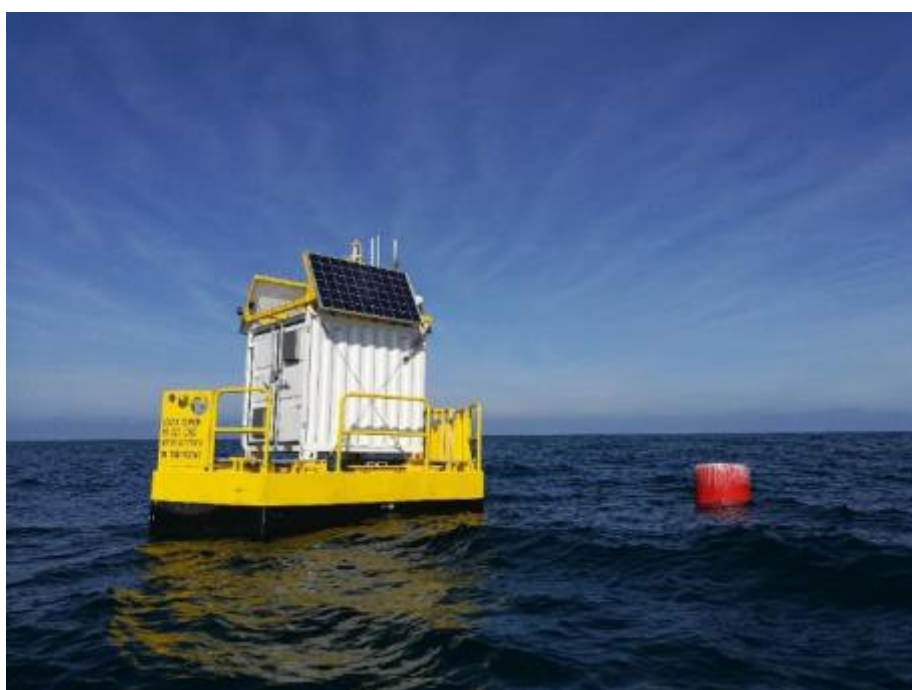


Projet de parc éolien off-shore au large de Barfleur

Lot 4 Rapport final – AO4 Normandie



Version 1 du 10/02/2022

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

- 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
AO4_Barfleur_Lot4_Rapport-final_V1_20220301	10/02/2022	V1	Livraison Rapport intermédiaire (6 mois)

Signatures

	Nom	Service
Rédacteurs	Nicolas Guérin Michel Aidonidis Éric Balcon Gérard Doligez	DSM/CS/ÉNERGIE DIRO/CM/BREST DIRO/CM/BREST DIROP/MAR
Relecteurs	Sébastien Delecay Isabelle Derrien	DSM/CS/ÉNERGIE DSM/CS/DC
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	6
2.1	Présentation du modèle AROME	6
2.2	Type de données fournies par le LiDAR	7
2.3	Les outils statistiques	8
2.3.1	Affectation d'un code qualité aux séries DD, FF et FXI	8
2.3.1.1	Seuils de référence	8
2.3.1.2	Détermination des seuils adaptés au LiDAR	9
2.3.1.3	Codes qualité	9
2.3.2	Statistiques de contrôle de la mesure	10
3	Analyse des données de vent mesuré par le LiDAR	12
3.1	Suivi des données	12
3.1.1	Disponibilité des données brutes	12
3.1.2	Monitoring des données FF brutes	14
3.1.3	Monitoring des erreurs	15
3.2	Retour sur des cas de données manquantes ou douteuses	16
3.3	Statistiques de contrôle et descriptives de la mesure	17
3.3.1	Statistiques de contrôle de la mesure	17
3.3.2	Statistiques descriptives du vent mesuré	20
3.3.2.1	Vent moyen horizontal à 100 m du LiDAR	20
3.3.2.2	Distributions	21
3.3.2.3	Variation diurne de la force du vent horizontal (données horaires)	22
3.3.2.4	Variation mensuelle de la force du vent horizontal (données horaires)	23
3.3.2.5	Roses des vents (données horaires)	25
3.3.2.6	Profils verticaux de vent (données horaires)	26
3.3.2.7	Cisaillement du vent (données 10 minutes)	27
3.3.2.8	Analyse des risques de turbulence atmosphérique à 100 m	29
3.3.2.9	Séries horaires FF et FXI à 100 m	30
4	Analyse des données de vent mesuré par l'anémomètre	31
5	Conclusions	33
6	Bibliographie	33
	Annexes	34

Liste des illustrations

Illustration 1 : Situation géographique de Barfleur (source www.geoportail.gouv.fr)	1
Illustration 2 : Roses des vents annuelle et saisonnières de la station de Gonneville (50)	2
Illustration 3 : Carte marine du large de Barfleur (source portail Data - SHOM)	3
Illustration 4 : Emplacement de la bouée de la zone d'étude de l'AO4 (source OpenStreetMap)	3
Illustration 5 : Photo de la plateforme de mesure	4
Illustration 6 : Photo d'un LiDAR Windcube V2 Offshore 8.66 identique à celui utilisé pour l'AO4.	5
Illustration 7 : Localisation des points de mesure les plus proches du LiDAR (source OpenStreetMap)	7
Illustration 8 : Exemple de tableau mensuel de disponibilité des données	13
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)	14
Illustration 10 : Monitoring des erreurs de forces (courbe bleue) et de directions (courbe rouge) pour le mois de décembre 2020.	15
Illustration 11 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) du LiDAR avec le modèle	17
Illustration 12 : Diagramme « quantile-quantile » du LiDAR	17
Illustration 13 : Répartitions des écarts de directions du LiDAR en fonction de l'heure (à gauche) et de la direction (à droite)	18
Illustration 14 : Dépassements des seuils de force (à gauche) et de direction (à droite) du vent du LiDAR	19
Illustration 15 : Distributions des vents horaires du LiDAR	21
Illustration 16 : Répartitions horaires des forces du vent du LiDAR	22
Illustration 17 : Répartitions mensuelles des forces du vent du LiDAR ; la largeur des boîtes à moustaches est fonction du nombre de données	23
Illustration 18 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) du LiDAR	25
Illustration 19 : Profils des quantiles de vents du LiDAR (bleu), du modèle (rouge) et de la climatologie (verte).	26
Illustration 20 : Cisaillement des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) du LiDAR	27
Illustration 21 : Exposant du cisaillement de vent du LiDAR	28
Illustration 22 : Turbulence du LiDAR	29
Illustration 23 : Séries FF et FXI à 100 m du LiDAR	30
Illustration 24 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) de l'anémomètre avec le modèle	31
Illustration 25 : Distribution des vents horaires de l'anémomètre (à gauche) et diagramme « quantile-quantile » (à droite)	32
Illustration 26 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'anémomètre	32
Illustration 27 : ANASYG du dimanche 27 décembre 2020 à 00H UTC	35
Illustration 28 : Comparaison des mesures LiDAR avec le modèle AROME pour le site de Barfleur les 26 et 27 décembre 2020	36
Illustration 29 : ANASYG du jeudi 20 octobre 2021 à 00UTC	37
Illustration 30 : A gauche : comparaison des mesures de l'anémomètre à 10 mètres avec le modèle AROME ; Au centre, comparaison des mesures du LiDAR à 100 mètres avec le modèle AROME ; A droite : visualisation des vents mesurés par le LiDAR à différentes hauteurs entre 40 et 200 mètres	37

Illustration 31 : Roses des vents du mois de novembre de la station de Gonneville (50)	38
Illustration 32 : Roses des vents hivernales de la station de Gonneville (50)	39
Illustration 33 : Roses des vents printanières de la station de Gonneville (50)	40
Illustration 34 : Roses des vents estivales de la station de Gonneville (50)	41
Illustration 35 : Roses des vents automnales de la station de Gonneville (50)	42
Illustration 36 : Roses des vents de décembre de la station de Gonneville (50)	43
Illustration 37 : Anomalies mensuelles de températures minimales et maximales de novembre 2020 à décembre 2021 à la station du Gonneville - Période de référence : 1981 - 2010	44
Illustration 38 : Cumuls mensuels de précipitations de novembre 2020 à décembre 2021 à la station de Gonneville (histogrammes en bleu) et normale de précipitations (segments en vert) - Période de référence : 1981 - 2010	45

Liste des tableaux

Tableau 1 : Taux de présence (en %) des données (DD,FF) 10 minutes du LiDAR. Deux seuils sont surveillés (Key Performance Indicators (KPI): taux mensuel de disponibilité des données > 80 % et taux de disponibilité sur l'ensemble de la campagne > 85 %. Les cases colorées en vert (rose) mettent en avant la validité (invalidité) par rapport à ces deux KPI.	13
Tableau 2 : Récapitulatif des problèmes techniques rencontrés sur le LiDAR	16
Tableau 3 : Classes de vitesses par mois. Taux « brut » (en italique) et « reconstitué » (en gras) du LiDAR	21
Tableau 4 : Statistiques 2001-2020 (en gras, en %) et valeurs 2020-2021 (en italique, en %) des forces de vent de la station de Gonneville ; surlignages rouge et bleu : excédent et déficit de plus de 5 % par rapport à la normale	24
Tableau 5 : Valeurs de l'exposant α en fonction de la nature du terrain (source http://eolienne.f4jr.org/vent)	28

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'AO4 Normandie. 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 durant une campagne de mesures de 12 mois et ce pour différentes hauteurs d'intérêt dont la hauteur 100 m revêtant un caractère important pour la production éolienne. Ce rapport traite des quatorze mois effectifs de la campagne.

1.1 Zone d'étude

Le futur parc éolien se situe sur une zone au large de la pointe de Barfleur, à l'extrémité nord-est du Cotentin.

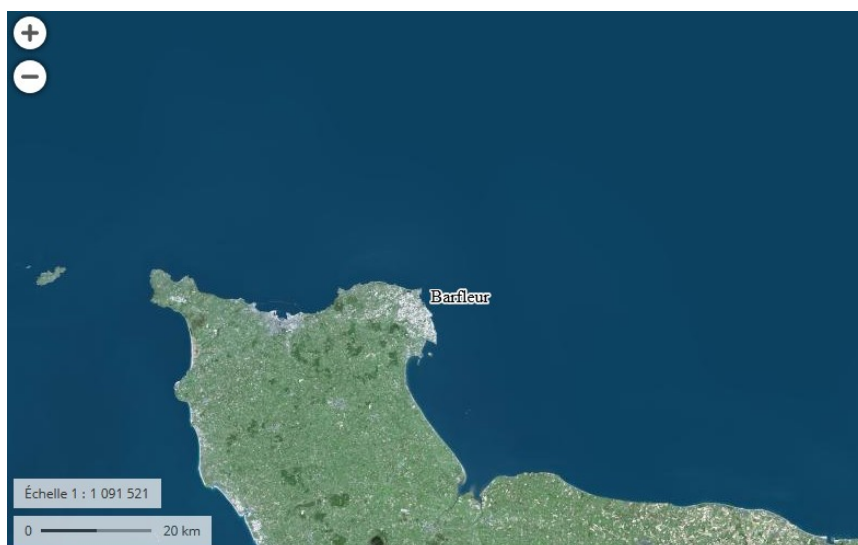


Illustration 1 : Situation géographique de Barfleur (source www.geoportail.gouv.fr)

La zone de l'AO4 Normandie est caractérisée d'un point de vue météorologique par :

- un rapide flux d'ouest-sud-ouest généré par la circulation de nombreuses dépressions sur l'Atlantique Nord. Les tempêtes hivernales y sont fréquentes ;
- 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 ;
- l'absence d'impact du continent par effet de brise du fait de la distance importante entre la zone d'étude et les côtes de la Manche.

La géographie physique de la zone et la distance à la côte libèrent cette zone de toute influence continentale. L'alternance de régimes d'ouest perturbés réguliers et de régimes anticycloniques d'est font de cette zone un secteur bien venté.

Météo-France dispose de deux stations de mesure, l'une au sémaphore de Barfleur (Gatteville-le-Phare), l'autre à Gonneville. Dans cette étude, nous retiendrons le poste de Gonneville qui est le plus représentatif de la zone d'étude, ceci malgré le fait que ce soit un point dans les terres.

Le point de mesure du Gonneville se trouve à 134 mètres d'altitude, sur l'aéroport de Maupertus près de Cherbourg. Cette station nous 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 à Gonneville observé sur la période 2001-2020 :

- les périodes de vent calme ($< 1,5\text{m/s}$) sont relativement rares sur l'année (de 3,7 % à 5,6 %). L'allure générale de la rose annuelle indique une prédominance des vents des secteurs ouest-sud-ouest et est-nord-est avec, cependant, une décomposition saisonnière comme suit : prédominance des vents de sud à ouest en hiver et en automne, un renforcement de la présence de nord-ouest au printemps et en été ;
- les vents les plus forts viennent du secteur ouest-sud-ouest au printemps et en été, du secteur sud à ouest en automne et en hiver ; leur intensité est bien plus notable en hiver et plus faible en été ;
- les vents de nord-ouest sont fréquents au printemps et en été sans être forts, ceux des secteurs nord et sud-est sont rares toute l'année, voire très rares au printemps et en été ;
- si les vents les plus forts sont observés venant du secteur sud à ouest, leur force peut également être soutenue quand ils soufflent du nord-est.

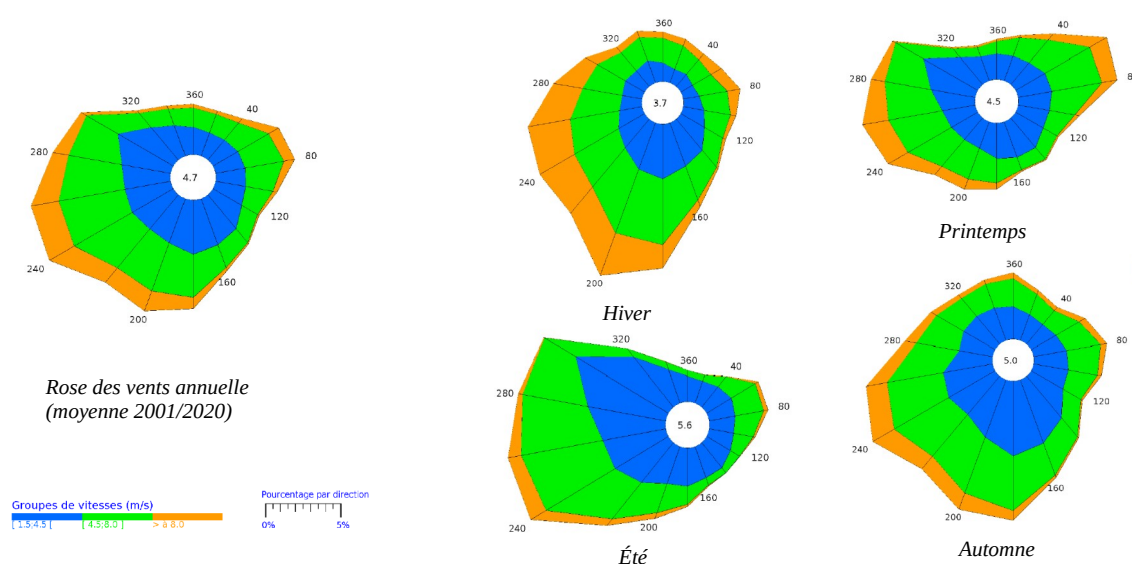


Illustration 2 : Roses des vents annuelle et saisonnières de la station de Gonneville (50)

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 variant entre 50 et 100 mètres. Les fonds sont réguliers.

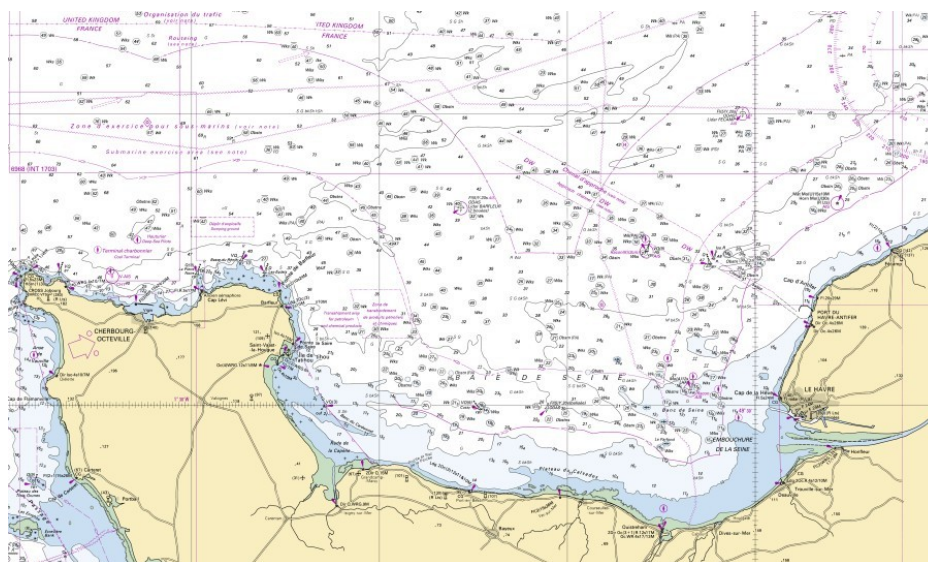


Illustration 3 : Carte marine du large de Barfleur (source portail Data - SHOM)

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 des conditions atmosphériques et océaniques au moyen d'un système flottant. La campagne de mesures est réalisée à proximité du point de coordonnées WGS84 Lon : -0,789696° Lat : 49,839094°. Elle se déroule à compter du 10 novembre 2020 et pour une durée de 12 mois minimum. Les coordonnées exactes du point de mesure sont disponibles dans les données brutes produites. La bouée a un rayon théorique maximal de 80 m de déplacement autour de son point d'ancrage. La bouée est équipée d'un LiDAR, d'une station météorologique ainsi que de capteurs océaniques.



Illustration 4 : Emplacement de la bouée de la zone d'étude de l'AO4 (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.

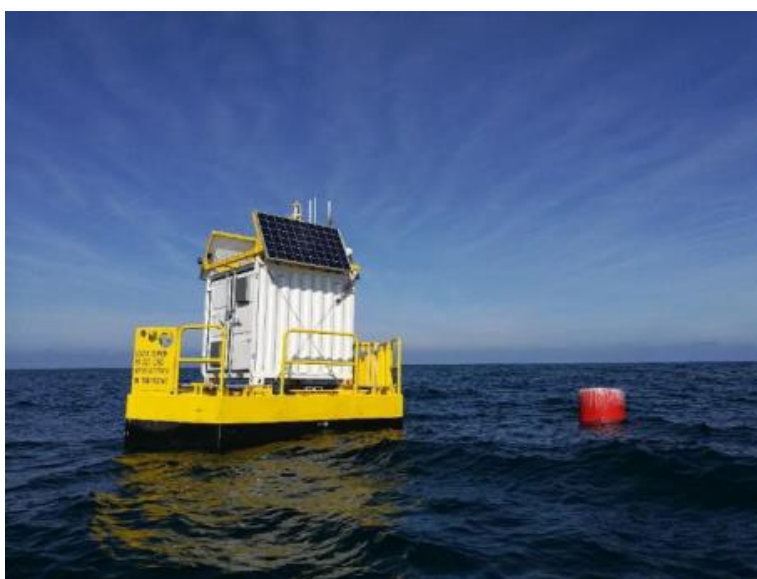


Illustration 5 : Photo de la plateforme de mesure

La plateforme flottante embarque des instruments pour effectuer différentes mesures :

- de vent en altitude ;
- de paramètres atmosphériques au niveau 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 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 (Light Detection And Ranging) 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 d'un LiDAR
Windcube V2 Offshore 8.66 identique à
celui utilisé pour l'AO4.

Le système a été conçu pour fonctionner dans des conditions de mer difficiles. Les limites de performance du LiDAR en matière de correction du mouvement sont d'une inclinaison maximale de $\pm 25^\circ$ (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, OMM¹) : le haubanage d'un mat 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 « [Echorange_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.

A l'issue de ce contrôle approfondi, Météo-France délivrera 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 son modèle météorologique à maille fine AROME qui dispose des hauteurs suivantes en matière de données de vent moyen assimilées : 10, 20, 50, 75, 100, 150 et 200 m. Ces données assimilées, disponibles 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 « le plus parfait » que le modèle va calculer l'évolution des paramètres météorologiques sur la grille en 3D qui représente l'atmosphère, en s'appuyant sur les lois physiques qui régissent son comportement.

Météo-France ne fournira pas d'estimation du vent maximal (rafale) car ce paramètre n'est pas disponible hormis pour la hauteur 10 m.

Nous allons décrire dans un premier temps le modèle de prévision numérique AROME, puis les différents types de données LiDAR et enfin une présentation des outils statistiques sera effectuée.

2.1 Présentation du modèle AROME

Le modèle AROME de Météo-France est décrit dans [Chatel et al., V1, 2021].

2.2 Type de données fournies par le LiDAR

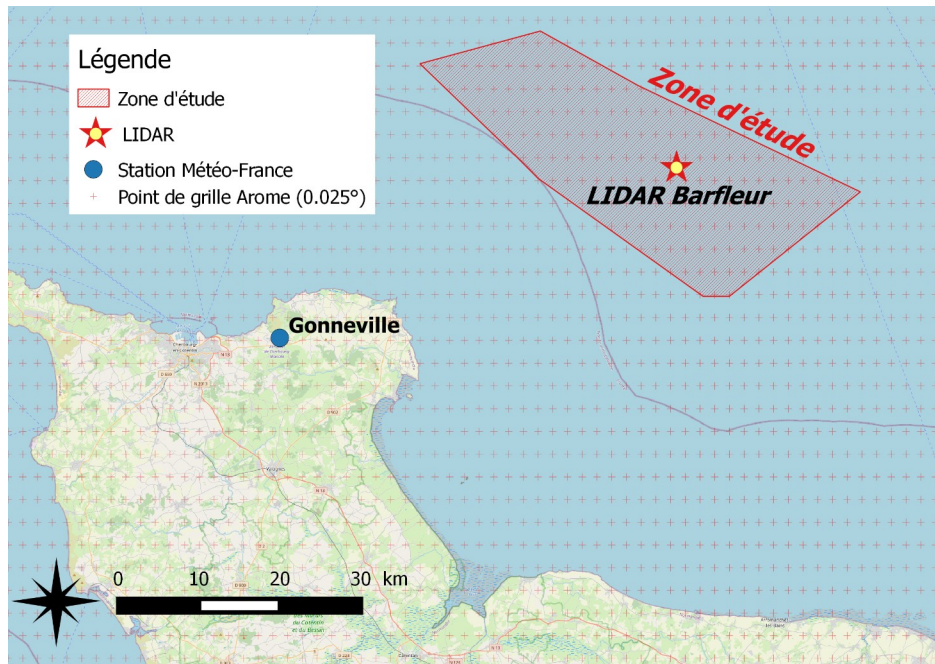


Illustration 7 : Localisation des points de mesure les plus proches du LiDAR (source OpenStreetMap)

Pour chaque hauteur de mesures le LiDAR fournit, en heure UTC, deux 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 incluent :
 - Vitesse en m/s et direction du vent horizontal moyennées sur 10 minutes, minimum, maximum, et écart type,
 - Vitesse verticale en m/s du vent moyennée sur 10 minutes, minimum, maximum, écart type.
- Les données **brutes** (1 seconde)
 - Données brutes non corrigées du nord magnétique (fichier *.rtd),
 - Données de cap du LiDAR (fichier *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 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.

A 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.

2.3 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.

2.3.1 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 DD, FF et FXI.

2.3.1.1 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 :

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

2.3.1.2 Détermination des seuils adaptés au LiDAR

Nous avons souhaité utiliser des critères plus ou moins semblables afin de contrôler les données du LiDAR. 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 iii).

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

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

2.3.1.3 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. §2.3.1.2), 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).

Météo-France fait le choix lors de la constitution de la série 100 m de conserver la donnée brute dite « douteuse ».

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 plus haut sont fournis dans le fichier « SerieLidarH100_Barfleur_20201101-20211215.csv ».

2.3.2 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 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 :

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

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
- 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.

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 de chaque 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.

3 Analyse des données de vent mesuré par le LiDAR

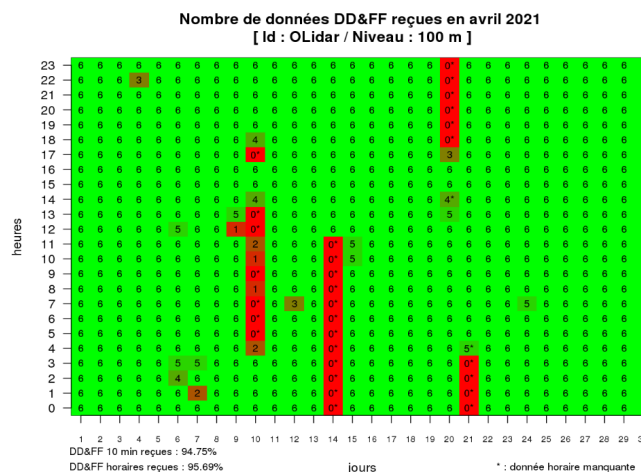


Illustration 8 : Exemple de tableau mensuel de disponibilité des données

Le taux de présence des données du LiDAR décroît naturellement légèrement avec l'altitude. Il reste cependant encore très bon à 200 m, où l'on comptabilise souvent moins de 5 % de données manquantes par mois (cf. Tableau 1).

	2020		2021												MOY (401j)
	nov (21j)	déc	jan	fév	mar	avr	mai	juin	juil	aoû	sep	oct	nov	déc (15j)	
200	97,82	95,00	88,82	66,94	66,55	88,68	96,37	79,40	70,45	78,70	92,78	99,15	97,59	96,72	86,23
180	98,31	95,45	90,01	67,68	66,80	90,02	97,83	83,54	73,05	79,91	94,26	99,51	98,96	98,25	87,57
160	98,91	95,97	91,35	67,96	66,96	91,20	98,66	87,75	75,43	80,87	95,58	99,71	99,49	98,93	88,68
150	99,11	96,21	91,76	68,06	67,14	92,66	98,97	90,02	76,12	81,09	96,30	99,73	99,61	99,26	89,22
140	99,17	96,46	92,14	68,11	67,23	93,87	99,24	91,81	76,52	81,16	96,85	99,78	99,65	99,41	89,61
120	99,21	96,75	92,85	68,28	67,47	94,49	99,51	94,72	77,49	81,27	98,33	99,78	99,72	99,68	90,22
100	99,21	96,86	93,39	68,33	67,59	94,75	99,69	96,37	78,79	81,38	98,80	99,82	99,75	99,78	90,59
80	98,74	96,98	93,82	68,53	67,59	95,72	99,96	97,89	79,19	81,38	99,56	99,87	99,72	99,86	90,92
60	98,38	97,11	94,62	68,68	67,61	96,23	99,96	99,10	79,39	81,38	99,84	99,87	99,63	99,72	91,14
50	98,25	97,29	95,03	68,85	67,61	96,25	99,96	99,07	79,05	81,38	99,84	99,87	99,51	99,63	91,15
40	98,15	97,36	95,54	69,05	67,61	96,18	99,96	99,00	78,97	81,38	99,84	99,87	99,19	99,59	91,16
MOY	98,66	96,50	92,67	68,22	67,29	93,64	99,10	92,61	76,77	80,90	97,45	99,72	99,35	99,17	89,68

Tableau 1 : Taux de présence (en %) des données (DD,FF) 10 minutes du LiDAR. Deux seuils sont surveillés (Key Performance Indicators (KPI): taux mensuel de disponibilité des données > 80 % et taux de disponibilité sur l'ensemble de la campagne > 85 %. Les cases colorées en vert (rose) mettent en avant la validité (invalidité) par rapport à ces deux KPI.

La réception des données du LiDAR débute le 10 novembre 2020. Le taux de disponibilité global sur l'ensemble de la campagne est supérieur au taux de 85 % (critère KPI du Carbon Trust). Cependant certains taux mensuels sont inférieurs à 80% notamment en raison d'une panne entre le 21/02/2021 et le 07/03/2021.

Au total, 36 jours durant la campagne ont présenté des manques (intégralité de la journée ou seulement certaines heures). Par conséquent la campagne a été prolongée jusqu'au 15 décembre 2021.

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 au cours de la semaine du 21 au 27 décembre 2020. Ils montrent le passage de la tempête « Bella » dans la nuit du 26 au 27 décembre. Au plus fort de la tempête, le modèle AROME estime le vent moyen à un peu plus de 25 m/s. Ce qui est tout à fait cohérent avec la mesure du LiDAR.

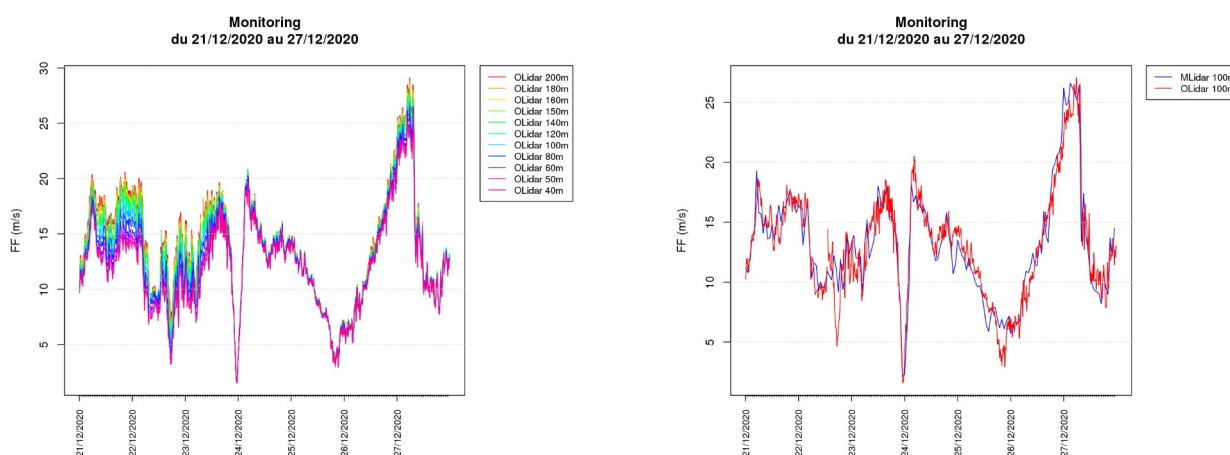


Illustration 9 : Monitoring des données 10 minutes sur les 11 niveaux de mesure (à gauche) et comparaison avec le modèle à 100 m (à droite)

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 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 détecter d'éventuelles dérives. Les résultats restent souvent en dessous de 2 m/s et de 20°, et sont donc très inférieurs aux seuils fixés (cf. Illustration 10). Les biais de direction de vent observés autour du 7 décembre, avec des écarts jusqu'à 25 à 30°, peuvent s'expliquer par des situations de cols barométriques et des conditions anticycloniques à faible gradient de pression, favorisant des vents faibles, souvent très variables en direction.

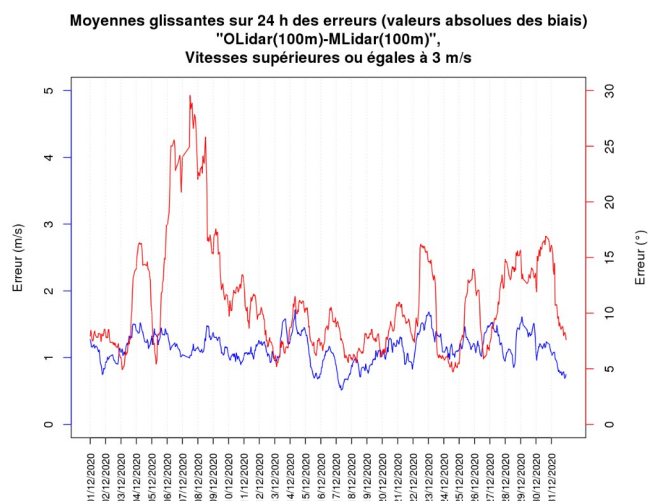


Illustration 10 : Monitoring des erreurs de forces (courbe bleue) et de directions (courbe rouge) pour le mois de décembre 2020.

3.2 Retour sur des cas de données manquantes ou douteuses

Le LiDAR fournit naturellement moins de données d'observations plus le niveau augmente, les nuages bas créant un obstacle à la mesure. Au-dessus de 140 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
Novembre 2020	Réception des données à compter du 10/11.
Décembre 2020	Perte de la réception des données à partir du 28/12, entraînant l'arrêt de la supervision quotidienne. Panne sans conséquence : les données ayant été sauvegardées ont pu être analysées a posteriori.
Janvier 2021	RAS
Février 2021	Panne à partir du 20/02 11h00 : Coupure d'alimentation électrique du LiDAR liée au défaut de la pile à combustible.
Mars 2021	Panne du 01/03 00h au 09/03 06h liée au défaut de la pile à combustible. Manques ponctuels en raison de problèmes de communication avec la bouée, le 10/03 de 00h à 16h, le 12/03 de 16h à 23h, du 14/03 14h au 15/03 18h.
Avril 2021	Le 14/04 de 00h à 11h problème ponctuel de transmission.
Mai 2021	Données temporairement manquantes le 03/05 ayant été récupérées par la suite (problème de synchronisation du serveur).
Juin 2021	Problème de mauvaise disponibilité lié à la faible concentration d'aérosols dans l'atmosphère représentée par un faible CNR.
Juillet 2021	Données absentes du 09/07 00h au 10/07/ 17h et du 20/07 00h au 21/07 21h en raison d'un problème sur l'armoire électrique (gestion de l'alimentation). Données absentes les 30/07 et 31/07 en raison d'une maintenance sur l'armoire électrique.
Août 2021	Suite à intervention, indisponibilité des données du 01/08 au 06/08.
Septembre 2021	Quelques problèmes de disponibilité liés à la faible concentration d'aérosols dans l'atmosphère représentée par un faible CNR.
Octobre 2021	RAS
Novembre 2021	RAS
Décembre 2021	Fin de la campagne le 15/12.

Tableau 2 : Récapitulatif des problèmes techniques rencontrés sur le LiDAR

L'analyse de deux situations météorologiques qui auraient pu impacter les mesures horaires du LiDAR (notamment le passage de la tempête « Bella ») figurent dans les annexes 1 et 2.

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.

Moins de 5 % des valeurs enregistrées par le LiDAR sortent des seuils fixés (cf. Illustration 11). L'essentiel des dépassements de seuil concerne le critère de direction pour des forces inférieures à 10 m/s.

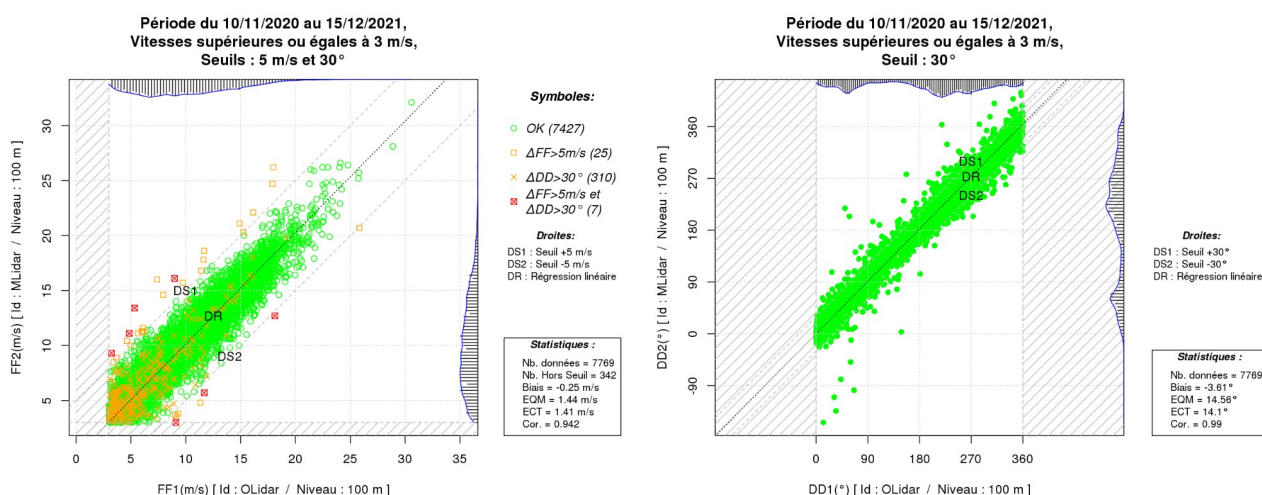


Illustration 11 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) du LiDAR avec le modèle

Le diagramme « quantile-quantile » des forces de vent du LiDAR ci-dessous présente des points alignés de manière satisfaisante sur la première bissectrice.

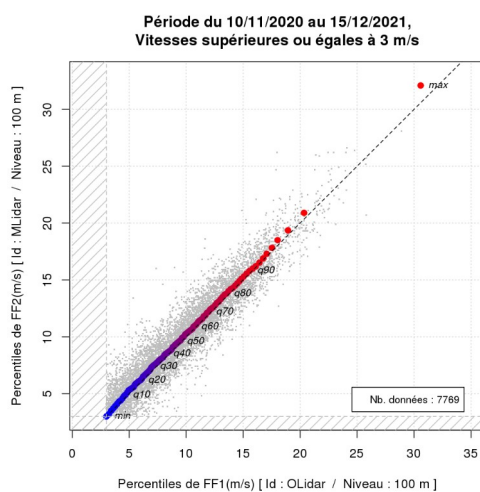


Illustration 12 : Diagramme « quantile-quantile » du LiDAR

Quelle que soit l'heure, l'observation présente un faible biais sur les directions, de moins de 5° par rapport au modèle. Suivant la direction considérée, on note un biais un peu plus marqué pour le secteur sud-est (de 7 à 8°) et plus faible pour les secteurs ouest à nord-ouest (de l'ordre de 1 à 3°) (cf. Illustration 13).

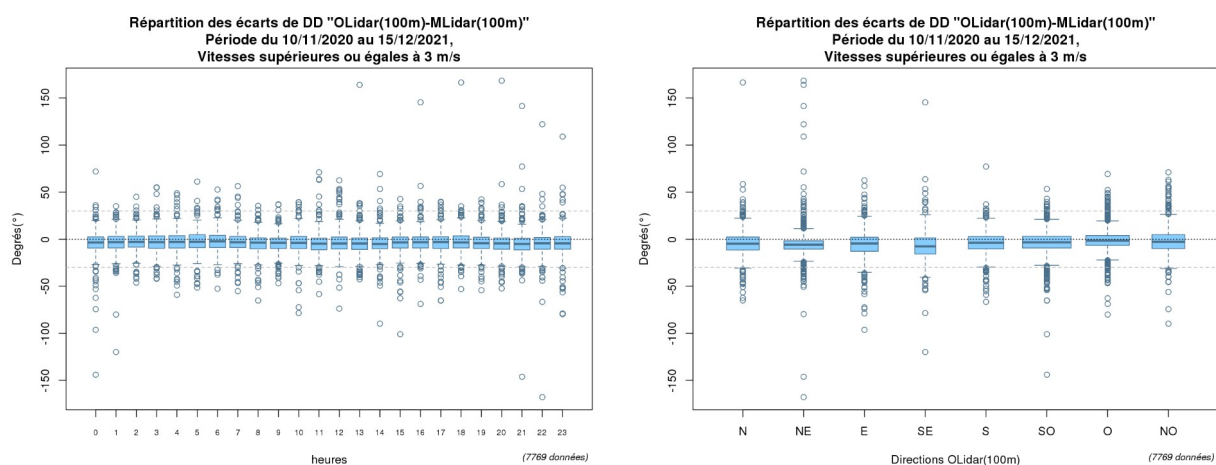


Illustration 13 : Répartitions des écarts de directions du LiDAR en fonction de l'heure (à gauche) et de la direction (à droite)

3 Analyse des données de vent mesuré par le LiDAR



Les dépassements du seuil de qualité pour la vitesse concernent globalement tous les secteurs de vent mais leur nombre reste très faible. Ils représentent moins de 1 % des cas suivant les directions (cf. Illustration 14 à gauche).

Pour des vitesses supérieures à 5 m/s, on enregistre des dépassements du seuil de direction dans moins de 8 % des cas (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.

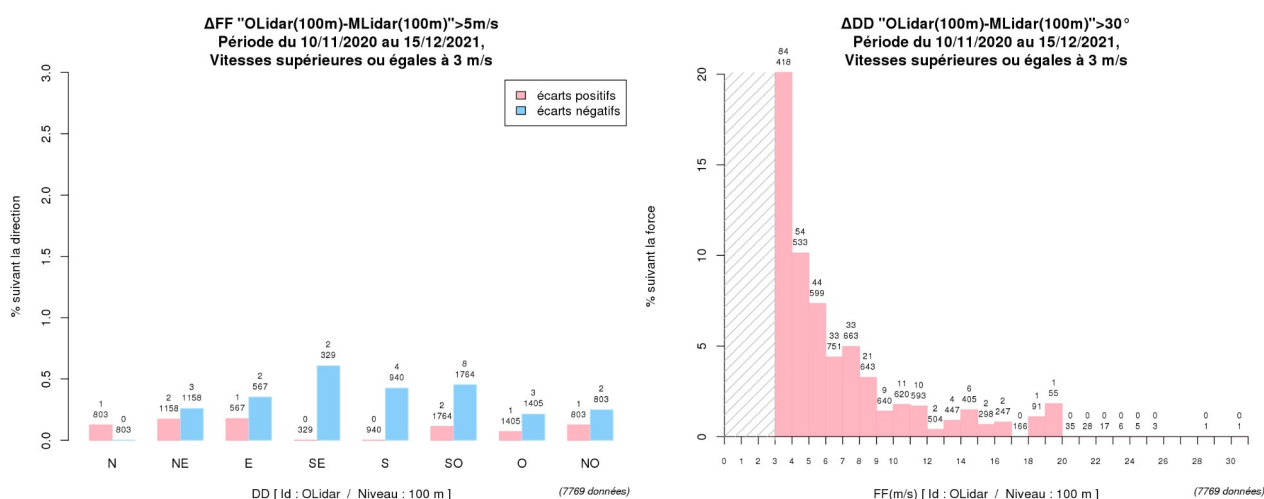


Illustration 14 : Dépassements des seuils de force (à gauche) et de direction (à droite) du vent du LiDAR

3.3.2 Statistiques descriptives du vent mesuré

En préambule, afin de se faire une idée plus précise des conditions météorologiques rencontrées durant les quatorze mois de mesure, une description détaillée de la climatologie saisonnière figure en annexe 3.

3.3.2.1 Vent moyen horizontal à 100 m du LiDAR

Dans le tableau suivant, le taux « brut » correspond à l'ensemble des données 10 minutes du LiDAR et le taux « reconstitué », aux données horaires de la série reconstituée.

Les premières données du LiDAR sont reçues le 10 novembre. De fin février à début mars, les données sont manquantes en raison d'une panne. Et suite à une maintenance sur l'armoire électrique, des données sont également absentes ponctuellement en juillet et début août. Ceci explique pour les cinq mois considérés, les quelques différences observées sur certaines classes de vitesse entre taux bruts et taux reconstitués. Elles n'excèdent toutefois pas 7%.

Pour les autres mois, quelle que soit la classe de vitesse, ces taux ne diffèrent pas de plus de 1 %.

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
2020	11	3000	5,4 %	7,1 %	46,7 %	29%	10,6 %	1,1 %	0%	
		719	4,6 %	7,8 %	44,9 %	28,7 %	12,4 %	1,5 %	0,1 %	
	12	4324	2,1 %	5,8 %	34,8 %	44,1 %	11,8 %	1,1 %	0,3 %	
		744	2%	7,1 %	34,4 %	43,5 %	11,6 %	1,1 %	0,3 %	
2021	1	4169	3,4 %	10,9 %	36,7 %	30,2 %	17,4 %	1,4 %		
		744	3,2 %	11,3 %	37,6 %	29,4 %	16,9 %	1,5 %		
	2	2755	1,7 %	3%	17,9 %	57,4 %	20,1 %			
		672	3,3 %	5,5 %	22,2 %	54,2 %	14,9 %			
	3	3134	7,9 %	20,6 %	38%	20,7 %	9,7 %	3%	0,1 %	
		744	5,5 %	16%	38,7 %	25,8 %	11,7 %	2,3 %		
	4	4177	20,2 %	17,4 %	29,9 %	23,8 %	8,6 %	0,2 %		
		720	20%	18,2 %	30,4 %	22,5 %	8,8 %	0,1 %		
	5	4450	8,4 %	6,9 %	31,7 %	39,8 %	11,6 %	1,6 %		
		744	8,9 %	6,3 %	32,3 %	39,5 %	11,3 %	1,7 %		
	6	4163	20,7 %	22,7 %	40,8 %	11,5 %	4,3 %			
		720	21,4 %	22,6 %	39,9 %	11,8 %	4,3 %			
	7	3518	10,8 %	10,5 %	53,5 %	20,8 %	3,9 %	0,5 %		
		744	15,3 %	12,2 %	46,1 %	21,1 %	4,6 %	0,7 %		
	8	3896	11,3 %	10,3 %	49%	27%	2,3 %			
		744	10,1 %	10,9 %	51,2 %	25,8 %	2%			
	9	4273	12,8 %	19,8 %	39%	26,6 %	1,7 %	0%		
		720	12,6 %	21,1 %	37,9 %	26,4 %	1,9 %			
	10	4457	5,9 %	15,4 %	38,9 %	27%	11,2 %	1,2 %	0,2 %	0,1 %
		744	5,8 %	15,5 %	39,1 %	27,3 %	10,9 %	1,2 %	0,1 %	0,1 %
	11	4309	6,6 %	17,3 %	40,7 %	23,3 %	9,7 %	2,5 %		
		720	6,2 %	17,8 %	40,7 %	23,1 %	9,4 %	2,8 %		

3 Analyse des données de vent mesuré par le LiDAR



	12	<i>2157</i>	<i>0,9 %</i>	<i>5,4 %</i>	<i>31,9 %</i>	<i>35,2 %</i>	<i>23,8 %</i>	<i>2,8 %</i>		
		360	1,1 %	5,6 %	31,4 %	35,8 %	22,8 %	3,3 %		
Total		<i>52782</i>	<i>8,9 %</i>	<i>12,9 %</i>	<i>38,1 %</i>	<i>29,2 %</i>	<i>9,8 %</i>	<i>1,0 %</i>	<i>0,0 %</i>	<i>0,0 %</i>
		9839	8,8 %	13,0 %	38,0 %	29,3 %	9,8 %	1,1 %	0,0 %	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). Les quantiles apparaissant ci-dessous dans l'encart ne diffèrent que de 0,3 à 0,4 m/s.

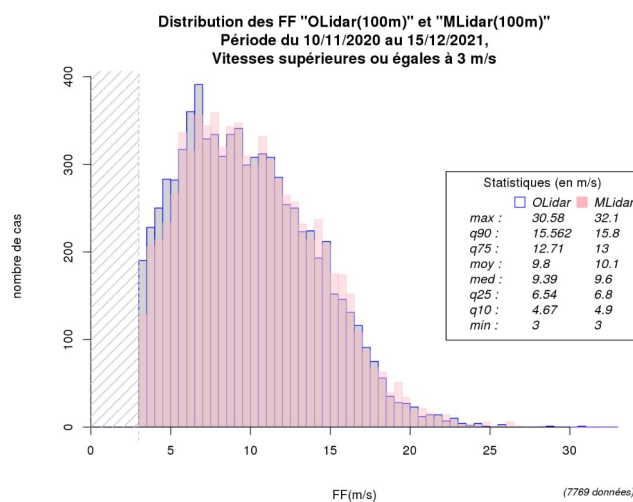


Illustration 15 : Distributions des vents horaires du LiDAR

Les distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100 m figurent en annexe 4.

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

Sur l'ensemble de la campagne, contrairement à ce qui avait été observé à la mi-campagne, aucun cycle diurne n'est réellement constaté. Les médianes horaires des observations et du modèle restent très proches des médianes de la période totale.

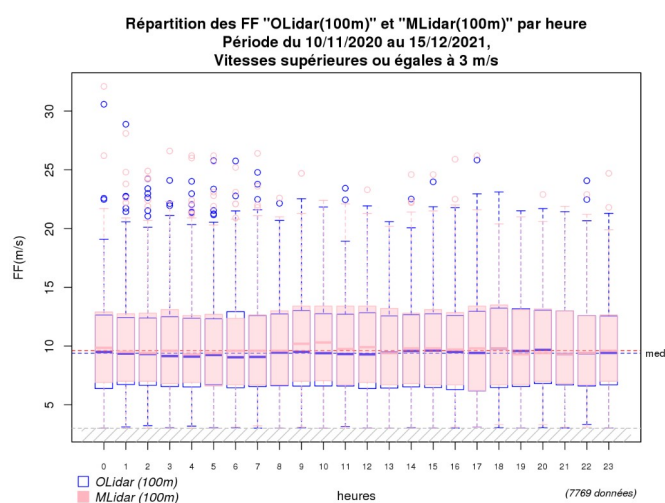


Illustration 16 : Répartitions horaires des forces du vent du LiDAR

Les répartitions horaires, par mois, des forces de vent du LiDAR à 100 m figurent en annexe 5.

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

On observe quelques disparités sur les répartitions mensuelles (cf. Illustration 17) qui s'expliquent par la climatologie mais aussi par les manques de données des mois de février, mars, juillet et août.

Au regard de la période étudiée, les mois de décembre 2020, février, mai et décembre 2021 ont été plutôt venteux tandis que les autres mois ont été conformes voire assez calmes, notamment de juin à septembre 2021.

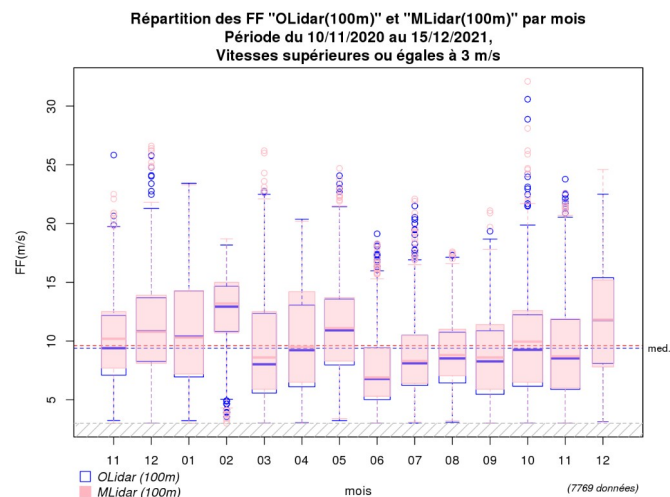


Illustration 17 : Répartitions mensuelles des forces du vent du LiDAR ; la largeur des boîtes à moustaches est fonction du nombre de données

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 de Gonneville (station de référence la plus proche du LiDAR).

Au regard de la climatologie, le mois de novembre 2020 a enregistré moins de vent modéré à fort que la normale mais un peu plus de vent fort. Les mois d'hiver 2020-2021 ont été assez contrastés avec un mois de décembre conforme à la normale, un mois de janvier globalement peu venteux et au contraire, un mois de février agité. Le début du printemps a été globalement assez calme avec durant les mois de mars et avril moins de vent modéré à fort que la normale. En revanche, le mois de mai a enregistré presque quatre fois plus de vent fort que la normale en raison d'un temps très perturbé. À partir de juin 2021, les mois ont été en moyenne assez calmes ou conformes aux normales de la période, excepté en octobre où les nombreuses perturbations ont apporté sur la région un temps agité.

Vitesses en m/s	nov	déc	jan	fév	mar	avr	mai	jui	jul	aoû	sep	oct	nov	déc	Total
> 8	12,4	20,5	20,4	20,8	17,0	9,1	8,0	5,6	4,2	4,1	6,4	9,2	12,4	20,5	12,2
	17,2	18,0	25,1	31,9	17,6	11,3	30,6	1,3	6,6	6,9	5,1	15,5	10,6	23,4	15,8
[4.5, 8.0[	42,2	43,0	42,7	42,1	41,3	37,4	38,1	35,7	36,0	34,0	35,6	40,3	42,2	43,0	39,5
	33,9	44,7	27,7	37,4	31,3	30,1	32,5	24,3	29,7	36,6	31,4	29,0	28,3	46,1	33,1
[1.5, 4.5[	41,4	32,7	33,6	33,4	38,3	47,4	49,5	53,7	54,4	55,8	52,2	44,7	41,4	32,7	43,7
	46,9	35,3	41,0	28,7	47,2	47,6	32,7	64,9	58,2	53,0	57,4	49,3	52,2	29,3	46
[0, 1.5[	4,0	3,8	3,3	3,7	3,4	6,1	4,4	5,0	5,4	6,1	5,8	5,8	4,0	3,8	4,6
	2,0	2,0	6,2	2,0	3,9	11,0	4,2	9,5	5,5	3,5	6,1	6,2	8,9	1,2	5,2

Tableau 4 : Statistiques 2001-2020 (en gras, en %) et valeurs 2020-2021 (en italique, en %) des forces de vent de la station de Gonneville ; 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 3.

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**).

Les roses des vents observés et modélisés du LiDAR sont très semblables. Elles présentent quelques légères différences (notamment une composante ouest un peu plus marquée pour le modèle) qui s'expliquent en grande partie par les données manquantes fin février à début mars puis en juillet et début août.

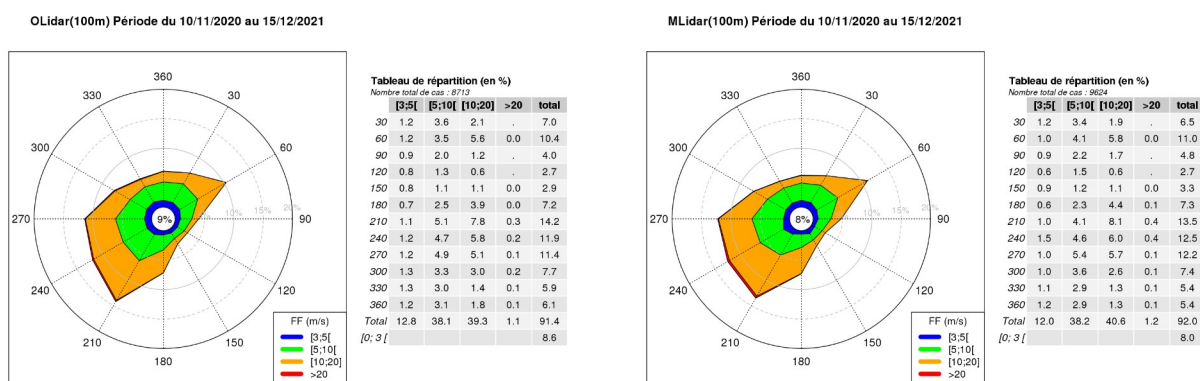


Illustration 18 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) du LiDAR

Le tableau de contingence détaillé, présentant les forces de vents du LiDAR par classes de 1m/s et par secteur de 30° figure en annexe 6.

Les roses des vents mensuelles élaborées à partir de toutes les données brutes **10 minutes** figurent en annexe 7.

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.**

Les profils horaires observés sur la couche allant de 40 m à 200 m sont parfaitement cohérents avec les profils modélisés. Les quantiles sont très proches.

Par ailleurs, on constate que durant la période de la campagne de mesure, les vitesses du profil moyen observé (profil bleu en pointillés) ont été légèrement inférieures (de l'ordre de 0,5 m/s) à celles du profil du vent moyen issu de la climatologie AROME sur 20 ans (profil vert en pointillés).

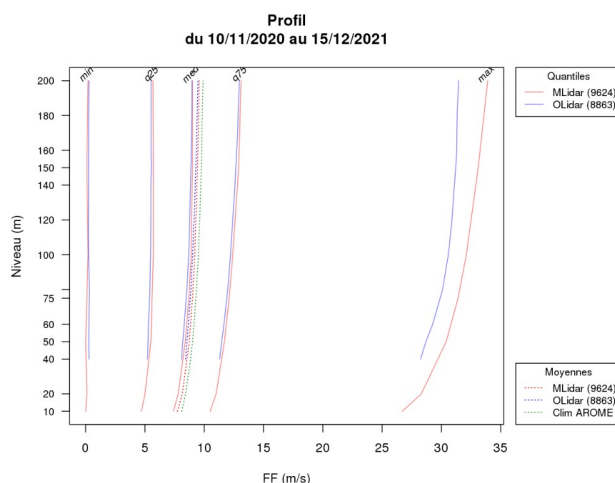


Illustration 19 : Profils des quantiles de vents du LiDAR (bleu), du modèle (rouge) et de la climatologie (verte).

Les profils, par mois, des forces de vent du LiDAR figurent en annexe 8.

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 assez net d'un peu moins de 1 m/s pour les directions de sud 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. On constate que les caractéristiques sont tout à fait comparables.

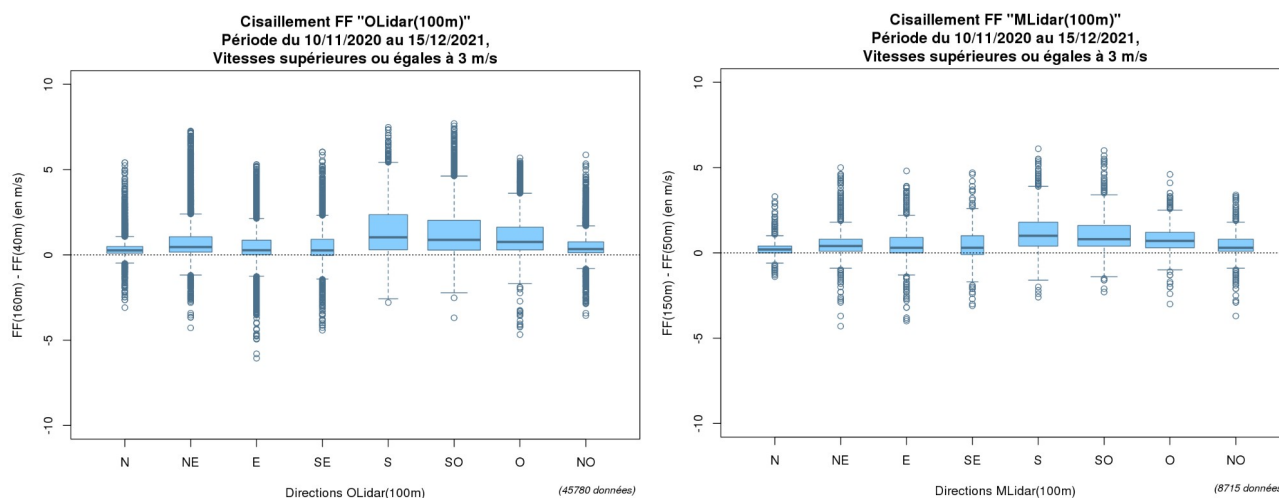


Illustration 20 : Cisaillement des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) du LiDAR

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-dessous) 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 5 : 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 du coefficient α (inférieures à 0,05) correspondent aux situations non perturbées. Pour les vents de secteur sud à sud-ouest, où le coefficient α est le plus fort, on constate sur la période d'étude, un léger cycle diurne avec des valeurs en moyenne un peu plus fortes durant la nuit. Par ailleurs, pour les vents de secteur nord-est à sud-est, où le coefficient α est plus faible, on note que ce cycle diurne est assez marqué.

Ce phénomène de cisaillement (quand il existe) est globalement un peu plus fort la nuit que le jour.

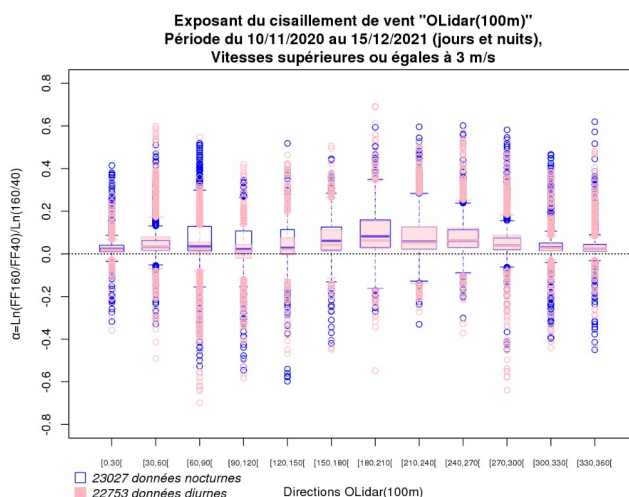


Illustration 21 : Exposant du cisaillement de vent du LiDAR

Les figures de l'exposant du cisaillement sur les périodes mensuelles se trouvent en annexe 9.

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 :

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

Sur la période de la campagne de mesures, on constate que les vents de secteur nord-ouest à nord-nord-est présentent une IT plus forte que pour les autres directions avec une valeur avoisinant 0,13. Pour les autres secteurs, l'IT est comprise entre 0,08 et 0,10 (cf. Illustration 22).

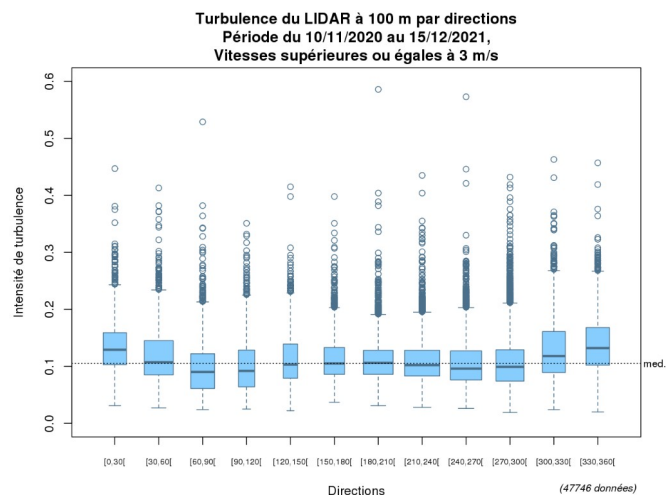


Illustration 22 : Turbulence du LiDAR

Les boîtes à moustaches mensuelles suivant les directions, de l'intensité de turbulence du vent du LiDAR à 100 m figurent en annexe 10.

3.3.2.9 Séries horaires FF et FXI à 100 m

Les séries horaires FF (vent moyen observé **ou estimé**) et FXI (vent maximal calculé) sont très cohérentes.

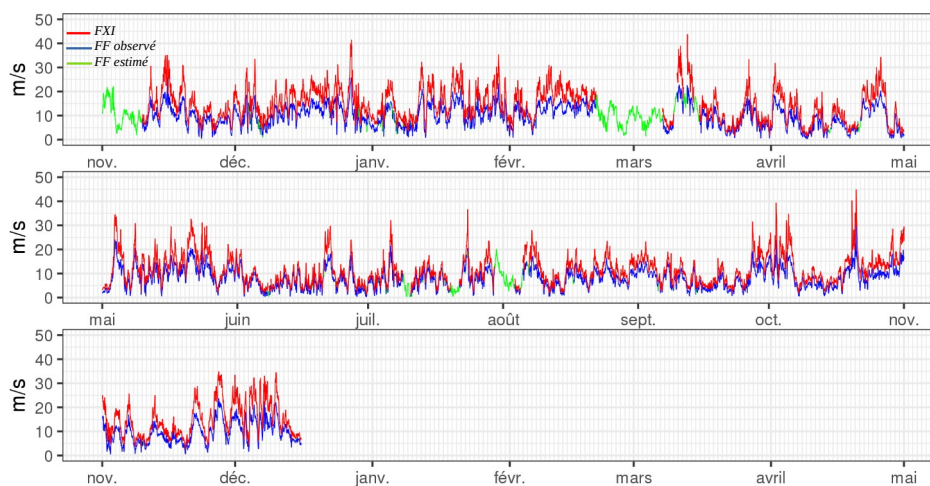


Illustration 23 : Séries FF et FXI à 100 m du LiDAR

Météo-France fournit au travers du fichier « SerieLidarH100_Barfleur_20201101-20211215.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 01/11/2020 au 15/12/2021. Ces paramètres sont accompagnés des codes qualité QFF, QDD et QFXI (cf. §2.3.1.3 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 §2.3.1.2 p9).

Environ 7 % des valeurs enregistrées par l'anémomètre sort des seuils de force. Ce qui est nettement plus important que pour le LiDAR. Mais ce constat s'explique par un environnement de mesures non optimal que pour les données de vent à 100 m.

Les dépassements du seuil de direction sont assez nombreux. Mais les trois quarts de ces dépassements correspondent à des forces plutôt faibles, inférieures à 5 m/s.

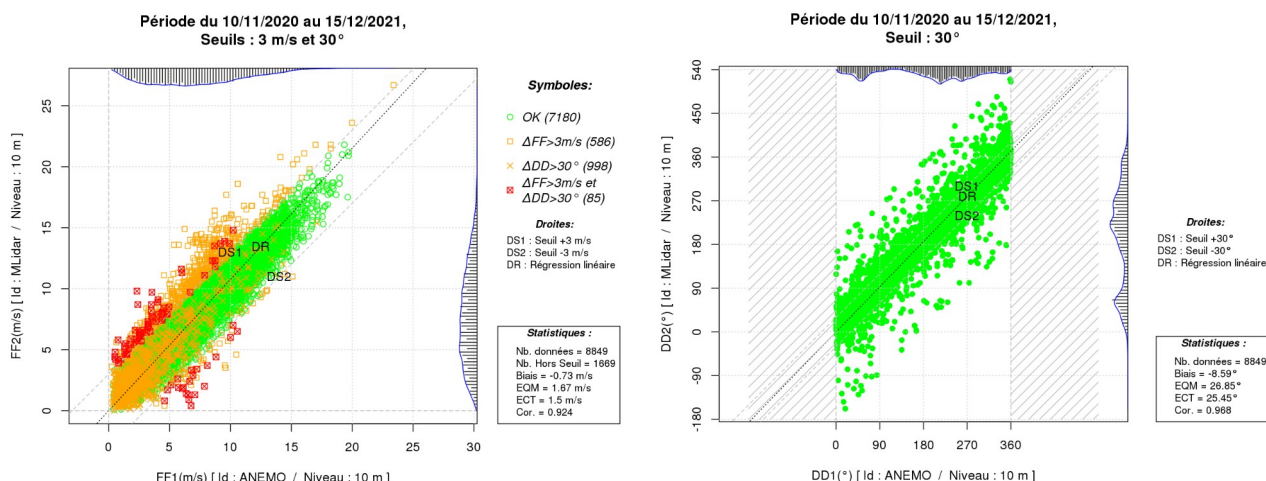


Illustration 24 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) de l'anémomètre avec le modèle

Les distributions statistiques horaires des observations et du modèle à 10 m sont assez proches. Les quantiles apparaissant ci-dessous ne diffèrent que de 0,4 à 0,9 m/s. Le diagramme « quantile-quantile » des forces de vent de l'anémomètre présente une dissymétrie (visible à partir du quantile 20), indiquant une légère surestimation du modèle par rapport à l'observation. Les résultats de l'anémomètre sont donc corrects mais ne sont pas parfaits.

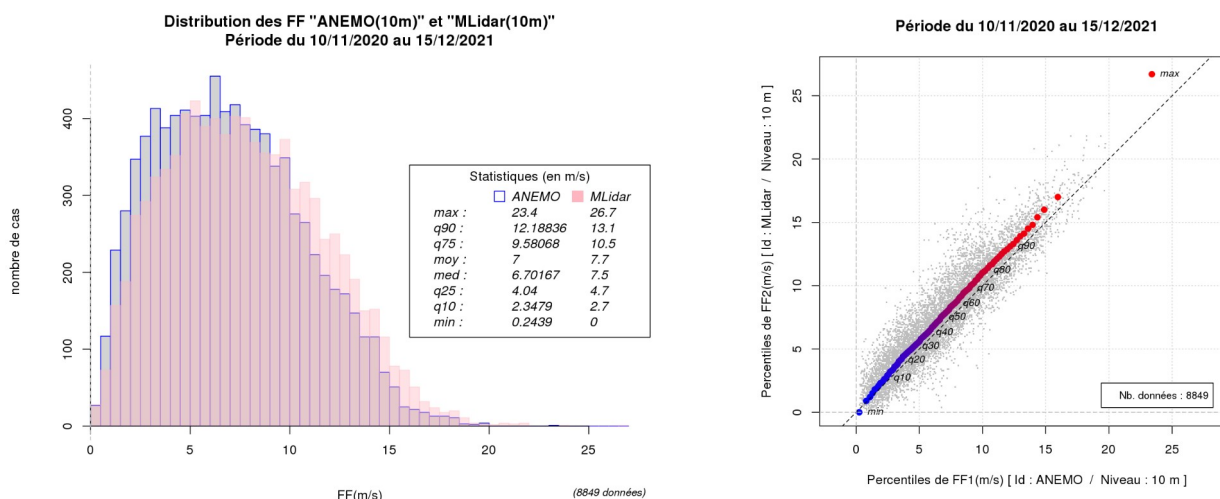


Illustration 25 : Distribution des vents horaires de l'anémomètre (à gauche) et diagramme « quantile-quantile » (à droite)

La rose des vents de l'anémomètre est très comparable à celle du modèle AROME à 10 m. Elle présente toutefois quelques petites différences, notamment une composante nord-est légèrement plus faible que le modèle et surtout un peu plus de vent calme.

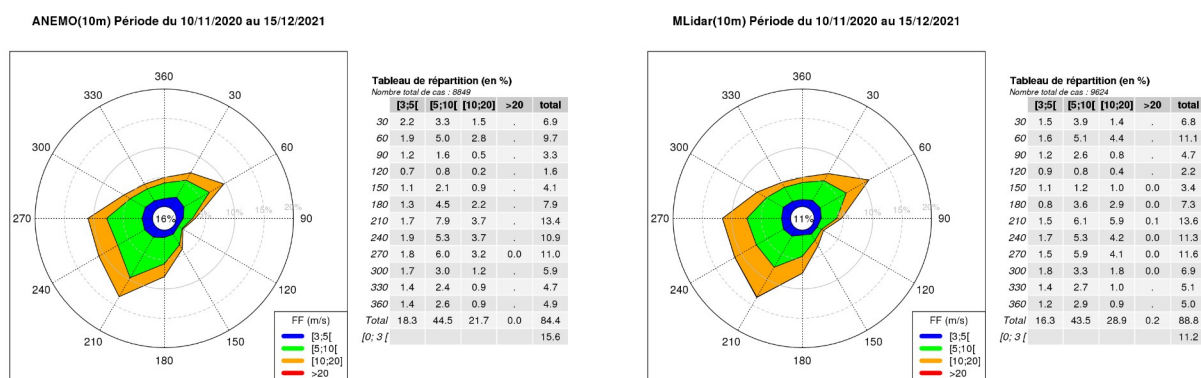


Illustration 26 : Roses des vents observées (à gauche) et modélisées (à droite) de l'anémomètre

5 Conclusions

Durant la période des quatorze mois de campagne, nous avons pu établir que les mesures de vent de surface et d'altitude, effectuées sur la zone d'étude au large de Barfleur, étaient tout à fait cohérentes avec les données du modèle 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.

Suite à ce contrôle, des séries complètes de vent horaires à 100 m ont pu être créées et estimées sur quelques périodes manquantes (notamment sur la période du 20 février au 9 mars, plus ponctuellement courant juillet et enfin début août).

6 Bibliographie

Chatel, V., Dalphiné, A., Merle, R., Mezdoor, A., Rouchy, N., Roule, O., Joly B., Poupponeau 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 du 26 au 27 décembre 2020 (tempête « Bella »).....	35
Annexe 2 : Situation météorologique des 20 et 21 octobre 2021.....	37
Annexe 3 : Climatologie du 1 ^{er} novembre 2020 au 15 décembre 2021.....	38
Annexe 4 : Distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	47
Annexe 5 : Répartitions horaires par mois des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	50
Annexe 6 : Tableau de contingence des forces de vent du LiDAR.....	53
Annexe 7 : Roses des vents mensuelles du LiDAR à 100m (données brutes).....	54
Annexe 8 : Profils de vent du LiDAR.....	57
Annexe 9 : Cisaillement du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	60
Annexe 10 : Turbulence du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	63

Annexe 1 : Situation du 26 au 27 décembre 2020 (tempête « Bella »)

Une profonde dépression à 960hPa, dénommée Bella, est positionnée au nord de l'Écosse au cours du week-end des 26 et 27 décembre 2020 générant un rapide flux de sud-ouest. Ce flux vire au secteur ouest à nord-ouest après le passage de la perturbation associée en cours de matinée du dimanche tout en mollissant très rapidement.

La période de vents les plus forts, dont l'intensité était voisine des 25 à 30 m/s, reste toutefois limitée à quelques heures tout au plus en fin de nuit du dimanche 26 au lundi 27 décembre 2020.

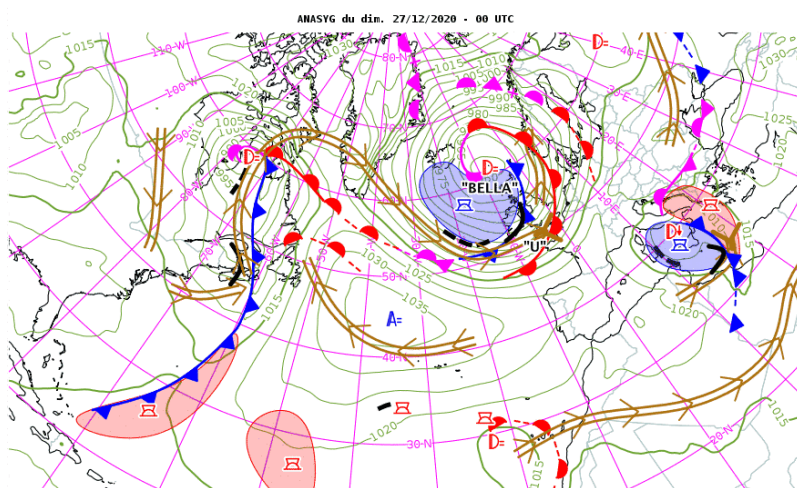


Illustration 27 : ANASYG du dimanche 27 décembre 2020 à 00H UTC

Tout au long de la journée du dimanche 26 décembre, on constate une augmentation très régulière de la force du vent pour atteindre son paroxysme en milieu de nuit du dimanche au lundi. À la bouée LiDAR, les vents atteignent alors des valeurs de 25 à 27 m/s, très légèrement en dessous du seuil de la tempête, et ce pendant quelques heures tout au plus. Après le passage du front froid, la vitesse du vent chute brutalement pour se stabiliser aux alentours des 10 à 15 m/s dans la traîne.

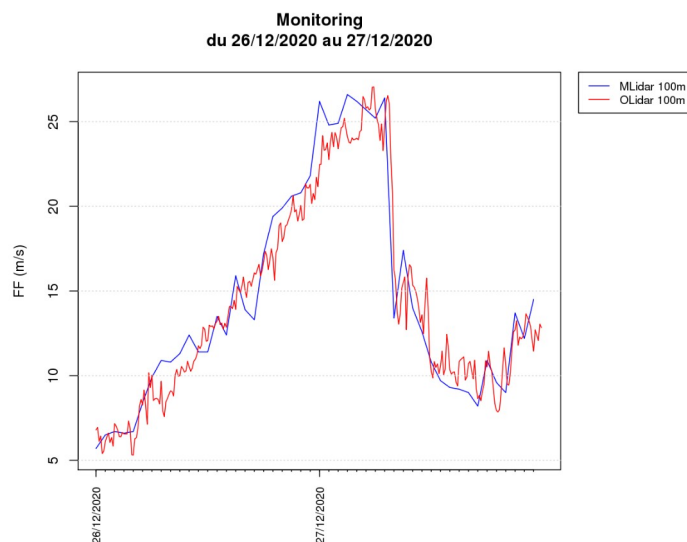
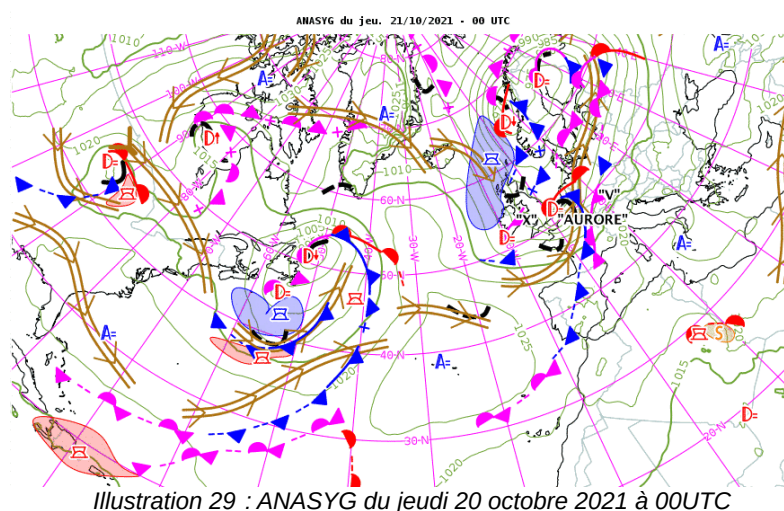


Illustration 28 : Comparaison des mesures LiDAR avec le modèle AROME pour le site de Barfleur les 26 et 27 décembre 2020

On notera une très bonne corrélation entre les observations et les sorties du modèle AROME sur ce site lors de l'arrivée progressive de la tempête le dimanche, au passage de la perturbation en deuxième partie de nuit puis dans la traîne dans la journée du lundi. Ceci est vrai, non seulement en matière d'intensité mais également au niveau temporel. Tout juste peut-on remarquer un léger décalage d'1 m/s en moins dans les observations par rapport au modèle AROME pendant quelques heures lors de la montée en puissance du vent. Ceci peut néanmoins être dû à la résolution temporelle des observations, bien meilleure que celle du modèle.

Annexe 2 : Situation météorologique des 20 et 21 octobre 2021

Un très rapide flux perturbé se met en place à partir du 20 octobre après-midi, générant au passage très rapide de la dépression « Aurore » circulant juste au nord de la Manche, des vents de plus en plus forts de secteur sud-sud-ouest basculant au secteur ouest après le passage du front.



A terre, au poste de Gonneville (50), les pics d'intensité sont observés juste avant le passage du front froid en début de nuit du 20 au 21 octobre 2021 (pic à 23.5 m/s – 85 km/h) puis juste après son passage en milieu de nuit (30.9 m/s – 111 km/h).

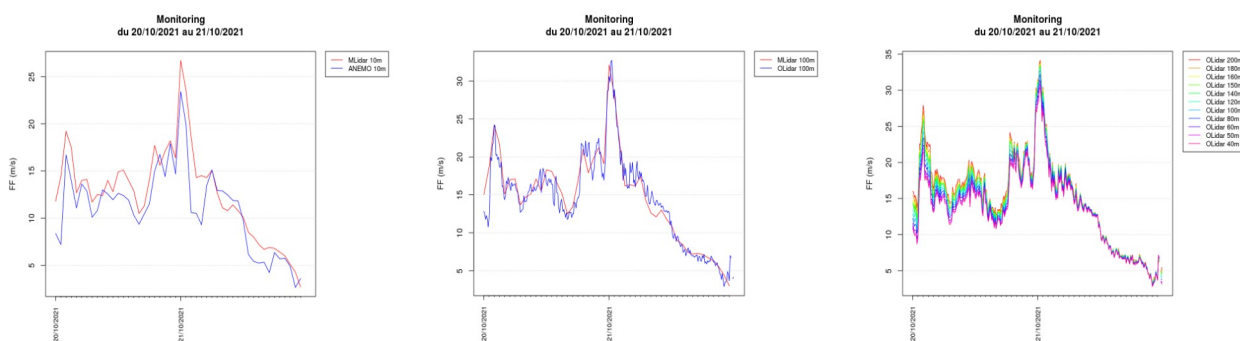


Illustration 30 : A gauche : comparaison des mesures de l'anémomètre à 10 mètres avec le modèle AROME ;
 Au centre, comparaison des mesures du LiDAR à 100 mètres avec le modèle AROME ;
 A droite : visualisation des vents mesurés par le LiDAR à différentes hauteurs entre 40 et 200 mètres

On notera une excellente corrélation entre les observations et les sorties du modèle AROME sur l'ensemble de la période tant à 10 mètres qu'à 100 mètres.

Annexe 3 : Climatologie du 1^{er} novembre 2020 au 15 décembre 2021

La station météorologique de référence choisie pour qualifier la climatologie de la zone étudiée est située à Gonneville (50). La période sur laquelle portent les statistiques s'étend de 2001 à 2020.

1) Le vent

a) Analyse de la fin d'automne 2020 (mois de novembre)

Le mois de novembre 2020 est caractérisé par une nette prédominance des vents de secteur sud à sud-sud-ouest, puis des vents d'ouest-sud-ouest, enfin des vents d'est dans une moindre mesure. Cette répartition ne correspond pas à celle habituellement rencontrée sur la période 2001-2020 où le vent provenant du nord-est est quasiment absent. Autre anomalie, les vents ont soufflé soit plus souvent (+4%) fortement (au-dessus de 8.0 m/s), soit plus souvent faiblement (+4% de vent calme à 4.5 m/s). Les vents modérés (entre 4.5 et 8.0 m/s) ont été moins fréquents en cette année 2020 (-8%).

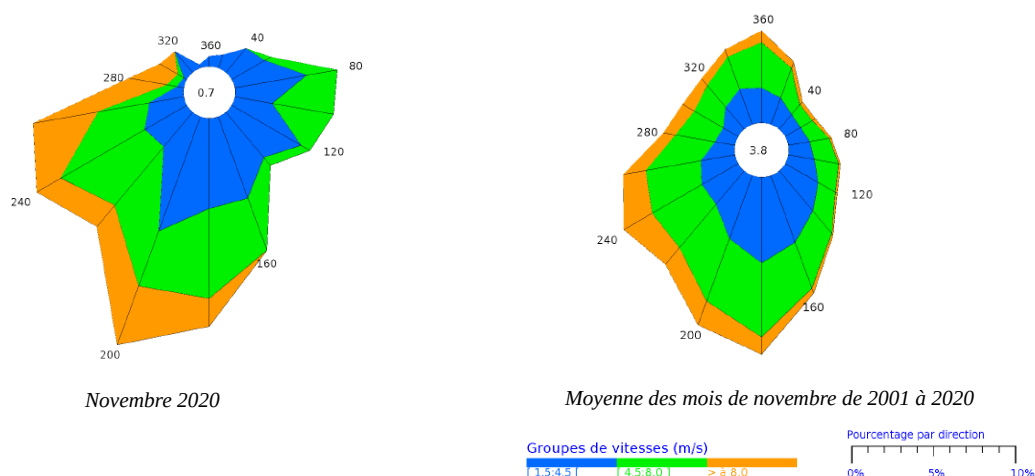


Illustration 31 : Roses des vents du mois de novembre de la station de Gonneville (50)

b) Analyse de l'hiver 2020-2021

Au cours des trois mois de l'hiver météorologique (décembre, janvier et février), les roses de vent moyennées montrent quelques différences avec la situation des 20 dernières années :

- plus grande prédominance des vents de secteur nord et sud ;
- plus faible prédominance des vents de sud-est ;
- des vents un peu plus forts (+4.1 % pour des forces supérieures à 8.0 m/s) au détriment des vents moyens (-5.7 % pour des forces comprises en 4.5 et 8.0 m/s).

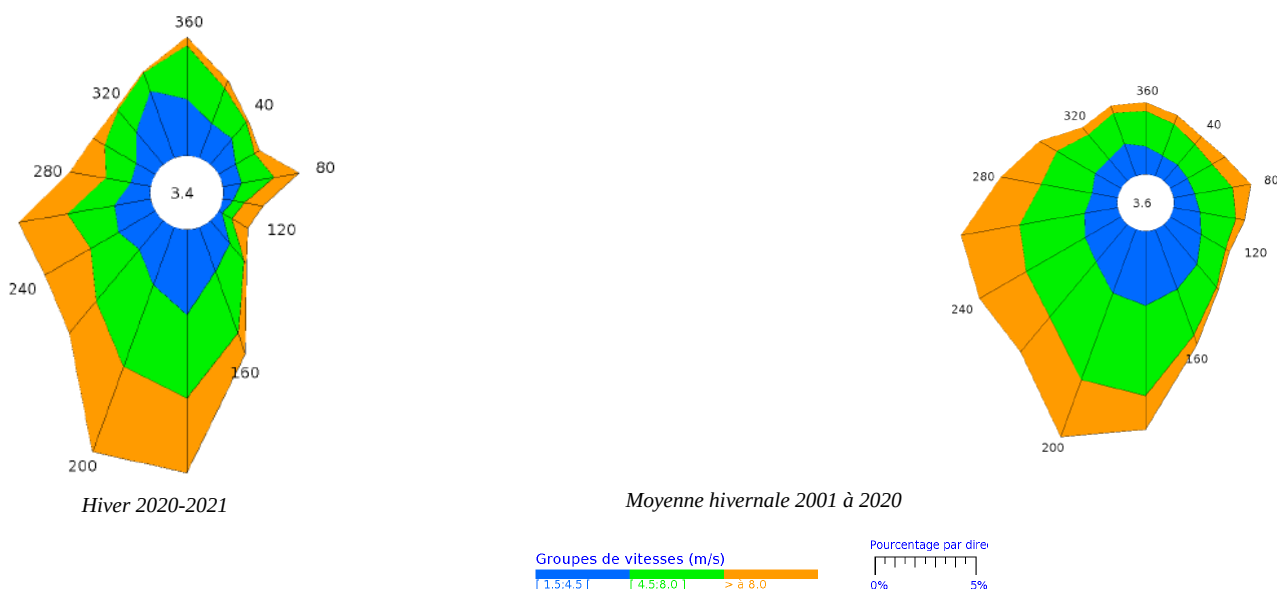


Illustration 32 : Roses des vents hivernales de la station de Gonneville (50)

c) Analyse du début du printemps 2021

Pendant les trois mois printaniers s'étendant de mars à mai 2021, on observe bien les directions habituellement rencontrées sur la période 2001-2020, à savoir du sud-ouest à l'ouest d'une part, du nord-est d'autre part mais avec certaines différences notables :

- les vents venant du 240 au 280° sont légèrement moins fréquents en 2021 avec une récurrence de 21.4 %, soit -2.4 % par rapport aux normales mais leur intensité est bien plus élevée. Ainsi, on a observé dans près de la moitié des cas (10.5%) des vents très forts supérieurs à 8.0 m/s, soit dans +5.9 % des cas ;
- ceux provenant du secteur 060° à 080° sont près de deux fois plus nombreux que la normale (20.8 %, soit +8.8%) mais leur intensité n'est pas plus forte ;
- enfin, le secteur 120° à 160° est plus rare en 2021 (5.4 % au lieu de 11.5 % habituellement) sans que les intensités ne soient modifiées.

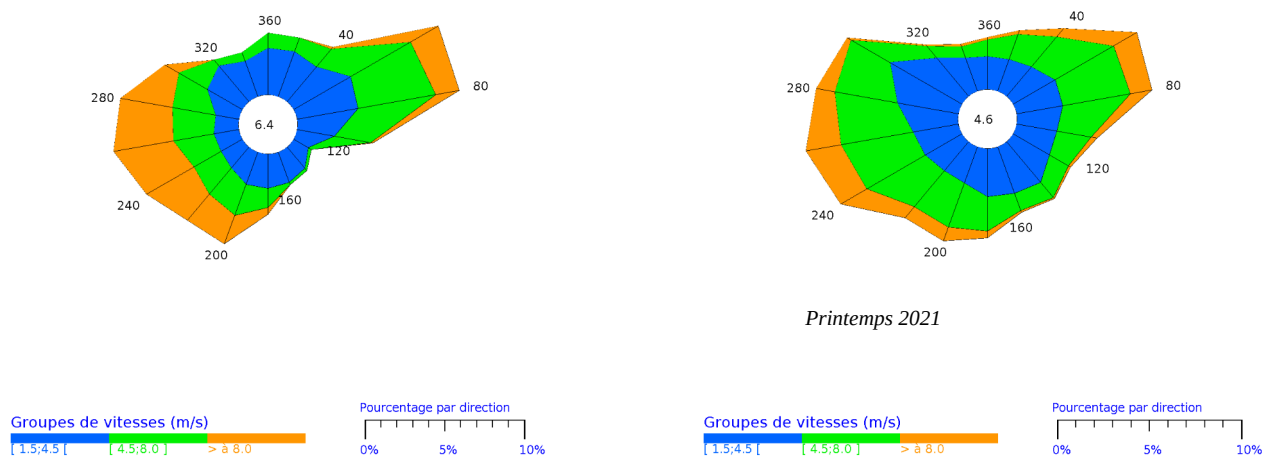


Illustration 33 : Roses des vents printanières de la station de Gonnevill (50)

d) Analyse de l'été 2021

Au cours des trois mois d'été (juin à août 2021), on retrouve à nouveau les deux orientations classiques ouest à sud-ouest d'une part, nord-est à est d'autre part. Si les intensités sont restées globalement proches des normales, des différences parfois notables apparaissent cependant pour ce qui est de la direction :

- les directions du 240° au 300° ont été observées dans 39.2 % des cas, soit un déficit de 4.0 %. Cette baisse de fréquence est cependant principalement due à la direction 280° enregistrée dans 7.4 % des cas, soit -3.2 % par rapport à la normale ;
- du 040° au 100°, la différence de fréquence est bien plus notable. En effet, l'année 2021 a vu ces directions observées dans 22.6 % des cas, soit +8.2 % par rapport à la période 2001-2020 !

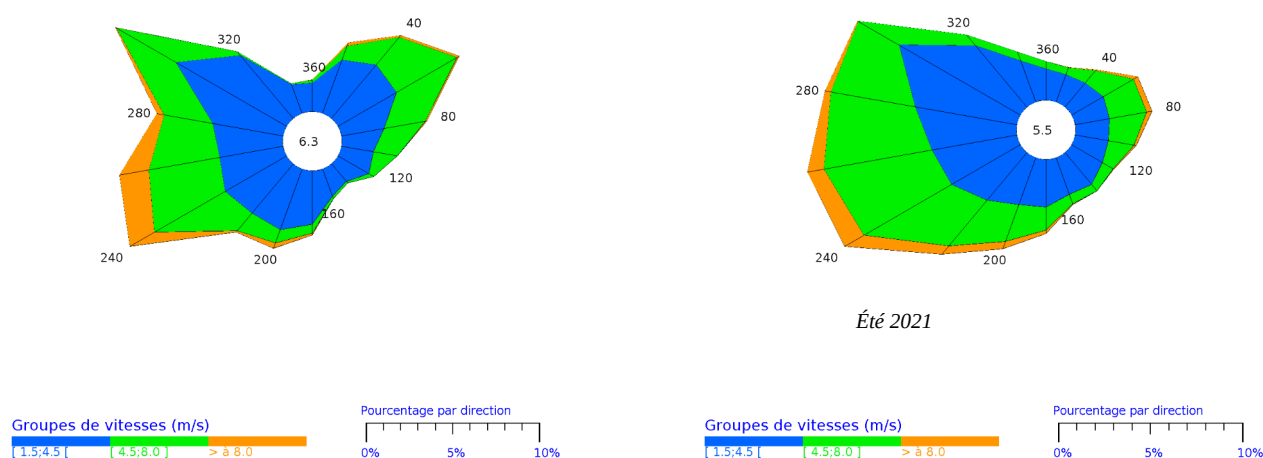


Illustration 34 : Roses des vents estivales de la station de Gonneville (50)

e) Analyse de l'automne 2021

Habituellement, cette saison est relativement équilibrée en termes de fréquence entre les directions 160° à 280°, les plus fréquentes (5.4 % à 8.5%) et les autres directions (2.9 % à 4.9%).

Lors de l'automne 2021, ce sont les vents de secteur sud-est qui ont été notoirement déficitaires. Ainsi, les directions comprises entre le 100° et le 140° ont été observées dans 6.3 % des cas soit une baisse de 6.3 % par rapport aux vingt dernières années ! De même, leur intensité a baissé pour privilégier les vents modérés (1.5 à 4.5 m/s) au lieu des vents assez forts (4.5 à 8.0 m/s).

À l'inverse, on remarque un léger sursaut de la fréquence pour les directions du 180° au 200° qui ont été enregistrées dans 19.5 % des cas (+2.8%).

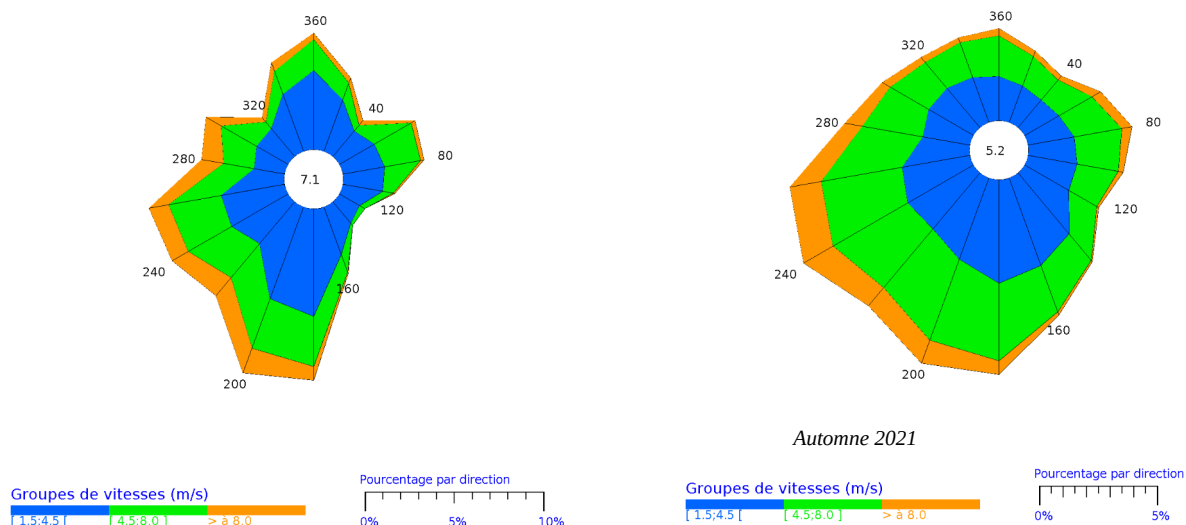


Illustration 35 : Roses des vents automnales de la station de Gonneville (50)

f) Analyse du début de l'hiver 2021 (mois de décembre)

Au cours d'un mois de décembre habituel, ce sont les vents venant du sud au sud-ouest qui sont les plus fréquents, toutes les autres directions pouvant être observées de façon plus ou moins équivalente.

En décembre 2021, les vents venant du 180° ou 200° ont représenté près d'un tiers des cas (29%) soit une augmentation de 7.6 % pour ces deux seules directions !

Autres directions à distinguer, les 080° et 100° observés dans 15.6 % des cas au lieu de 7.4 % sur la période 2001-2020, soit une augmentation notable de 8.2 % !

A l'opposé, les directions comprises entre le 360° et le 060° ont pratiquement disparu en 2021 avec 2.4 % des cas enregistrés contre 10.9 % habituellement, soit une baisse de 8.5 %.

Côté intensités, les vents ont soufflé un tout petit peu moins fortement, par contre, il n'y a pratiquement pas eu de vents calmes (0.8 %, soit une baisse de 3.3%).

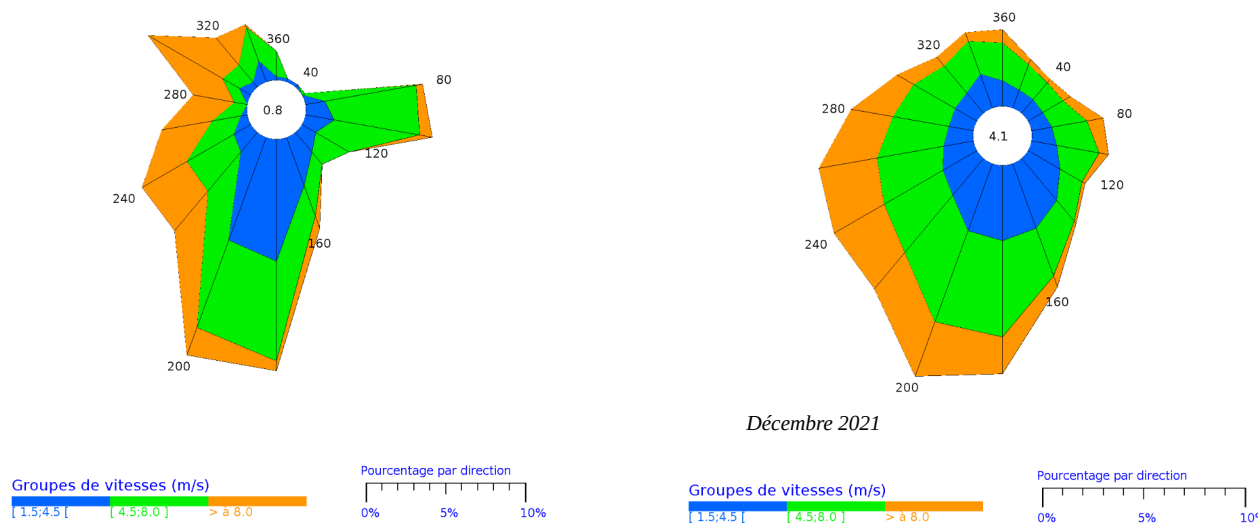


Illustration 36 : Roses des vents de décembre de la station de Gonneville (50)

2) Les températures

En dehors des mois d'avril, mai et août 2021, où les températures enregistrées ont été bien basses pour la période (jusqu'à -1.0°C pour les maximales en avril et -0.8°C en août, près de -2°C pour les minimales toujours en avril et -1.1°C en mai) et d'un mois de janvier conforme aux normales, tous les autres mois de la période ont été très doux, notamment côté maximales. Novembre 2020 mais également décembre 2021 ont ainsi enregistré des températures minimales 1.7°C au-dessus des normales, ce qui est considérable pour un site maritime. Côté températures maximales, l'anomalie positive atteint même les 2.0°C ! On notera que la prédominance du flux d'ouest en cette fin d'année 2020 puis à nouveau sur la fin 2021 explique cette anomalie positive.

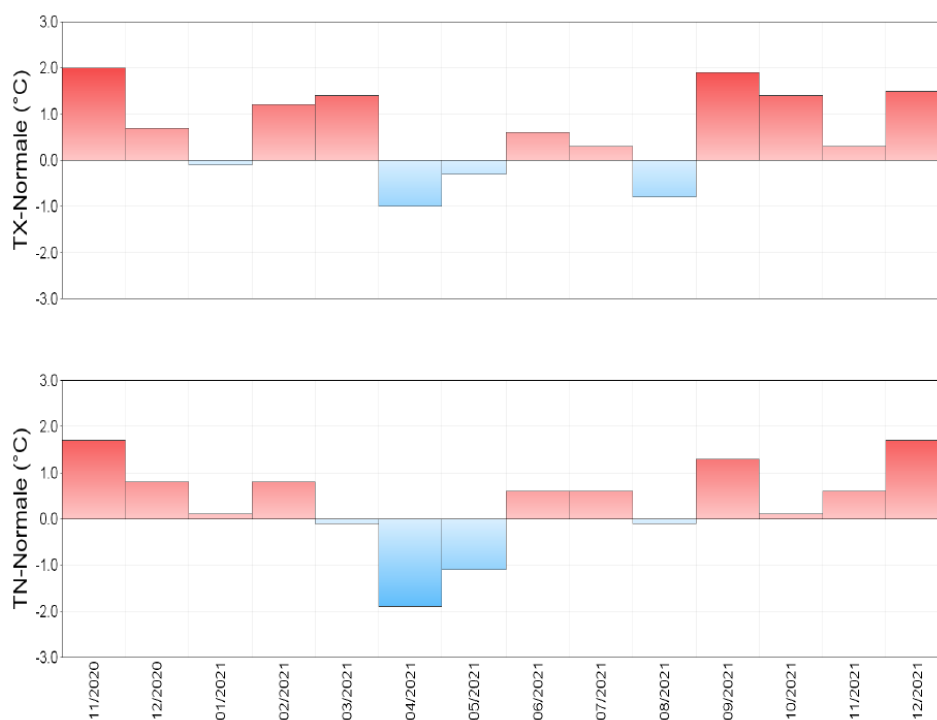


Illustration 37 : Anomalies mensuelles de températures minimales et maximales de novembre 2020 à décembre 2021 à la station du Gonneville - Période de référence : 1981 - 2010

3) Les précipitations

La période comprise entre novembre 2020 et décembre 2021 a connu une alternance spectaculaire de mois secs à très secs et de mois très arrosés.

Ainsi, décembre 2020 puis janvier 2021 ont enregistré de fortes précipitations, jusqu'au double des normales, autour des 200 mm par mois. Mais, en termes d'anomalies, c'est le mois de juin 2021 qui est sans conteste impressionnant avec un excès de précipitations qui est plus du triple de la valeur normale avec 151.0 mm mesurés au lieu de 49.1 mm en temps normal, ceci constituant un record pour un mois de juin depuis l'ouverture du poste en 1956 !

Inversement, novembre 2020 avec près de 80 mm mais surtout février, mars et avril 2021 n'ont vu tomber que quelques dizaines de mm par mois (15 à 30 mm environ), soit entre la moitié (en février et mars) et le quart (en avril) des quantités normalement attendues. Pour de mêmes anomalies de précipitations, les mois de septembre et novembre ont recueilli, cette fois 40 et 60 mm environ.

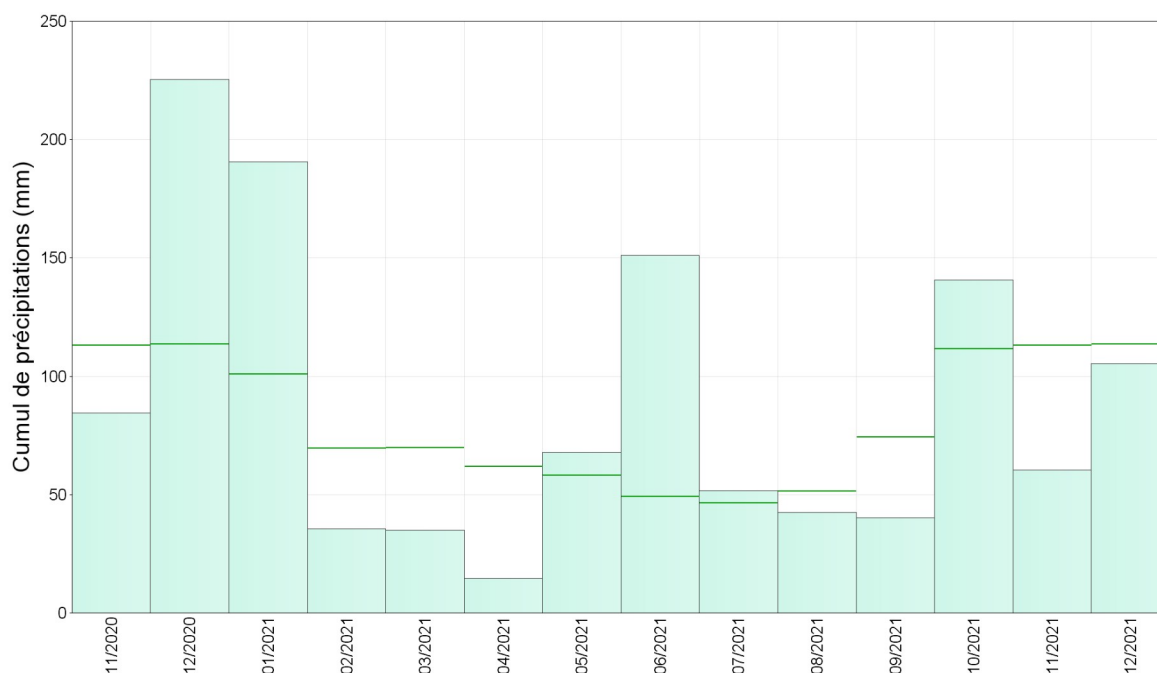


Illustration 38 : Cumuls mensuels de précipitations de novembre 2020 à décembre 2021 à la station de Gonnevillle (histogrammes en bleu) et normale de précipitations (segments en vert) - Période de référence : 1981 - 2010

Pour chacun des mois du semestre étudié, voici les valeurs de précipitation les plus notables :

- novembre 2020 : 24.8 mm le 15, cumul de 37.6 mm du 14 au 15
- décembre 2020 : 40.5 mm le 3, cumul de 83.6 mm du 3 au 5, cumul de 130.3 mm du 3 au 11
- janvier 2021 : 39.3 mm le 5, cumul de 74.9 mm du 3 au 6
- février 2021 : 5.8 mm le 4
- mars 2021 : 11.8 mm le 12
- avril 2021 : 6.6 mm le 10
- mai 2021 : 13.1 mm les 23 et 25
- juin 2021 : 24.5 mm le 20, cumul de 62.5 mm du 20 au 22
- juillet 2021 : 9.9 mm le 5
- août 2021 : 9.7 mm le 8, cumul de 26.2 mm du 8 au 10
- septembre 2021 : 34.4 mm le 31
- octobre 2021 : 23.1 mm le 1^{er}, cumul de 71.6 mm du 1^{er} au 4
- novembre 2021 : 13.9 mm le 1^{er}
- décembre 2021 : 25.4 mm le 3

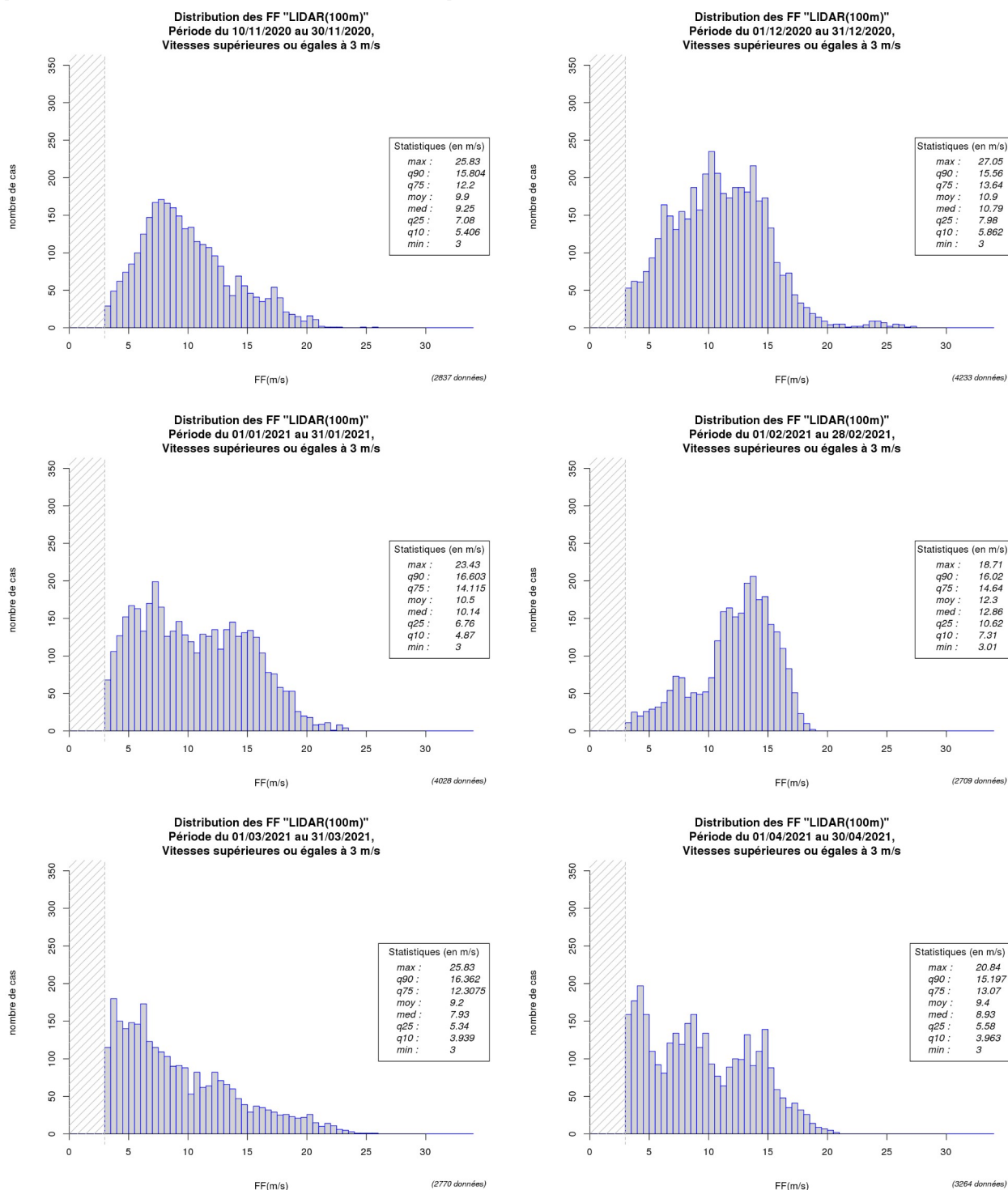
4) Les vents forts

Au cours de la période comprise entre le 1^{er} novembre 2020 et le 31 décembre 2021, voici les épisodes de vent les plus forts (supérieurs à 27.0 m/s) enregistrés au point de mesure de Gonneville (50) :

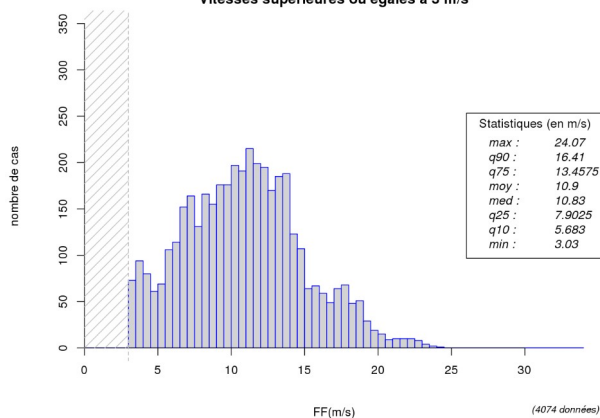
- 34.3 m/s le 27 décembre 2020
- 30.9 m/s le 20 octobre 2021
- 30.8 m/s le 21 octobre 2021
- 29.7 m/s le 11 mars 2021
- 28.8 m/s le 2 octobre 2021
- 27.7 m/s le 13 mars 2021
- 27.2 m/s le 12 mars 2021

Deux des événements passés sont traités dans une fiche de synthèse spécifique, la tempête du 27 décembre 2020 (cf. annexe 1) et celle des 20-21 octobre 2021 (cf. annexe 2).

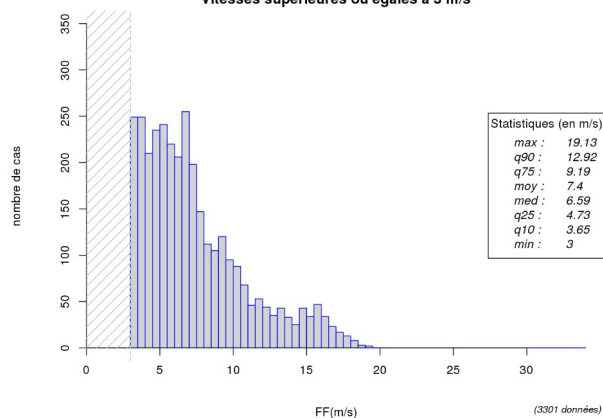
Annexe 4 : Distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)



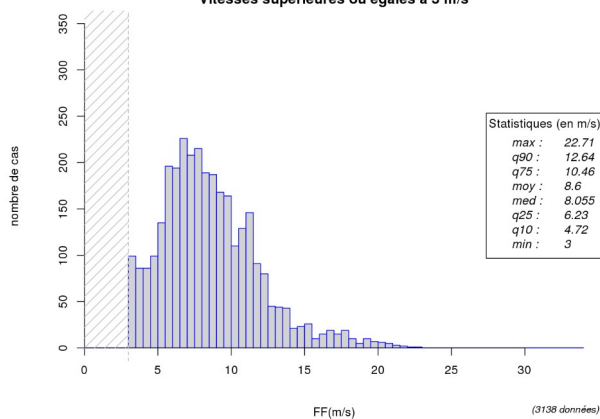
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/05/2021 au 31/05/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



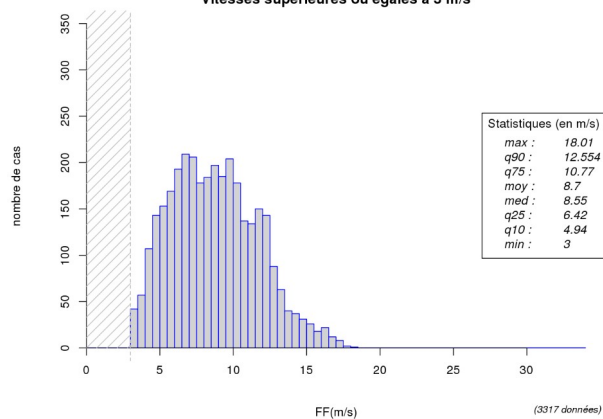
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/06/2021 au 30/06/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



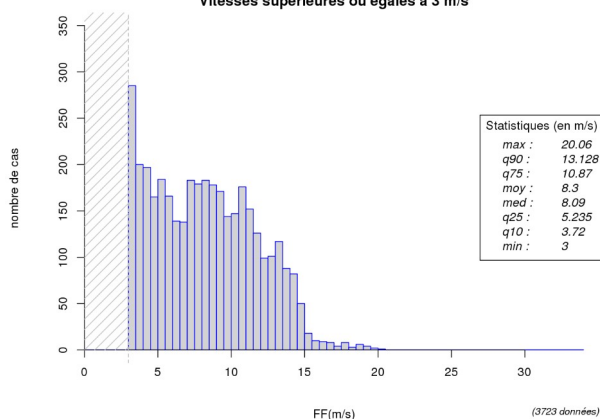
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/07/2021 au 31/07/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



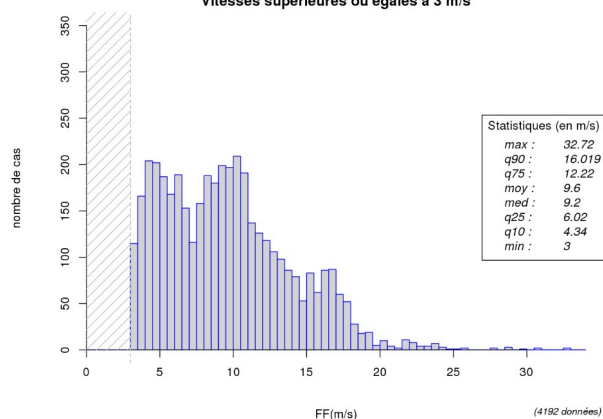
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/08/2021 au 31/08/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s

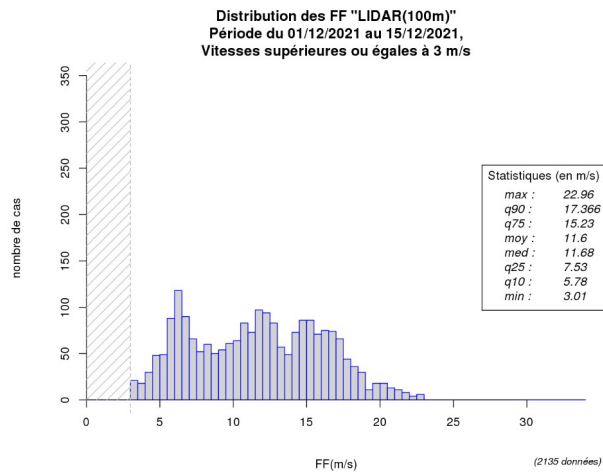
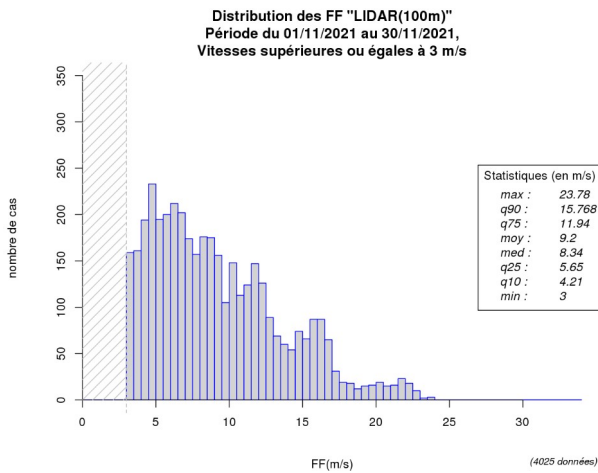


Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/09/2021 au 30/09/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s

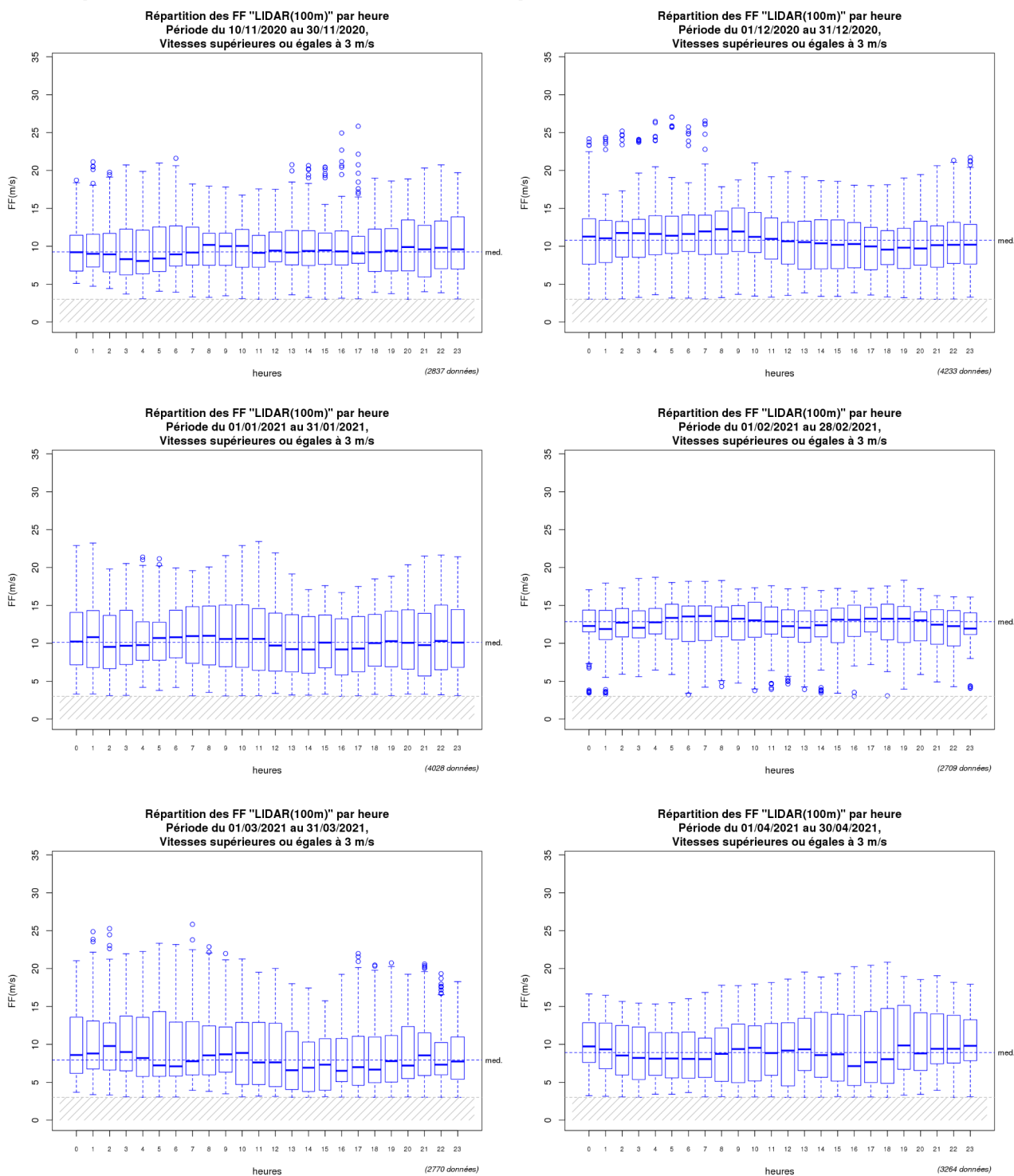


Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/10/2021 au 31/10/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s

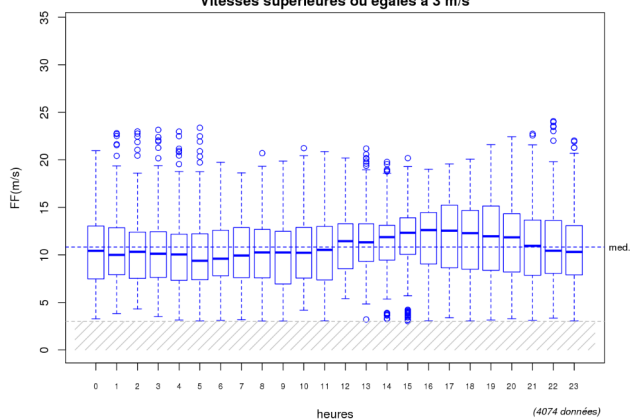




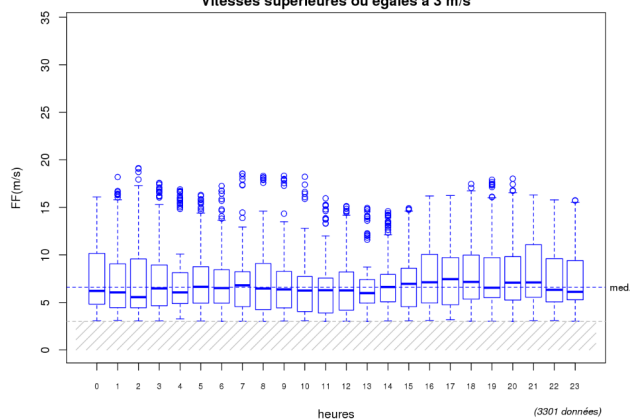
Annexe 5 : Répartitions horaires par mois des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)



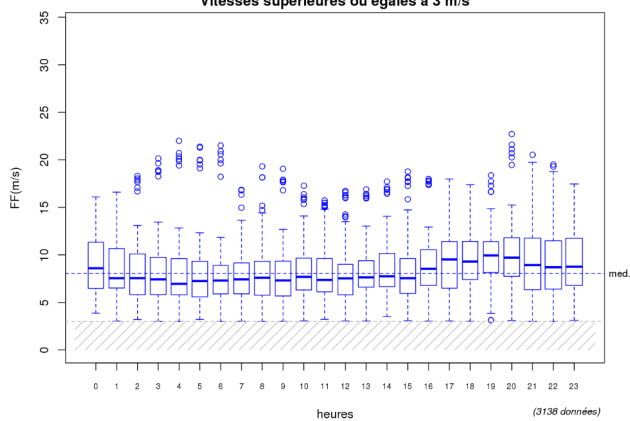
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/05/2021 au 31/05/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



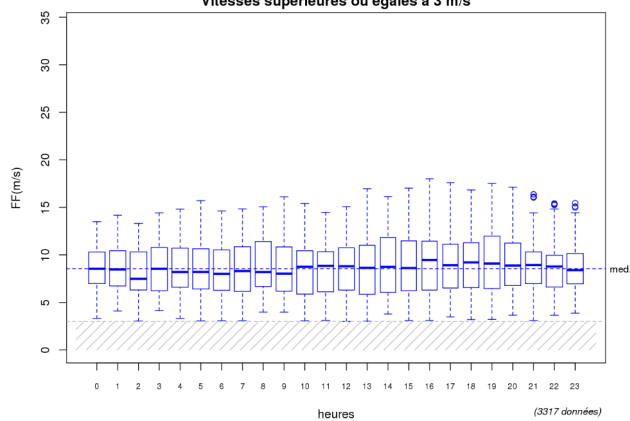
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/06/2021 au 30/06/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



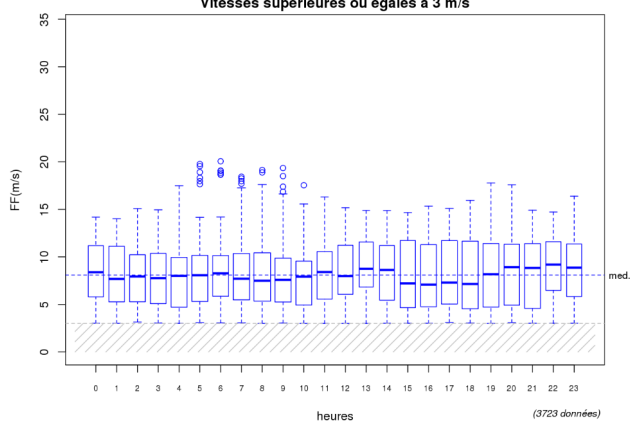
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/07/2021 au 31/07/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



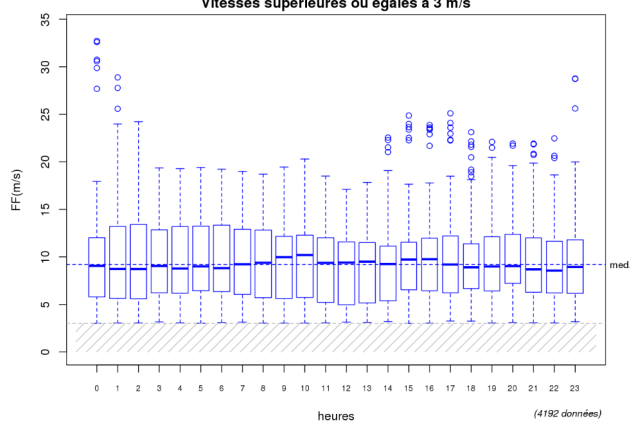
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/08/2021 au 31/08/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s

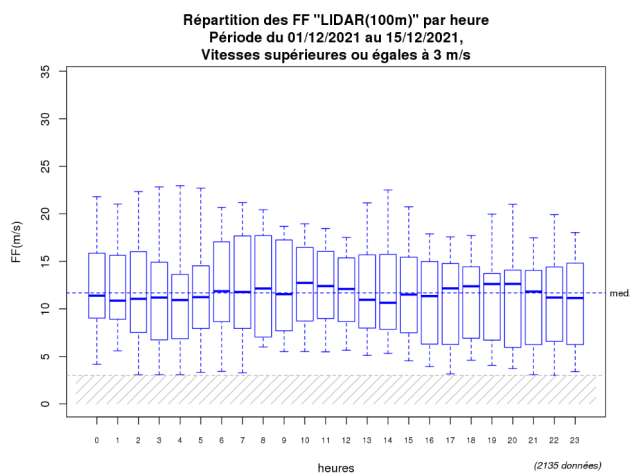
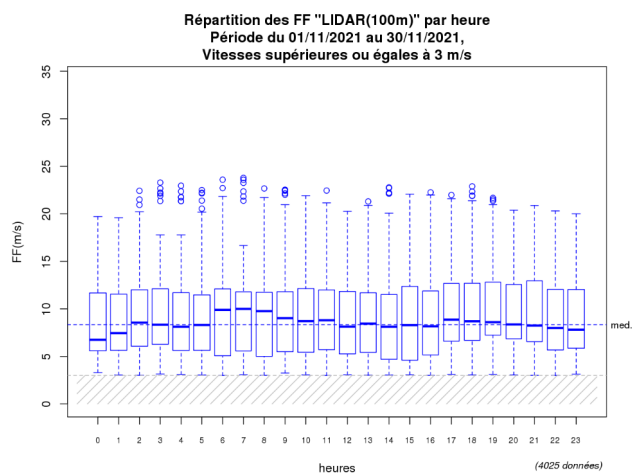


Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/09/2021 au 30/09/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



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





Annexe 6 : Tableau de contingence des forces de vent du LiDAR

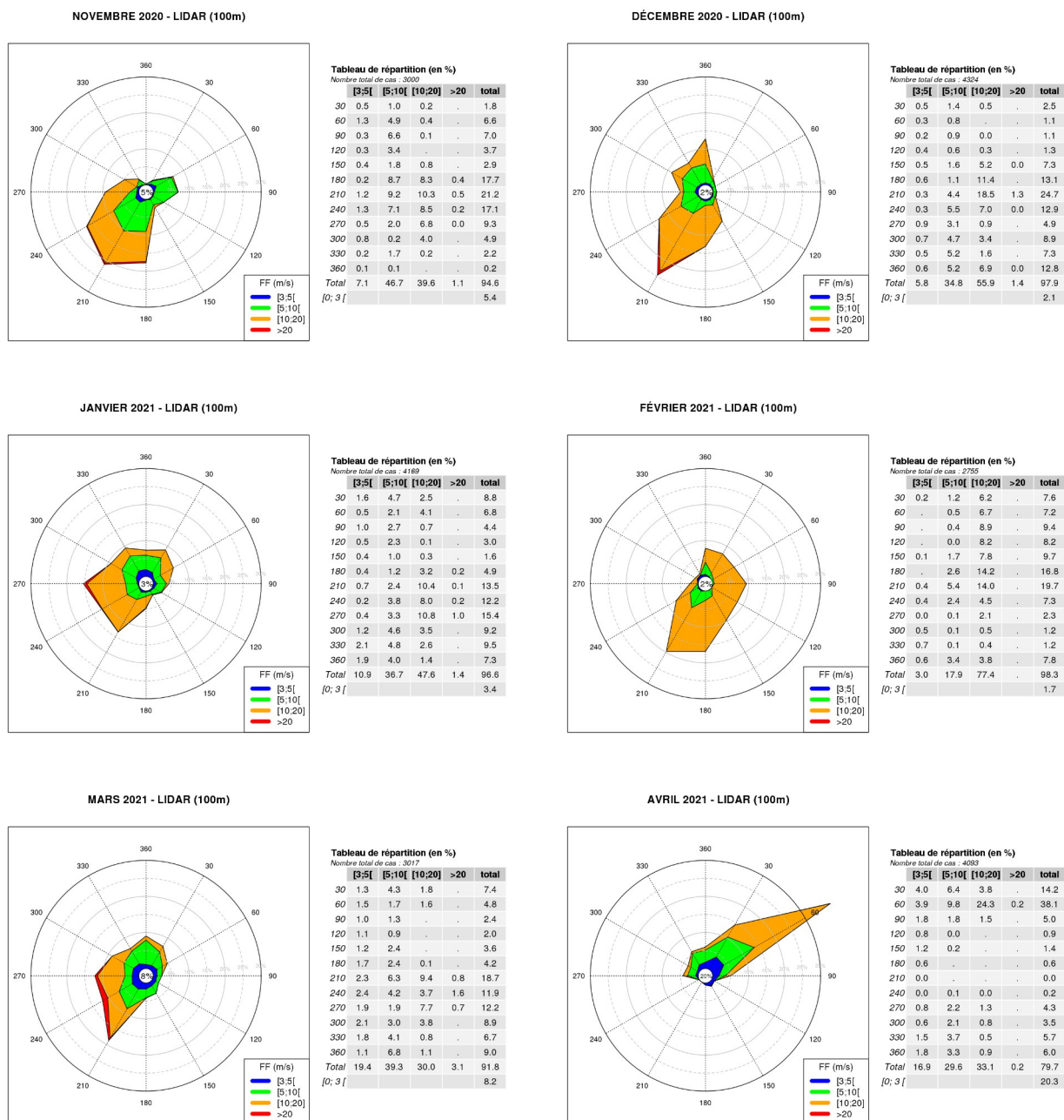
	Directions en degrés												Total
	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	
[34,35[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[33,34[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[32,33[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,0	.	.	0,0
[31,32[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[30,31[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,0	.	.	0,0
[29,30[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,0	.	.	0,0
[28,29[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,1	.	.	0,1
[27,28[	.	.	.	.	.	.	0,0	.	.	0,0	.	.	0,1
[26,27[	.	.	.	.	.	.	0,1	.	.	.	.	.	0,1
[25,26[	.	.	.	.	.	.	0,2	0,1	0,0	0,0	.	.	0,2
[24,25[	.	.	.	.	.	0,0	0,4	0,0	.	.	.	.	0,5
[23,24[	.	.	.	.	.	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	.	0,9
[22,23[	.	0,0	.	.	0,0	0,1	0,4	0,5	0,3	0,3	0,3	0,1	1,9
[21,22[	.	0,0	.	.	0,1	0,2	0,5	0,6	0,4	0,4	0,5	0,2	2,8
[20,21[	.	0,2	.	.	0,1	0,3	1,1	0,9	0,5	0,5	0,6	0,2	4,3
[19,20[	.	0,5	.	.	0,1	0,5	1,0	1,6	1,0	0,5	0,5	0,2	5,9
[18,19[	0,2	1,1	0,0	.	0,4	0,9	2,6	2,4	1,6	1,2	0,4	0,1	10,9
[17,18[	0,6	3,1	0,2	0,0	0,5	1,7	4,2	3,2	2,6	2,2	0,4	0,3	19,0
[16,17[	1,7	3,4	0,6	0,1	0,9	2,8	5,7	4,2	4,7	2,5	0,9	0,5	28,0
[15,16[	2,3	5,7	1,1	0,1	1,9	3,7	5,2	4,7	5,2	3,0	1,1	1,0	34,9
[14,15[	1,9	8,2	1,5	0,8	2,3	5,2	7,3	5,1	6,5	3,9	0,8	2,0	45,4
[13,14[	2,0	8,5	2,1	1,2	1,9	7,6	10,2	6,6	6,8	3,1	1,8	1,5	53,4
[12,13[	2,6	8,9	1,7	0,9	1,1	5,8	12,7	8,9	8,1	3,5	2,0	2,6	58,7
[11,12[	3,9	8,9	1,9	1,4	1,2	5,3	13,3	10,6	8,4	4,0	2,8	4,2	65,8
[10,11[	5,4	8,3	2,2	2,1	0,5	5,1	15,9	8,9	7,1	4,8	3,8	5,4	69,5
[9,10[	6,1	7,9	3,0	1,3	1,3	6,3	13,5	8,9	8,7	5,2	4,8	6,2	73,0
[8,9[	5,7	8,3	3,5	2,4	1,4	7,2	10,0	8,5	9,7	6,5	6,1	7,0	76,4
[7,8[	8,2	6,6	3,8	3,9	1,7	4,7	8,9	8,8	11,9	7,0	7,0	6,5	79,2
[6,7[	8,4	6,0	4,7	3,4	3,3	3,6	10,7	9,7	10,9	8,0	7,2	5,6	81,6
[5,6[	7,6	7,2	4,5	2,3	3,1	3,8	7,9	9,7	7,3	7,3	5,7	6,5	72,8
[4,5[	6,9	6,2	4,7	3,5	4,1	3,8	6,2	7,4	6,8	6,3	5,9	5,9	67,6
[3,4[	6,1	5,5	4,6	3,9	3,7	3,5	4,7	4,5	5,1	6,0	6,0	5,8	59,4
[0,3[	8,2	7,2	6,7	6,5	6,5	7,0	6,4	6,1	7,8	8,2	7,7	9,0	87,2
Total	77,7	111,7	46,8	33,7	36,1	79,3	149,6	121,8	121,8	84,7	66,2	70,8	1000,0

Nombre de cas : 52782

*Analyse de répartition du vent LiDAR observé à 100 m sur la période du 10 novembre 2020 au 15 décembre 2021
(en pour mille)*

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

Annexe 7 : Roses des vents mensuelles du LiDAR à 100m (données brutes)



MAI 2021 - LIDAR (100m)

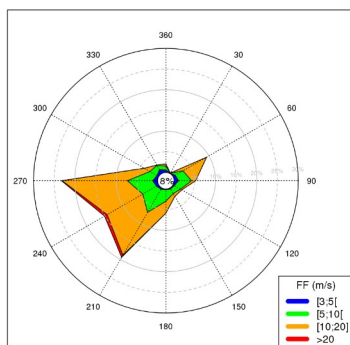


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4450

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.1	.	0.0	.	0.1
60	0.6	2.2	6.6	.	9.4
90	1.1	3.1	1.0	.	5.2
120	0.3	1.8	0.3	.	2.4
150	0.3	1.3	0.8	.	2.4
180	0.2	2.7	2.9	.	5.8
210	0.4	6.5	11.9	0.6	19.4
240	0.6	3.8	9.9	0.7	15.1
270	1.2	6.1	15.8	0.2	23.3
300	0.5	2.0	1.6	.	4.0
330	1.1	1.2	0.1	.	2.4
360	0.6	1.0	0.5	.	2.1
Total	6.9	31.7	51.4	1.6	91.6

[0; 3[

JUIN 2021 - LIDAR (100m)

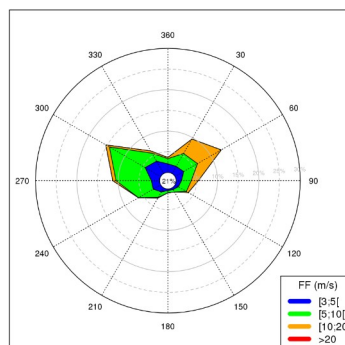


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4163

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	2.0	3.6	4.0	.	9.6
60	2.4	3.8	6.6	.	12.9
90	1.3	2.4	1.7	.	5.4
120	0.9	2.2	0.5	.	3.7
150	0.5	0.7	.	.	1.2
180	0.4	0.5	.	.	0.9
210	1.1	1.5	0.2	.	2.8
240	2.1	4.1	0.0	.	6.2
270	2.0	8.5	0.8	.	11.3
300	4.3	10.0	1.0	.	15.3
330	3.5	2.2	0.6	.	6.3
360	2.1	1.2	0.3	.	3.6
Total	22.7	40.8	15.8	.	79.3

[0; 3[

JUILLET 2021 - LIDAR (100m)

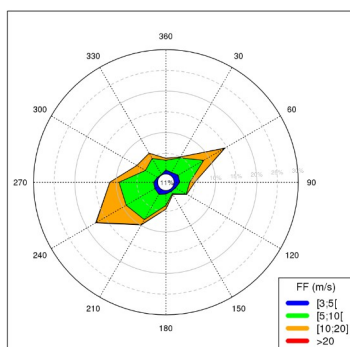


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 3517

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.7	4.1	0.3	.	5.1
60	1.4	7.1	5.8	0.2	14.5
90	1.4	2.4	1.2	.	5.0
120	0.7	3.0	0.1	.	3.8
150	0.6	0.6	0.2	.	1.4
180	0.9	2.8	0.9	.	4.5
210	1.4	7.1	1.3	0.1	9.9
240	1.1	8.0	8.4	0.1	17.6
270	1.0	8.4	2.2	.	11.5
300	0.3	3.4	2.4	.	6.1
330	0.2	4.5	1.5	.	6.1
360	1.0	2.3	0.5	.	3.8
Total	10.5	53.5	24.7	0.5	89.2

[0; 3[

AOÛT 2021 - LIDAR (100m)

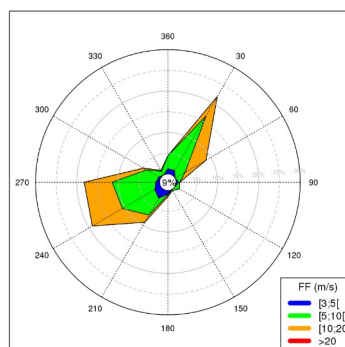


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 3633

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.3	15.2	5.4	.	21.9
60	0.0	2.8	5.8	.	8.6
90	0.7	0.2	.	.	0.9
120	0.0	1.2	.	.	1.2
150	.	0.2	.	.	0.2
180	0.9	0.2	0.5	.	1.5
210	2.4	4.7	2.0	.	9.1
240	1.6	9.1	8.4	.	19.1
270	0.9	10.6	6.7	.	18.2
300	0.5	3.5	0.9	.	4.8
330	0.0	1.0	0.2	.	1.3
360	1.3	3.1	0.0	.	4.4
Total	9.6	51.7	30.0	.	91.3

[0; 3[

SEPTEMBRE 2021 - LIDAR (100m)

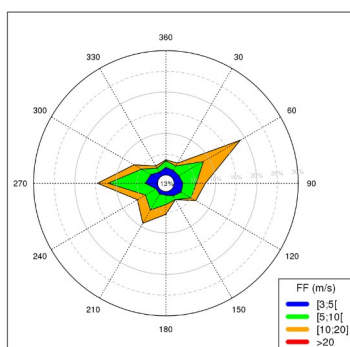


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4268

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.6	1.2	0.8	.	3.6
60	1.6	6.8	10.3	.	18.8
90	2.1	3.2	2.2	.	7.5
120	2.3	2.8	1.3	.	6.3
150	1.5	1.0	.	.	2.6
180	0.9	2.2	2.3	0.0	5.5
210	1.0	4.4	3.7	.	9.1
240	0.7	3.0	2.2	.	5.9
270	3.0	9.0	2.6	.	14.5
300	2.2	2.6	2.1	.	6.9
330	1.1	1.1	0.6	.	2.8
360	1.9	1.6	0.2	.	3.7
Total	19.8	39.0	28.4	0.0	87.2

[0; 3[

OCTOBRE 2021 - LIDAR (100m)

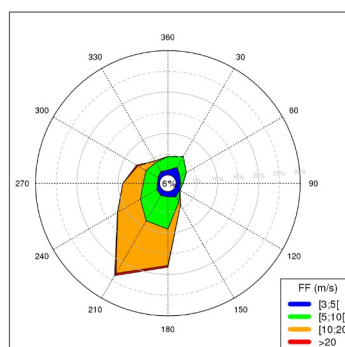


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4456

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	2.5	2.9	0.0	.	5.4
60	1.4	1.8	.	.	3.2
90	1.0	0.6	.	.	1.7
120	1.3	0.1	.	.	1.4
150	1.8	1.4	0.8	.	4.1
180	1.3	7.8	8.8	0.4	18.2
210	1.4	7.0	14.7	0.6	23.7
240	1.1	4.6	6.3	0.1	12.1
270	0.5	3.5	4.9	0.0	8.9
300	0.8	3.3	2.3	0.4	6.7
330	1.3	2.5	0.4	.	4.2
360	1.1	3.3	.	.	4.5
Total	15.4	38.9	38.2	1.5	94.1

[0; 3[

NOVEMBRE 2021 - LIDAR (100m)

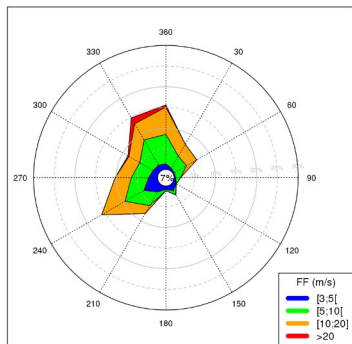


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4309

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.6	3.4	3.4	.	7.4
60	0.3	3.4	2.9	.	6.6
90	0.3	1.2	.	.	1.5
120	0.9	.	.	.	0.9
150	1.6	1.2	.	.	2.8
180	0.8	0.3	.	.	1.1
210	2.0	3.8	2.2	.	8.0
240	4.1	5.3	6.5	.	15.9
270	2.2	4.2	3.9	.	10.3
300	1.5	3.8	3.0	0.3	8.6
330	1.5	7.0	4.5	1.6	14.7
360	1.3	7.1	6.6	0.5	15.6
Total	17.3	40.7	33.0	2.4	93.4
[0; 3[					6.6

DÉCEMBRE 2021 - LIDAR (100m)

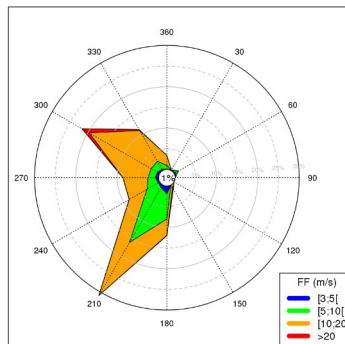
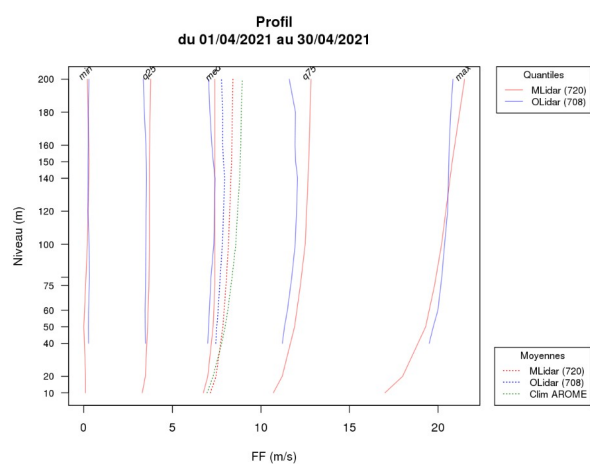
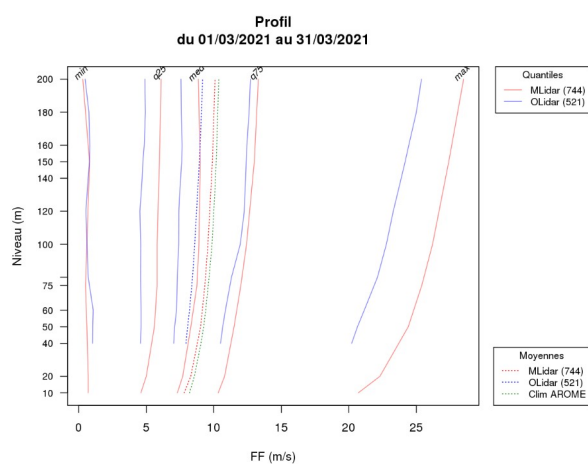
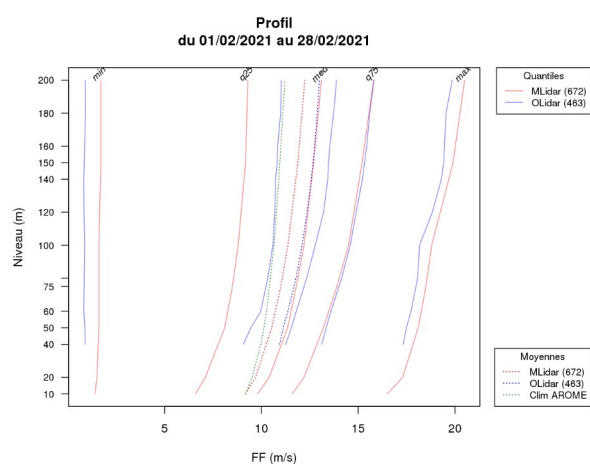
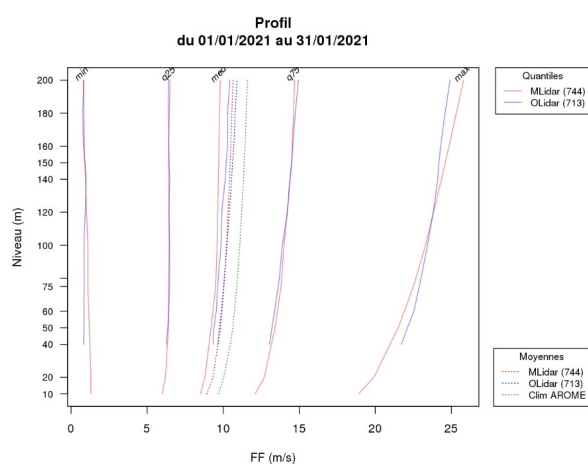
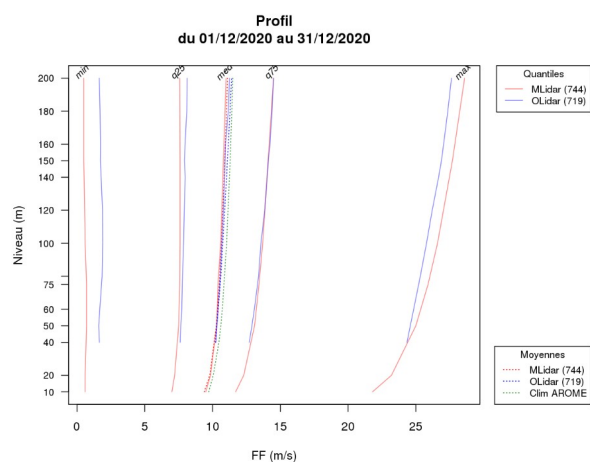
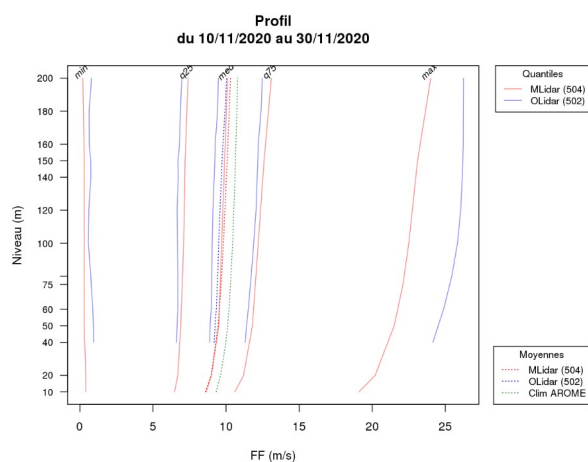


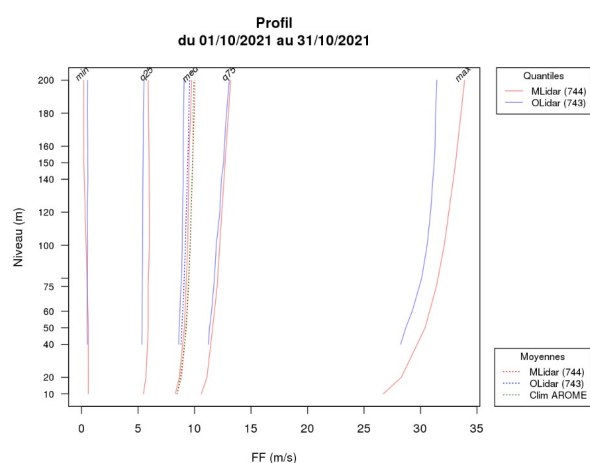
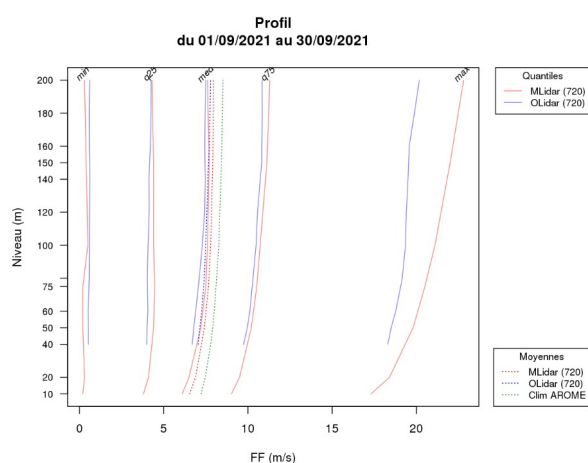
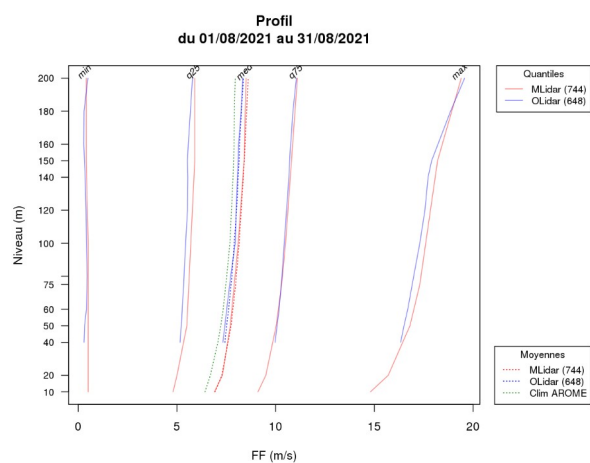
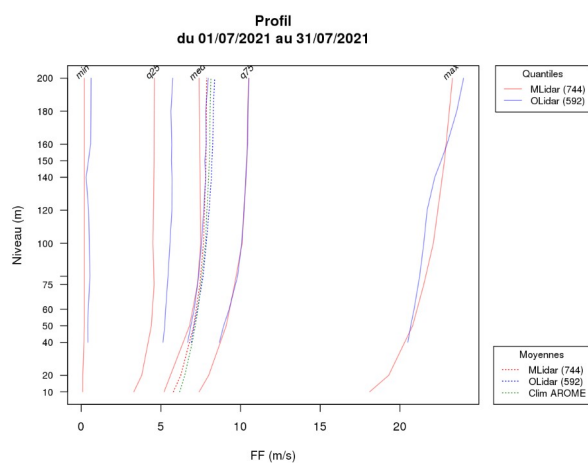
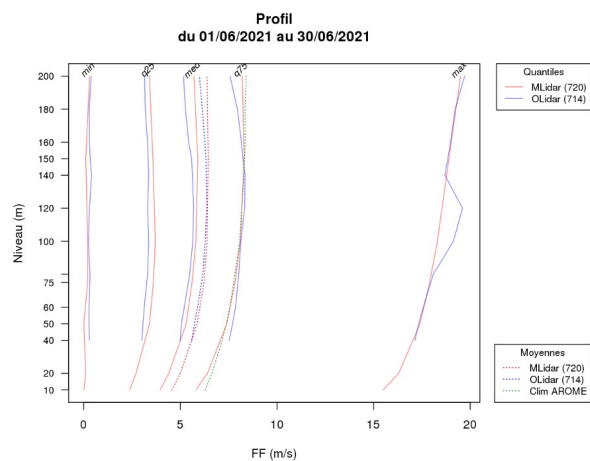
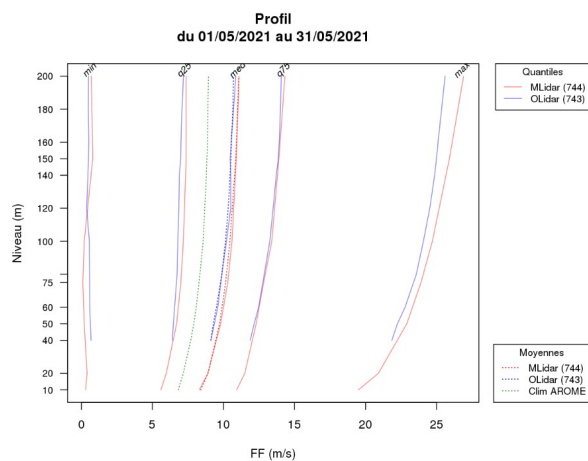
Tableau de répartition (en %)

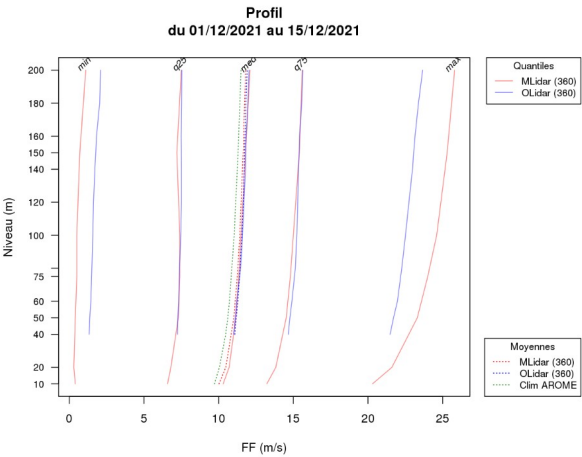
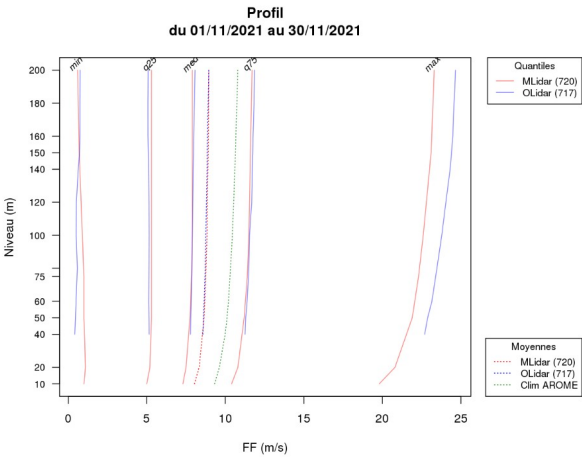
Nombre total de cas : 2155

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.1	.	0.0	.	0.1
60	0.4	0.8	.	.	1.2
90	.	.	.	.	.
120	.	.	.	.	.
150	.	.	0.8	0.3	1.1
180	1.9	6.1	3.9	0.1	12.0
210	0.7	15.3	14.8	.	30.9
240	0.4	3.2	5.0	0.0	8.5
270	0.8	1.8	6.1	.	8.6
300	0.6	1.7	17.3	2.0	21.7
330	0.3	2.3	8.6	0.3	11.5
360	0.1	0.8	2.4	.	3.4
Total	5.4	31.9	58.9	2.8	99.1
[0; 3[					0.9

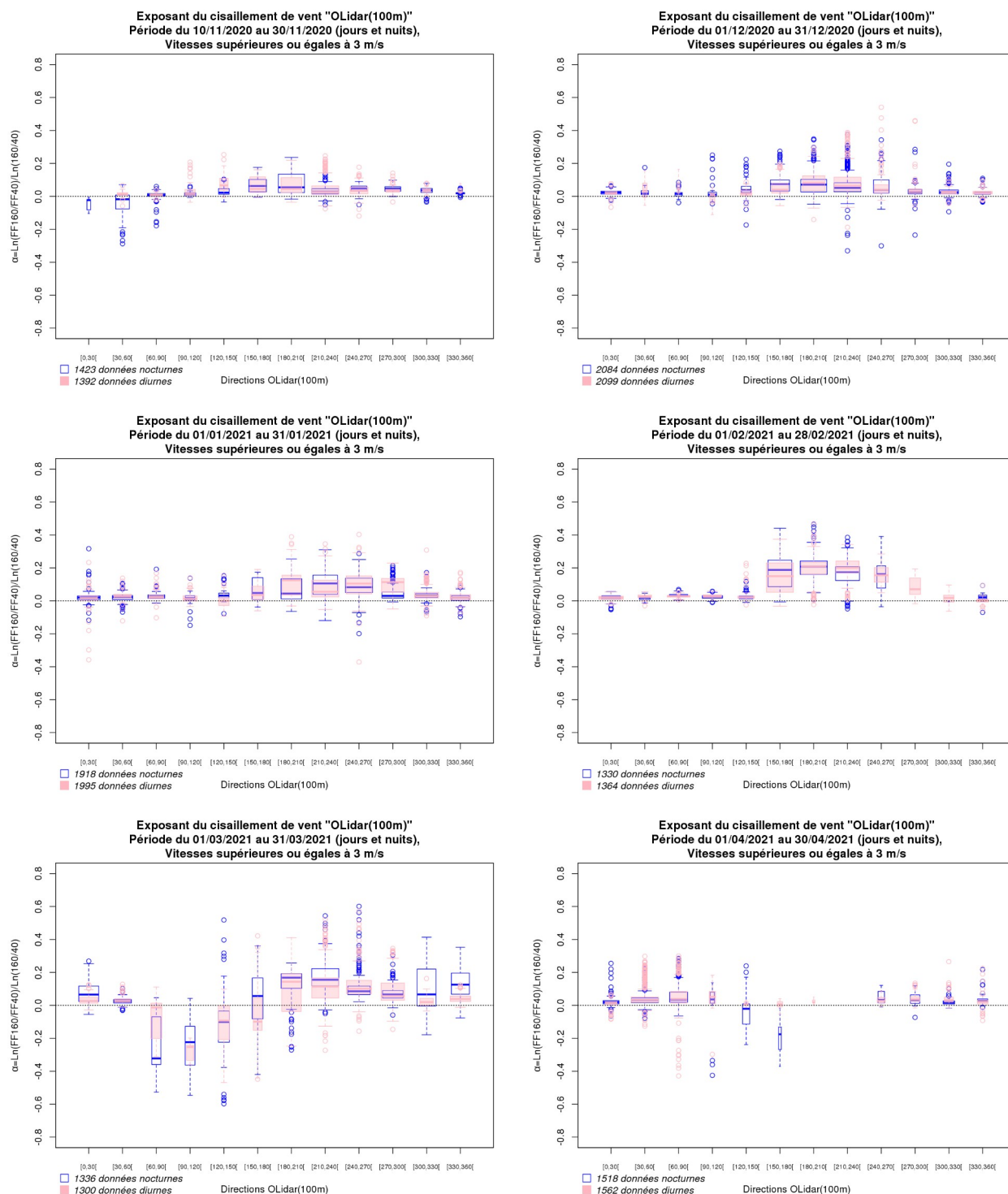
Annexe 8 : Profils de vent du LiDAR

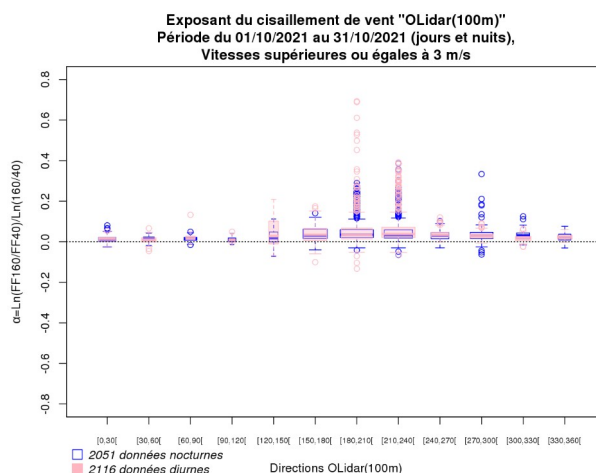
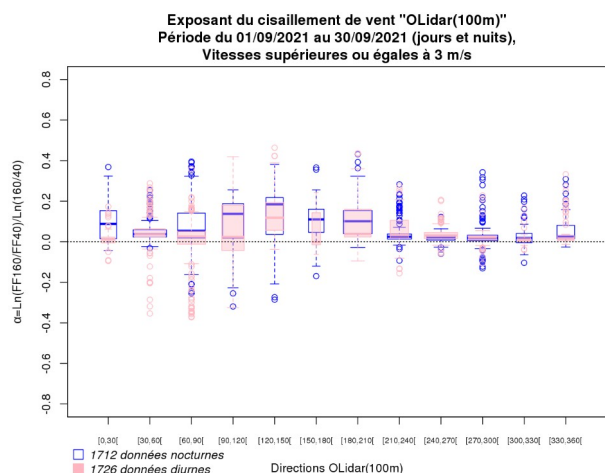
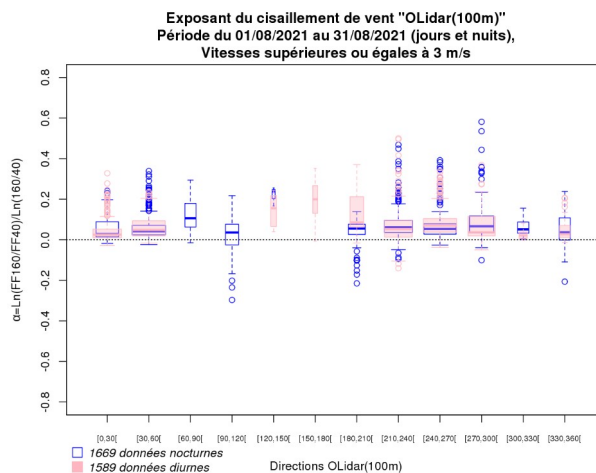
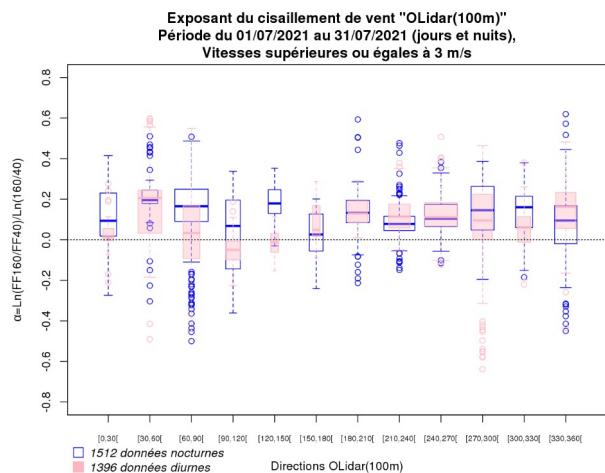
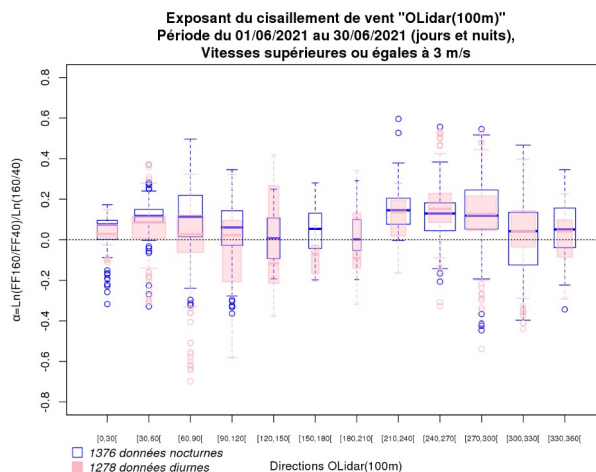
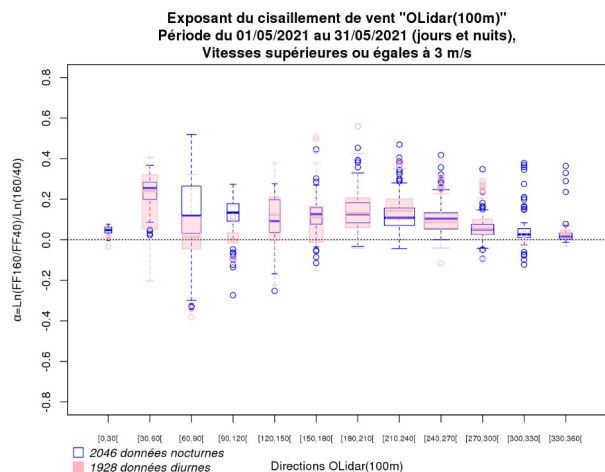


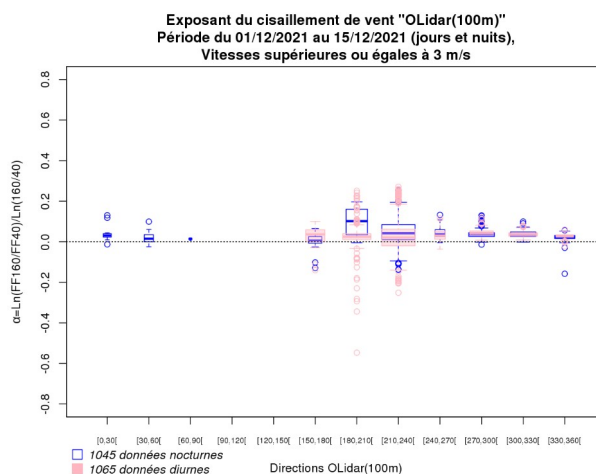
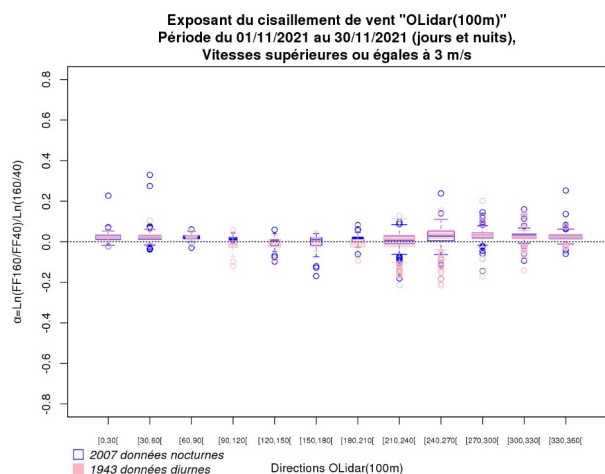




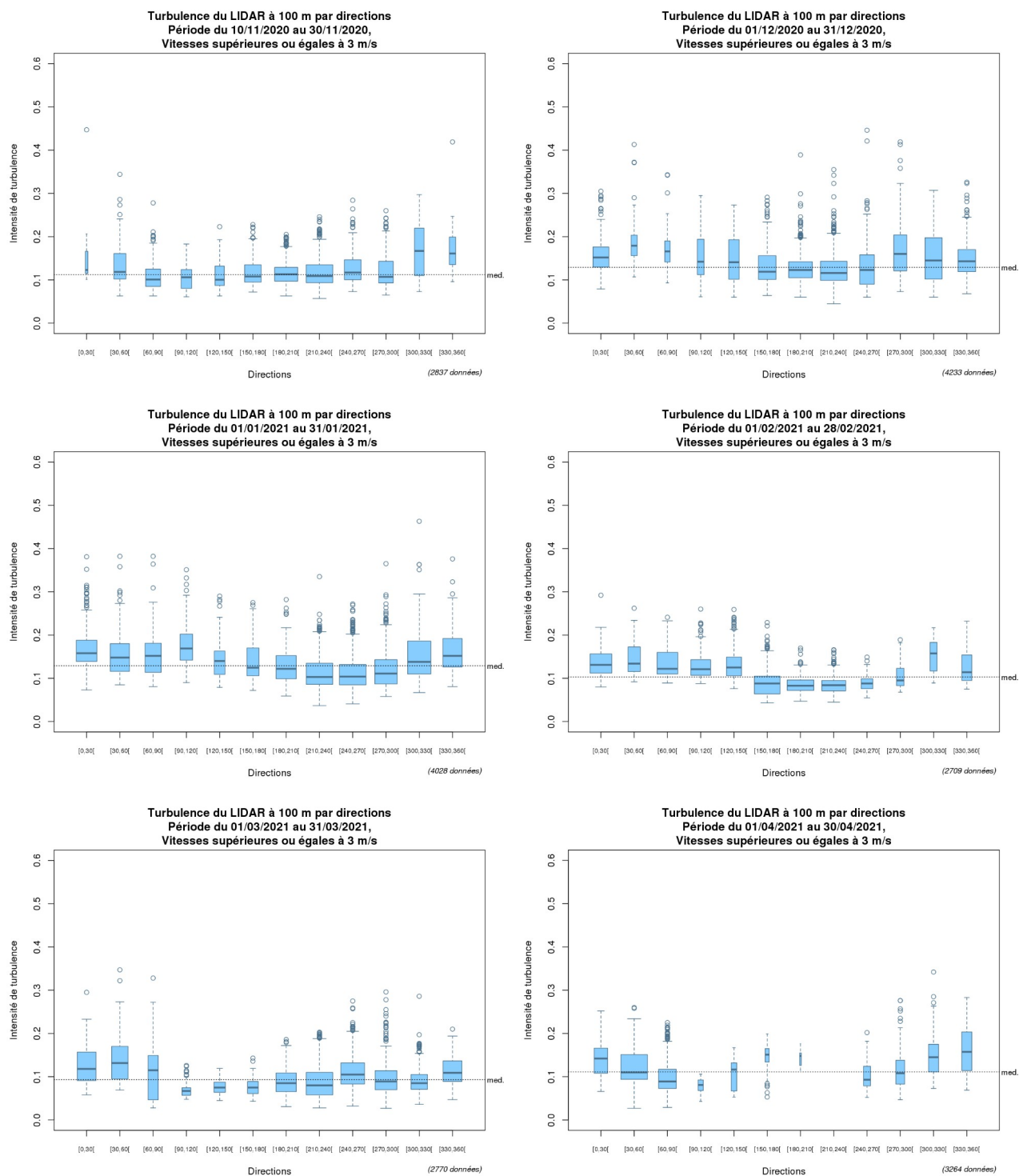
Annexe 9 : Cisaillement du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)



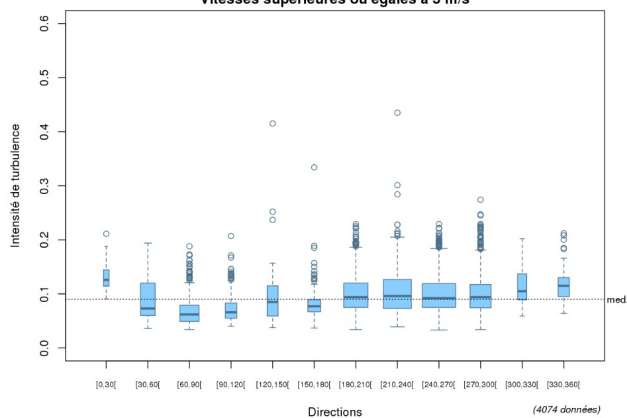




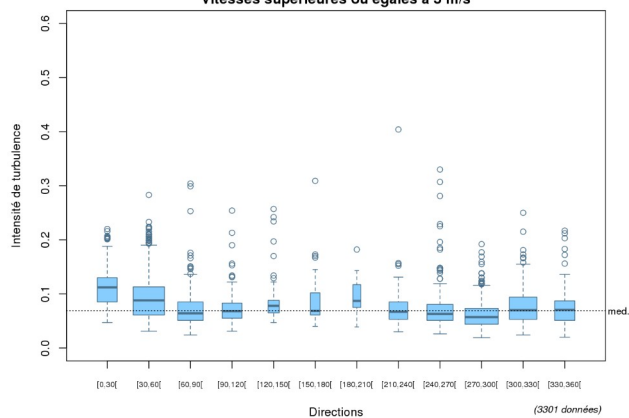
Annexe 10 : Turbulence du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)



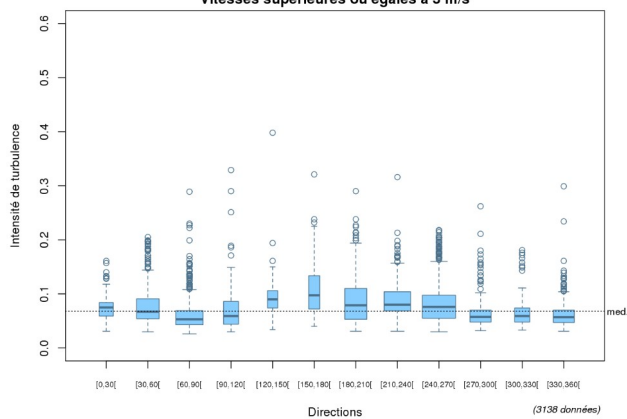
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/05/2021 au 31/05/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



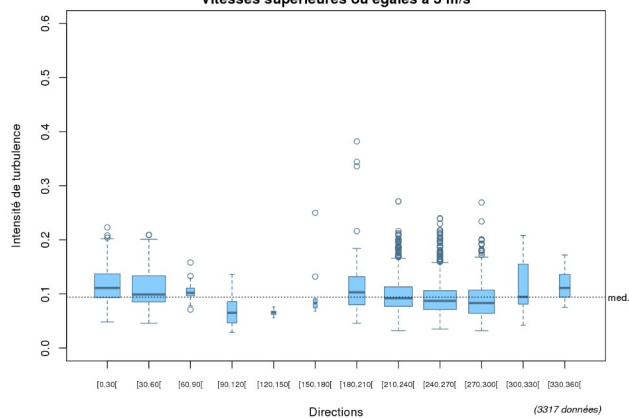
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/06/2021 au 30/06/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



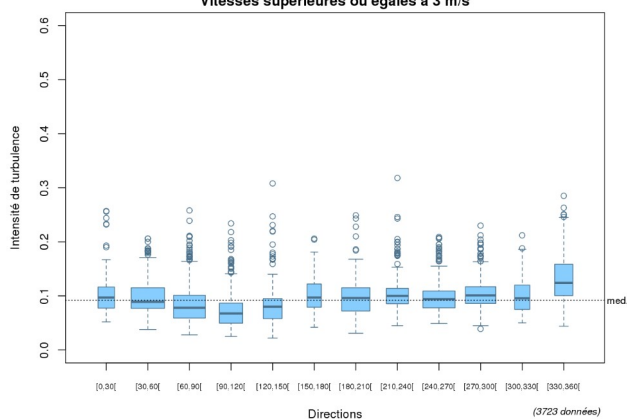
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/07/2021 au 31/07/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



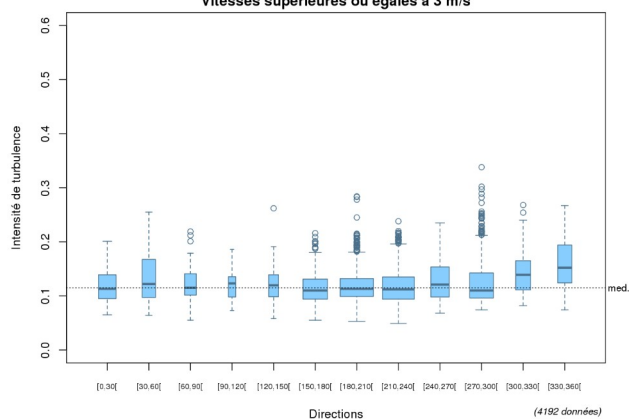
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/08/2021 au 31/08/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s

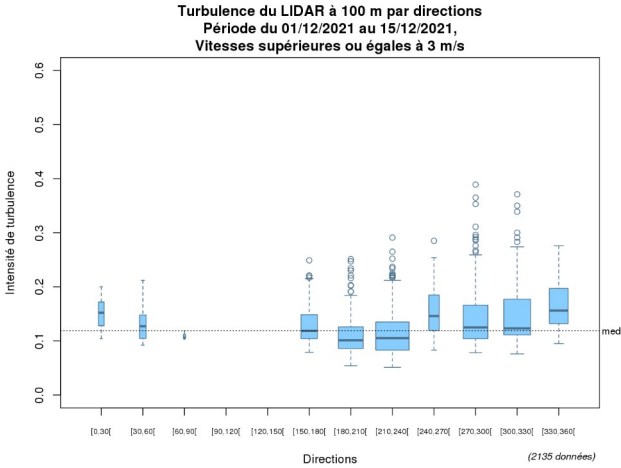
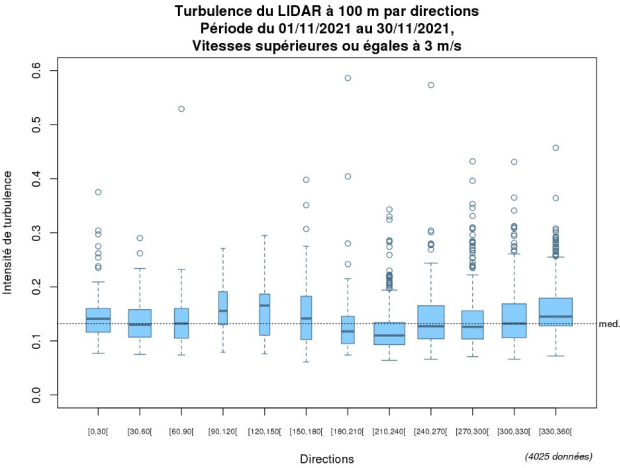


Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/09/2021 au 30/09/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



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





FIN DE DOCUMENT
