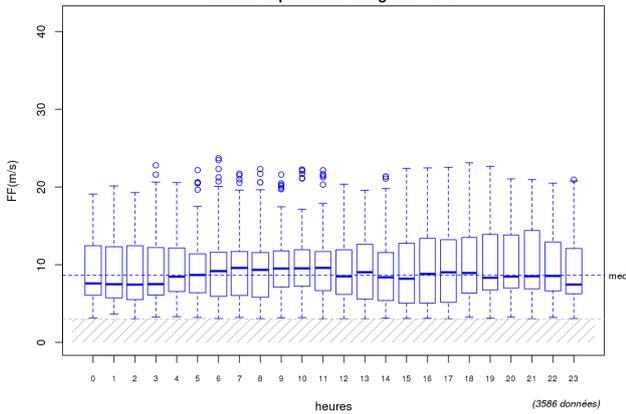
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/09/2021 au 30/09/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



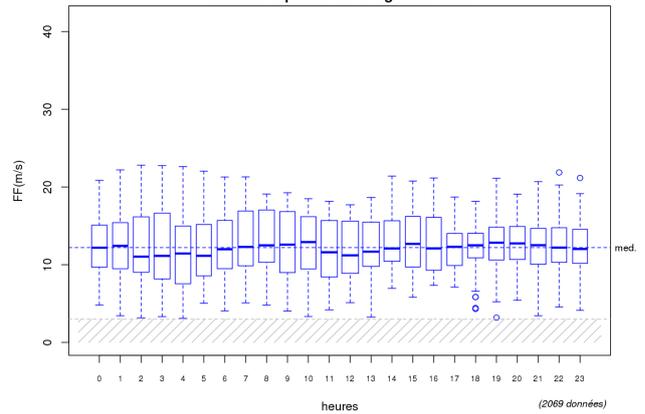
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/10/2021 au 31/10/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



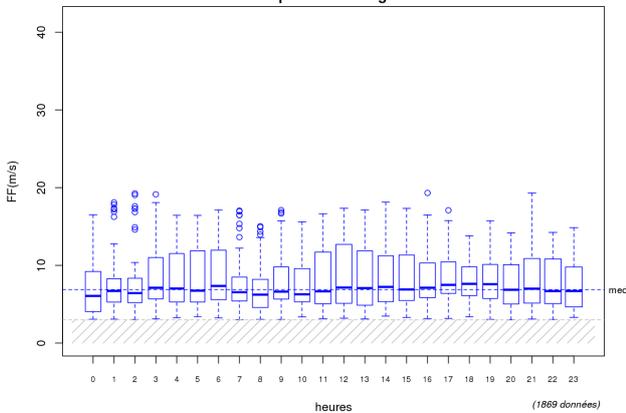
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/11/2021 au 30/11/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



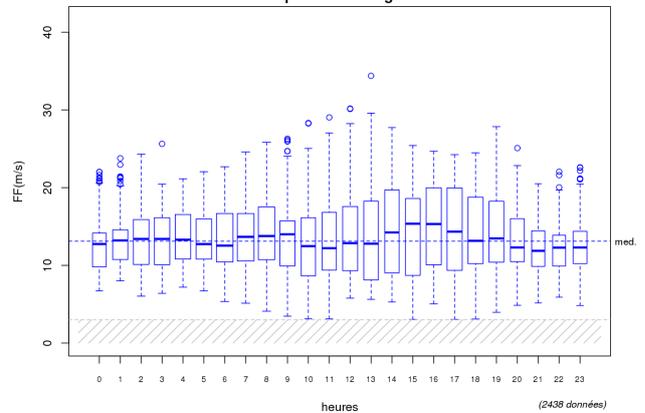
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/12/2021 au 31/12/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



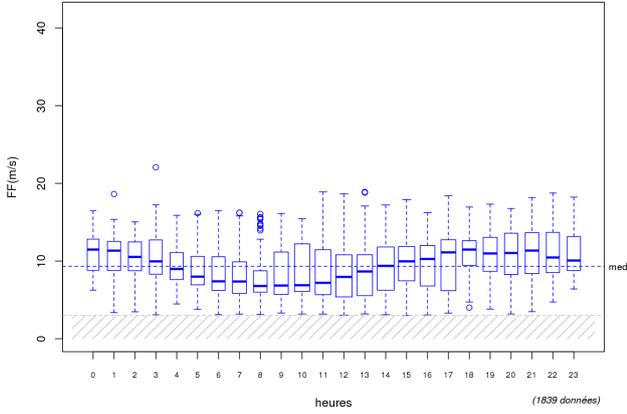
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/01/2022 au 31/01/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



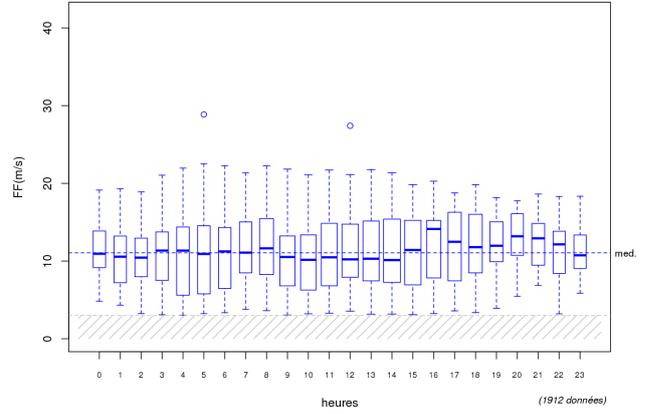
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/02/2022 au 28/02/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



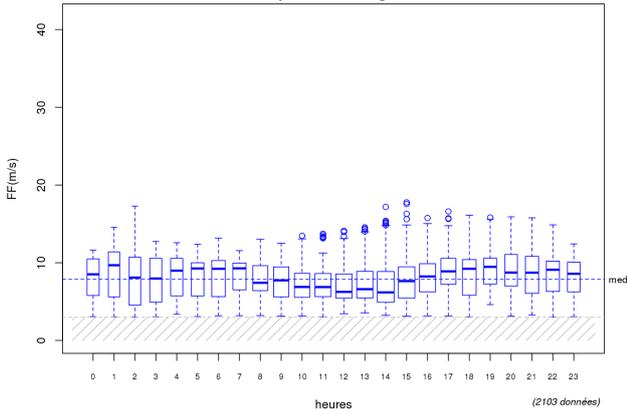
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/03/2022 au 31/03/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



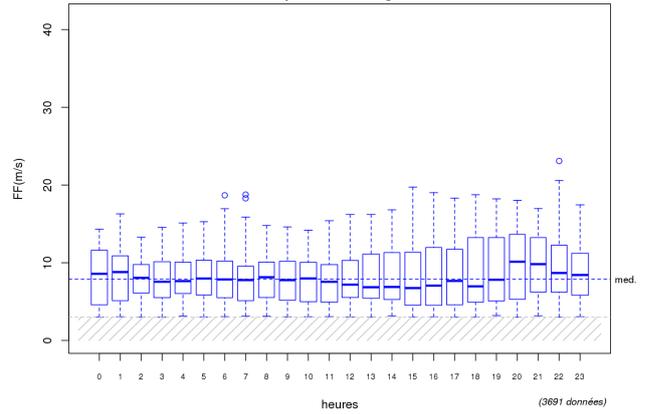
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/04/2022 au 30/04/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



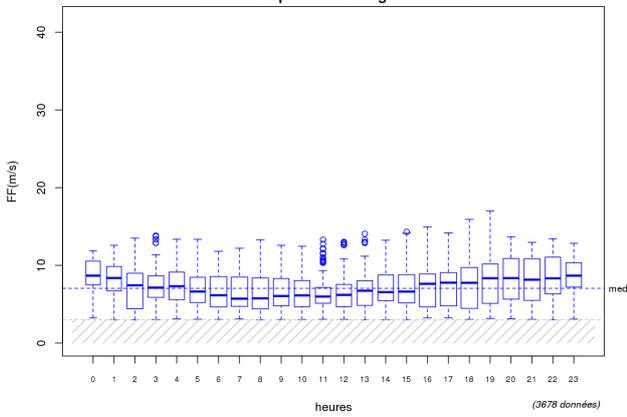
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/05/2022 au 31/05/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



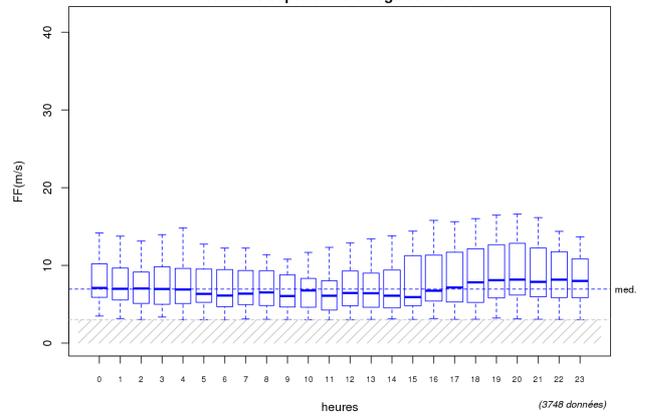
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/06/2022 au 30/06/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



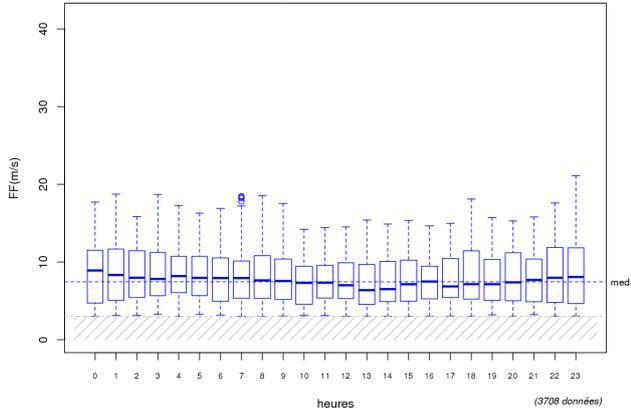
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/07/2022 au 31/07/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



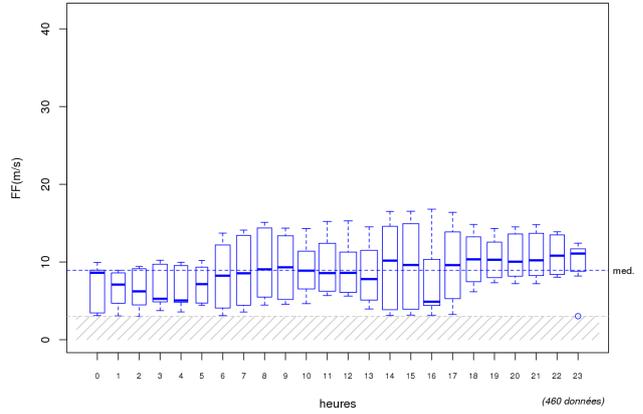
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/08/2022 au 31/08/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/09/2022 au 30/09/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/10/2022 au 04/10/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



Annexe 7 : Tableau de contingence des forces de vent du LiDAR

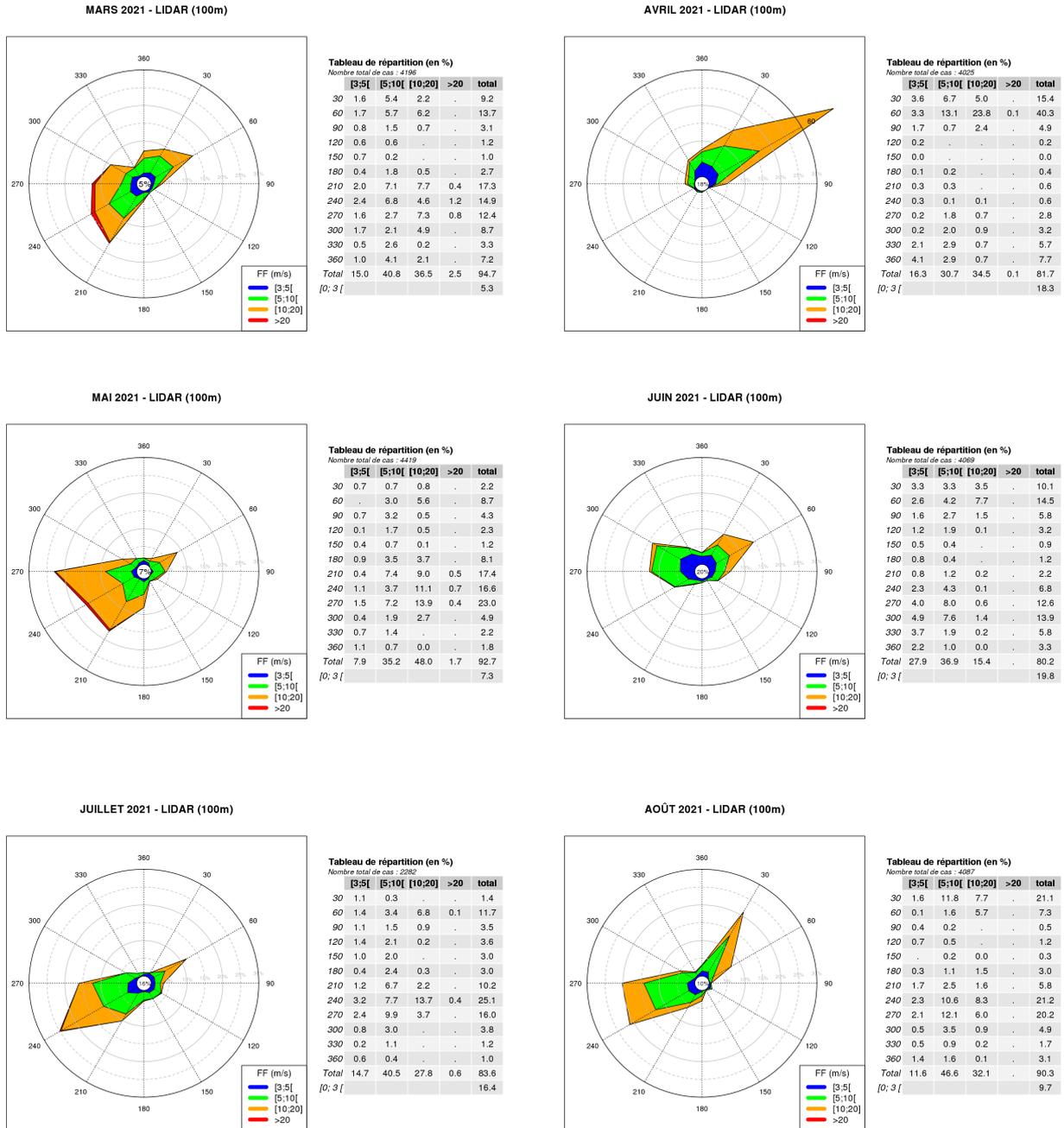
	Directions en degrés												Total
	30,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	210,0	240,0	270,0	300,0	330,0	360,0	
[34,35[	.	.	.	.	.	.	.	.	0	.	.	.	0
[33,34[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[32,33[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[31,32[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[30,31[	.	.	.	.	.	.	.	0	.	.	.	.	0
[29,30[	.	.	.	.	.	.	.	0	0	0	.	.	0,1
[28,29[	.	.	.	.	.	.	.	0	0	.	.	0	0,1
[27,28[	.	0	.	.	.	0	.	0	0,1	0	.	.	0,2
[26,27[	.	.	.	.	.	0,1	0	0	0,1	.	.	.	0,2
[25,26[	.	.	.	.	.	0,1	0	0,2	0,2	0	0	.	0,5
[24,25[	.	.	.	.	.	0,1	0,1	0,3	0,2	0	0	.	0,7
[23,24[	0	0	.	.	.	0	0,1	0,4	0,4	0,1	0	.	1
[22,23[	.	.	0	.	.	0,1	0,3	0,6	0,7	0,2	0,2	0,1	2,1
[21,22[	0	0	.	.	0	0,1	0,4	0,7	0,8	0,3	0,4	0,4	3,1
[20,21[	0,1	0	.	.	0	0,3	0,6	1,5	1	0,2	0,4	0,4	4,5
[19,20[	0	0,3	.	.	0	0,7	0,8	2,1	0,7	0,4	0,7	0,5	6,5
[18,19[	0,4	0,9	0,1	.	.	0,9	1,4	3,3	1,6	0,7	0,4	0,3	10
[17,18[	1,3	1,9	0	.	0,1	1,1	1,8	4	2,3	1,6	0,7	0,5	15,2
[16,17[	1,9	3,6	0	.	0	1,2	3,2	4,3	3,1	2,2	0,9	0,4	21
[15,16[	2,7	5,6	0,1	0	0,1	1,4	3	4,6	4,4	2,8	1	0,5	26,3
[14,15[	2,9	9,4	0,4	0,1	0	1,4	2,9	5,8	5,7	3	1	0,5	33
[13,14[	2,5	11,7	0,9	0,2	0,2	1,6	4,7	7,5	8	3,5	1,4	0,4	42,6
[12,13[	3,2	13,7	1,9	0,4	0,3	2,5	5,1	8,9	7,7	3,7	1,1	1,7	50,2
[11,12[	5	13,8	3,6	0,7	0,3	3,2	7,2	9,7	8,8	4,4	1,7	3,2	61,8
[10,11[	6,4	13,8	5,3	1,6	0,9	3,1	7,2	10,1	8,9	4,3	2,1	3,6	67,3
[9,10[	6,5	12,5	4,1	1,3	1,1	5,5	8,2	9,6	11,3	4,6	2,8	4,9	72,2
[8,9[	8,1	13,5	4,6	2,2	2	5,7	7,6	8,7	13	6,5	3,3	5,5	80,8
[7,8[	8,2	11,9	5,1	2,7	1,6	5,3	7,4	8,2	12,3	8,1	6,1	5,5	82,3
[6,7[	8,7	9,6	5,6	3,8	2,5	3,9	7,3	9,7	13,3	6,9	6,5	5,1	83
[5,6[	8,6	9,6	6,6	3,3	2,8	3,9	6,5	10,4	12,6	9,2	6,9	6,4	87
[4,5[	7,7	7,6	5	3,5	3,3	3,5	5,8	10,4	11	8,3	7,4	6,9	80,4
[3,4[	8,2	6,9	5,3	4	3,9	3,8	5	7	8,6	6,8	6	7,3	72,9
[0,3[	9,1	9,9	7,4	7	6,9	6,7	5,5	6,8	10,1	9,9	8,2	7,5	94,9
Total	91,7	156,3	56,2	30,9	26	56,2	92,2	135,1	146,9	87,6	59,2	61,6	1000

Nombre de cas : 66516

Analyse de répartition du vent LiDAR 10 minutes observé à 100 m sur la période du 02 mars 2021 au 04 octobre 2022
(en pour mille)

Les vents inférieurs à 3 m/s (non comptabilisés dans les statistiques) apparaissent ici en surligné dans le tableau. Ils représentent 9,5 % des cas.

Annexe 8 : Roses des vents mensuelles du LiDAR à 100m (données brutes)



SEPTEMBRE 2021 - LIDAR (100m)

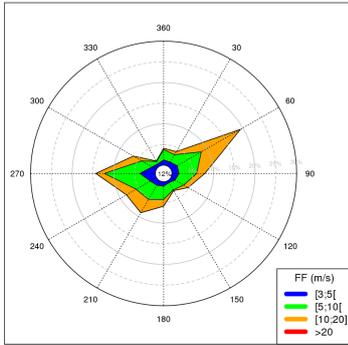


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4297

	[3;5]	[5;10]	[10;20]	>20	total
30	1.2	2.1	0.9	.	4.1
60	1.8	6.7	10.8	.	19.3
90	1.7	4.2	2.0	.	7.9
120	1.2	2.4	1.2	.	4.8
150	0.6	2.0	0.2	.	2.8
180	1.1	3.2	1.6	0.0	5.9
210	1.3	4.0	3.7	0.0	9.0
240	1.7	4.0	2.7	.	8.3
270	3.7	8.5	2.0	0.0	14.3
300	1.2	2.9	2.3	.	6.4
330	0.7	0.7	0.1	.	1.5
360	1.3	2.5	0.3	.	4.1
Total	17.3	43.2	27.8	0.1	88.4

[0; 3 [

OCTOBRE 2021 - LIDAR (100m)

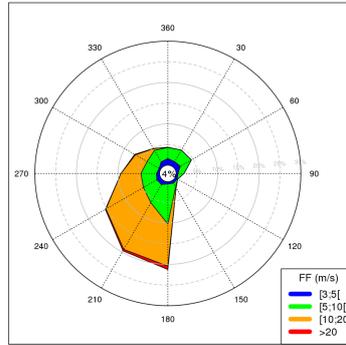


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4452

	[3;5]	[5;10]	[10;20]	>20	total
30	1.3	3.2	.	.	4.5
60	1.5	3.1	.	.	4.5
90	0.4	1.5	.	.	1.9
120	0.6	0.1	.	.	0.7
150	0.7	1.0	0.2	.	2.0
180	0.5	9.7	10.2	0.8	21.2
210	1.1	5.1	13.0	0.4	19.5
240	1.1	3.7	10.4	0.2	15.4
270	0.7	3.7	4.8	.	9.3
300	0.4	3.3	3.3	0.2	7.2
330	1.2	3.2	0.5	0.1	5.0
360	1.6	2.7	0.0	.	4.3
Total	11.2	40.4	42.4	1.7	95.7

[0; 3 [

NOVEMBRE 2021 - LIDAR (100m)

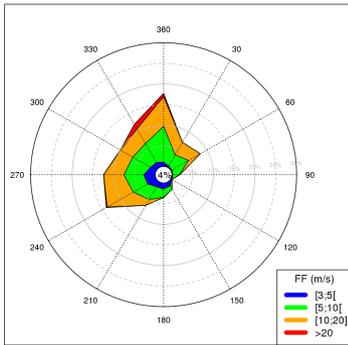


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 3742

	[3;5]	[5;10]	[10;20]	>20	total
30	0.4	3.2	3.5	.	7.1
60	0.3	4.6	3.3	.	8.2
90	0.2	1.6	0.1	.	1.9
120	0.3	0.0	.	.	0.3
150	1.1	0.9	.	.	2.0
180	1.5	2.0	0.1	.	3.5
210	1.4	3.6	1.6	0.0	6.6
240	2.5	4.0	7.2	0.3	13.9
270	2.8	4.8	4.9	0.0	12.5
300	1.6	4.9	3.4	0.1	10.0
330	1.4	5.3	4.1	1.3	12.1
360	1.1	8.7	7.2	0.8	17.7
Total	14.5	43.5	35.3	2.5	95.8

[0; 3 [

DÉCEMBRE 2021 - LIDAR (100m)

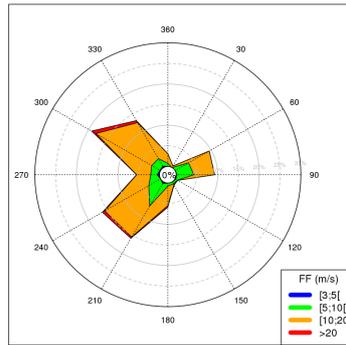


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 2075

	[3;5]	[5;10]	[10;20]	>20	total
30	.	.	0.4	.	0.4
60	0.1	3.7	5.7	.	9.5
90	0.2	4.0	5.0	.	9.3
120	0.2	0.5	0.0	.	0.7
150	0.1	0.5	0.3	0.1	1.0
180	0.0	0.7	4.7	0.4	5.9
210	0.4	6.3	8.7	0.4	15.8
240	0.0	3.2	12.2	0.7	16.2
270	0.6	1.5	3.4	0.0	5.5
300	0.2	2.3	15.5	1.2	19.2
330	0.4	2.1	10.1	0.6	13.2
360	0.0	0.7	2.3	.	3.1
Total	2.3	25.6	68.4	3.4	99.7

[0; 3 [

JANVIER 2022 - LIDAR (100m)

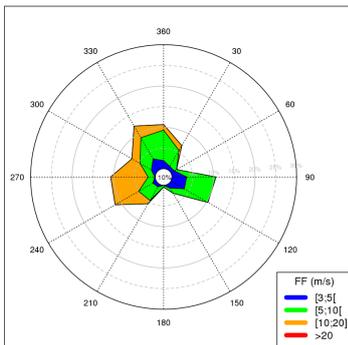


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 2087

	[3;5]	[5;10]	[10;20]	>20	total
30	1.0	4.5	1.3	.	6.8
60	1.0	0.6	.	.	1.6
90	3.5	7.0	.	.	10.6
120	3.7	6.6	.	.	10.3
150	1.1	1.4	.	.	2.5
180	0.0	0.4	.	.	0.4
210	0.8	3.8	0.9	.	5.5
240	1.0	4.0	6.5	.	11.5
270	0.1	1.6	9.0	.	10.7
300	1.4	3.2	2.3	.	6.8
330	3.1	5.9	3.3	.	12.2
360	2.0	7.4	1.3	.	10.7
Total	18.6	46.3	24.6	.	89.6

[0; 3 [

FÉVRIER 2022 - LIDAR (100m)

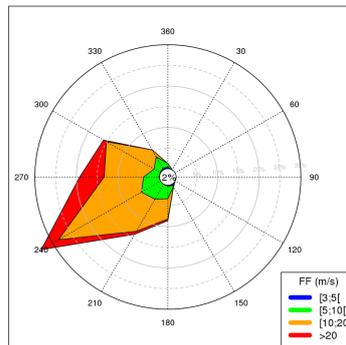


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 2477

	[3;5]	[5;10]	[10;20]	>20	total
30	.	0.0	.	.	0.0
60	.	.	.	.	.
90	.	.	.	.	.
120	.	.	.	.	.
150	0.4	0.2	0.0	.	0.7
180	0.2	3.1	4.9	0.4	8.6
210	0.1	4.1	9.0	0.8	14.0
240	0.0	5.3	23.1	4.8	33.2
270	0.2	3.7	9.5	5.9	19.2
300	0.1	1.7	13.2	0.8	15.9
330	0.4	3.2	1.9	.	5.6
360	0.4	0.8	.	.	1.3
Total	1.9	22.2	61.6	12.8	98.4

[0; 3 [

MARS 2022 - LIDAR (100m)

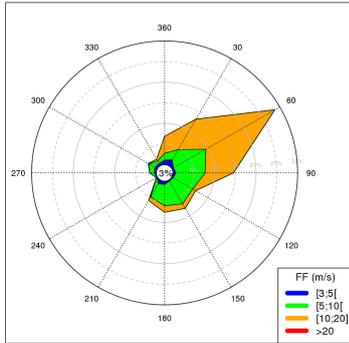


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 1893

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.6	2.9	8.5	. .	13.0
60	0.4	9.0	19.2	. .	28.6
90	0.7	7.0	6.8	0.1	14.6
120	0.3	5.5	0.8	. .	6.6
150	0.3	6.4	1.3	. .	7.9
180	0.8	5.2	1.6	. .	7.6
210	1.0	3.8	1.0	. .	5.7
240	0.1	0.2	. .	. .	0.3
270	0.5	1.1	. .	. .	1.6
300	0.7	1.7	0.1	. .	2.5
330	0.6	0.7	0.5	. .	1.8
360	1.1	1.6	4.1	. .	6.9
Total	8.2	45.1	43.7	0.1	97.1

[0; 3[

AVRIL 2022 - LIDAR (100m)

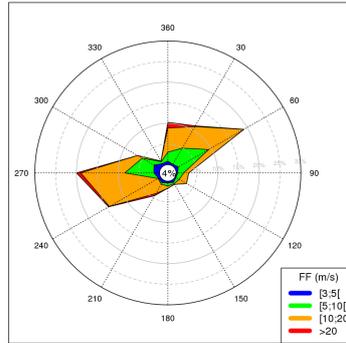


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 1985

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.4	4.5	6.0	0.2	11.2
60	0.9	8.4	9.8	0.1	19.1
90	0.4	1.5	1.2	. .	3.0
120	0.3	0.9	2.0	. .	3.2
150	0.7	0.4	0.2	. .	1.2
180	0.4	0.8	0.6	. .	1.7
210	0.8	0.4	2.6	0.6	4.4
240	0.6	0.2	13.6	0.2	14.5
270	1.4	7.0	10.6	1.1	20.0
300	1.8	3.3	1.3	. .	6.4
330	0.6	0.6	0.2	. .	1.3
360	0.9	2.2	5.8	1.4	10.3
Total	8.9	30.0	53.9	3.5	96.3

[0; 3[

MAI 2022 - LIDAR (100m)

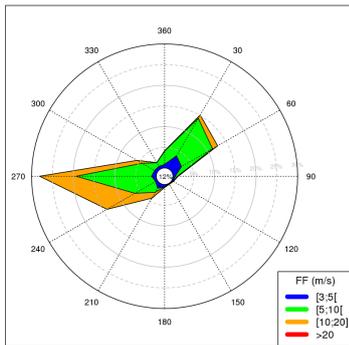


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 2381

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	3.7	10.5	0.9	. .	15.1
60	2.7	8.6	1.4	. .	12.7
90	0.5	0.5	0.2	. .	1.3
120	0.3	0.0	0.1	. .	0.5
150	0.1	0.1	0.0	. .	0.3
180	0.5	. .	0.2	. .	0.7
210	1.3	1.1	1.6	. .	4.1
240	0.5	5.8	7.7	. .	14.0
270	1.1	18.1	8.8	. .	28.1
300	0.8	3.5	1.4	. .	5.7
330	0.8	1.0	0.0	. .	1.8
360	0.9	3.2	0.1	. .	4.2
Total	13.3	52.5	22.5	. .	88.3

[0; 3[

JUIN 2022 - LIDAR (100m)

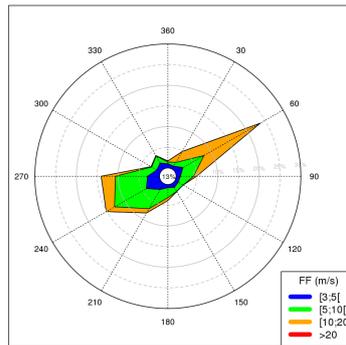


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4222

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.8	1.0	3.0	0.0	4.9
60	2.2	5.8	15.6	. .	23.7
90	1.0	3.2	0.7	. .	4.9
120	0.9	1.4	. .	. .	2.3
150	1.1	1.1	0.0	. .	2.3
180	0.8	2.4	0.7	. .	3.9
210	1.7	5.4	1.2	. .	8.2
240	4.0	8.8	2.3	. .	15.1
270	2.9	7.7	3.5	. .	14.0
300	1.1	1.4	0.2	. .	2.7
330	1.7	2.0	0.1	. .	3.8
360	1.0	0.4	0.3	. .	1.7
Total	19.2	40.6	27.5	0.0	87.4

[0; 3[

JUILLET 2022 - LIDAR (100m)

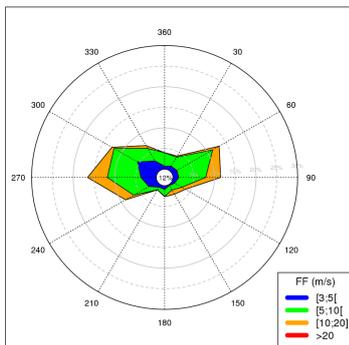


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4175

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.1	2.5	0.3	. .	4.0
60	1.4	9.9	1.8	. .	13.1
90	1.4	6.5	3.6	. .	11.5
120	0.8	2.0	1.0	. .	3.8
150	0.3	1.2	1.2	. .	2.7
180	0.9	1.7	0.1	. .	2.7
210	0.7	0.7	. .	. .	1.5
240	2.4	4.2	2.3	. .	8.8
270	3.7	8.1	4.7	. .	16.5
300	5.5	6.5	0.6	. .	12.6
330	2.6	3.5	0.8	. .	6.9
360	0.7	3.3	. .	. .	4.0
Total	21.6	50.1	16.4	. .	88.1

[0; 3[

AOÛT 2022 - LIDAR (100m)

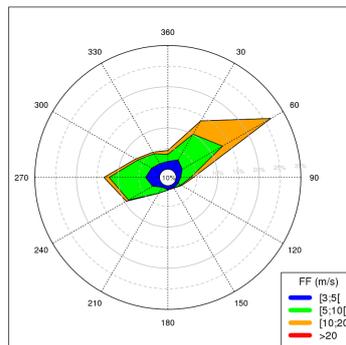


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4151

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	2.9	7.2	3.7	. .	13.8
60	2.0	11.2	13.4	. .	26.6
90	1.1	2.4	0.6	. .	4.1
120	0.9	0.7	0.2	. .	1.9
150	0.8	0.1	. .	. .	0.9
180	0.9	0.1	. .	. .	1.0
210	0.7	1.7	. .	. .	2.4
240	2.2	6.7	0.6	. .	9.5
270	3.4	8.7	1.3	. .	13.4
300	2.5	3.9	0.5	. .	6.9
330	1.9	2.8	0.4	. .	5.1
360	1.9	1.7	0.9	. .	4.5
Total	21.3	47.3	21.8	. .	90.3

[0; 3[

SEPTEMBRE 2022 - LIDAR (100m)

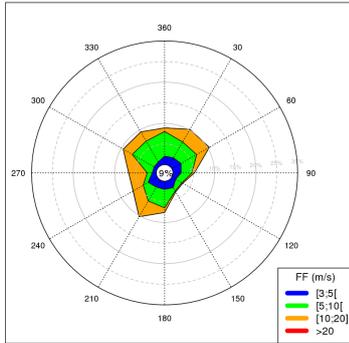


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4091

	[3;5[	[5;10[	[10;20[	>20	total
30	2.2	4.5	3.5	.	10.2
60	2.6	4.3	3.5	.	10.4
90	2.0	2.6	0.6	.	5.2
120	1.1	1.7	0.2	.	3.0
150	2.1	0.9	0.3	.	3.3
180	2.0	4.5	1.1	.	7.6
210	2.0	3.9	4.4	.	10.3
240	2.6	1.4	2.8	0.0	6.8
270	1.0	1.2	4.5	.	6.6
300	0.9	6.1	2.5	.	9.5
330	1.1	5.8	2.6	.	9.5
360	2.1	6.0	0.9	.	8.9
Total	21.5	42.9	26.8	0.0	91.3

[0;3[

OCTOBRE 2022 - LIDAR (100m)

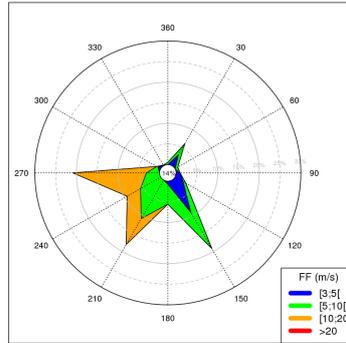


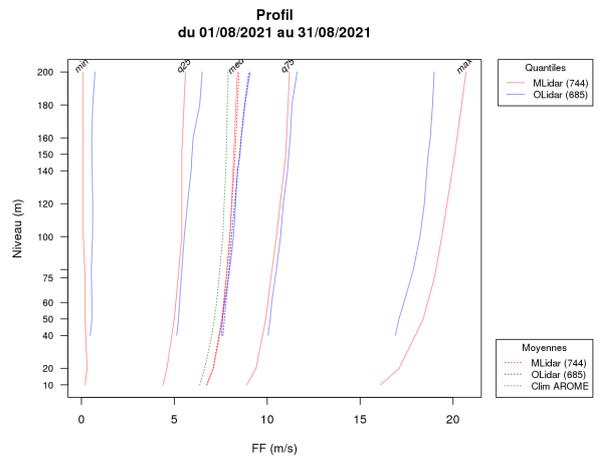
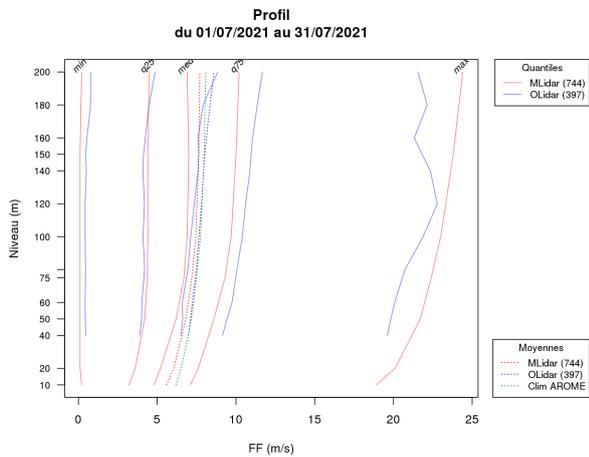
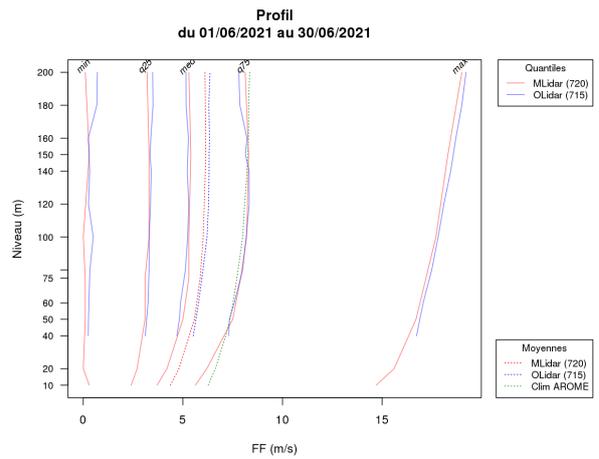
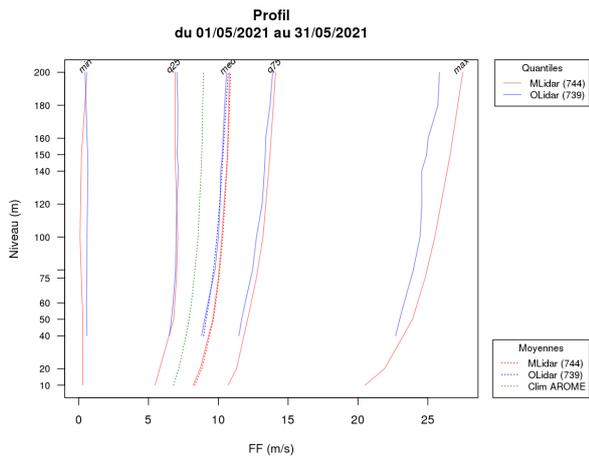
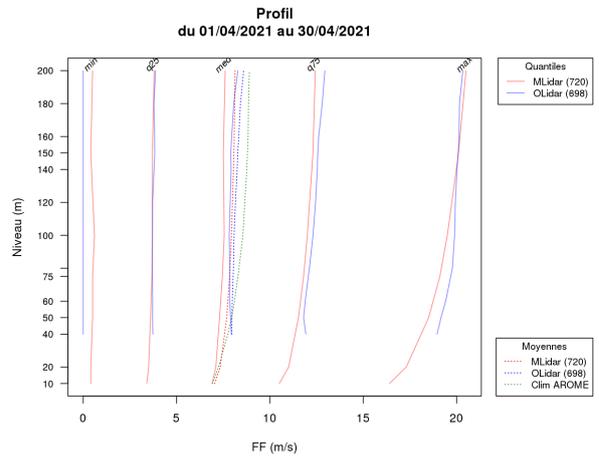
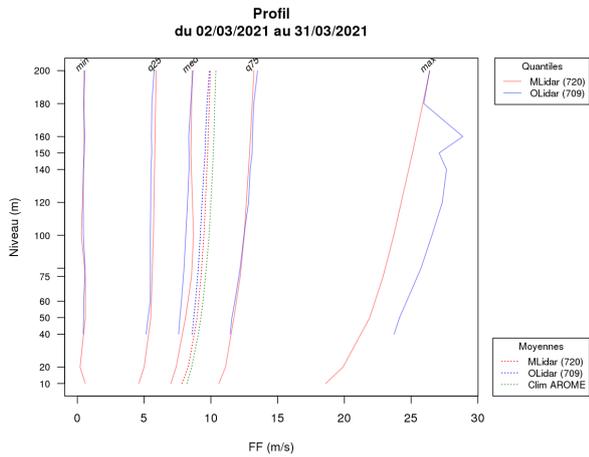
Tableau de répartition (en %)

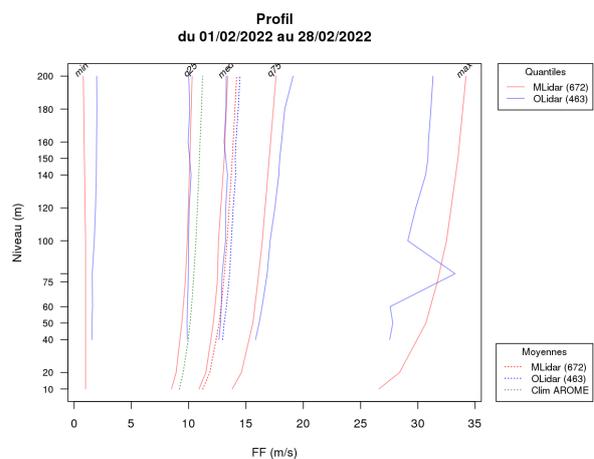
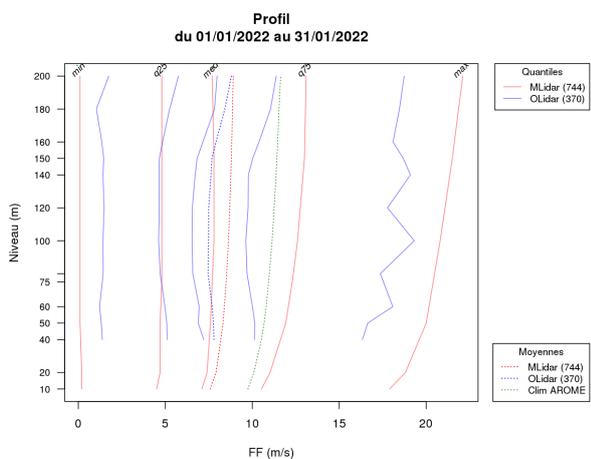
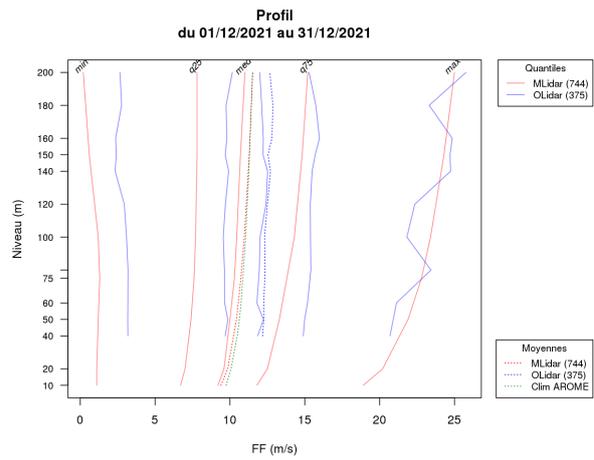
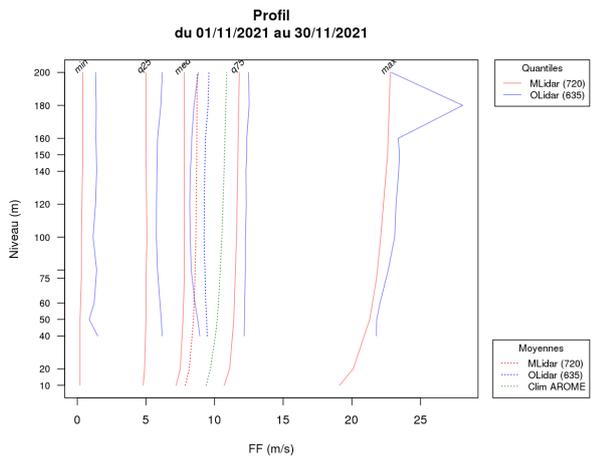
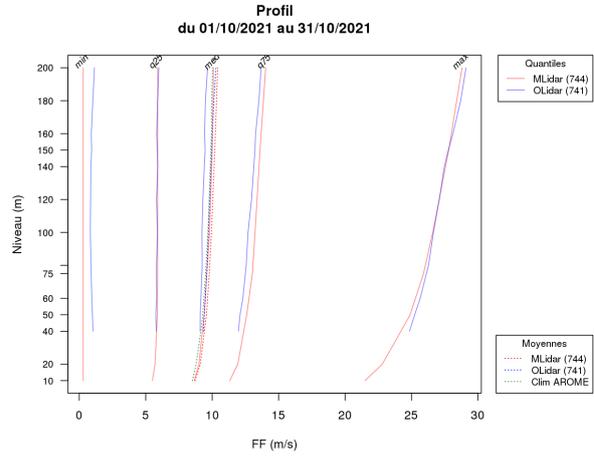
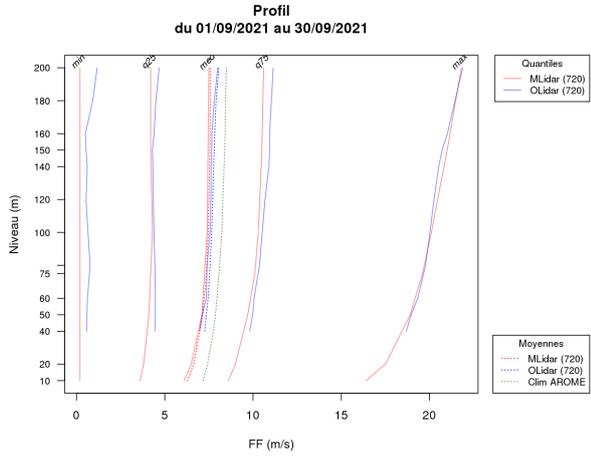
Nombre total de cas : 508

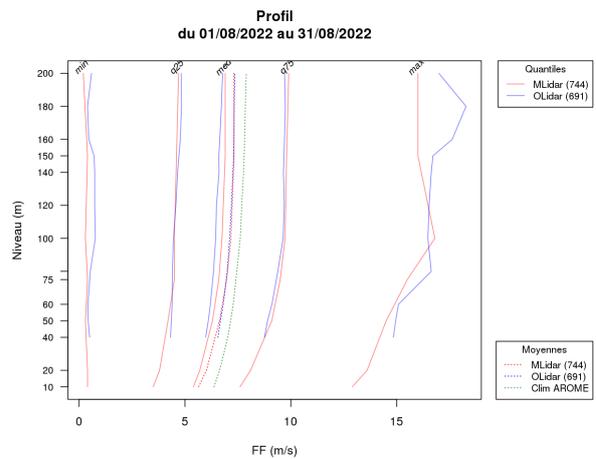
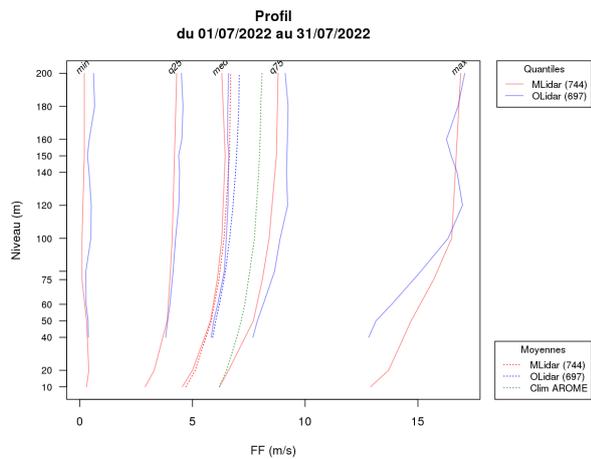
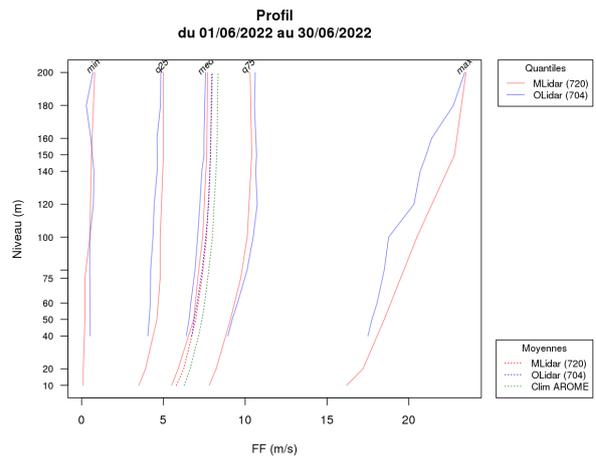
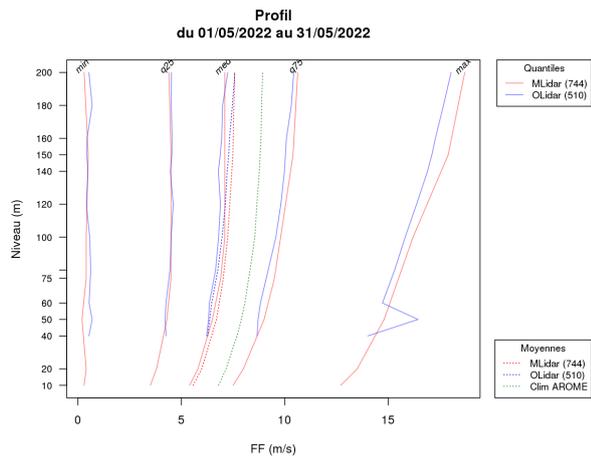
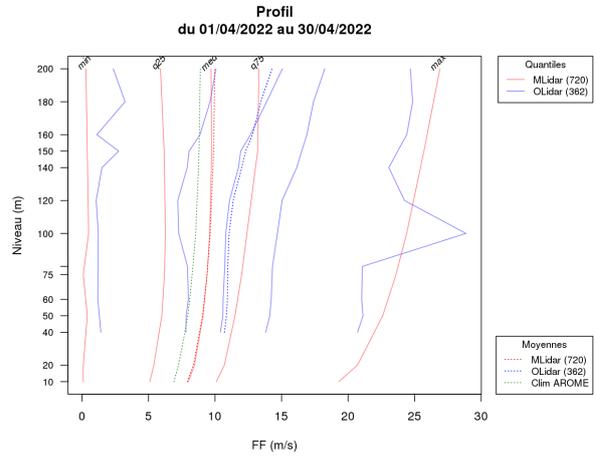
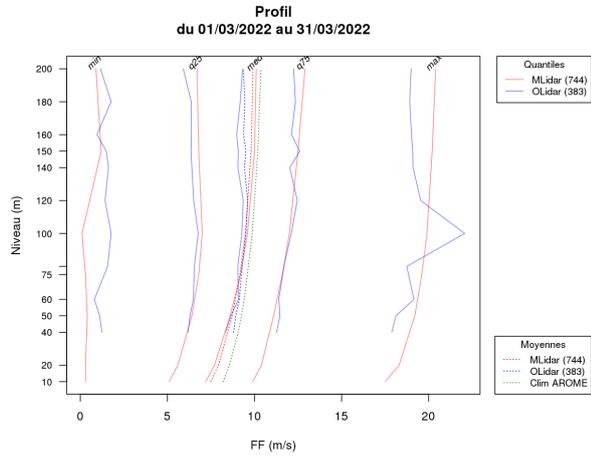
	[3;5[	[5;10[	[10;20[	>20	total
30	3.2	3.0	.	.	6.1
60	.	0.7	.	.	0.7
90	0.9	.	.	.	0.9
120	2.2	0.7	.	.	3.0
150	9.1	10.0	.	.	19.1
180	0.7	4.8	.	.	5.6
210	.	10.8	7.2	.	18.0
240	.	5.6	3.7	.	9.3
270	.	3.2	17.7	.	20.8
300	0.7	0.4	.	.	1.1
330	0.2	.	.	.	0.2
360	.	0.6	.	.	0.6
Total	17.1	39.8	28.6	.	85.5

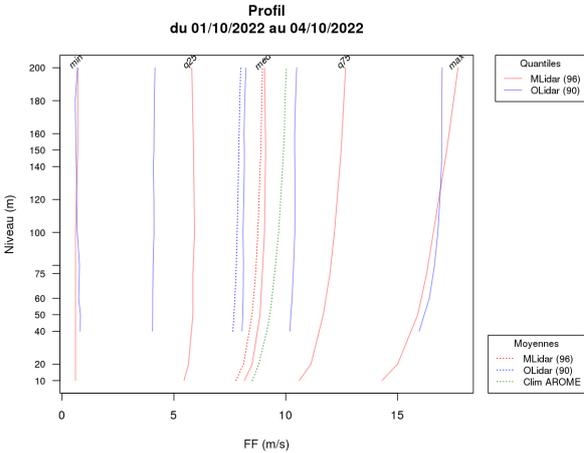
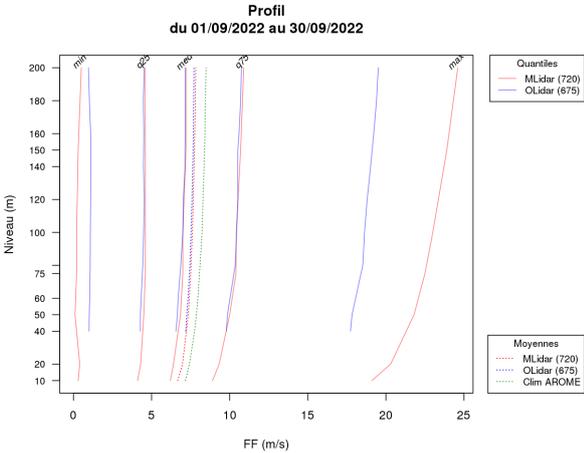
[0;3[

Annexe 9 : Profils de vent du LiDAR



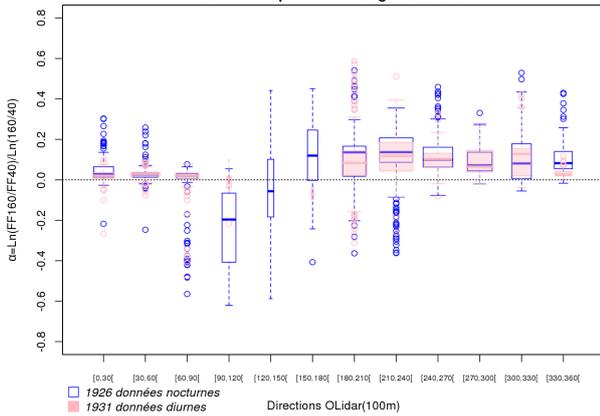




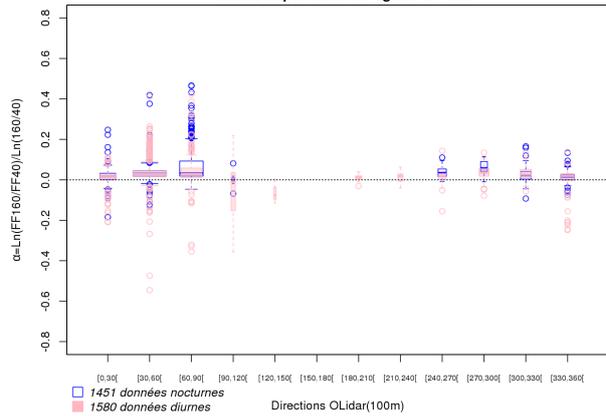


Annexe 10 : Cisaillement du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)

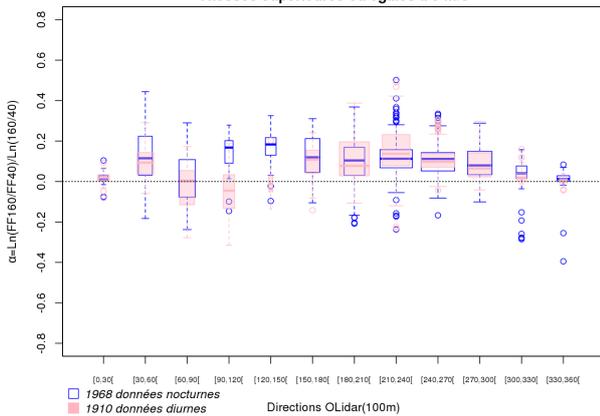
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 02/03/2021 au 31/03/2021 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



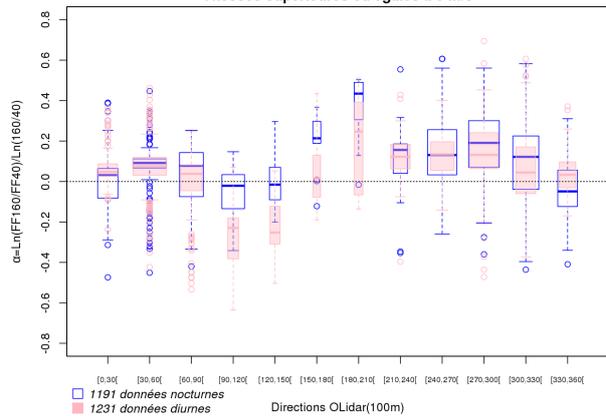
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/04/2021 au 30/04/2021 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



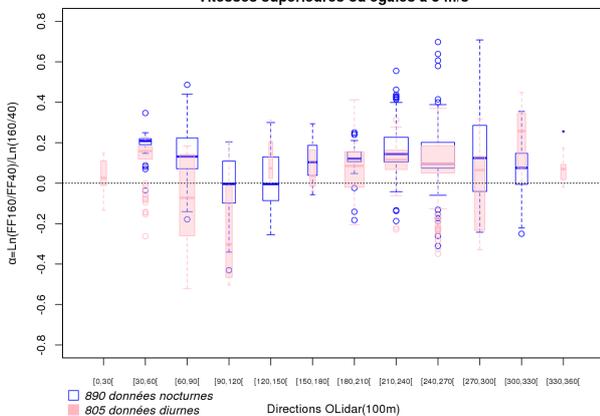
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/05/2021 au 31/05/2021 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



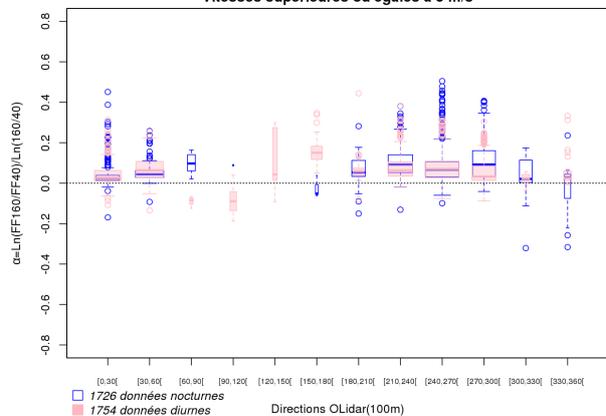
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/06/2021 au 30/06/2021 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



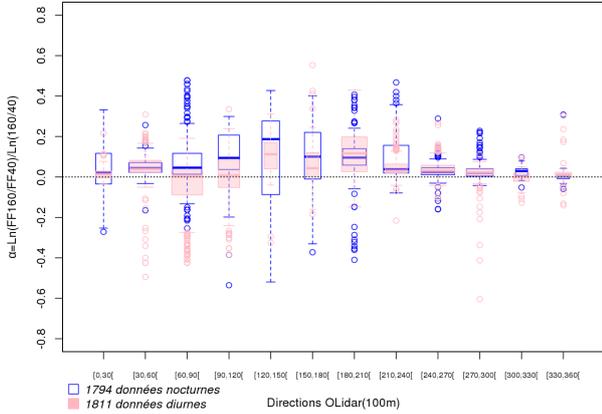
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/07/2021 au 31/07/2021 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



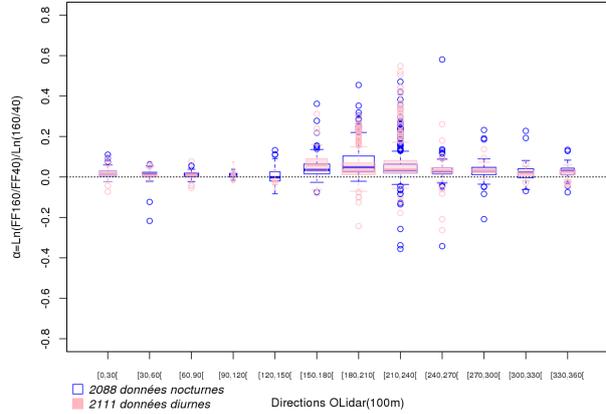
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/08/2021 au 31/08/2021 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



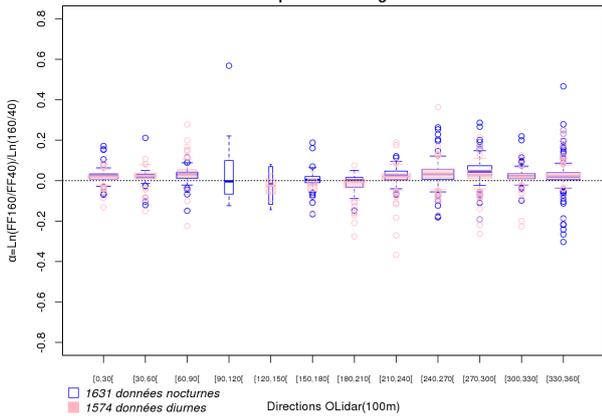
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/09/2021 au 30/09/2021 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



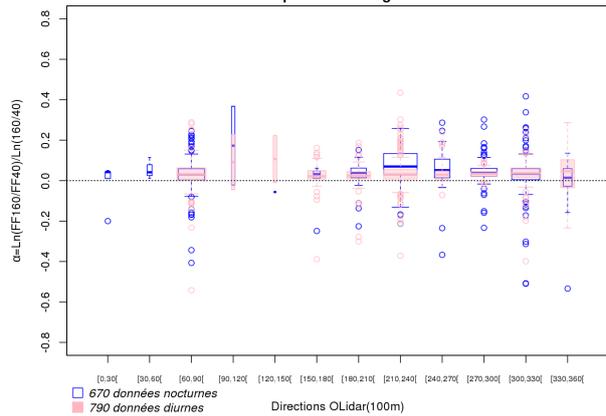
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/10/2021 au 31/10/2021 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



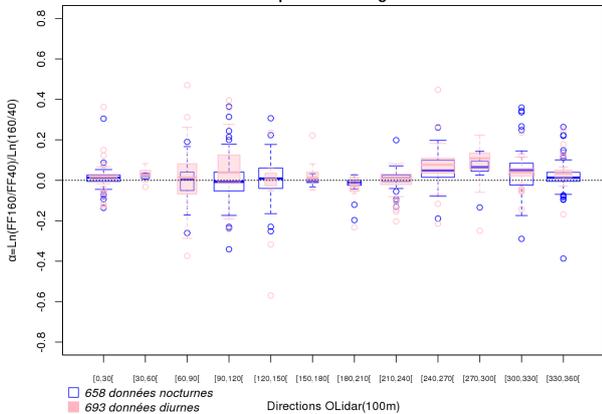
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/11/2021 au 30/11/2021 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



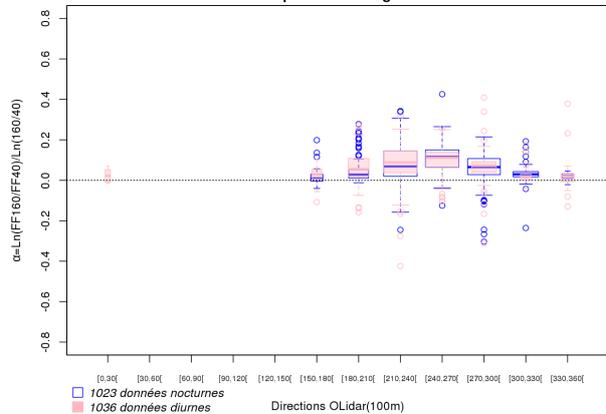
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/12/2021 au 31/12/2021 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



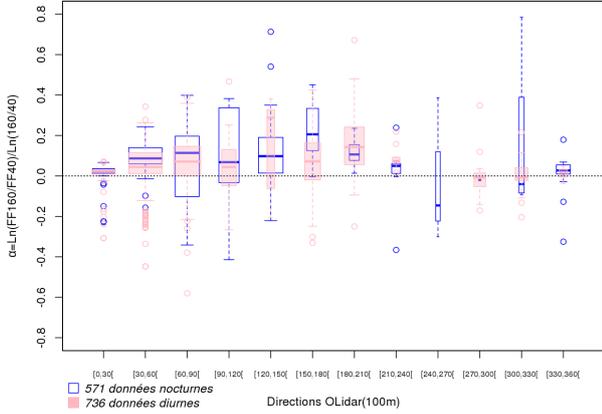
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/01/2022 au 31/01/2022 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



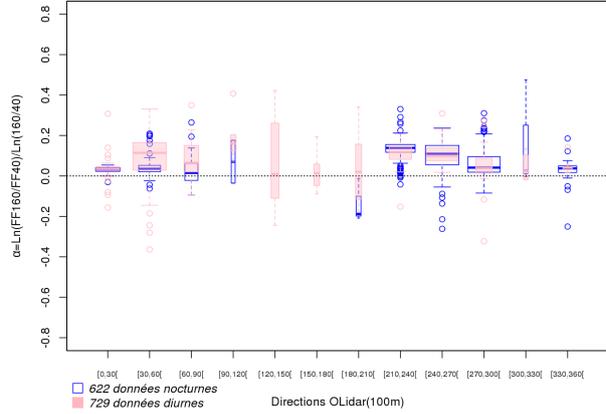
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/02/2022 au 28/02/2022 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



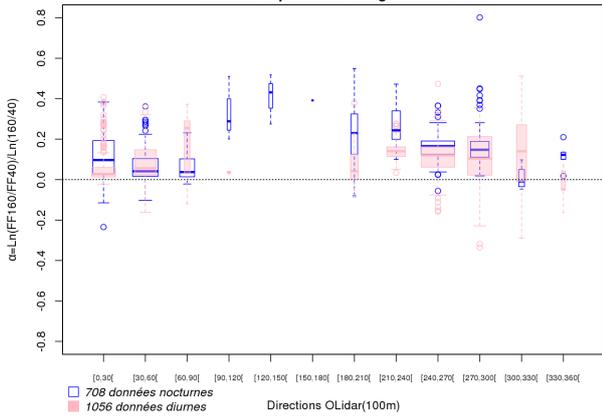
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/03/2022 au 31/03/2022 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



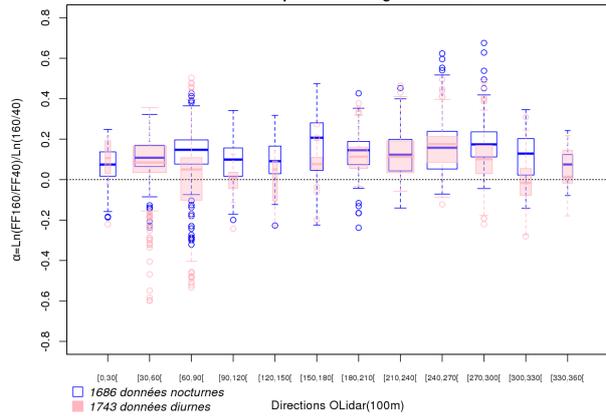
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/04/2022 au 30/04/2022 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



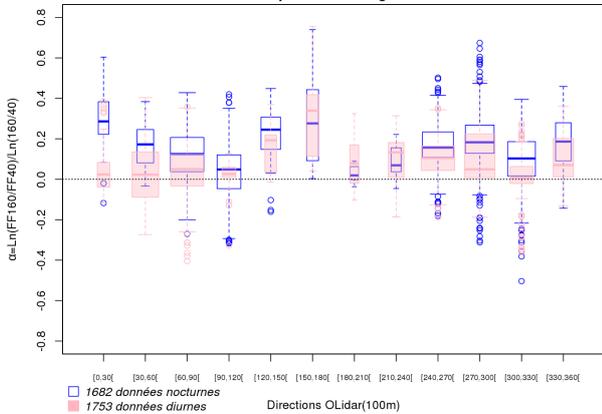
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/05/2022 au 31/05/2022 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



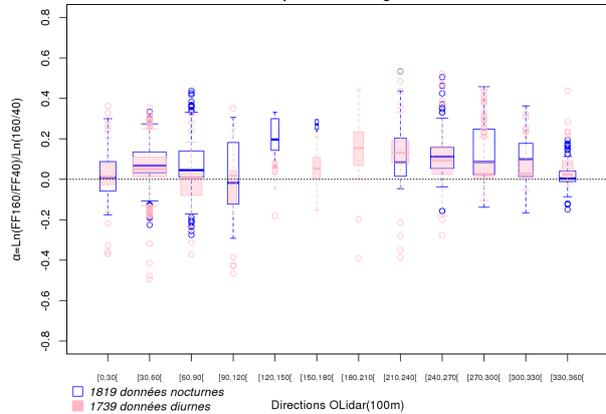
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/06/2022 au 30/06/2022 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s

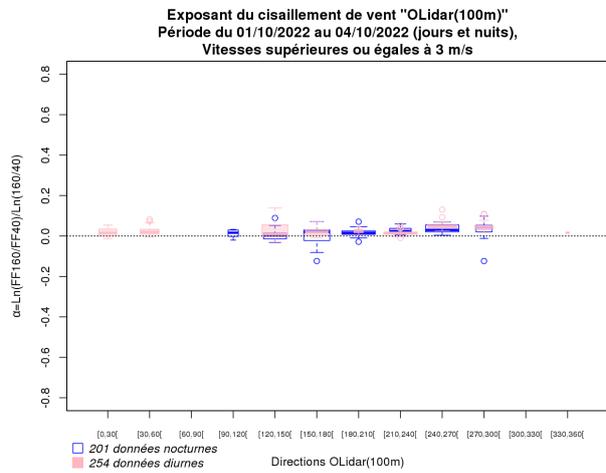
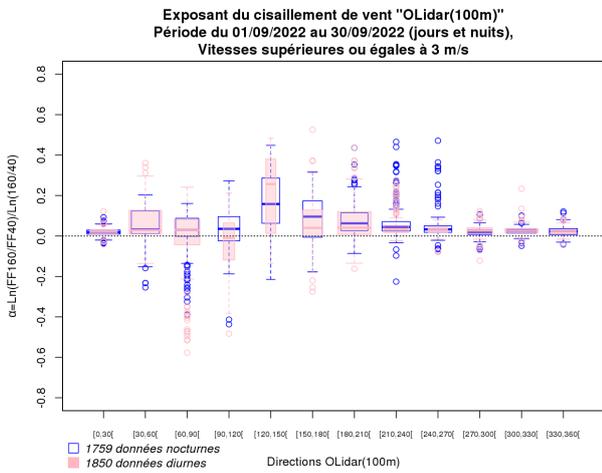


Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/07/2022 au 31/07/2022 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



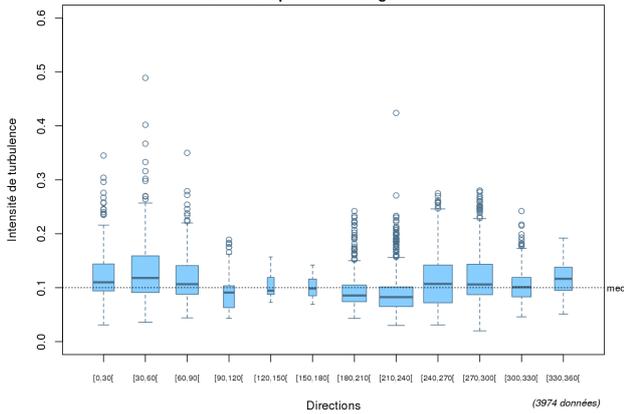
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/08/2022 au 31/08/2022 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



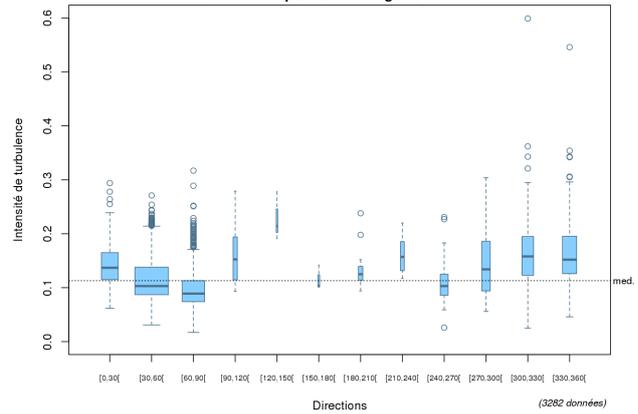


Annexe 11 : Turbulence du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)

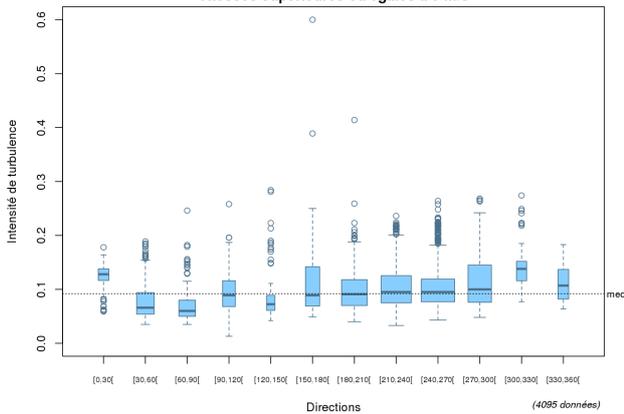
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 02/03/2021 au 31/03/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



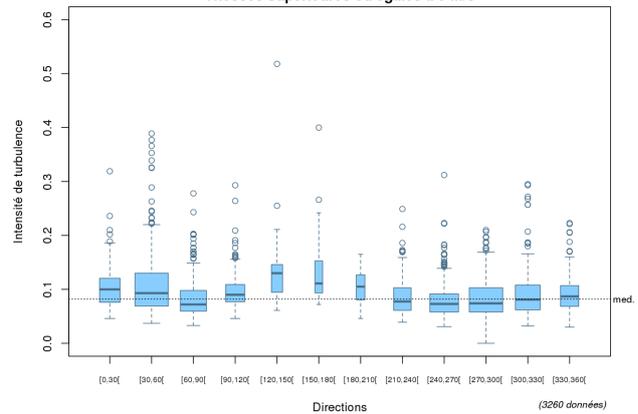
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/04/2021 au 30/04/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



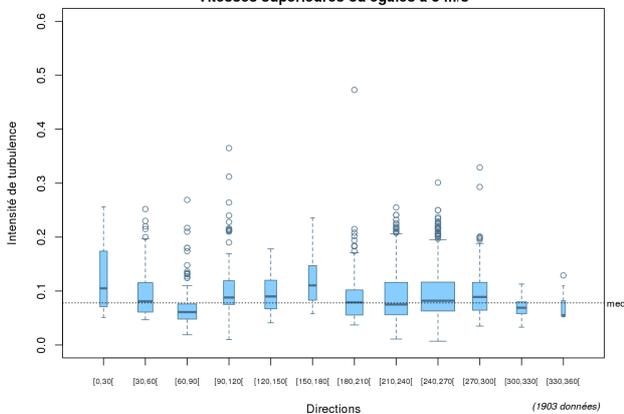
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/05/2021 au 31/05/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



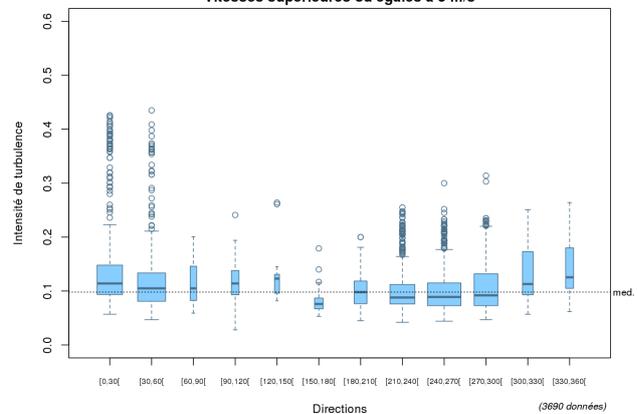
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/06/2021 au 30/06/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



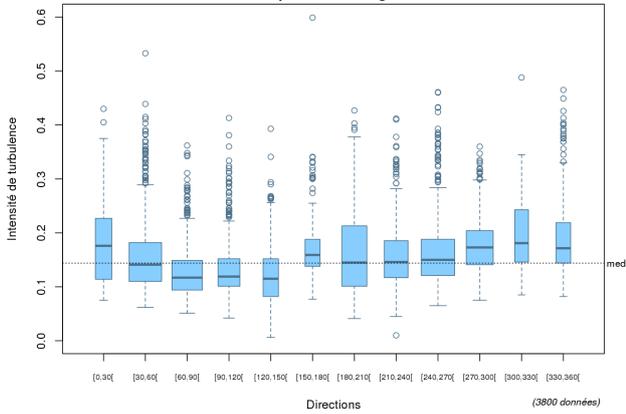
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/07/2021 au 31/07/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



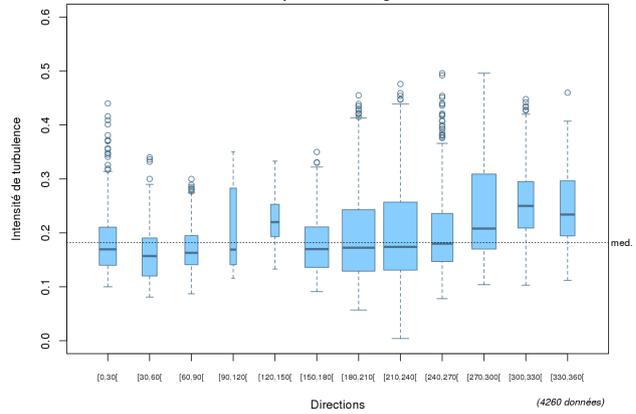
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/08/2021 au 31/08/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



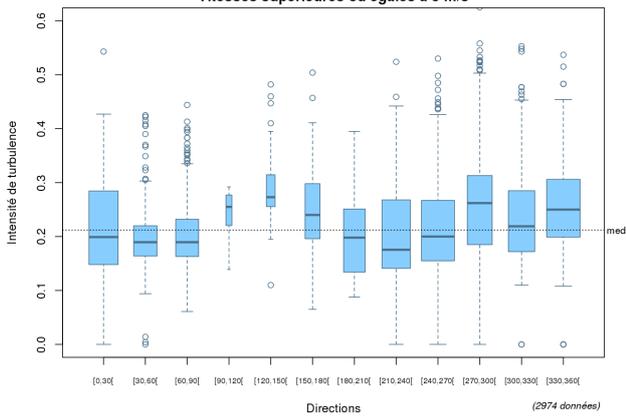
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/09/2021 au 30/09/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/10/2021 au 31/10/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/11/2021 au 30/11/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



Absence de données - mois de décembre 2021

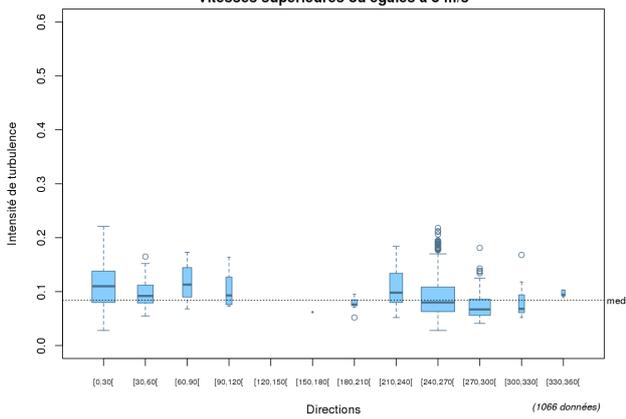
Absence de données mois de janvier 2022

Absence de données mois de février 2022

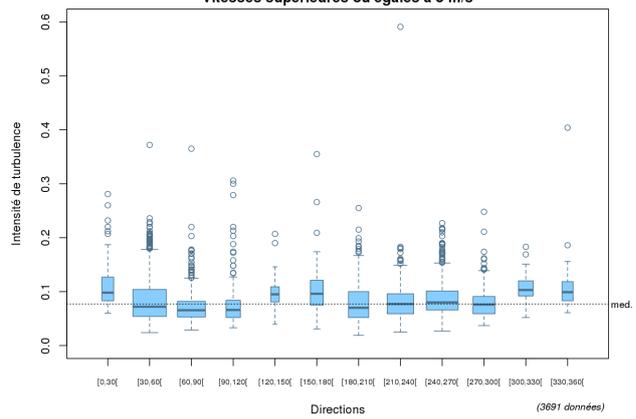
Absence de données mois de mars 2022

Absence de données mois de avril 2022

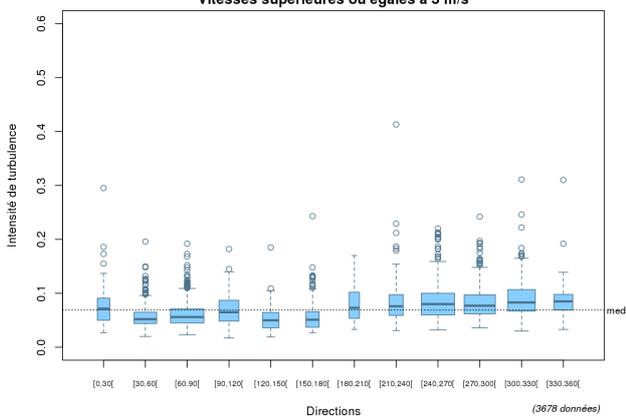
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/05/2022 au 31/05/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



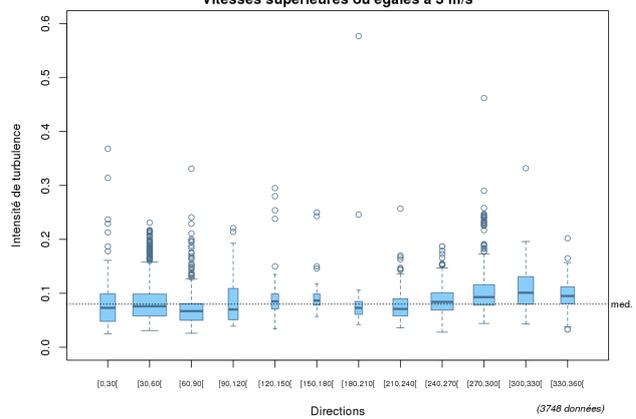
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/06/2022 au 30/06/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



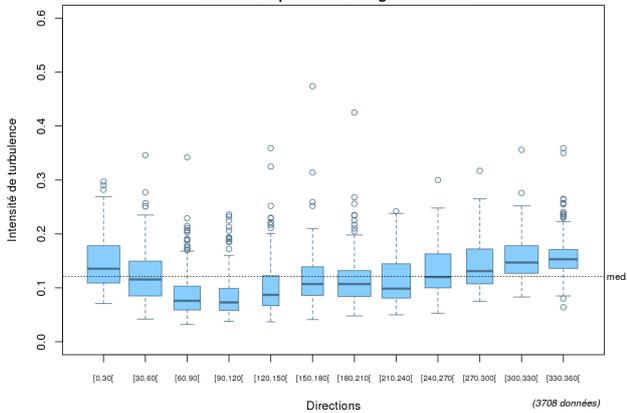
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/07/2022 au 31/07/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



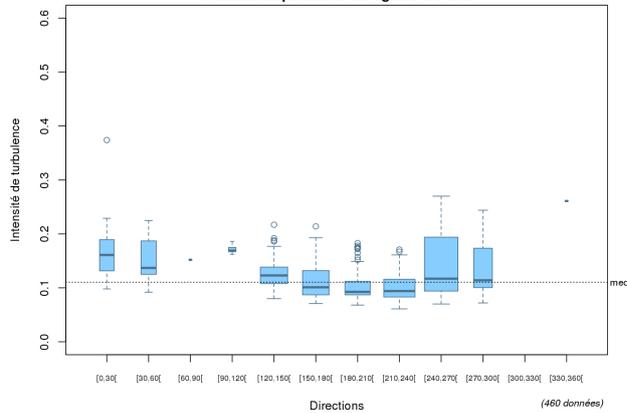
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/08/2022 au 31/08/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/09/2022 au 30/09/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/10/2022 au 04/10/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s





FIN DE DOCUMENT
