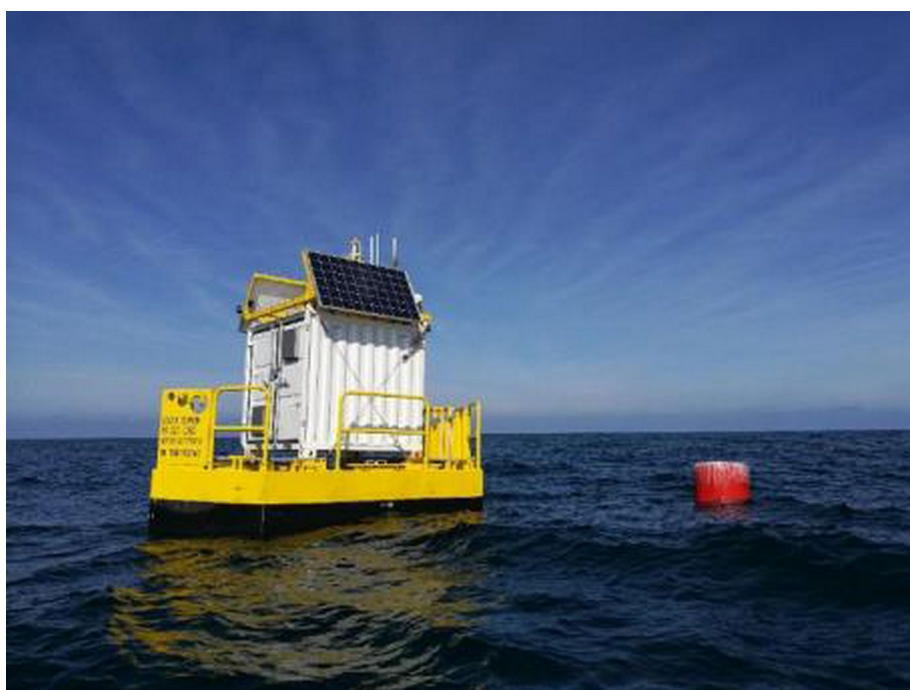


Rapport d'étude

Rapport final Lot 4

AO7 Oléron



Version 12 du 12/05/2023

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
AO7_Oléron_Lot4_Rapport-final_V2_20230512	07/04/2022	V1	Livraison
AO7_Oléron_Lot4_Rapport-final_V2_20230512	12/05/23	V2	Livraison

Signatures

	Nom	Service
Rédacteurs	Nicolas Guérin Éric Balcon	DSM/CS/ÉNERGIE DIRO/CM/BREST
Relecteur	Raphaël Legrand	DSM/CS/DC
Approbateur	Raphaël Legrand	DSM/CS/DC

Table des matières

1	Contexte	1
1.1	Zone d'étude	2
1.2	Descriptif de la solution retenue pour l'acquisition des mesures sur site	5
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	15
3.1.3	Monitoring des erreurs	16
3.2	Retour sur des cas de données manquantes ou douteuses	17
3.3	Statistiques de contrôle et descriptives de la mesure	18
3.3.1	Statistiques de contrôle de la mesure	18
3.3.2	Statistiques descriptives du vent mesuré	21
3.3.2.1	Vent moyen horizontal à 100 m du LiDAR	21
3.3.2.2	Distributions	23
3.3.2.3	Variation diurne de la force du vent horizontal (données horaires)	24
3.3.2.4	Variation mensuelle de la force du vent horizontal (données horaires)	25
3.3.2.5	Roses des vents (données horaires)	27
3.3.2.6	Profils verticaux de vent (données horaires)	28
3.3.2.7	Cisaillement du vent (données 10 minutes)	29
3.3.2.8	Analyse des risques de turbulence atmosphérique à 100 m	31
3.3.2.9	Séries horaires FF et FXI à 100 m	32
4	Analyse des données de vent mesuré par l'anémomètre	33
5	Conclusion	35
6	Bibliographie	35
	Annexes	36

Liste des illustrations

Illustration 1 : Situation géographique de la zone (source www.geoportail.gouv.fr)	2
Illustration 2 : Roses des vents annuelle et saisonnières de la station de Chassiron (17323001) sur la période 2001/2020	3
Illustration 3 : Carte marine du large d'Oléron (source portail Data - SHOM)	4
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 avec une absence de données entre le 21/12/21 6h et le 22/12/21 13h.	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)	15
Illustration 10 : Monitoring des erreurs de forces (courbe bleue) et de directions (courbe rouge)	16
Illustration 11 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) du LiDAR avec le modèle	18
Illustration 12 : Diagramme « quantile-quantile »	19
Illustration 13 : Répartitions des écarts de directions du LiDAR en fonction de l'heure (à gauche) et de la direction (à droite)	19
Illustration 14 : Dépassements des seuils de force (à gauche) et de direction (à droite) du vent du LiDAR	20
Illustration 15 : Distributions des vents horaires du LiDAR	23
Illustration 16 : Répartitions horaires des forces du vent du LiDAR	24
Illustration 17 : Répartitions mensuelles des forces du vent du LiDAR ; la largeur des boîtes à moustaches est fonction du nombre de données	25
Illustration 18 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite)	27
Illustration 19 : Profils de vents avec quantiles du LiDAR	28
Illustration 20 : Cisaillement des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite)	29
Illustration 21 : Exposant du cisaillement de vent du LiDAR	30
Illustration 22 : Turbulence du LiDAR	31
Illustration 23 : Séries FF et FXI à 100 m du LiDAR	32
Illustration 24 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) de l'anémomètre avec le modèle	33
Illustration 25 : Distribution des vents horaires de l'anémomètre (à gauche) et diagramme « quantile-quantile » (à droite)	34
Illustration 26 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'anémomètre	34
Illustration 27 : Analyse Isofront du mercredi 20 octobre 2021 à 18 UTC	37
Illustration 28 : Comparaison des mesures du Lidar d'Oléron avec le modèle AROME les 20 et 21 octobre 2021	38
Illustration 29 : Comparaison des biais entre les mesures du Lidar d'Oléron et le modèle AROME les 20 et 21 octobre 2021	38
Illustration 30 : Roses des vents de l'été 2021 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Chassiron	39

Illustration 31 : Roses des vents de l'automne 2021 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Chassiron	40
Illustration 32 : Roses des vents de l'hiver 2021-2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Chassiron	41
Illustration 33 : Roses des vents du printemps 2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Chassiron	42
Illustration 34 : Roses des vents de l'été 2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Chassiron	43
Illustration 35 : Anomalies mensuelles de températures minimales et maximales de juin 2021 à août 2022 à la station de Chassiron - Période de référence : 1991 - 2020	45
Illustration 36 : Cumuls mensuels de précipitations de juin 2021 à août 2022 à la station de Chassiron, histogrammes (en bleu) et normale de précipitations (segments en vert) - Période de référence : 1991 - 2020	46

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.	14
Tableau 2 : Récapitulatif des problèmes techniques rencontrés sur le LiDAR	17
Tableau 3: Classes de vitesses par mois. Taux « brut » (en italique) et « reconstitué » (en gras) du LiDAR	22
Tableau 4: Valeurs de l'exposant α en fonction de la nature du terrain (source http://eolienne.f4jr.org/vent)	30

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

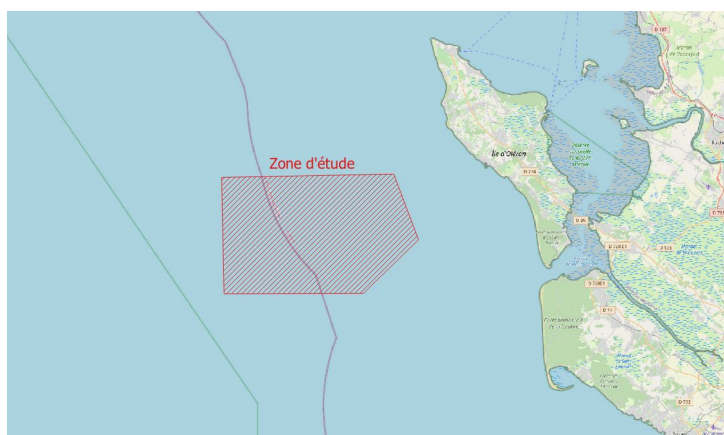
La Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC) a sollicité Météo-France pour la réalisation d'études de vent dans la zone de l'AO7, au large d'Oléron (cf. Illustration 1). Le but est d'identifier et de lever les risques susceptibles de se présenter dans la zone retenue comme favorable au développement 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 durant une campagne de mesures de 12 mois minimum et ce, pour différentes hauteurs d'intérêt dont la hauteur 100 m revêtant un caractère important pour la production éolienne. Ce rapport traite des quinze mois de mesure qui ont été nécessaires à la validation de la campagne.

1.1 Zone d'étude

Le futur parc éolien se situe sur une zone au large d'Oléron.



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

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

- des flux perturbés d'ouest à sud-ouest réguliers et bien marqués, associés à des dépressions sur le nord de l'Océan Atlantique (flux océaniques). Les vents sont réguliers et souvent assez forts (situations à tempêtes atlantiques) ;
- des régimes de nord-est bien marqués et stables associés à des régimes anticycloniques sous l'influence de hautes pressions continentales (situations hivernales) avec des renforcements fréquents en mer ;
- des flux de nord-ouest associés à des phénomènes de brises estivales ou à des dépressions creuses sur la Bretagne et la Manche générant des vents assez forts.

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 font de cette zone au large un secteur bien venté.

1 Contexte



Météo-France dispose d'une station de mesure à la Pointe de Chassiron (Phare de Chassiron – île d'Oléron), positionnée à une altitude de 11 mètres et située face à la mer. Sans obstacle, cette station est tout à fait représentative du vent au large et du secteur de la zone d'étude.

De l'expérience du Centre Météorologique de La Rochelle, nous présentons les caractéristiques suivantes sur le vent au large d'Oléron :

- les périodes de vent calme ($< 1,5$ m/s) sont rares (< 4 %) ;
- l'allure générale des roses d'automne, d'hiver et de printemps sont proches. Seule la rose estivale a une composante nord-ouest plus marquée liée aux régimes de brises ;
- Les vents de nord et d'est à sud-est sont peu nombreux et généralement faibles ;
- Les vents les plus forts sont associés à des flux d'ouest à sud-ouest et se produisent plutôt en automne et en hiver (situations perturbées). Les vents en flux de nord-est peuvent être également bien marqués.

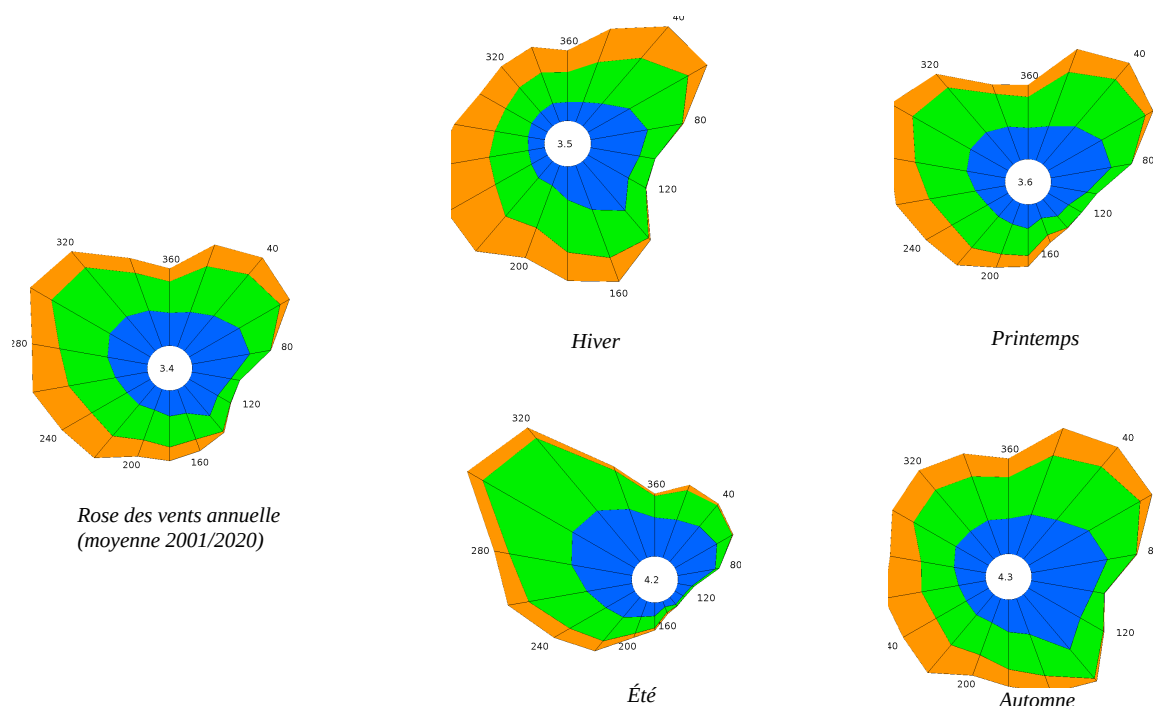


Illustration 2 : Roses des vents annuelle et saisonnières de la station de Chassiron (17323001) sur la période 2001/2020

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 variant entre 30 et 35 mètres. Les fonds sont réguliers.

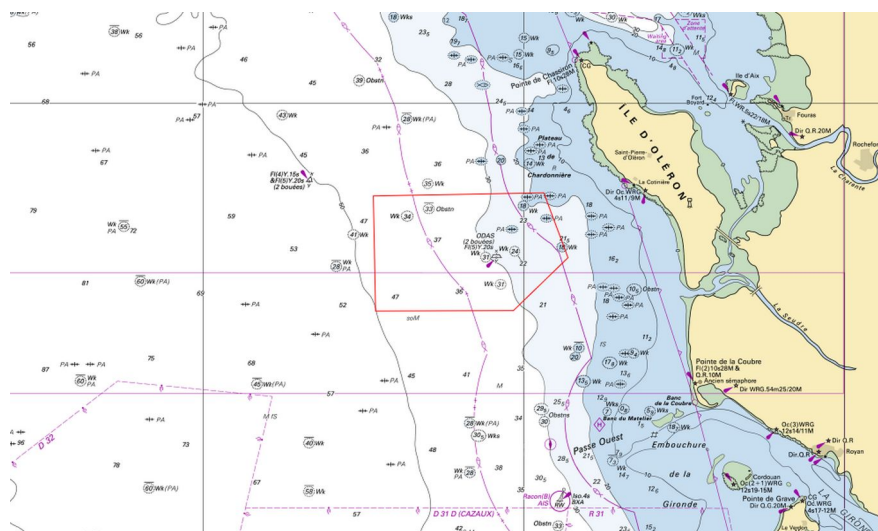


Illustration 3 : Carte marine du large d'Oléron (source portail Data - SHOM)

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 de plusieurs capteurs atmosphérique (dont un LiDAR) et océanique. La campagne de mesures est réalisée à proximité du point de coordonnées WGS84 Lon : -1,55° Lat : 45,83°. 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 campagne débute officiellement à compter du 3 juin 2021, pour une durée de 12 mois minimum.

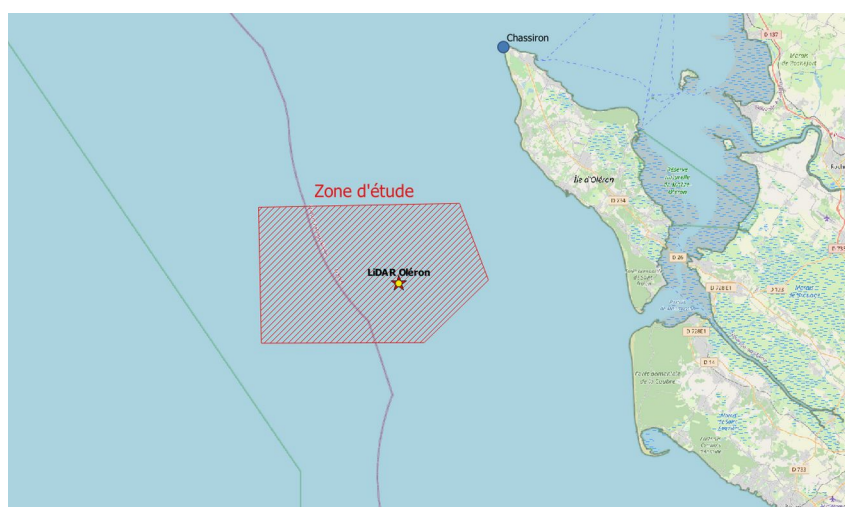


Illustration 4 : Emplacement du LiDAR et de la zone d'étude du futur parc éolien (source OpenStreetMap)

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 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 sont 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 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 4 m 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 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 « ADCP_Nortek_Signature250.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'aide 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 termes 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 par le modèle 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 optimisé 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.

Il faut noter que le modèle AROME ne fournit pas d'estimation du vent maximal (rafale) hormis pour la hauteur 10 m. Pour les niveaux supérieurs, des estimateurs sont produits et étudiés dans le cadre du lot 3.

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

2.1 Type de données fournies par le LiDAR

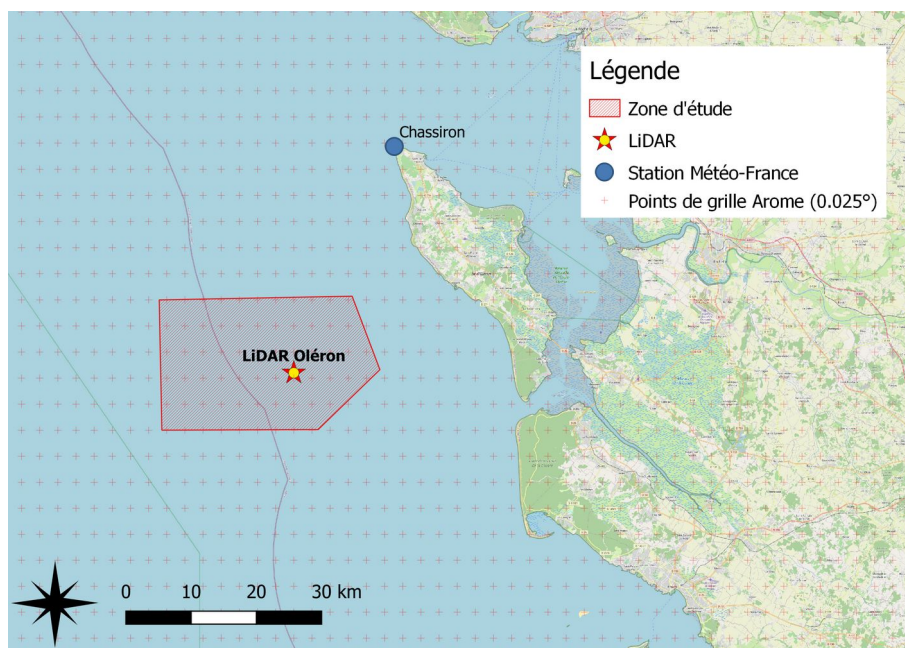


Illustration 7 : Localisation des points de grille AROME (source OpenStreetMap)

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 (fichier *.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 (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 (les données au pas de temps de la 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.

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.

2.2 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 donc qualifiée de douteuse si respectivement :

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

2.2.1.3 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. §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 est à 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. §2.1). 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 plus haut sont fournis dans le fichier « SerieLidarH100_MedA_20210601-20220809.csv ».

2.2.2 Statistiques de contrôle de la mesure

Afin de contrôler la qualité des données du LiDAR, Météo-France compare de façon statistique les données LiDAR avec celles du 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 :

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

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.

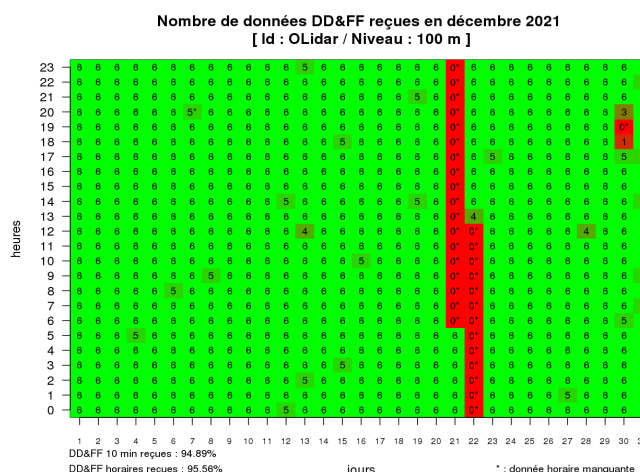


Illustration 8 : Exemple de tableau mensuel de disponibilité des données avec une absence de données entre le 21/12/21 6h et le 22/12/21 13h.

Le taux de présence des données du LiDAR décroît naturellement avec l'altitude. De 40 à 120 m, les taux de disponibilité des données dépassent généralement les 95 % (cf. Tableau 1).

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

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

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

	2021							2022									MOY (457j)
	6 (28j)	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (2j)	
200 m	97,6	99,4	96,6	97,1	98,5	98,0	87,8	85,5	93,9	95,3	90,6	62,2	71,8	98,8	95,7	99,0	91,2
180 m	98,3	99,6	97,4	97,8	98,7	98,3	90,9	86,7	94,8	97,0	92,2	62,9	72,2	99,2	97,0	99,0	92,2
160 m	91,8	99,6	98,3	98,4	98,9	98,7	92,9	88,8	95,8	97,8	93,6	63,3	72,3	99,4	98,1	99,0	92,5
150 m	98,7	99,6	98,8	98,5	99,0	99,0	93,7	89,9	96,1	98,0	94,0	63,5	72,3	99,5	98,4	99,0	93,3
140 m	98,8	99,7	99,1	98,6	99,0	99,3	94,3	91,2	96,4	98,1	94,4	63,7	72,3	99,5	98,6	99,0	93,5
120 m	99,0	99,7	99,4	98,8	99,1	99,5	94,8	94,9	97,8	98,3	95,5	63,9	72,3	99,5	99,0	99,0	94,1
100 m	99,0	99,7	99,5	99,0	99,3	99,5	94,9	95,4	98,7	98,5	96,2	64,0	72,3	99,5	99,1	99,0	94,3
80 m	99,1	99,7	99,6	99,0	99,3	99,5	95,0	95,5	98,8	98,6	96,5	64,1	72,3	99,5	99,2	99,0	94,4
60 m	99,2	99,7	99,5	99,0	99,3	99,5	95,0	95,5	99,0	98,6	97,0	64,1	72,3	99,5	99,0	99,0	94,4
50 m	99,2	99,7	99,5	99,0	99,3	99,5	95,0	95,5	99,1	98,6	97,3	64,1	72,3	99,5	98,9	99,0	94,4
40 m	99,3	99,7	99,5	99,0	99,3	99,5	95,0	95,5	99,1	98,5	97,6	64,1	72,3	99,5	98,9	99,0	94,4
MOY (60, 100 et 160 m)	96,7	99,7	99,1	98,8	99,1	99,3	94,3	93,2	97,8	98,3	95,6	63,8	72,3	99,5	98,7	99,0	93,7

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.

La réception des données du LiDAR débute le 3 juin 2021. Les mois de mai et juin 2022 enregistrent des taux inférieurs à 80 %, en raison de plusieurs problèmes techniques (cf. Tableau 2). Afin de compenser ces mois « non valides » et atteindre un taux de disponibilité de 85 % aux niveaux 60, 100 et 160 m, la campagne de mesures a été prolongée jusqu'au 2 septembre 2022.

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 au passage de la tempête Aurore. On note une bonne corrélation entre l'observation LiDAR et le modèle aussi bien dans la chronologie que l'intensité des phénomènes (en particulier au plus fort de la perturbation).

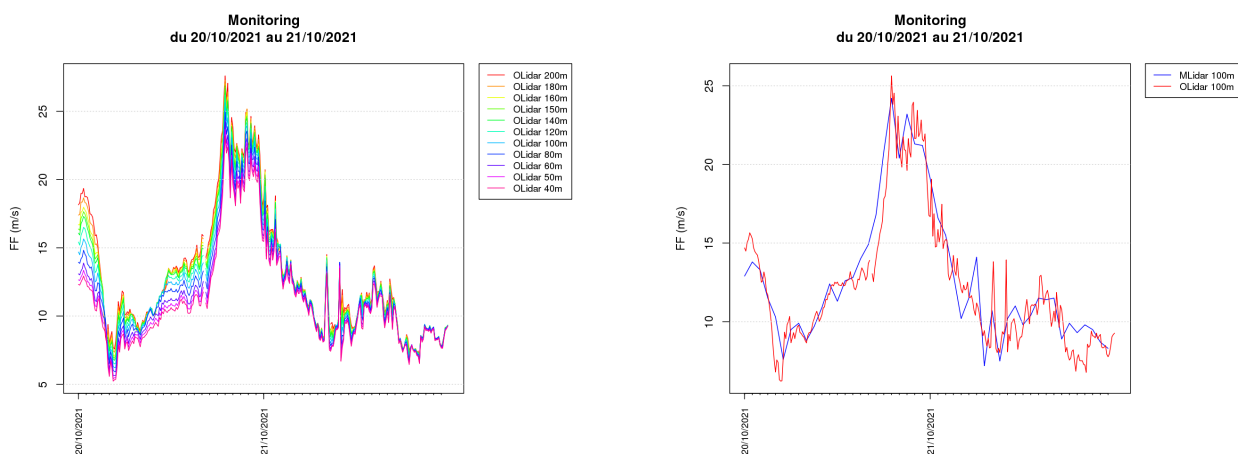


Illustration 9 : Monitoring des données 10 minutes sur les 11 niveaux de mesure (à gauche) et comparaison avec le modèle à 100 m (à droite)

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 dans la plupart des cas en dessous de 2 m/s et de 20°, et sont donc très inférieurs aux seuils fixés (cf. §2.2.1.2). L'exemple de monitoring pour le mois de juillet 2021 figure dans l'illustration ci-dessous.

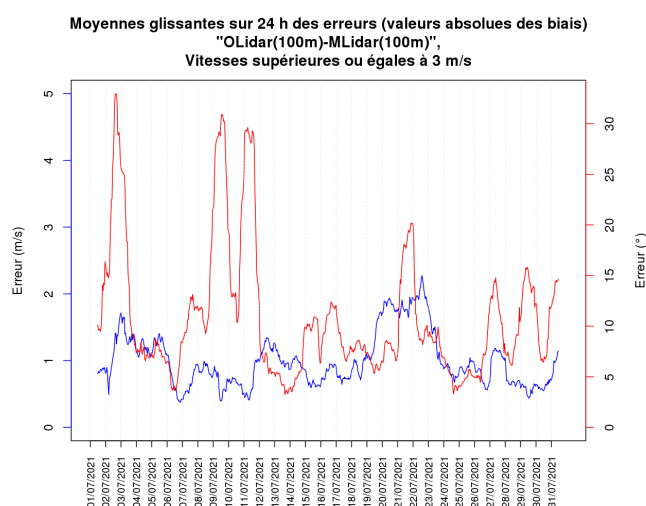


Illustration 10 : Monitoring des erreurs de forces (courbe bleue)
et de directions (courbe rouge)

3.2 Retour sur des cas de données manquantes ou douteuses

Une première observation est que les LiDAR fournissent moins de données d'observations lorsque l'altitude augmente. Ceci est dû au fait que le faisceau laser des LiDAR est fortement perturbé voire masqué dans les zones contenant des hydrométéores (gouttelettes nuageuses par exemple), les nuages bas créent des obstacles à la mesure sur leur passage.

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
Juin 2021	Réception des données à compter du 03/06 Du 29 au 30, données aberrantes à 160m (données retirées).
Juillet 2021	RAS
Août 2021	RAS
Septembre 2021	RAS
Octobre 2021	RAS
Novembre 2021	RAS
Décembre 2021	Manques ponctuels du 21 à 6h au 22 12h liés à un problème de transmission.
Janvier 2022	RAS
Février 2022	RAS
Mars 2022	RAS
Avril 2022	RAS
Mai 2022	Données manquantes du 18/05 au 31/05 en raison d'un problème électrique.
Juin 2022	Données manquantes le 01/06 et du 09/06 au 15/06 en raison d'un problème électrique.
Juillet 2022	RAS
Août 2022	RAS
Septembre 2022	Fin de la campagne le 02/11

Tableau 2 : Récapitulatif des problèmes techniques rencontrés sur le LiDAR

L'analyse de la situation météorologique des 20 et 21 octobre 2021 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.

Moins de 6 % 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 supérieure à 30° (cf. Illustration 11). L'essentiel des dépassements de seuil concerne le critère de direction pour des forces inférieures à 10 m/s.

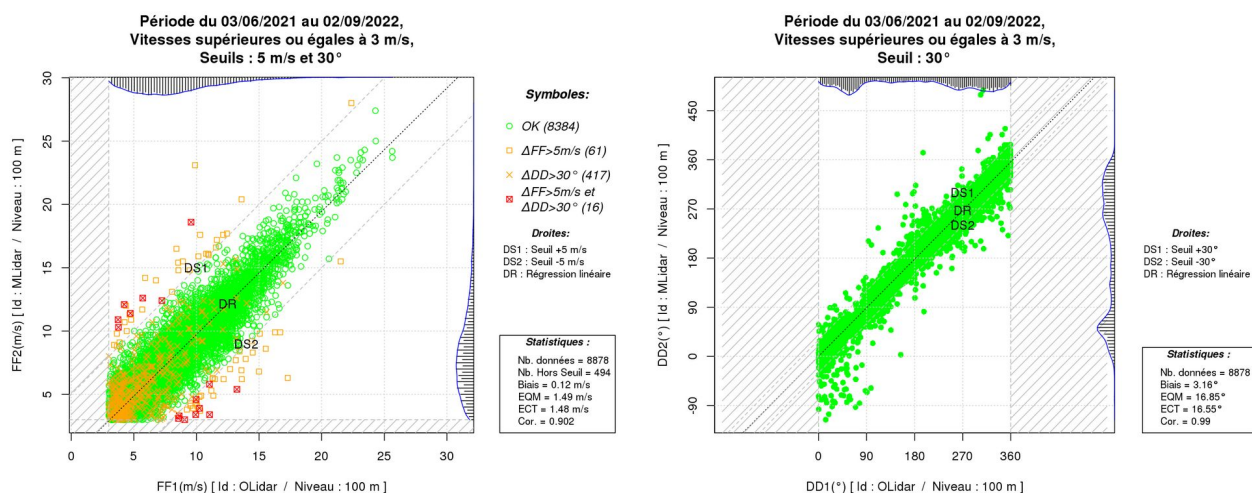


Illustration 11 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) du LiDAR avec le modèle

3 Analyse des données de vent mesuré par le LiDAR

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 avec des écarts de moins de 0,5 m/s entre l'échantillon observé et celui du modèle AROME.

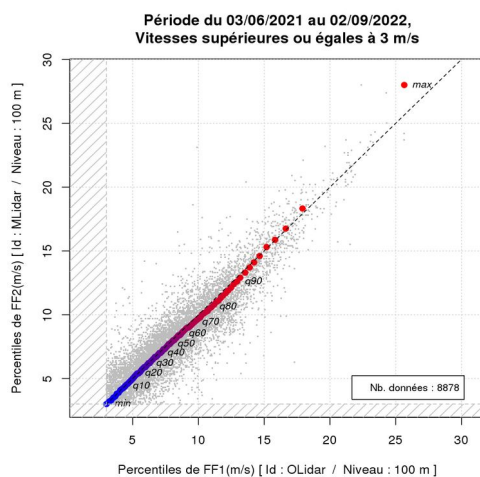


Illustration 12 : Diagramme « quantile-quantile »

Quelle que soit l'heure, l'observation présente un très faible biais non systématique sur les directions, de moins de 4° par rapport au modèle. Suivant la direction considérée, on note un biais légèrement plus marqué pour le secteur est, de l'ordre de 7° (cf. Illustration 13).

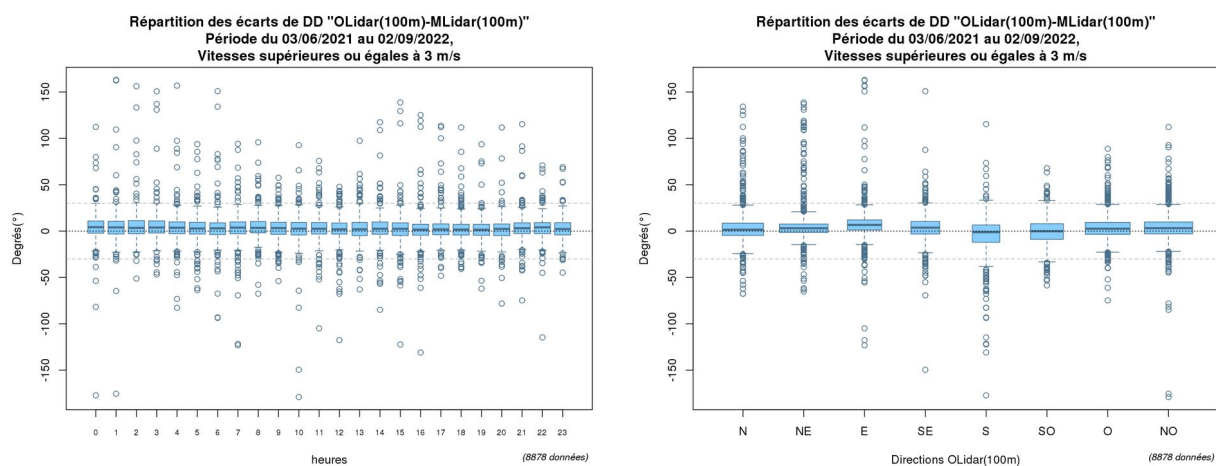


Illustration 13 : Répartitions des écarts de directions du LiDAR en fonction de l'heure (à gauche) et de la direction (à droite)

Les dépassements du seuil pour la force du vent (écart supérieur à 5 m/s entre le LiDAR et le modèle) sont de l'ordre de 1 % pour la majeure partie des secteurs de vent. Ils représentent seulement 0,2 % pour les secteurs nord à nord-est qui font partie des secteurs prépondérants (cf. Illustration 14 à gauche).

Pour des vitesses supérieures à 8 m/s, on enregistre des dépassements du seuil de direction (écart supérieur à 30° entre le LiDAR et le modèle) dans moins de 3 % des cas. On note également que plus le flux est établi avec des vitesses de vent importantes, moins les erreurs de directions surviennent. 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.

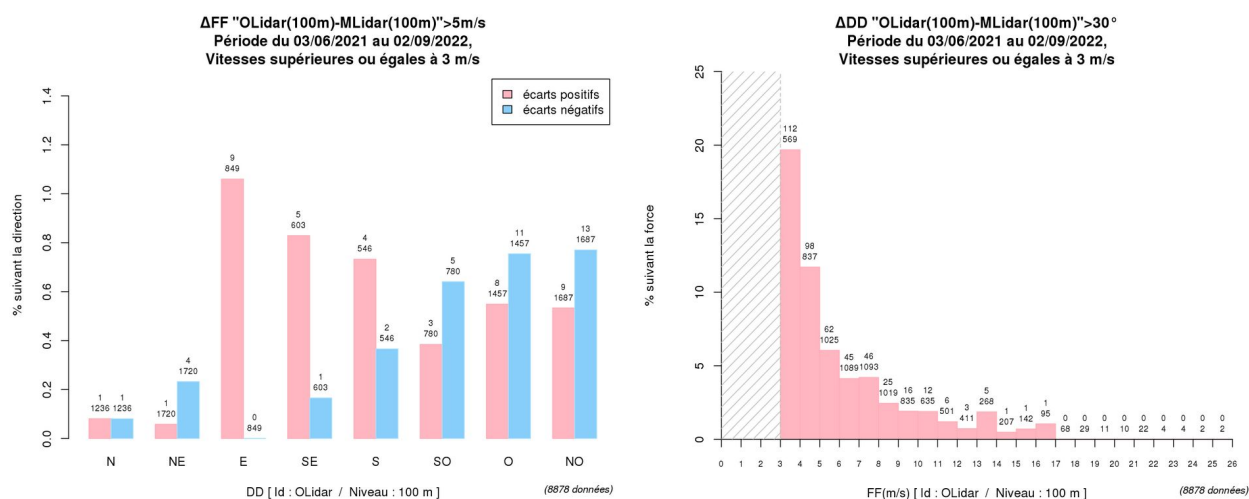


Illustration 14 : Dépassements des seuils de force (à gauche) et de direction (à droite) du vent du LiDAR

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 2.

3.3.2.1 Vent moyen horizontal à 100 m du LiDAR

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

La campagne a débuté le 3 juin 2021. Par ailleurs, au cours des mois de mai et juin 2022, suite à quelques problèmes techniques (cf. Tableau 2), le LiDAR n'a pas effectué de mesures. Ceci explique les différences constatées sur certaines classes de vitesse entre les taux bruts et reconstitués.

Pour les autres mois, quelle que soit la classe de vitesse, ces taux ne diffèrent pas de plus de 1,5 %.

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	6	3993	12.1%	24.1%	55.5%	7.9%	0.4%	.	.	.
		672	12.2%	23.7%	55.7%	8.3%	0.1%	.	.	.
	7	4450	8.4%	15%	59%	17.1%	0.4%	.	.	.
		744	7.8%	15.5%	58.9%	17.5%	0.4%	.	.	.
	8	4442	9%	17.8%	55.6%	17.4%	0.1%	.	.	.
		744	9.5%	17.1%	55.8%	17.6%	.	.	.	.
	9	4289	17.8%	18.5%	51.2%	12.2%	0.3%	.	.	.
		720	18.1%	18.6%	51%	12.1%	0.3%	.	.	.
	10	4431	10.3%	14.7%	56.8%	13.2%	4.3%	0.7%	0%	.
		744	9.5%	15.1%	57.5%	12.8%	4.4%	0.5%	0.1%	.
	11	4299	6.9%	22.1%	46.1%	17.1%	7.9%	0%	.	.
		720	6.9%	21.8%	47.5%	15.6%	8.2%	.	.	.
2022	12	4265	4.2%	6.8%	40.8%	32.5%	14.2%	1.5%	.	.
		744	4.2%	6.9%	42.5%	31.2%	13.7%	1.6%	.	.
	1	4292	21.3%	16.8%	35.2%	21.8%	4.1%	0.7%	0%	.
		744	20.7%	17.5%	35.1%	21.6%	4.3%	0.8%	.	.
	2	3990	12.9%	15%	37.7%	27.7%	6.7%	0.1%	.	.
		672	12.8%	15.8%	36.6%	28%	6.7%	0.1%	.	.
	3	4398	5%	9.3%	48.2%	34.5%	3%	.	.	.
		744	5.1%	9.4%	48%	34.3%	3.2%	.	.	.
	4	4163	6.9%	17.8%	46.6%	19.4%	6.7%	2.2%	0.4%	.
		720	7.5%	17.2%	47.5%	19%	6%	2.6%	0.1%	.
	5	2859	13.2%	18.9%	51.3%	16.3%	0.3%	.	.	.
		744	10.8%	16.8%	55.8%	16.4%	0.3%	.	.	.
	6	3126	18.3%	21.9%	50.1%	9.2%	0.4%	.	.	.
		720	16.2%	20.4%	51.7%	11.4%	0.3%	.	.	.

	7	4443	6.2%	14.7%	54.1%	24.5%	0.6%	.	.	.
		744	6%	15.1%	53.6%	24.7%	0.5%	.	.	.
	8	4425	7.1%	17.7%	53.5%	21.2%	0.5%	.	.	.
		744	7.5%	16.3%	54.8%	21%	0.4%	.	.	.
	9	285	13.3%	47%	39.6%	.	.	.	.	.
		48	16.7%	39.6%	43.8%	.	.	.	.	.
Total		62150	10.4 %	16.7%	49.5%	19.7%	3.4%	0.4%	0%	
		10968	10.3 %	16.5%	50.2%	19.4%	3.2%	0.4%	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 différences entre les quantiles apparaissant ci-dessous dans l'encart ne dépassent pas 0,3 m/s jusqu'au 90^{ème} percentile.

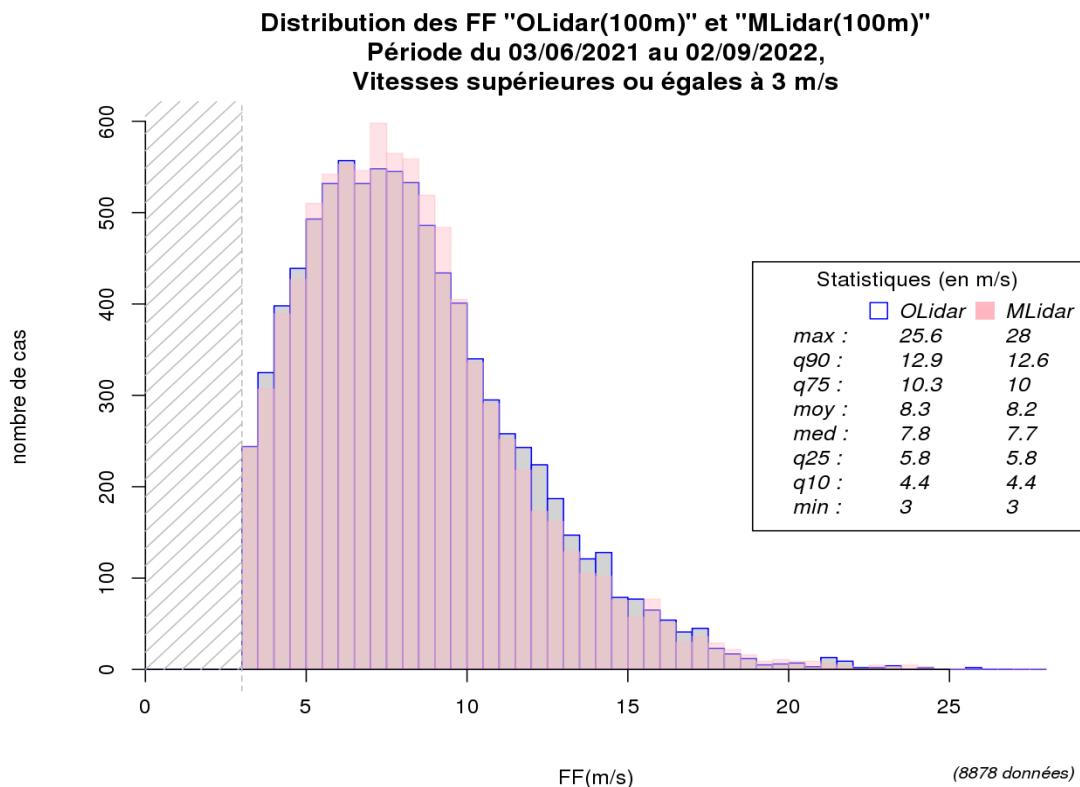


Illustration 15 : Distributions des vents horaires du LiDAR

Les distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100 m figurent en Annexe 3.

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 journée (globalement de 9h à 15h UTC), les médianes horaires des observations et du modèle sont inférieures à la médiane de la période totale (de 0,5 à 1 m/s). En soirée et en première partie de nuit (de 18h à 23h), on observe plutôt l'effet inverse.

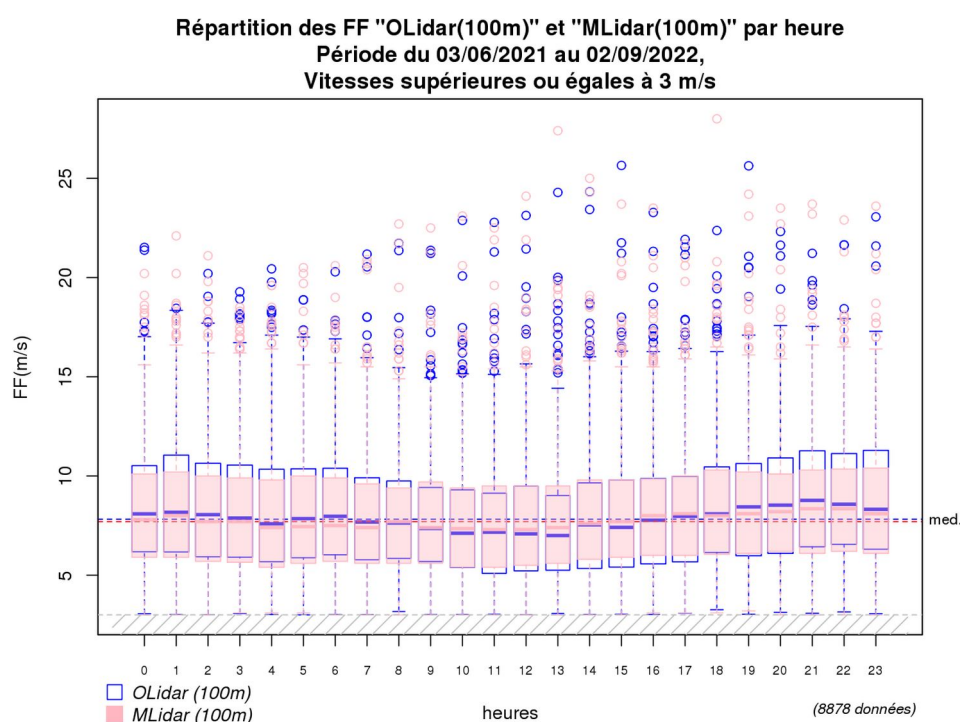


Illustration 16 : Répartitions horaires des forces du vent du LiDAR

Les répartitions horaires, par mois, des forces de vent du LiDAR à 100 m figurent en Annexe 4.

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 de la période.

Au regard de la période étudiée, les mois de juin et septembre 2021 puis juin 2022 ont été des mois calmes. En revanche, décembre 2021 puis février et mars 2022 ont été des mois globalement agités, notamment en raison de régimes de temps perturbés ou de situations orageuses.

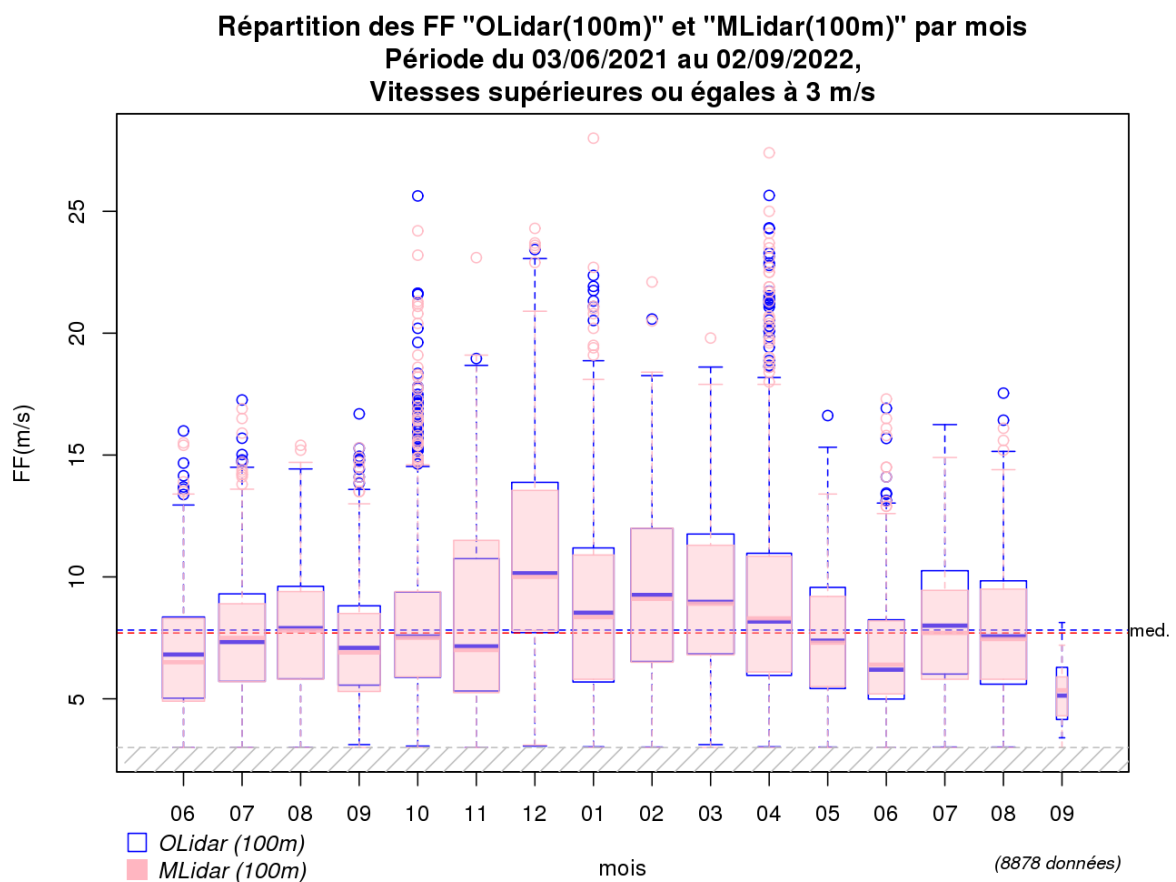


Illustration 17 : Répartitions mensuelles des forces du vent du LiDAR ; la largeur des boîtes à moustaches est fonction du nombre de données

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

Au regard de la climatologie (statistiques 2000-2019), en moyenne et sur l'ensemble de la campagne de mesures, les forces de vent ont été globalement conformes aux normales. Plus en détail, juillet 2021 a été assez venteux avec plus de vent fort que la normale. En revanche, septembre 2021 puis mars, mai, juin et août 2022 ont été des mois calmes avec presque deux fois moins de vent fort que la normale.

Vitesses en m/s	2021								2022								Total
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
> 8	9,3	8,7	8,5	10,7	17,2	27,4	28,0	26,4	26,5	21,6	14,6	12,8	9,3	8,7	8,5	10,7	15,5
	3,2	14,1	12,4	4,9	14,1	26,4	32,1	17,5	24,4	12,6	15,6	5,1	4,3	4,6	3,1	15,3	13,1
[4.5, 8.0[	40,8	42,5	40,6	39,2	37,6	36,0	38,0	39,0	39,1	41,3	41,2	42,9	40,8	42,5	40,6	39,2	40,1
	42,5	50,4	53,5	36,0	43,0	37,5	42,1	34,7	35,9	41,4	41,9	46,0	38,8	40,3	40,6	45,7	41,9
[1.5, 4.5[	46,2	45,0	47,4	45,8	41,2	33,6	31,2	31,3	31,0	34,3	40,6	41,1	46,2	45,0	47,4	45,8	40,9
	51,1	33,9	32,8	52,1	39,8	34,7	24,6	39,5	33,7	43,5	39,6	44,8	51,3	53,4	52,3	36,4	41,5
[0, 1.5[	3,7	3,8	3,5	4,3	4,0	3,0	2,8	3,3	3,4	2,8	3,6	3,2	3,7	3,8	3,5	4,3	3,5
	3,2	1,6	1,3	7,0	3,1	1,4	1,2	8,3	6,0	2,5	2,9	4,1	5,6	1,7	4,0	2,6	3,5

Tableau 4 : Statistiques 2001-2020 (en gras, en %) et valeurs 2021-2022 (en italique, en %) des forces de vent de la station de Chassiron ; 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 2 .

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 bien avec la rose des vents obtenue à partir des données observées par le LiDAR (à gauche dans l'illustration ci-dessous). Les secteurs 30° et 270° sont très légèrement surestimés par le modèle (+1 %). Le vent faible à modéré est également légèrement surestimé (+2%) alors que le vent modéré est légèrement sous-estimé (-2%).

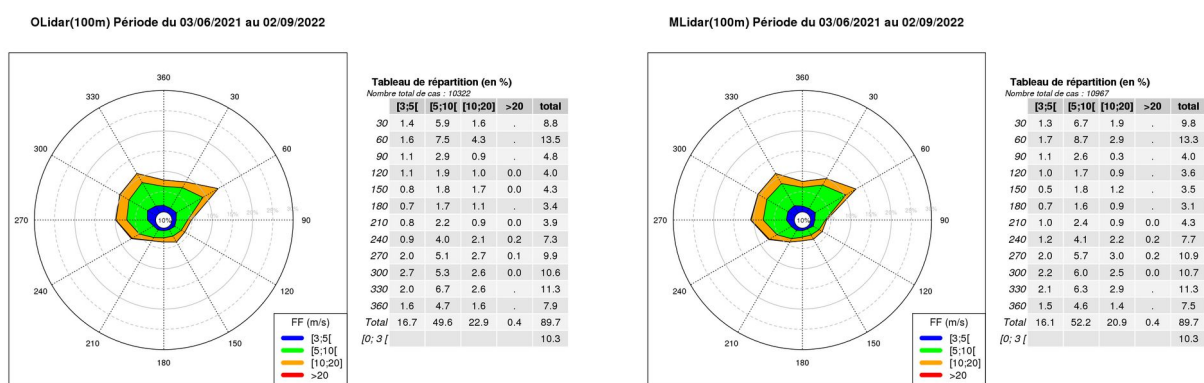


Illustration 18 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite)

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 5.

Les roses des vents mensuelles élaborées à partir de toutes les données brutes **10 minutes** figurent en Annexe 6.

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 mesure, 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. Les premiers quartiles sont quasi-identiques. La médiane et le troisième quartile observés sont supérieurs d'environ 0,1 et 0,5 m/s par rapport aux modélisés.

Par ailleurs, de 40 m à 160 m, les vitesses du profil moyen observé (profil bleu en pointillés) sont légèrement supérieures, de 0,1 à 0,2 m/s, à celles du profil moyen modélisé (profil rouge en pointillés). En revanche, elles sont inférieures d'environ 0,2 m/s à celles issues de la climatologie AROME sur 20 ans (profil vert en pointillés).

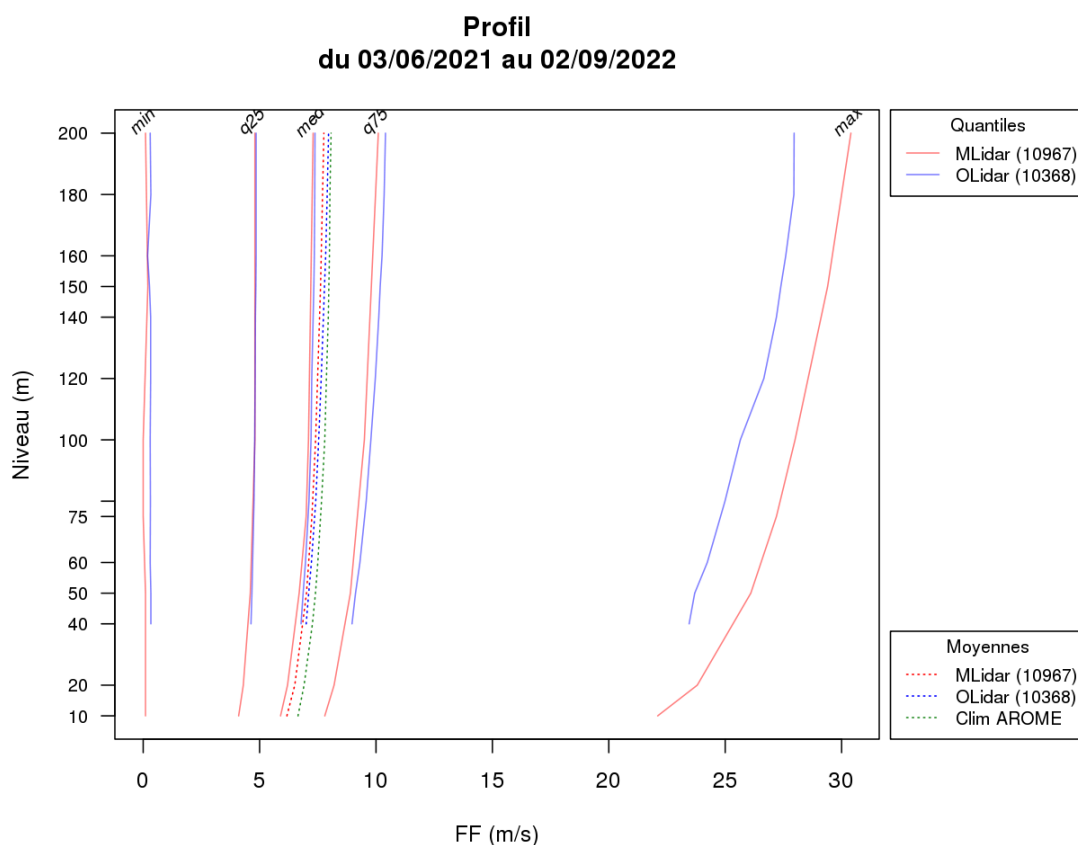


Illustration 19 : Profils de vents avec quantiles du LiDAR

Les profils, par mois, des forces de vent du LiDAR figurent en Annexe 7.

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 de 0,9 à 1,4 m/s pour les directions d'est à sud (cf. Illustration 20). Ces directions témoignent du passage des perturbations 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 faible (de 0,8 à 1,3 m/s) pour les directions indiquées précédemment.

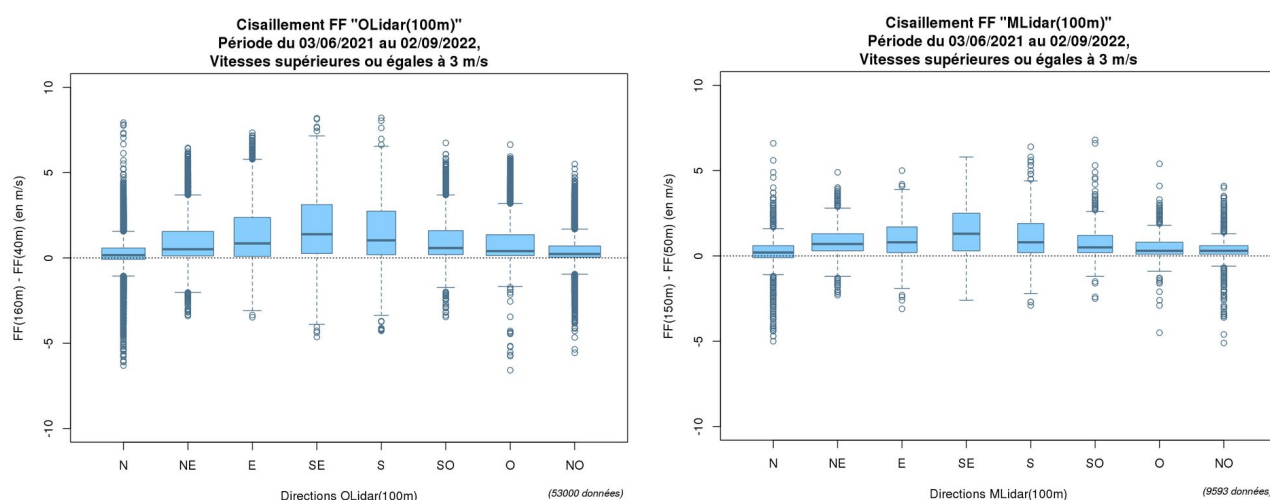


Illustration 20 : Cisaillement des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite)

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-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 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 sud-ouest, correspondant au régime classique de temps perturbé, on ne constate pas de cycle diurne.

En revanche, pour les vents de secteur est à sud, on observe un cisaillement plus important la nuit qui peut s'expliquer par un effet de brise de terre.

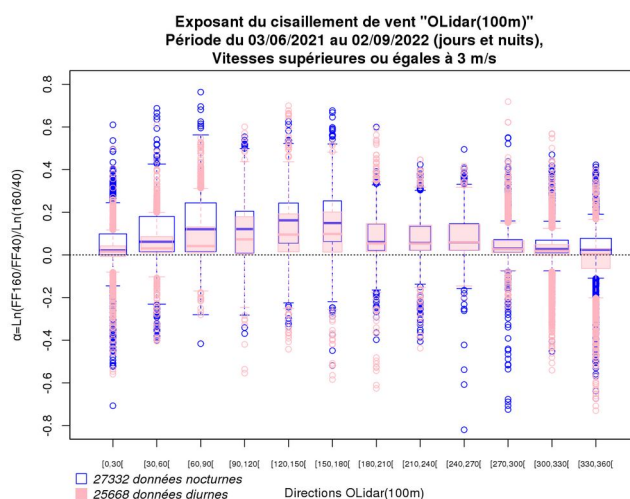


Illustration 21 : Exposant du cisaillement de vent du LiDAR

Les figures de l'exposant du cisaillement sur les périodes mensuelles se trouvent en Annexe 8.

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 :

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

Sur la période de la campagne de mesures, on constate que les vents de secteur ouest-nord-ouest présentent une intensité de turbulence légèrement plus forte que pour les autres directions (cf. Illustration 22).

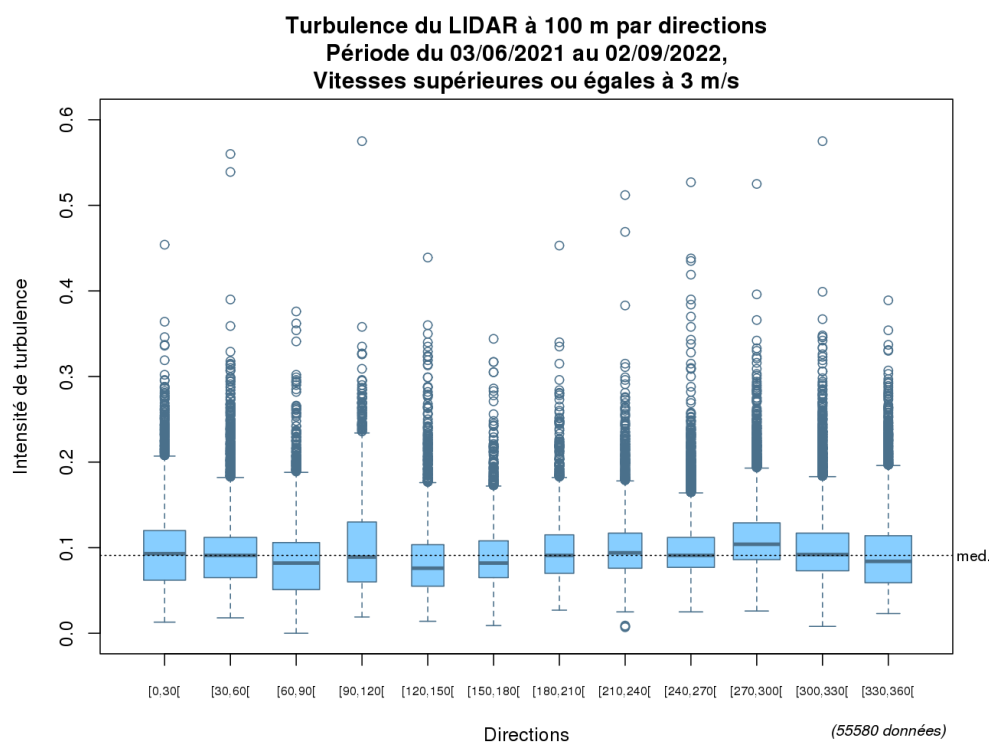


Illustration 22 : Turbulence du LiDAR

Les boîtes à moustaches mensuelles, suivant les directions, de l'intensité de turbulence du vent du LiDAR à 100 m figurent en Annexe 9.

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.

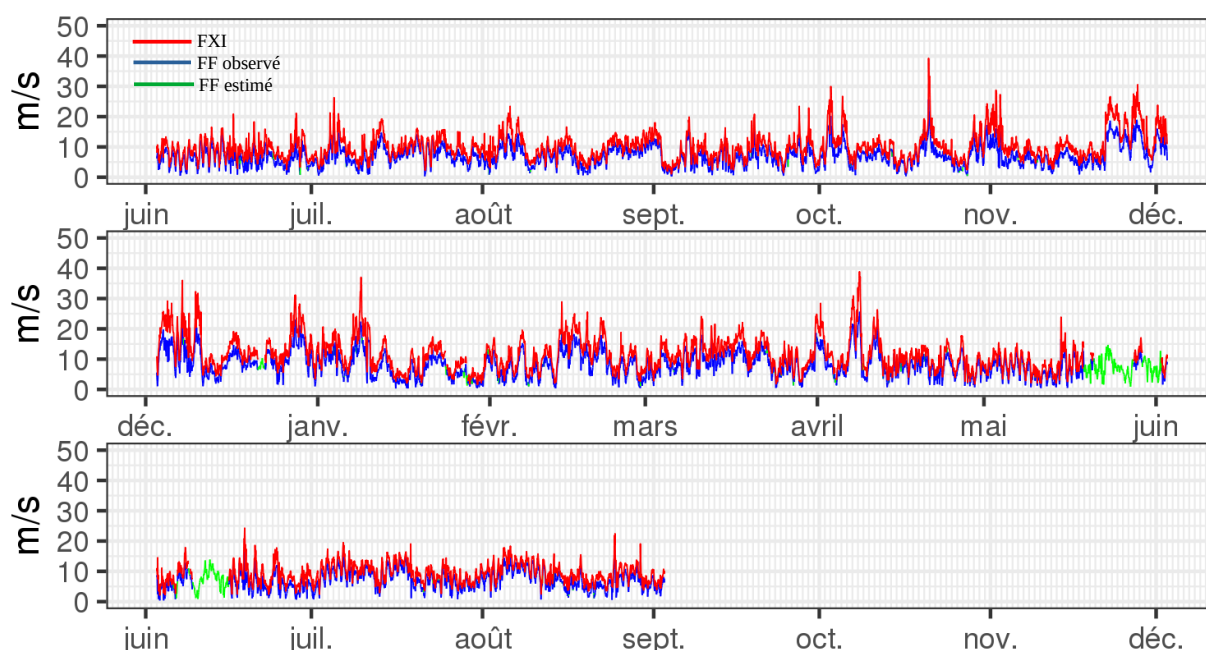


Illustration 23 : Séries FF et FXI à 100 m du LiDAR

Météo-France fournit au travers du fichier « SerieLidarH100_Oleron_20210603-20220902.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 03/06/2021 au 02/09/2022. 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).

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

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

Environ 3 % des valeurs enregistrées par l'anémomètre sort des seuils de force. Ce qui est nettement plus important que pour le LiDAR. La plupart des dépassements en force sont dus à des forces modélisées inférieures à celles relevées par l'anémomètre.

Les dépassements du seuil de direction sont assez nombreux. La majorité de ces dépassements correspondent à des forces faibles à légèrement modérées. Pour des vitesses supérieures à 6 m/s, on enregistre des dépassements du seuil de direction (écart supérieur à 30° entre l'anémomètre et le modèle) dans moins de 5 % des cas.

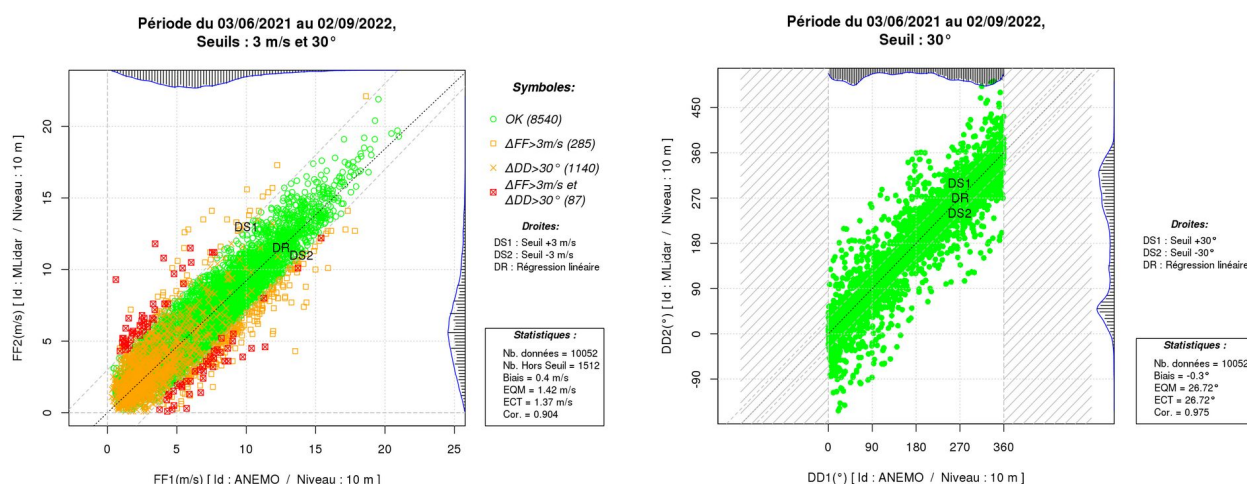


Illustration 24 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) de l'anémomètre avec le modèle

- 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.

Les distributions statistiques horaires des observations et du modèle à 10 m sont assez proches. Les quantiles apparaissant ci-dessous sont très proches pour les premiers déciles. Ils s'éloignent ensuite progressivement avec des écarts atteignant 0,4 m/s à la médiane et 0,7 m/s au dernier décile. Le diagramme « quantile-quantile » des forces de vent de l'anémomètre présente des points légèrement décalés par rapport à la première bissectrice avec, comme indiqué précédemment, des forces de vent inférieures pour le modèle. Les résultats de l'anémomètre restent globalement très corrects, compte tenu de la difficulté de l'extrapolation de la mesure à 10 m.

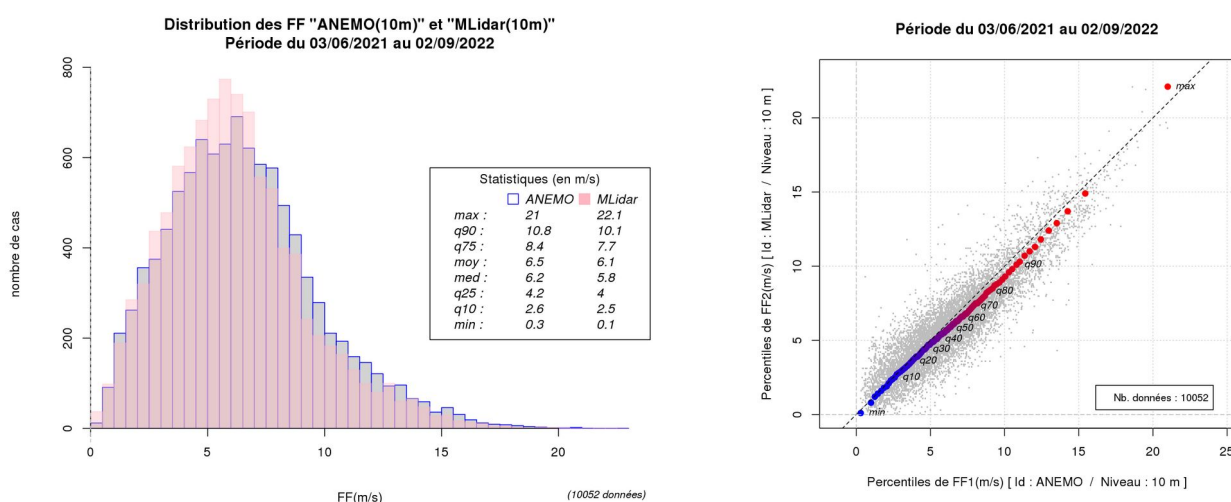


Illustration 25 : Distribution des vents horaires de l'anémomètre (à gauche) et diagramme « quantile-quantile » (à droite)

La rose des vents de l'anémomètre présente de nombreuses ressemblances avec celle du modèle AROME à 10 m. On note quelques différences mineures avec notamment une composante ouest plus fréquente pour le modèle (+1,4%), une légère surestimation de 1,5 % du modèle pour les vents faibles, et à l'inverse une sous-estimation de 1,5 % pour les vents modérés.

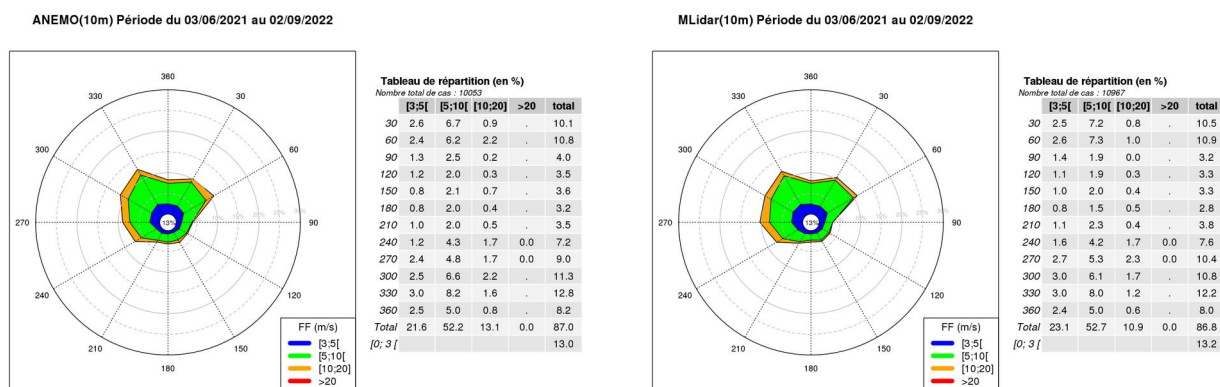


Illustration 26 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'anémomètre

5 Conclusion

Au cours des douze mois de campagne prolongés de trois mois supplémentaires, nous avons pu établir que les mesures de vent de surface et d'altitude, effectuées sur la zone d'étude au large d'Oléron, étaient parfaitement 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, une série complète du vent horaire à 100 m a pu être créée et estimée sur quelques périodes manquantes (notamment sur la dernière décade de mai 2022 et sur la première quinzaine de juin 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

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.

Annexes

Table des annexes

Annexe 1 : Situation des 20 et 21 octobre 2021 (tempête Aurore).....	38
Annexe 2 : Climatologie du 1er juin 2021 au 31 août 2022.....	40
Annexe 3 : Distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	48
Annexe 4 : Répartitions horaires par mois des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	51
Annexe 5 : Tableau de contingence des forces de vent du LiDAR.....	54
Annexe 6 : Roses des vents mensuelles du LiDAR à 100m (données brutes).....	55
Annexe 7 : Profils de vent du LiDAR.....	58
Annexe 8 : Cisaillement du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	61
Annexe 9 : Turbulence du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	64

Annexe 1 : 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 rapidement vers l'est en gardant une force très soutenue. Les vents tempétueux concernent toute la moitié nord de l'hexagone, et en particulier la Charente-Maritime avec des rafales de secteur Nord-Ouest enregistrées en soirée à 34,3 m/s (128 km/h) à St-Clément-des-Baleines (Île de Ré), 32,8 m/s (118 km/h) à Chassiron (Oléron), et 30,5 m/s (110 km/h) à La Rochelle.

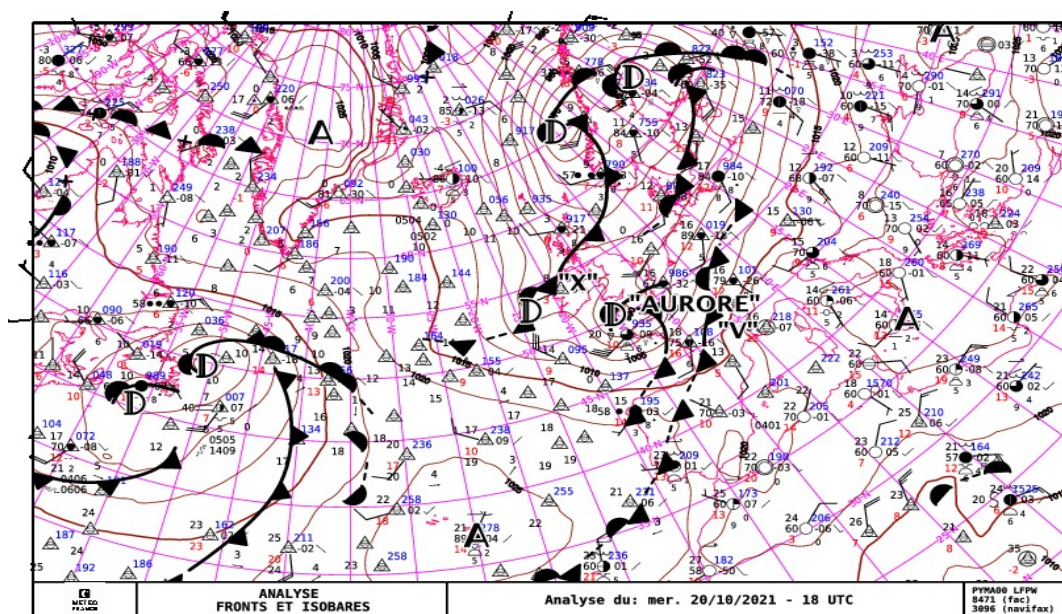


Illustration 27 : Analyse Isofront du mercredi 20 octobre 2021 à 18 UTC

La comparaison entre l'enregistrement du Lidar d'Oléron et le modèle AROME ne fait pas apparaître d'anomalie particulière avec une excellente convergence temporelle et d'intensité entre observation et modélisation. On peut juste noter quelques variations d'intensité du vent observé, en particulier le 21 au matin, à l'arrière de la tempête. Ceci s'explique par une situation de traîne active donnant lieu à de brusques variations de vent sur des périodes très courtes, inférieures à la résolution temporelle du modèle.

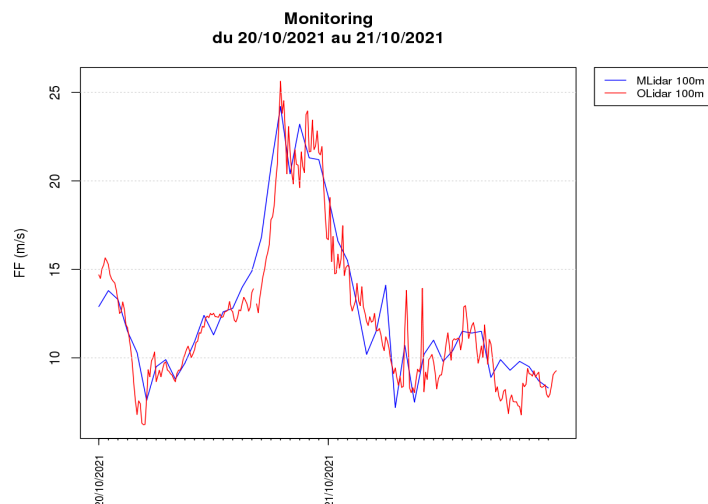


Illustration 28 : Comparaison des mesures du Lidar d'Oléron avec le modèle AROME les 20 et 21 octobre 2021

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.

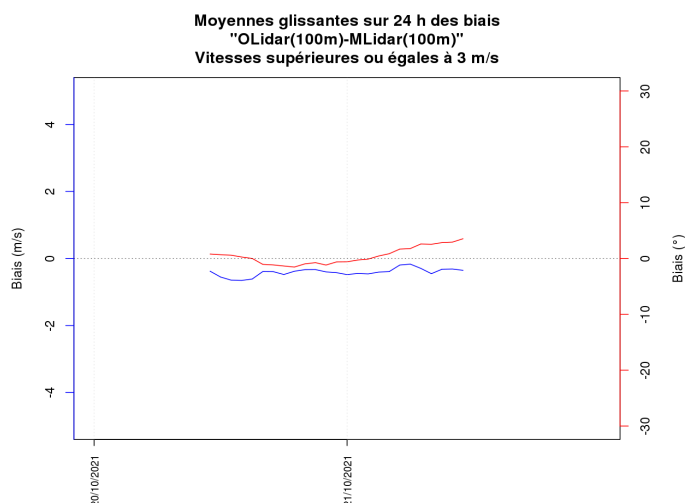


Illustration 29 : Comparaison des biais entre les mesures du Lidar d'Oléron et le modèle AROME les 20 et 21 octobre 2021

Annexe 2 : Climatologie du 1^{er} juin 2021 au 31 août 2022

La station météorologique de référence pour qualifier la climatologie de la zone étudiée est située à Chassiron sur l'île d'Oléron (17). La période sur laquelle portent les statistiques s'étend de 2001 à 2020.

1) Le vent

a) Analyse de l'été 2021 (mois de juin à août)

La rose des vents observée pendant l'été 2021 et celle de la période estivale 2001-2020 sont assez similaires. On note cependant une direction 040°-060° plus présente que la normale (+6,5%) au détriment du secteur 320°-360° un moins marqué (-6.3 % par rapport à la normale saisonnière).

On remarque également des intensités de vents globalement plus fortes que la normale 2001-2020 avec des fourchettes [4.5 et 8.0 m/s] et > 8,0 m/s plus fréquentes de respectivement +7.6 %, et +2.0 %

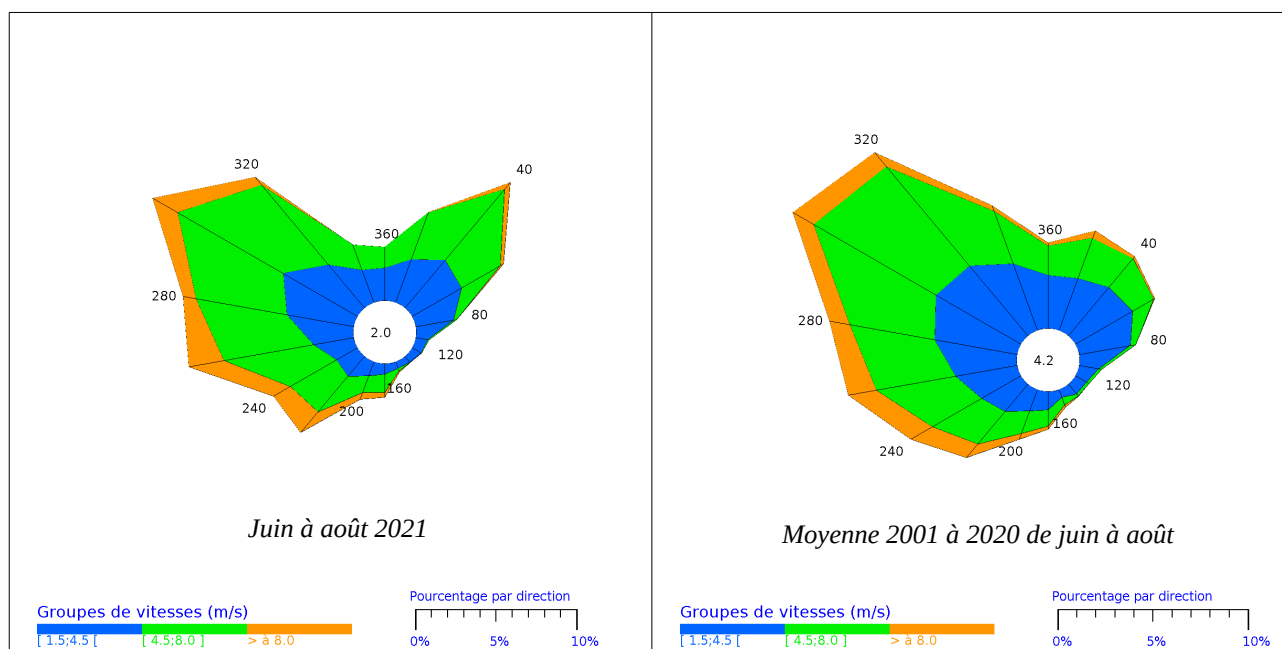


Illustration 30 : Roses des vents de l'été 2021 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Chassiron

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

On observe ici une sur-représentation des vents d'un large secteur Nord-Est (020°-080°) avec une fréquence de ces directions supérieure de 10,7 % par rapport aux normales. Cet excédent est compensé sur à peu près toutes les autres directions de vents, en particulier les secteurs 120°-160° (-5,2%) et 180°-240° (-2,7 %).

On ne note pas différence significative en termes d'intensité de vent.

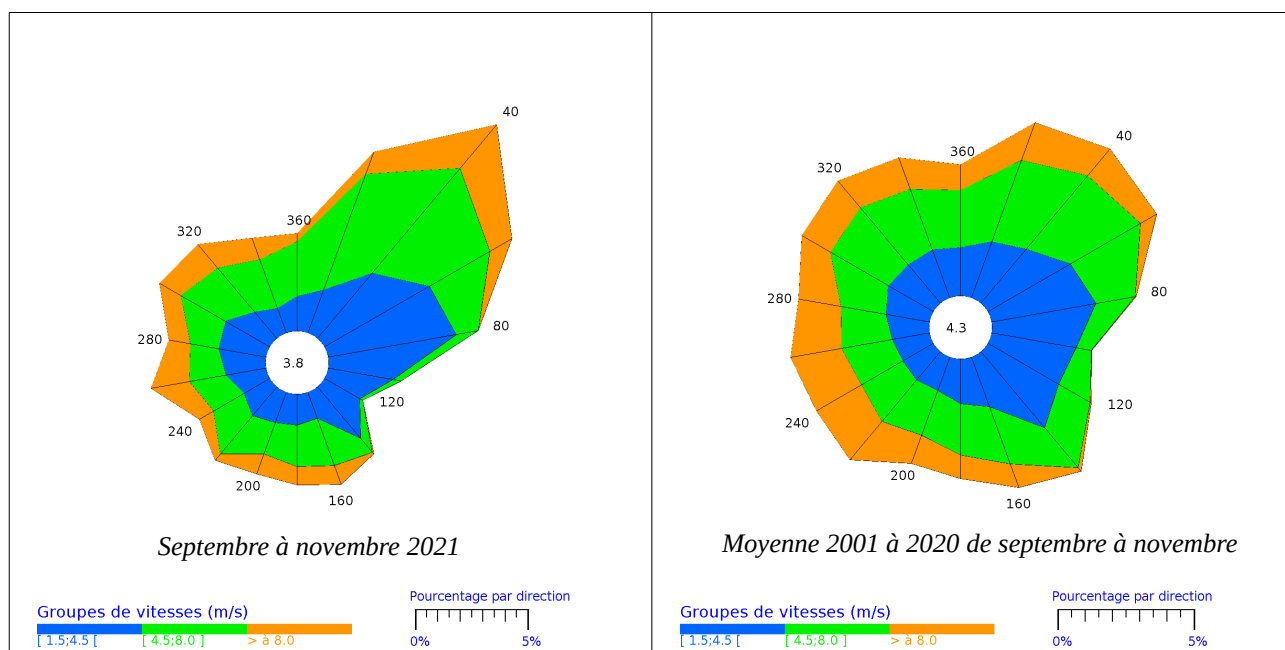


Illustration 31 : Roses des vents de l'automne 2021 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Chassiron

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

On observe sur la période hivernale 2021-2022, une rose des vents au profil plus étiré que la normale saisonnière 2001-2020. Ceci s'explique par une moindre fréquence des vents de secteur Nord (-5.5 % sur les directions 340° à 020°) ainsi que d'un large secteur Sud (-7,7 % sur les directions 140° à 220°). En contrepartie, on note une plus grande fréquence des vents de directions 060° à 100° (+6.7 %), 240° (+2.0%) et des vents calmes (+1.6%).

La répartition des intensités de vents est similaire sur les deux roses des vents, sans différence significative.

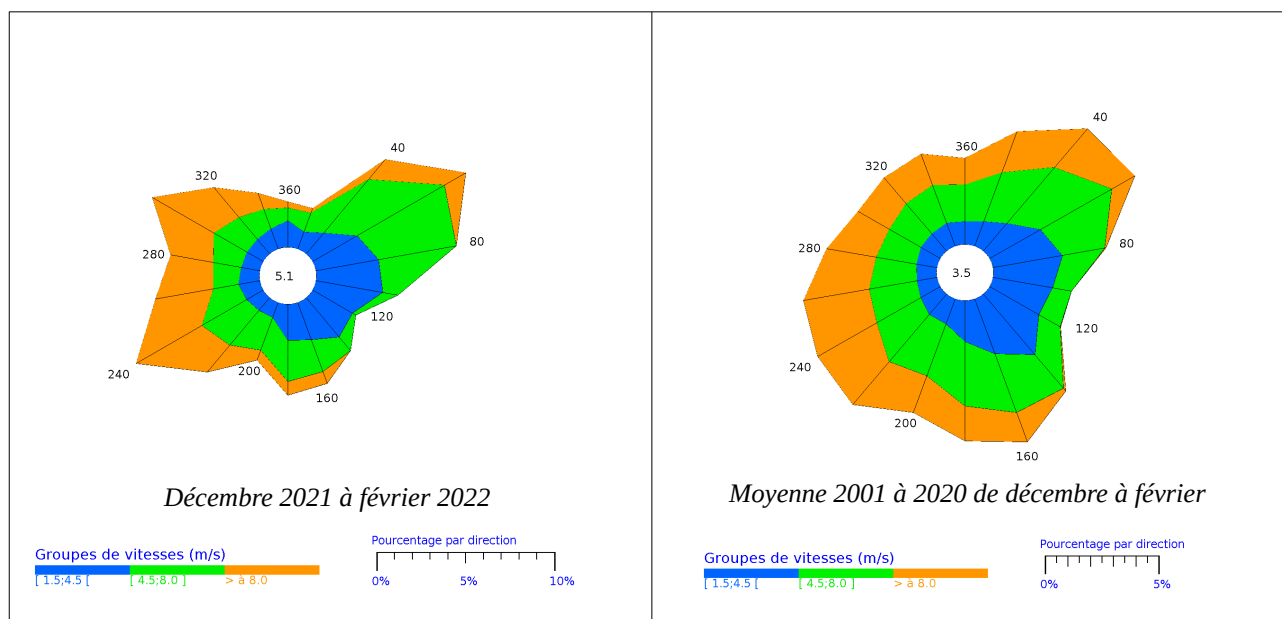


Illustration 32 : Roses des vents de l'hiver 2021-2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Chassiron

d) Analyse du printemps 2022 (mois de mars à mai)

Les formes des deux roses de vents (2022 versus 2001-2020) sont ici assez similaires. On note cependant que les vents de secteur Sud-Ouest (200°-280°) sont moins fréquents en 2022 (-10.9 % par rapport aux normales) au profit des vents Sud-Est (+6.5 % sur les directions 120° à 160°) et de Nord (+3.6 % sur les directions 340°-360°).

Sur cette période printanière 2022, les vents ont soufflé un peu moins fort que la normale, avec une moindre fréquence de vents supérieurs à 8.0 m/s (11.1 % en 2022 vs 16.4 % pour la période 2001-2020) au bénéfice de vents faibles à modérés (-4.5% pour les intensités entre 1.5 et 4.5 m/s).

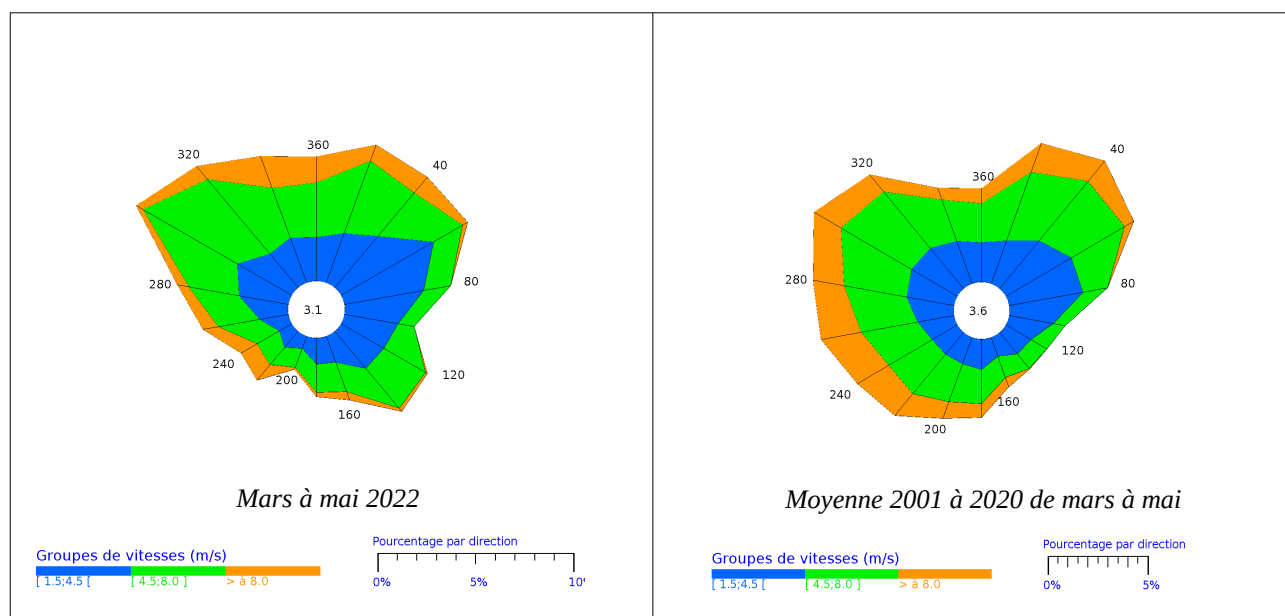


Illustration 33 : Roses des vents du printemps 2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Chassiron

e) Analyse de l'été 2022 (mois de juin à août)

On retrouve ici aussi des roses de vents 2022 et 2001-2020 assez similaires. Les différences portent essentiellement sur une plus grande fréquence des vents de large secteur Nord-Est (+10.7 % pour les directions 020° à 080°) au détriment des vents de Sud-Ouest (-6.0 % pour les directions 220° à 280°) et dans une moindre mesure Nord-Ouest (-2.2 % pour les directions 320°-340°).

Les vents forts supérieurs à 8.0 m/s ont été moins fréquents que la normale (4.0 % des cas pendant l'été 2022 contre 8.8 % pour les normales estivales 2001-2020). A l'inverse, les vents faibles ou modérés ont été un peu plus fréquents en 2022 avec +6.6 % d'intensités de vent comprises entre 1.5 et 4.5 m/s par rapport aux normales.

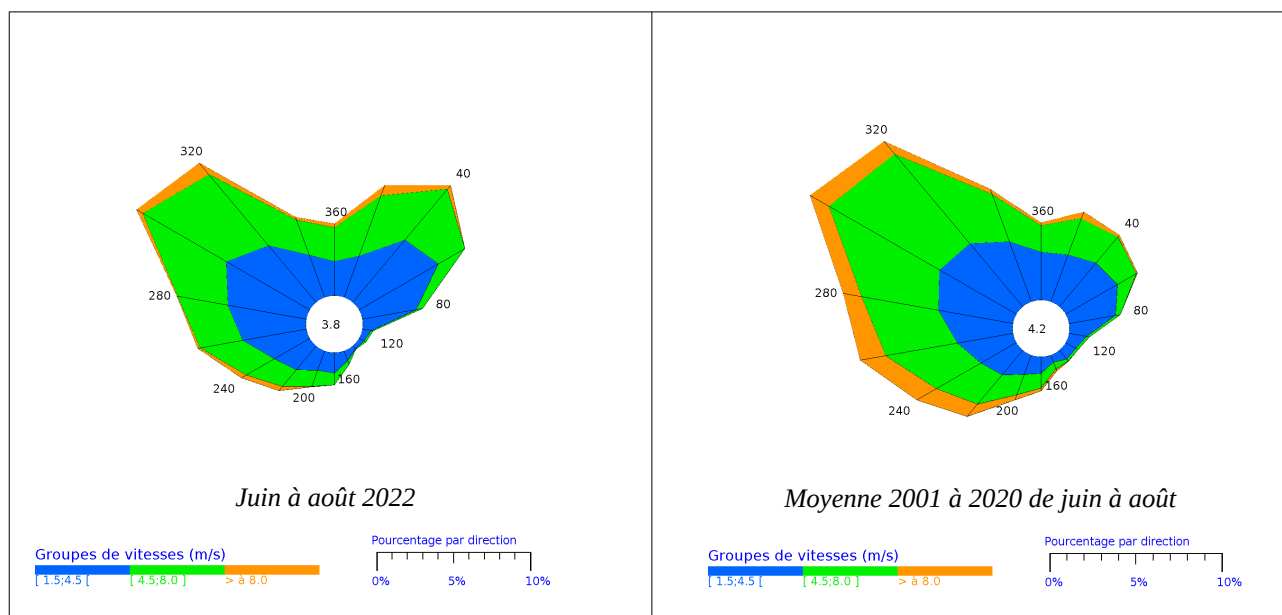


Illustration 34 : Roses des vents de l'été 2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Chassiron

f) Tempêtes

Sur la période 2021 de la campagne (juin à décembre 2021), les vents tempétueux (supérieurs à 27 m/s) ont été observés à 3 reprises: une fois en octobre (tempête « Aurore » détaillée en Annexe 1) et 2 fois en décembre. On notera que cela est tout à fait conforme aux statistiques établies sur la période 1991/2020 avec en moyenne 3 cas de tempête sur cette même période de juin à décembre, répartis le plus souvent entre octobre et décembre.

Sur la période 2022 de la campagne (janvier à août 2022), les vents tempétueux ont été observés à 2 reprises : une fois en janvier et une autre fois en avril. Ce nombre d'occurrences est légèrement inférieur aux statistiques établies sur la période 1991/2020 avec en moyenne 2,7 cas de tempête chaque année sur cette même période de janvier à août.

Date	Vent maxi (m/s)	Remarques
20/10/2021	32.8	Tempête « Aurore »
04/12/2021	27.8	
07/12/2021	28.6	Tempête « Barra »
08/01/2022	27.9	
08/04/2022	30.5	Tempête « Diego »

2) Les températures

De juin 2021 à janvier 2022, on observe une assez grande variabilité des températures autour des normales. A partir de février 2022, les températures sont tous les mois au-dessus des normales, en particulier mai, juillet et août 2022, très excédentaires.

Concernant les températures maximales, elles sont proches des normales 1991-2020 en juillet, octobre et décembre 2021, ainsi qu'en avril 2022. Elles sont déficitaires en août 2021 (-0,8°C), novembre 2021 (-1,5°C) et janvier 2022 (-1,0°C). L'excès de température, déjà significatif en septembre 2021 (+1,7°C), devient encore plus notable en 2022, en particulier mars (+1,9°C), mai (+3,1°C), juillet (+2,4°C) et août (+2,6°C).

Pour les températures minimales, elles sont proches de la normale en juillet, août et octobre 2021. Elles sont déficitaires en novembre 2021 (-1,4°C) et janvier 2022 (-1,0°C). Tous les autres mois sont excédentaires, en particulier juin 2021 (+1,2°C), septembre 2021 (+1,4°C), ainsi que toute la période 2022 (+1,8°C en février et mai, +1,2°C en juin).

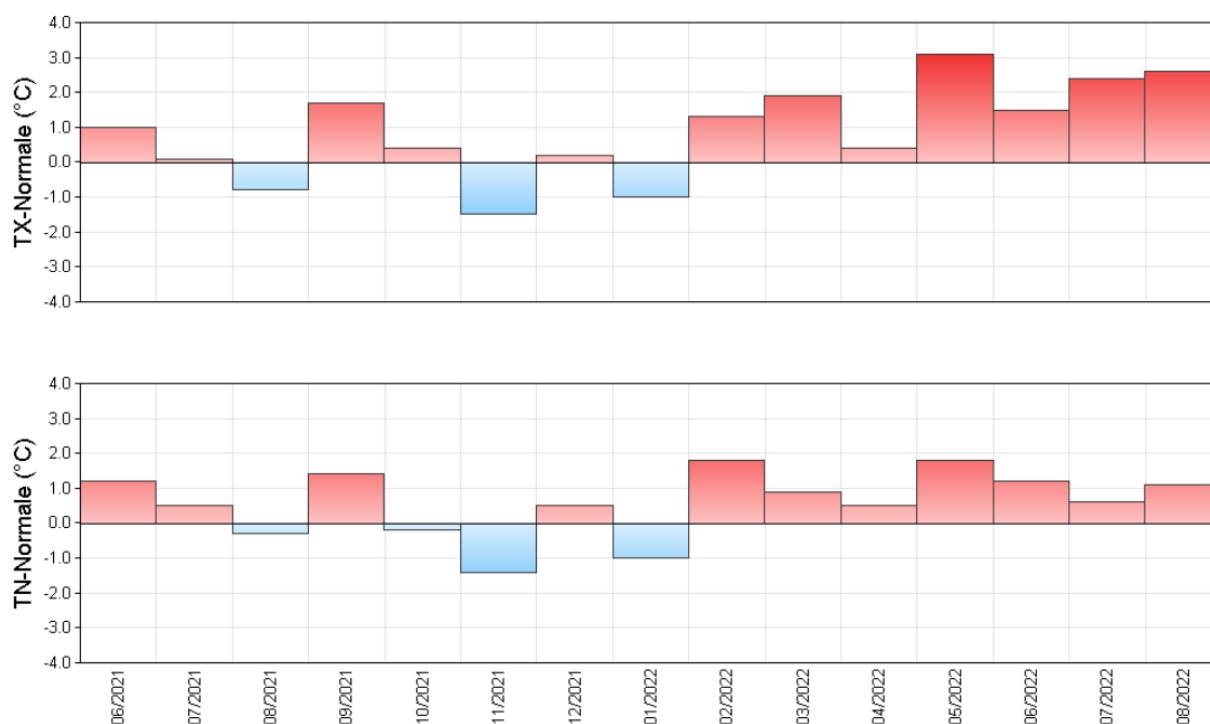


Illustration 35 : Anomalies mensuelles de températures minimales et maximales de juin 2021 à août 2022 à la station de Chassiron - Période de référence : 1991 - 2020

3) Les précipitations

Hormis juin et décembre 2021 ainsi que juin 2022, tous les autres mois de la période étudiée ont été secs voire très secs par rapport aux normales 1991-2020. Sur l'ensemble de la période le déficit de précipitations est voisin de 23 % par rapport à la normale.

Après un mois de juin 2021 particulièrement arrosé (cumul mensuel de 93 mm soit plus de 2,5 fois la normale), les 5 mois suivants ont enregistré un déficit de précipitations variant de 17 % en octobre (60.5 mm) à 54 % en novembre (41.9 mm). L'année 2021 s'est conclue par un mois de décembre proche de la normale (85.3 mm). Les 5 premiers mois de 2022 ont été particulièrement secs avec un déficit de précipitations variant de 18 % en mars (39.8 mm) à 62 % en février (18.8 mm). Juin 2022 a bénéficié d'un excédent pluviométrique de 120 % par rapport à la normale (79,5 mm), avant de retrouver des mois de juillet et août de nouveau très secs (- 82 % en juillet soit 6.8 mm, et -54 % en août soit 19.5 mm).

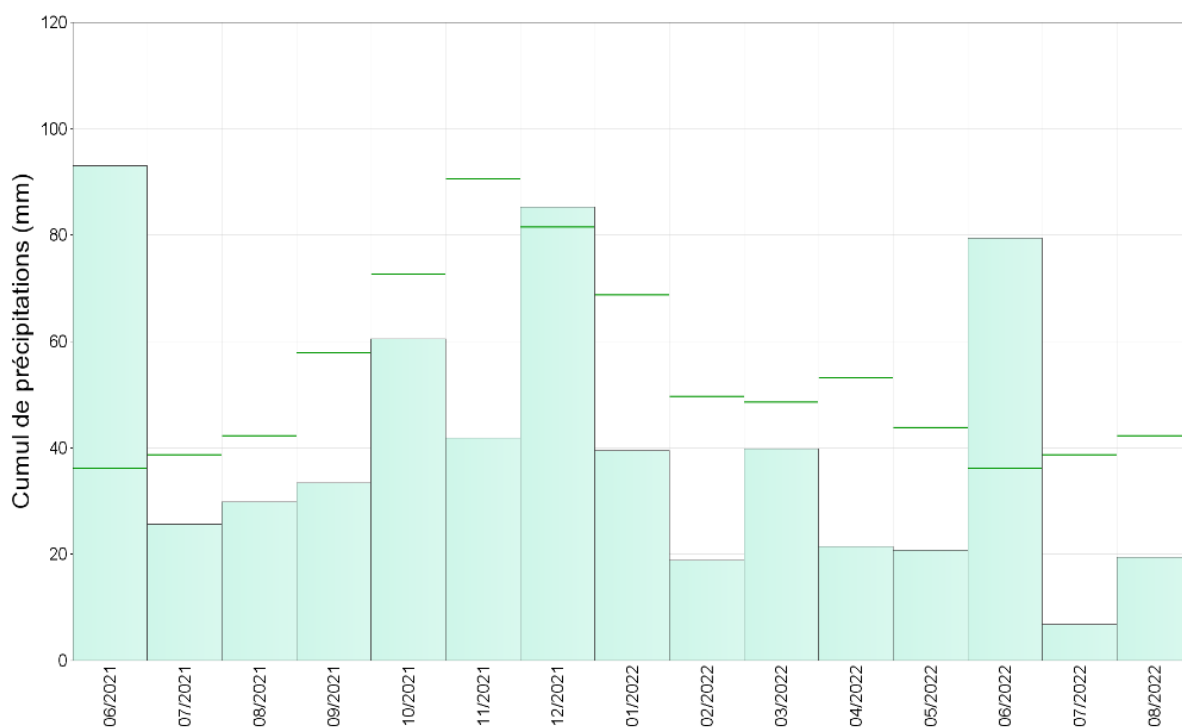
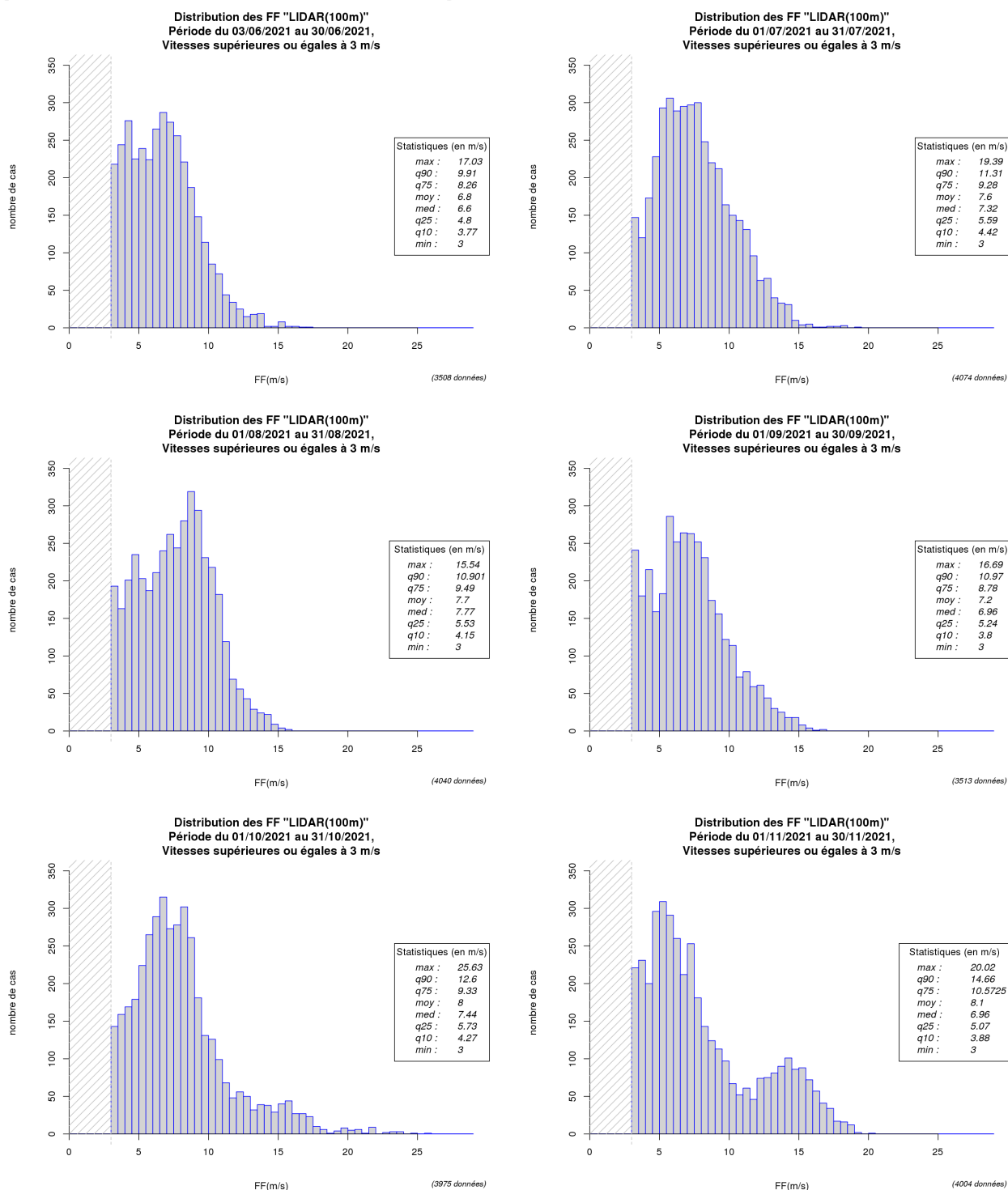
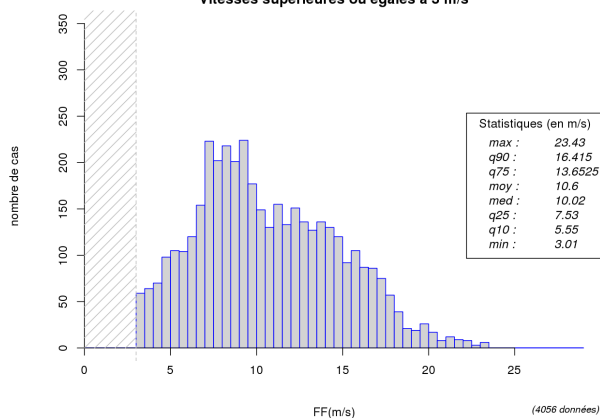


Illustration 36 : Cumuls mensuels de précipitations de juin 2021 à août 2022 à la station de Chassiron, histogrammes (en bleu) et normale de précipitations (segments en vert) - Période de référence : 1991 - 2020

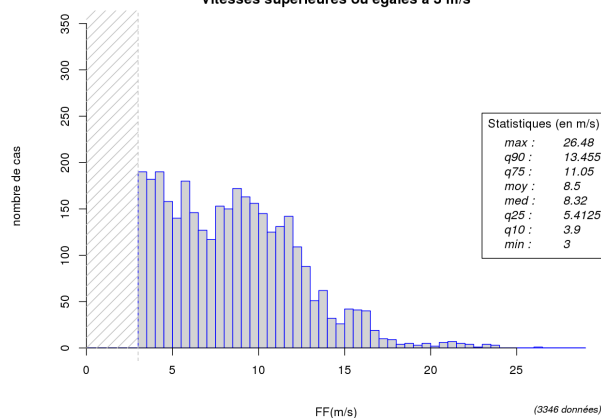
Annexe 3 : Distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)



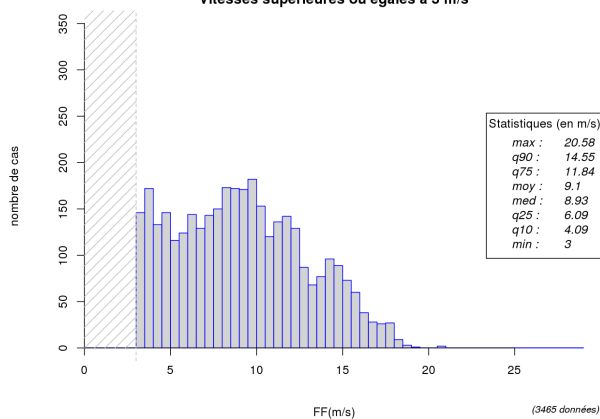
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/12/2021 au 31/12/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



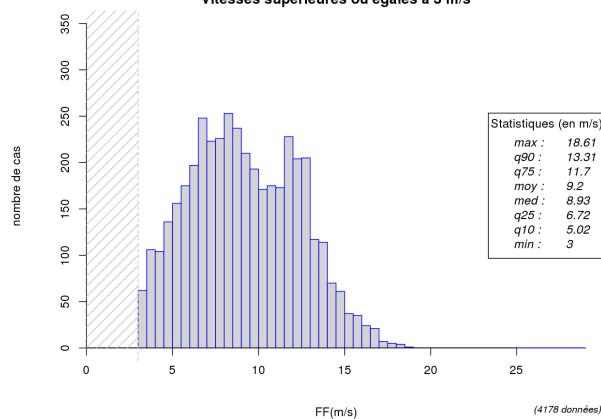
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/01/2022 au 31/01/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



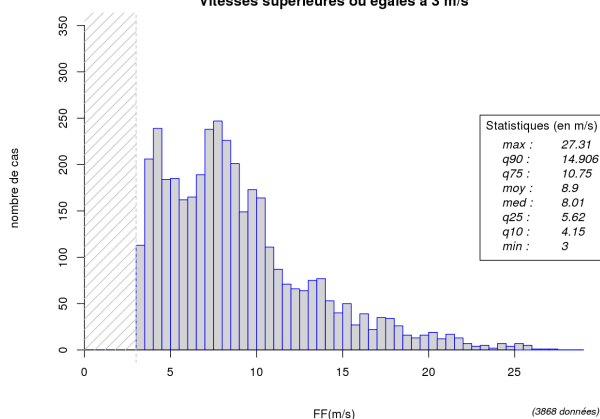
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/02/2022 au 28/02/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



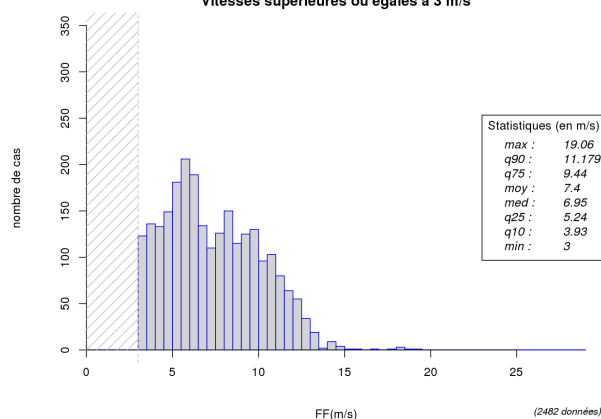
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/03/2022 au 31/03/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s

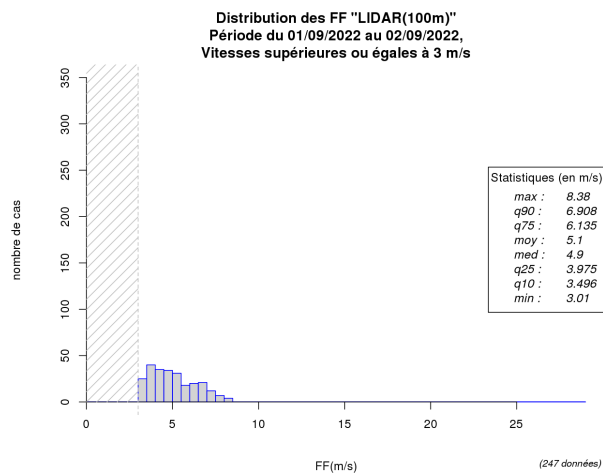
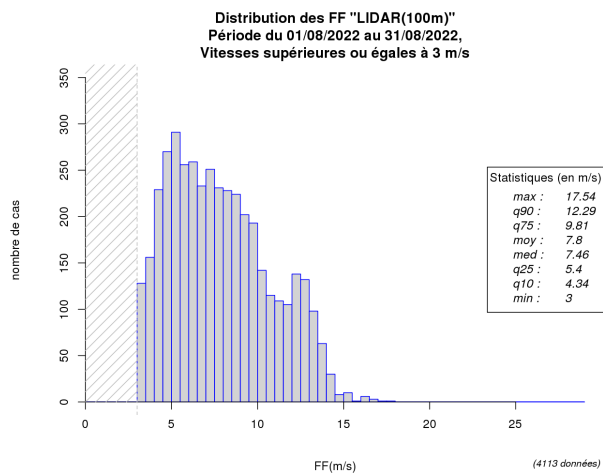
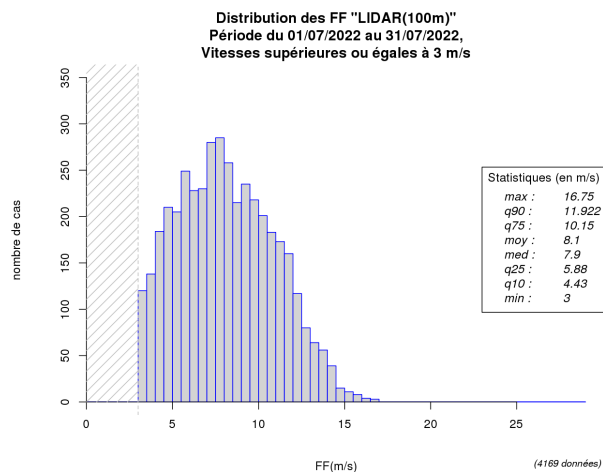
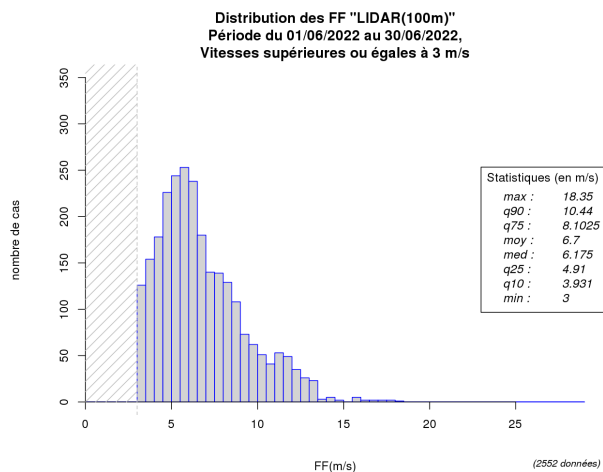


Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/04/2022 au 30/04/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



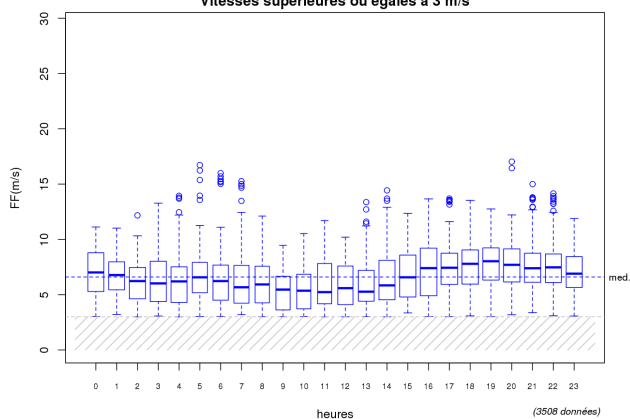
Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/05/2022 au 31/05/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



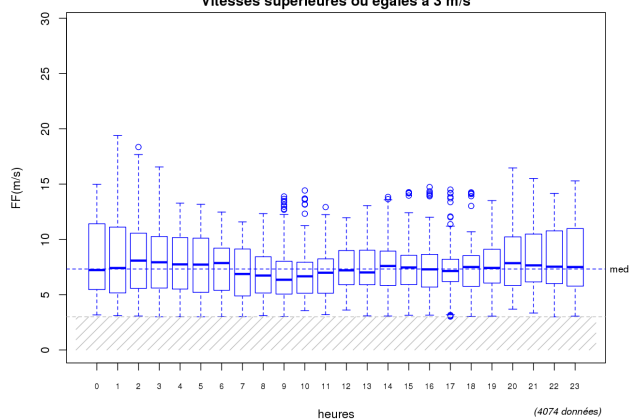


Annexe 4 : Répartitions horaires par mois des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)

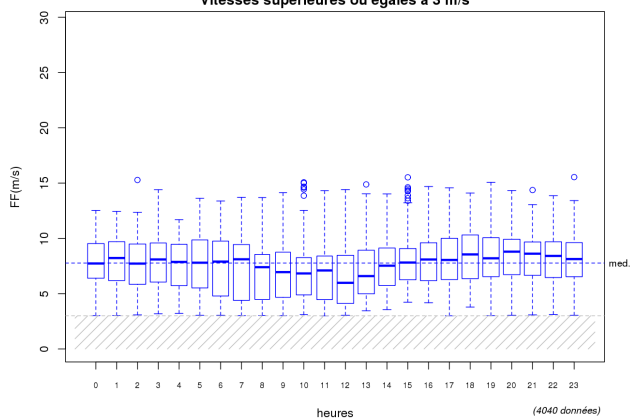
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 03/06/2021 au 30/06/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



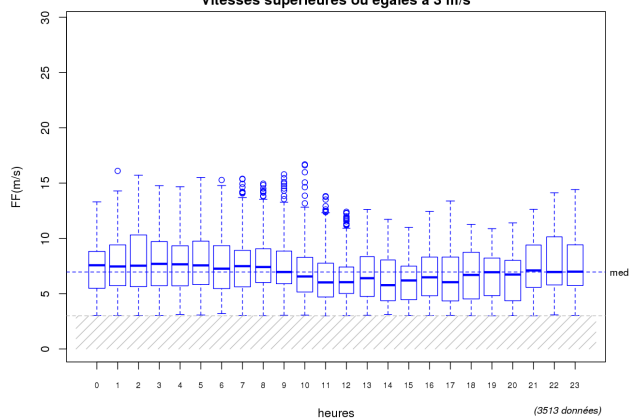
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/07/2021 au 31/07/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



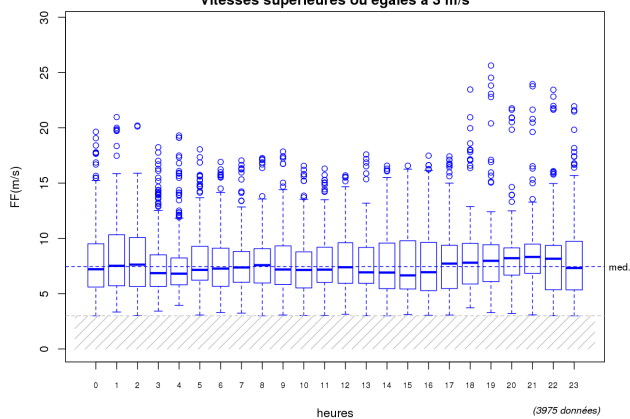
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/08/2021 au 31/08/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



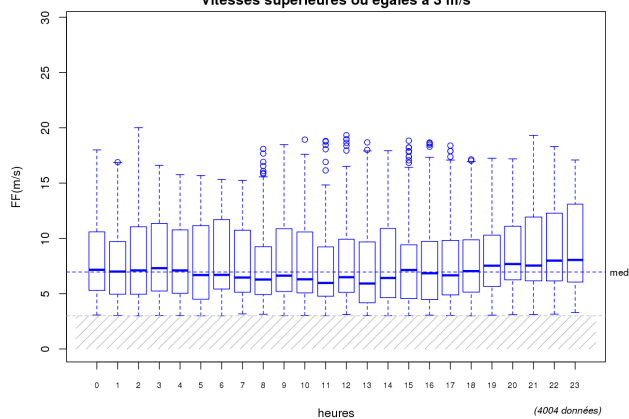
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/09/2021 au 30/09/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



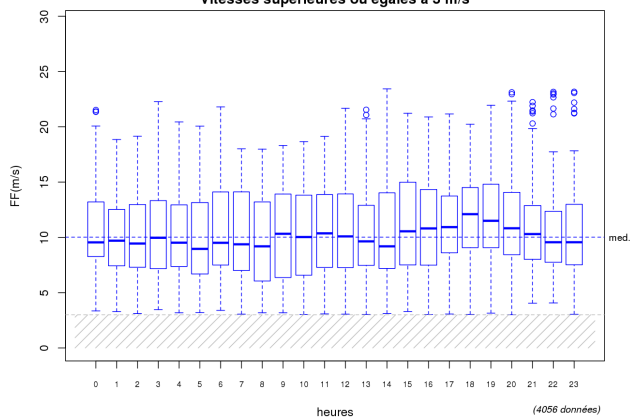
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/10/2021 au 31/10/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



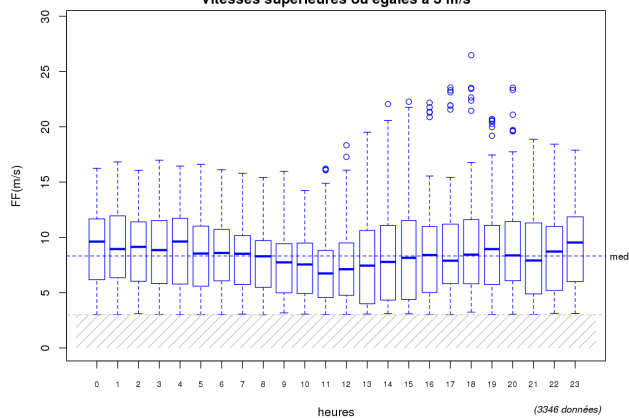
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/11/2021 au 30/11/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



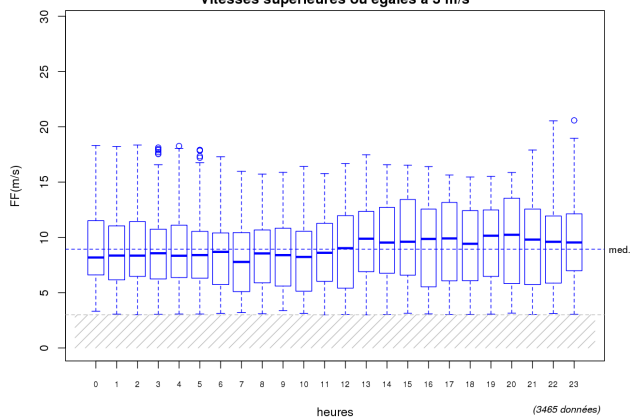
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/12/2021 au 31/12/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



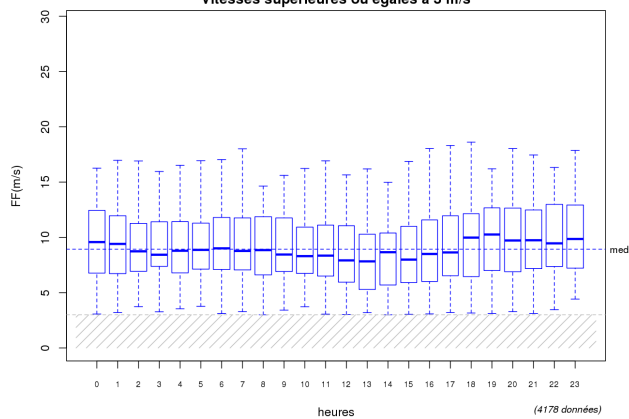
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/01/2022 au 31/01/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



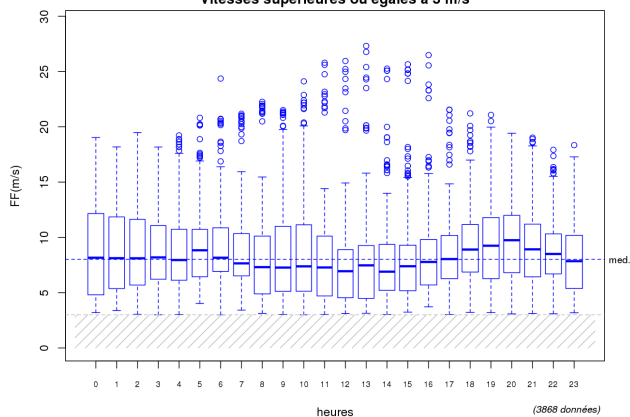
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/02/2022 au 28/02/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



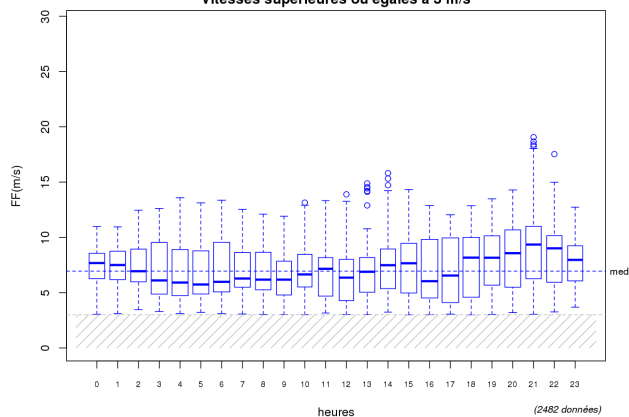
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/03/2022 au 31/03/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



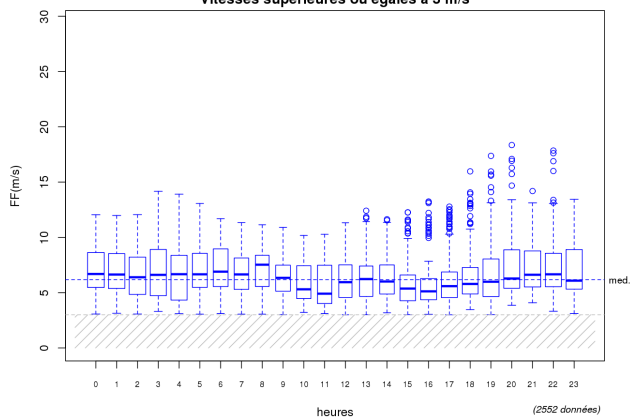
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/04/2022 au 30/04/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



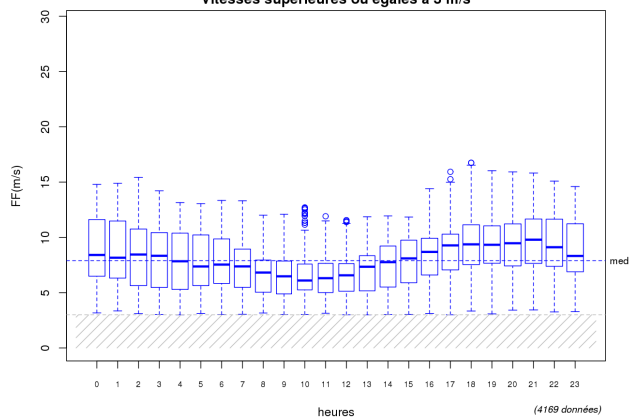
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/05/2022 au 31/05/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



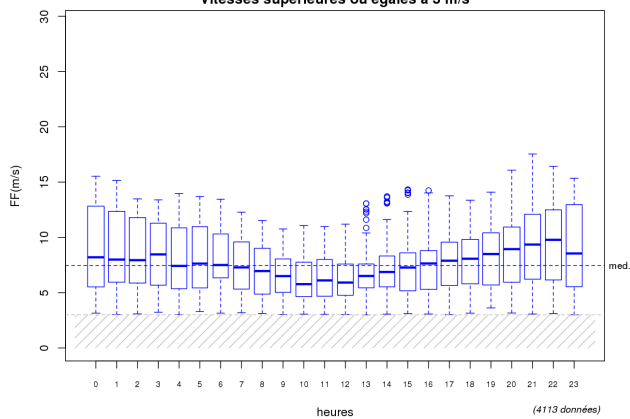
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/06/2022 au 30/06/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



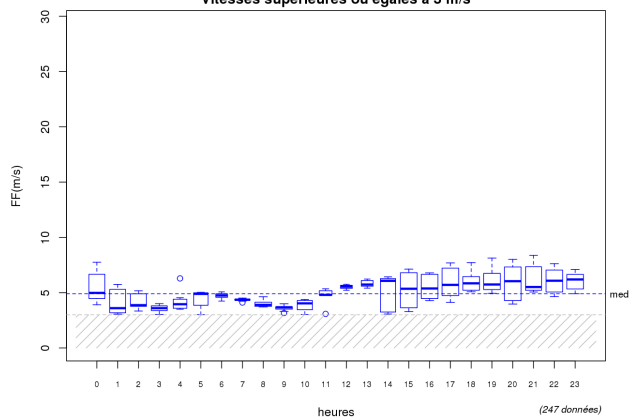
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/07/2022 au 31/07/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



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 02/09/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



Annexe 5 : 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[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[31,32[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[30,31[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[29,30[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[28,29[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[27,28[	.	.	.	.	.	.	.	0,0	.	.	.	.	0,0
[26,27[	.	.	.	.	.	.	.	0,0	0,0	0,0	.	.	0,0
[25,26[	.	.	.	.	.	.	.	0,1	0,1	0,0	.	.	0,2
[24,25[	.	.	.	.	.	.	.	0,1	0,1	.	.	.	0,2
[23,24[	.	.	.	.	.	.	0,0	0,2	0,1	0,1	.	.	0,4
[22,23[	.	.	.	.	.	.	.	0,4	0,0	0,0	.	.	0,5
[21,22[	.	.	.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,3	0,1	.	.	1,2
[20,21[	.	.	.	0,0	0,0	0,0	0,1	0,5	0,3	0,1	0,0	.	1,3
[19,20[	.	.	.	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,6	0,2	0,0	.	1,6
[18,19[	0,0	0,0	.	0,1	0,1	0,1	0,2	0,7	0,5	0,4	0,4	0,1	2,8
[17,18[	0,2	0,2	.	0,1	0,3	0,4	0,3	1,3	1,7	0,8	0,6	0,3	6,1
[16,17[	0,2	0,6	.	0,3	0,7	0,8	0,3	1,0	2,0	1,6	1,1	1,0	9,4
[15,16[	0,5	1,8	0,0	0,3	1,0	0,9	0,7	1,4	2,9	2,3	1,3	1,1	14,2
[14,15[	1,1	2,5	0,3	0,8	1,7	0,9	0,7	2,5	3,0	3,1	1,9	0,8	19,3
[13,14[	2,5	4,3	0,8	1,3	2,3	1,3	0,9	2,5	3,0	4,2	2,6	1,5	27,3
[12,13[	3,4	8,1	2,0	2,5	3,8	1,9	1,6	2,6	3,3	5,1	3,5	2,1	40,0
[11,12[	2,7	11,5	2,1	2,1	3,2	2,1	1,6	4,4	4,4	4,5	6,0	4,4	49,1
[10,11[	5,2	13,6	3,8	2,1	3,3	2,3	2,7	4,0	5,4	4,8	8,4	4,8	60,5
[9,10[	8,5	17,3	4,3	2,8	4,5	2,5	2,5	6,8	7,0	5,8	11,6	6,9	80,6
[8,9[	11,7	18,6	6,3	3,9	4,1	3,2	3,3	9,5	7,3	8,5	13,7	9,0	99,0
[7,8[	12,3	16,2	6,8	3,2	3,4	3,9	4,3	8,7	10,2	11,8	14,2	11,9	106,9
[6,7[	12,6	13,9	5,6	4,0	3,0	4,7	5,7	7,8	11,8	12,6	13,6	9,9	105,2
[5,6[	12,3	10,1	5,9	5,4	3,3	3,3	5,3	6,8	14,2	14,5	12,8	9,1	103,0
[4,5[	7,8	8,8	5,9	5,7	3,3	3,2	4,5	5,4	11,3	15,3	11,5	8,6	91,2
[3,4[	6,1	7,9	5,3	5,9	4,1	3,0	3,7	4,1	8,5	10,5	10,0	6,8	75,8
[0,3[	7,8	8,3	8,1	8,2	6,2	6,3	6,9	6,8	12,2	12,0	11,8	9,6	104,1
Total	95	143,8	57,3	48,7	48,5	40,9	45,5	78,8	110,3	118,3	125	88	1000

Nombre de cas : 62150

*Analyse de répartition du vent LiDAR observé à 100 m sur la période du 02 juin 2021 au 3 septembre 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 10 % des cas.

Annexe 6 : Roses des vents mensuelles du LiDAR à 100m (données brutes)

JUIN 2021 - LiDAR (100m)

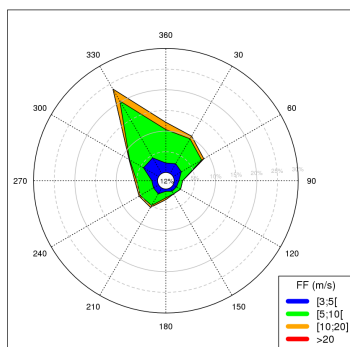


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 3993

	[3;5[	[5;10[	[10;20[	>20	total
30	2.8	6.9	0.8	.	10.4
60	2.3	5.7	0.6	.	8.6
90	1.2	0.9	.	.	2.1
120	1.0	1.1	.	.	2.1
150	1.0	0.7	0.0	.	1.7
180	0.6	1.6	0.4	.	2.6
210	1.7	3.2	0.5	.	5.4
240	1.5	3.7	0.3	.	5.5
270	1.4	3.7	0.5	.	5.5
300	4.2	3.9	0.2	.	8.3
330	4.4	15.9	3.3	.	23.6
360	2.3	8.1	1.8	.	12.1
Total	24.1	55.5	8.3	.	87.9
[0; 3[	.	.	.	.	12.1

JUILLET 2021 - LiDAR (100m)

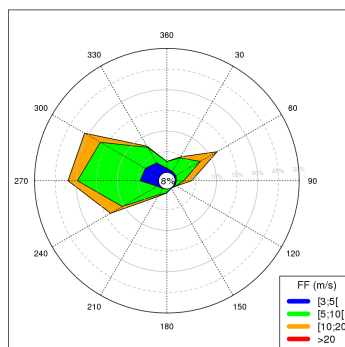


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4450

	[3;5[	[5;10[	[10;20[	>20	total
30	0.6	3.8	0.3	.	4.7
60	0.5	6.8	4.7	.	12.0
90	0.3	1.8	1.9	.	4.0
120	0.3	0.3	.	.	0.6
150	0.0	0.1	.	.	0.1
180	.	0.9	.	.	0.9
210	0.2	1.8	0.5	.	2.4
240	0.7	9.8	3.3	.	13.7
270	4.5	15.1	2.3	.	21.9
300	4.0	12.6	4.4	.	21.0
330	3.0	4.4	0.3	.	7.6
360	1.0	1.6	.	.	2.7
Total	15.0	59.0	17.6	.	91.6
[0; 3[	.	.	.	.	8.4

AOÛT 2021 - LiDAR (100m)

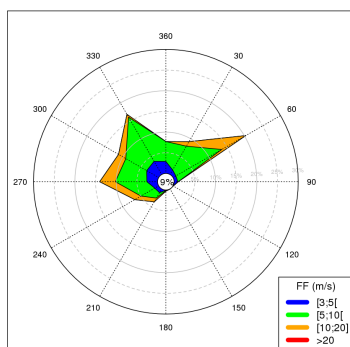


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4442

	[3;5[	[5;10[	[10;20[	>20	total
30	1.3	6.6	1.3	.	9.2
60	0.8	12.8	6.7	.	20.3
90	0.9	0.1	.	.	1.0
120	0.1	.	.	.	0.1
150	0.0	.	.	.	0.0
180	0.0	0.1	0.2	.	0.3
210	1.1	1.5	1.1	.	3.6
240	1.1	3.8	1.7	.	6.7
270	2.6	7.6	3.8	.	14.0
300	3.4	5.8	2.0	.	11.2
330	3.7	12.4	0.8	.	16.8
360	2.9	4.8	.	.	7.7
Total	17.8	55.6	17.5	.	91.0
[0; 3[	.	.	.	.	9.0

SEPTEMBRE 2021 - LiDAR (100m)

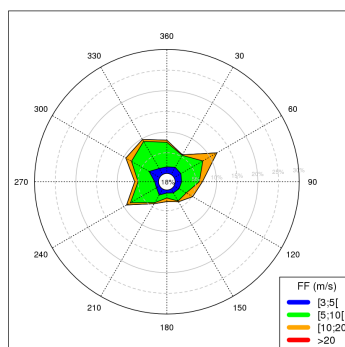


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4276

	[3;5[	[5;10[	[10;20[	>20	total
30	2.0	3.3	0.1	.	5.5
60	1.9	6.1	3.9	.	12.0
90	1.6	4.3	0.7	.	6.6
120	1.4	2.0	1.8	.	5.2
150	1.1	2.3	0.2	.	3.6
180	0.7	1.2	0.9	.	2.8
210	1.7	2.1	0.3	.	4.1
240	0.9	7.2	1.1	.	9.2
270	0.9	4.0	0.8	.	5.8
300	2.9	4.9	1.6	.	9.4
330	1.7	7.6	0.5	.	9.8
360	1.6	5.9	0.5	.	8.0
Total	18.6	51.1	12.5	.	82.2
[0; 3[	.	.	.	.	17.8

OCTOBRE 2021 - LiDAR (100m)

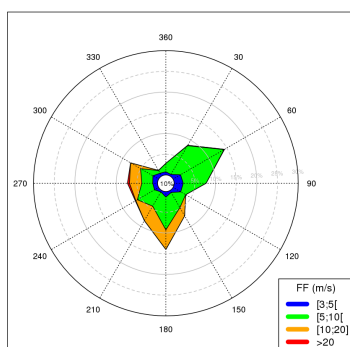


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4431

	[3;5[	[5;10[	[10;20[	>20	total
30	0.5	8.0	0.1	.	8.6
60	2.1	12.1	0.1	.	14.4
90	2.2	5.5	.	.	7.7
120	2.1	1.4	.	.	3.5
150	0.6	4.2	2.3	.	7.1
180	1.3	7.9	4.7	0.0	14.0
210	0.4	4.0	4.0	0.0	8.4
240	1.2	4.8	0.4	0.1	6.5
270	1.2	2.6	3.0	0.5	7.3
300	1.6	3.5	2.8	.	7.9
330	0.8	0.7	0.0	.	1.6
360	0.8	2.0	.	.	2.8
Total	14.7	56.8	17.5	0.7	89.7
[0; 3[	.	.	.	.	10.3

NOVEMBRE 2021 - LiDAR (100m)

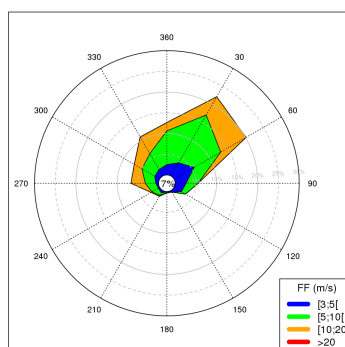


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4299

	[3;5[	[5;10[	[10;20[	>20	total
30	3.7	13.4	5.1	.	22.1
60	5.6	7.4	7.1	.	20.1
90	2.7	2.9	.	.	5.6
120	2.1	1.1	.	.	3.2
150	0.4	0.0	.	.	0.5
180	0.1	0.2	.	.	0.3
210	0.7	0.7	0.3	.	1.6
240	0.3	1.8	0.3	.	2.4
270	0.7	2.5	3.4	.	6.7
300	1.4	3.6	2.2	.	7.1
330	1.8	4.4	4.7	0.0	10.9
360	2.5	8.1	2.0	.	12.7
Total	22.1	46.1	24.9	0.0	93.1
[0; 3[	.	.	.	.	6.9

DÉCEMBRE 2021 - LIDAR (100m)

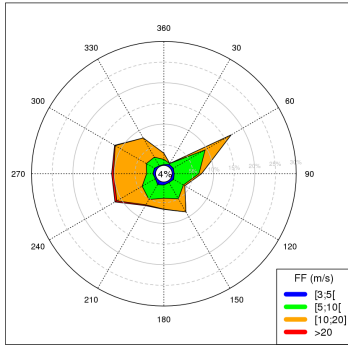


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4238

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.6	0.2	.	.	0.8
60	0.6	8.9	7.2	.	16.8
90	0.5	6.0	0.6	.	7.1
120	0.7	2.7	0.4	.	3.8
150	0.5	4.5	3.7	.	8.7
180	0.8	3.2	2.6	0.1	6.6
210	1.0	4.2	1.5	0.2	6.9
240	0.4	3.7	7.1	0.5	11.7
270	0.7	1.5	8.0	0.5	10.6
300	0.6	2.3	8.7	0.2	11.8
330	0.2	2.4	5.4	.	8.0
360	0.2	1.2	1.5	.	3.0
Total	6.9	40.8	46.6	1.5	95.8
[0; 3[					4.2

JANVIER 2022 - LIDAR (100m)

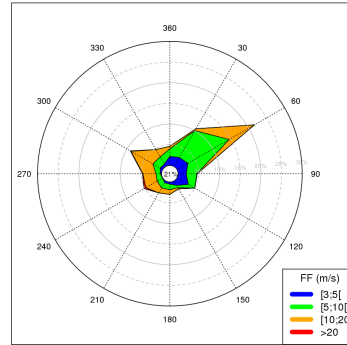


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4258

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	2.5	7.5	0.5	.	10.5
60	3.0	11.5	7.1	.	21.6
90	2.0	2.6	0.1	.	4.6
120	3.1	1.8	.	.	5.0
150	1.3	0.7	0.3	.	2.2
180	0.5	1.4	1.2	.	3.0
210	0.5	1.5	1.4	.	3.4
240	0.1	1.5	3.2	0.5	5.2
270	0.3	1.1	3.2	0.1	4.6
300	0.7	2.0	6.1	0.2	9.0
330	0.7	2.0	2.0	.	4.7
360	2.2	1.8	0.6	.	4.6
Total	16.9	35.3	25.6	0.8	78.6
[0; 3[					21.4

FÉVRIER 2022 - LIDAR (100m)

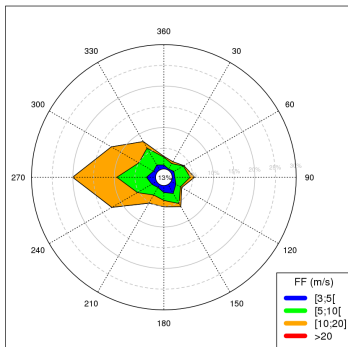


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 3979

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.3	1.5	0.5	.	2.3
60	0.8	2.6	0.2	.	3.6
90	0.7	3.7	1.1	.	5.4
120	1.4	1.3	0.3	.	3.0
150	2.5	2.8	0.9	.	6.2
180	1.7	1.9	1.5	.	5.1
210	0.9	2.1	2.3	0.0	5.2
240	1.4	4.0	7.1	0.0	12.5
270	2.2	7.2	10.7	.	20.1
300	0.9	4.1	7.7	.	12.7
330	1.4	4.7	1.8	.	7.9
360	1.0	1.9	0.2	.	3.0
Total	15.0	37.8	34.2	0.1	87.1
[0; 3[					12.9

MARS 2022 - LIDAR (100m)

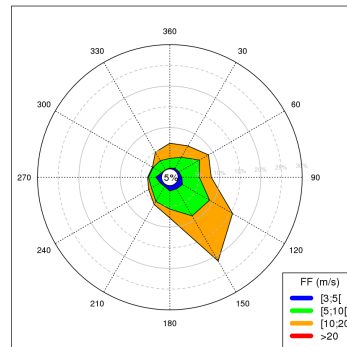


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4397

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.5	3.1	3.2	.	6.7
60	0.6	5.7	2.5	.	8.8
90	0.9	4.3	2.9	.	8.0
120	1.5	7.6	6.4	.	15.5
150	1.2	7.5	12.6	.	21.3
180	1.3	4.3	2.1	.	7.8
210	0.5	4.2	0.8	.	5.6
240	0.7	2.4	0.8	.	3.9
270	1.4	1.8	0.2	.	3.4
300	0.2	2.5	0.1	.	2.8
330	0.1	2.5	2.3	.	5.0
360	0.2	2.3	3.7	.	6.2
Total	9.3	48.2	37.6	.	95.0
[0; 3[					5.0

AVRIL 2022 - LIDAR (100m)

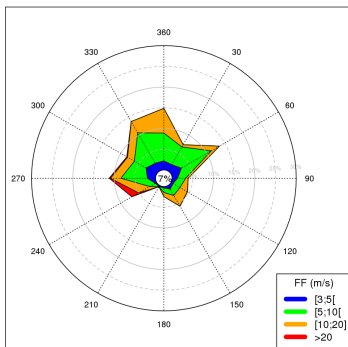


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4154

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.8	4.9	0.6	.	7.3
60	2.9	8.3	2.3	.	13.5
90	1.3	2.0	0.6	.	3.9
120	0.6	1.9	2.1	0.0	4.6
150	1.0	1.8	3.0	0.0	5.8
180	0.3	1.1	1.0	.	2.4
210	0.3	0.0	.	.	0.4
240	0.4	1.6	3.1	1.9	7.0
270	2.0	6.4	2.5	0.3	11.2
300	3.0	3.3	1.9	0.2	8.4
330	2.2	8.5	3.2	.	13.8
360	2.2	6.7	6.0	.	14.9
Total	17.9	46.6	26.1	2.5	93.1
[0; 3[					6.9

MAI 2022 - LIDAR (100m)

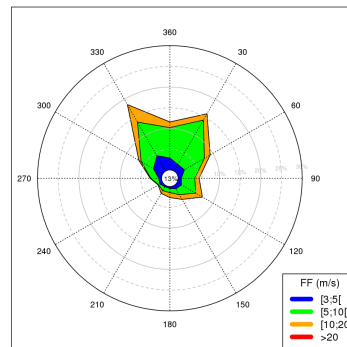


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 2858

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.9	12.4	1.7	.	16.0
60	2.1	5.6	1.6	.	9.2
90	0.8	3.3	1.0	.	5.1
120	1.2	4.0	1.9	.	7.1
150	0.9	1.6	1.3	.	3.9
180	0.5	1.0	1.2	.	2.7
210	0.3	1.1	0.7	.	2.2
240	0.8	0.3	0.1	.	1.3
270	0.7	1.9	0.1	.	2.8
300	2.6	3.4	0.6	.	6.6
330	4.3	9.4	4.9	.	18.5
360	2.9	7.3	1.4	.	11.6
Total	18.9	51.3	16.6	.	86.8
[0; 3[					13.2

JUIN 2022 - LIDAR (100m)

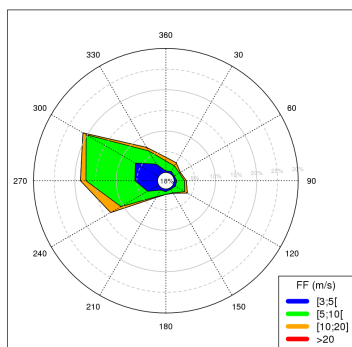


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 3125

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.6	1.5	0.9	.	3.0
60	0.3	1.4	0.3	.	2.0
90	0.6	1.8	0.5	.	2.9
120	0.6	2.6	0.7	.	4.0
150	0.4	1.1	0.1	.	1.5
180	0.6	0.7	.	.	1.3
210	0.6	1.8	0.2	.	2.7
240	3.1	7.4	2.9	.	13.4
270	5.5	11.8	1.3	.	18.7
300	6.5	13.7	0.9	.	21.2
330	2.5	3.7	1.0	.	7.3
360	0.4	2.4	0.9	.	3.7
Total	21.9	50.1	9.7	.	81.7
[0; 3[					18.3

JUILLET 2022 - LIDAR (100m)

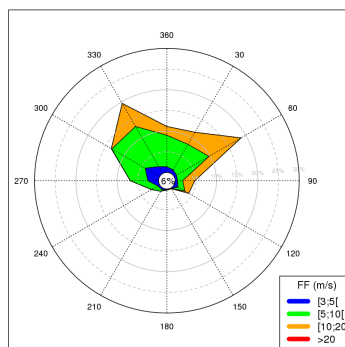


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4443

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.0	7.2	3.4	.	11.5
60	0.7	9.0	9.0	.	18.7
90	0.6	1.3	2.9	.	4.7
120	1.1	2.0	1.0	.	4.1
150	0.2	.	0.1	.	0.2
180	0.2	0.0	0.0	.	0.3
210	0.5	0.5	.	.	0.9
240	0.5	1.7	0.0	.	2.3
270	2.6	4.3	.	.	6.8
300	4.1	9.3	0.1	.	13.5
330	1.9	11.2	6.4	.	19.6
360	1.4	7.6	2.1	.	11.1
Total	14.7	54.1	25.1	.	93.8
[0; 3[					6.2

AOÛT 2022 - LIDAR (100m)

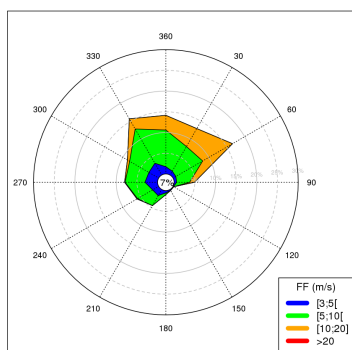


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4425

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.1	6.9	5.0	.	12.9
60	0.8	7.5	8.3	.	16.6
90	0.6	3.1	1.2	.	4.9
120	0.1	0.0	.	.	0.2
150	0.3	.	.	.	0.3
180	0.6	0.4	.	.	1.0
210	1.7	2.8	.	.	4.5
240	1.7	4.2	0.2	.	6.1
270	3.1	4.8	0.1	.	8.0
300	2.7	5.4	0.6	.	8.7
330	3.3	9.5	2.8	.	15.7
360	1.7	8.9	3.5	.	14.1
Total	17.7	53.5	21.7	.	92.9
[0; 3[					7.1

SEPTEMBRE 2022 - LIDAR (100m)

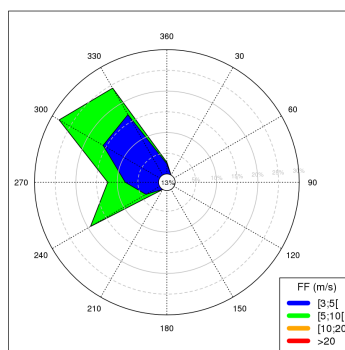
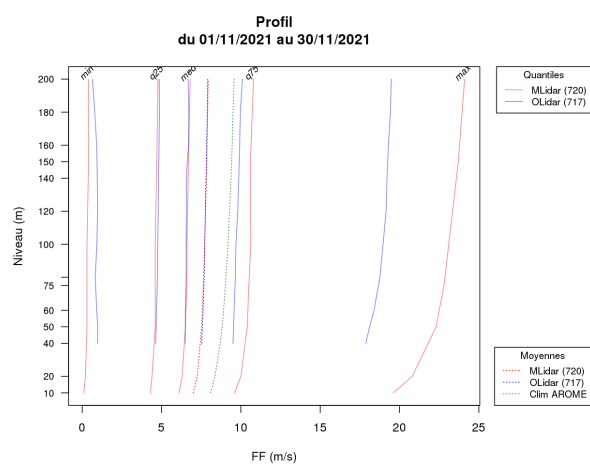
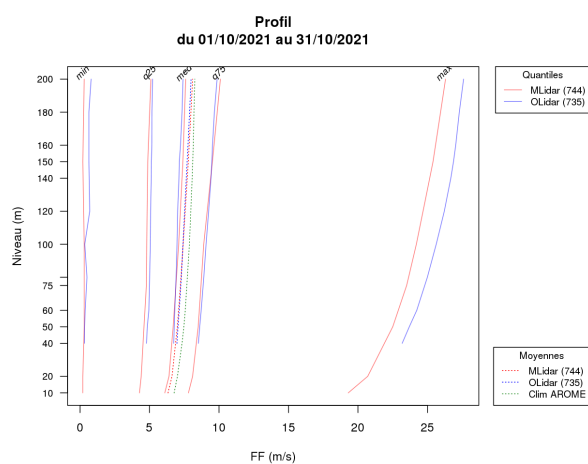
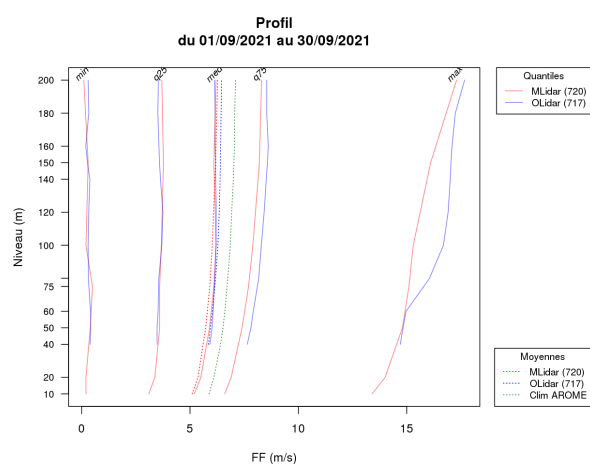
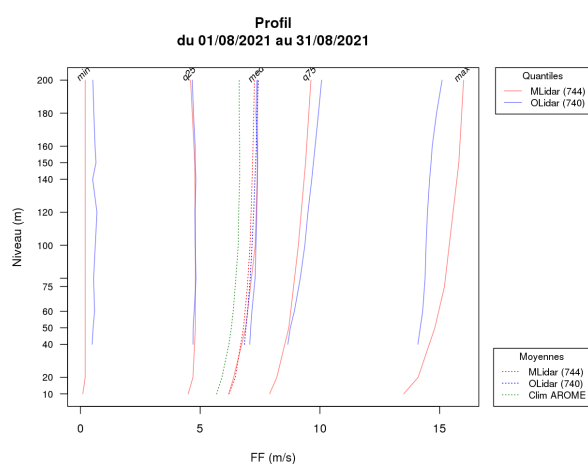
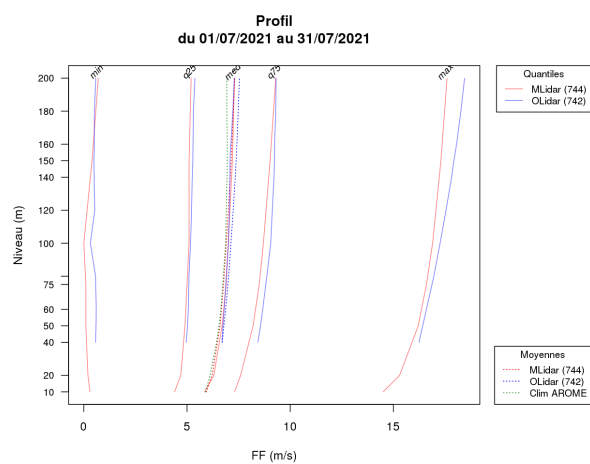
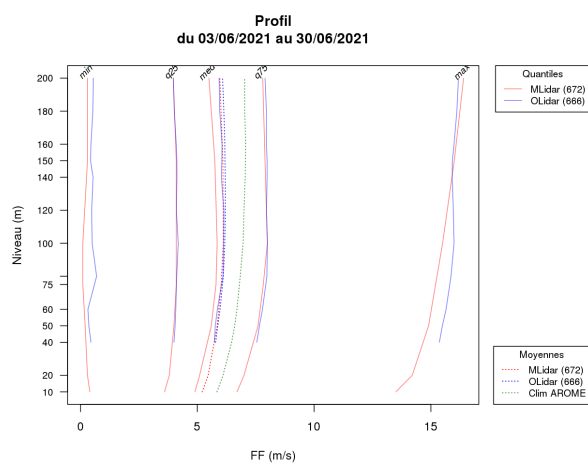


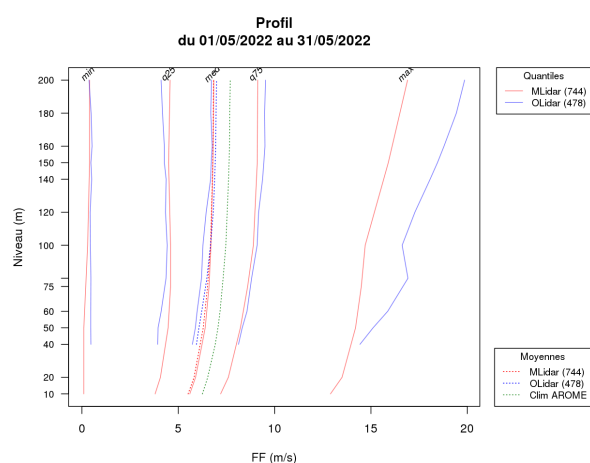
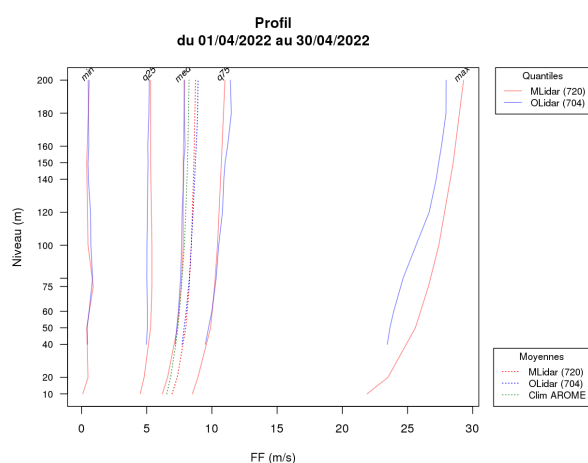
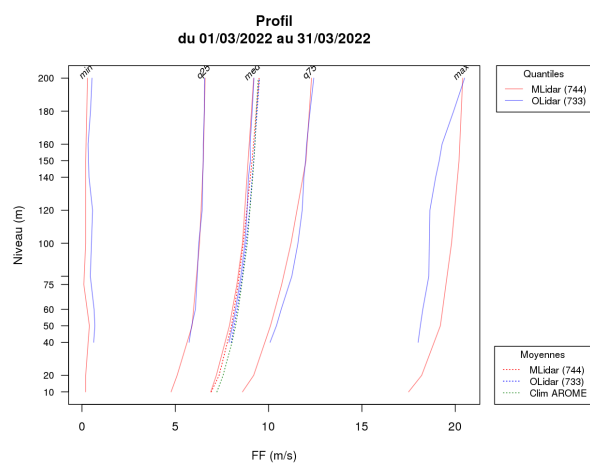
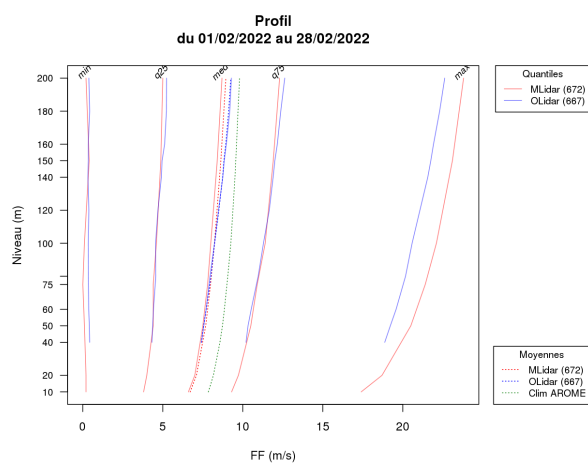
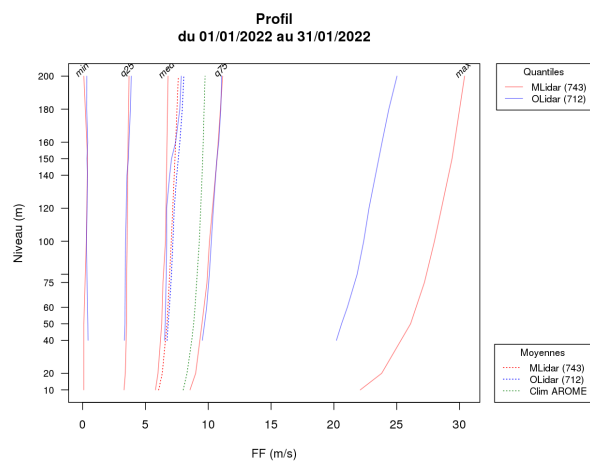
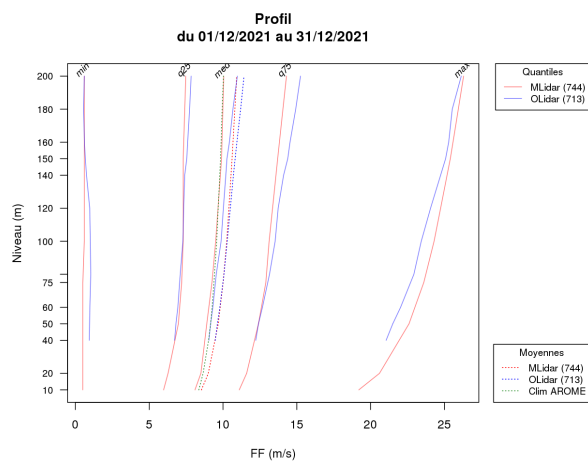
Tableau de répartition (en %)

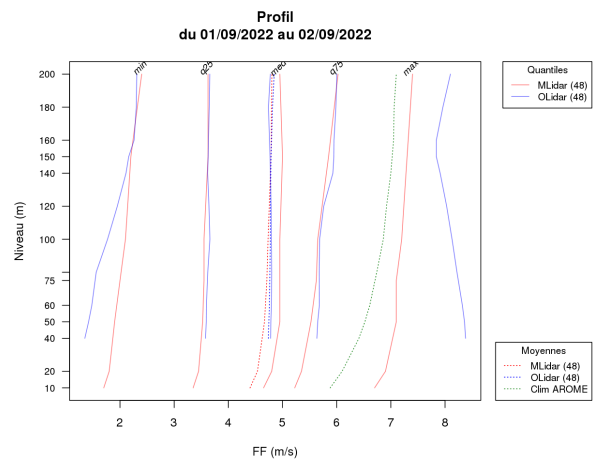
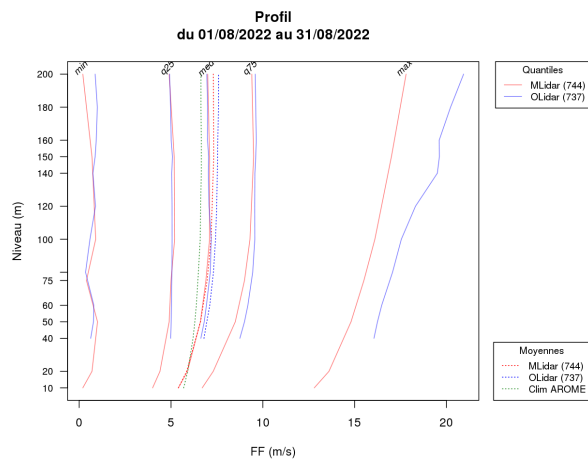
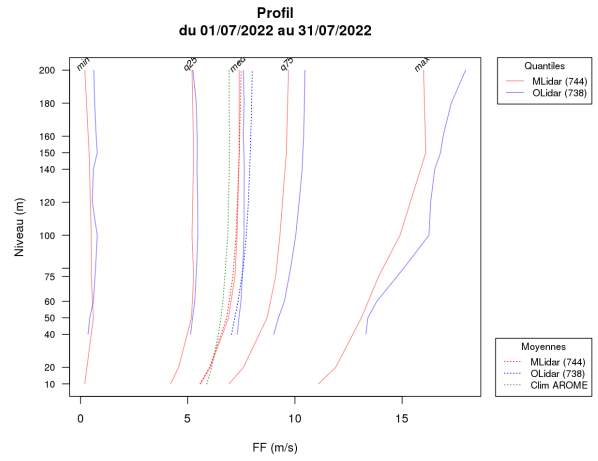
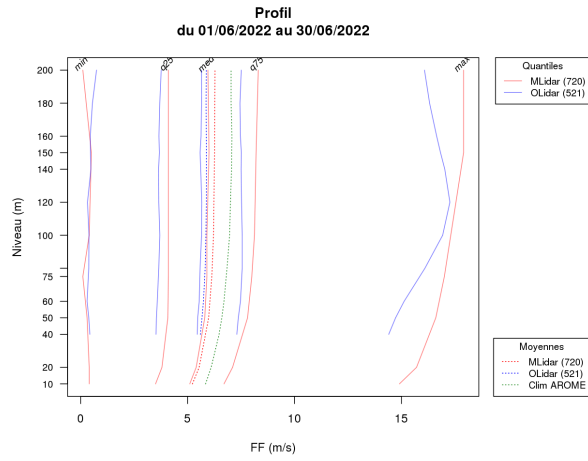
Nombre total de cas : 285

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	.	.	.	.	.
60	.	.	.	.	.
90	.	.	.	.	.
120	.	.	.	.	.
150	.	.	.	.	.
180	.	.	.	.	.
210	.	.	.	.	.
240	3.9	15.4	.	.	19.3
270	8.1	4.2	.	.	12.3
300	15.8	12.3	.	.	28.1
330	16.8	7.4	.	.	24.2
360	2.5	0.4	.	.	2.8
Total	47.0	39.6	.	.	86.7
[0; 3[					13.3

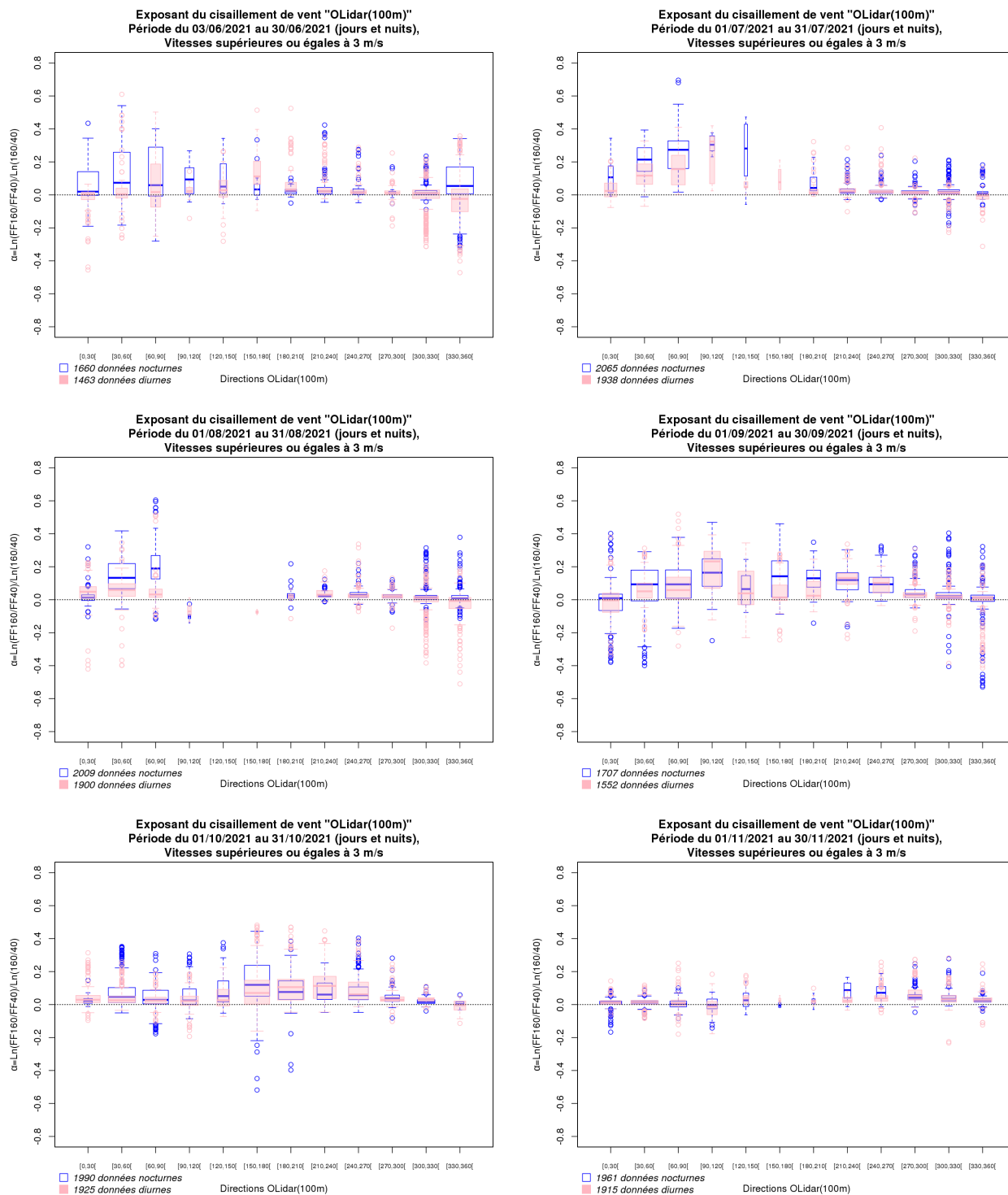
Annexe 7 : Profils de vent du LiDAR

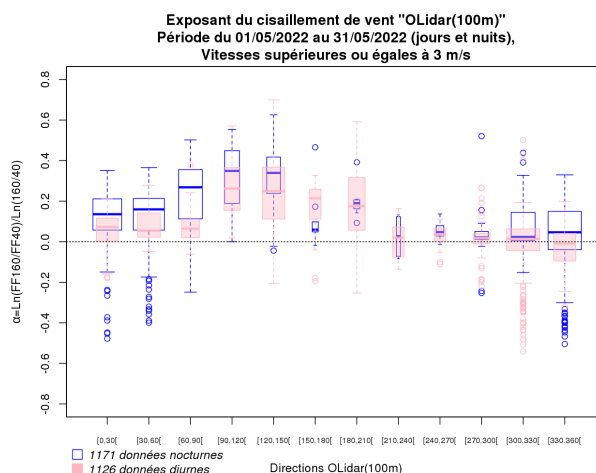
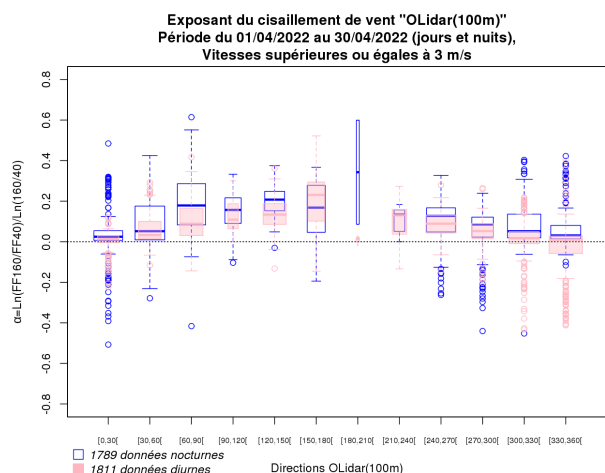
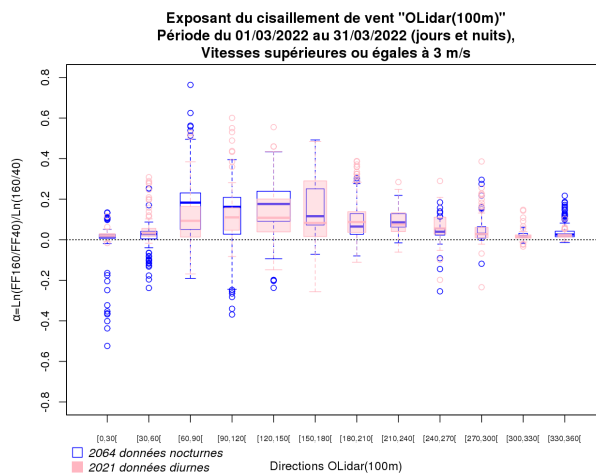
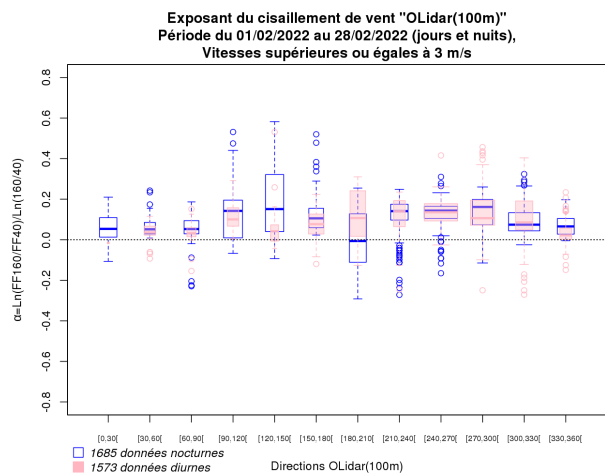
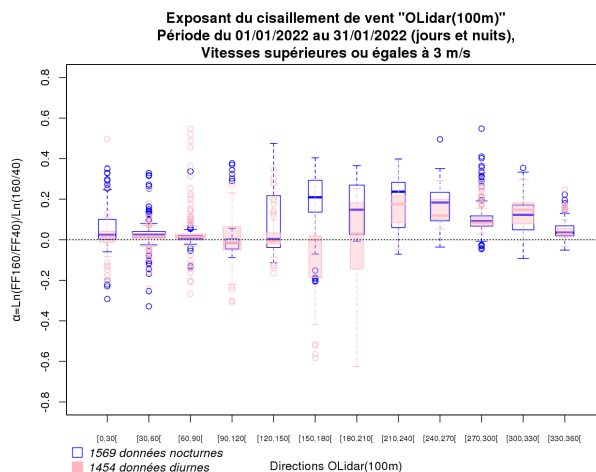
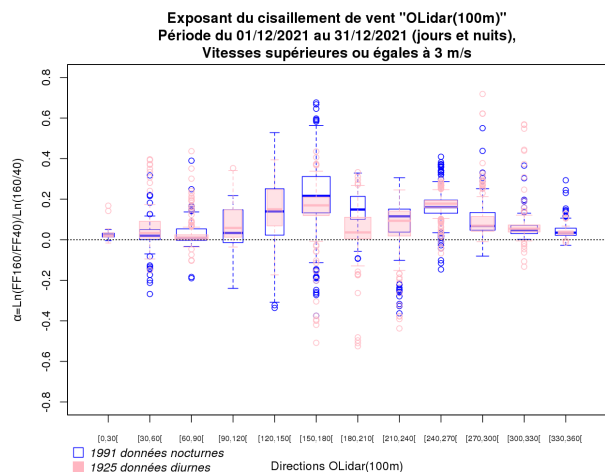




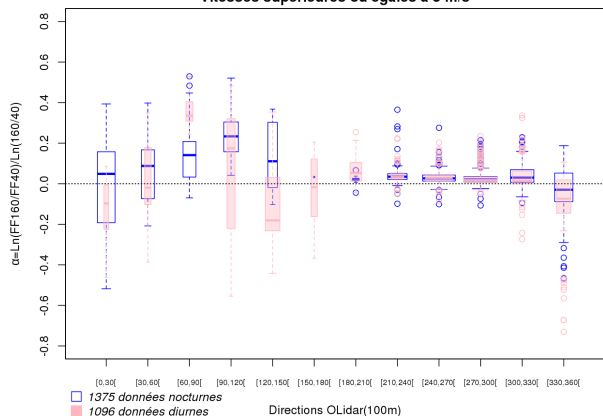


Annexe 8 : Cisaillement du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)

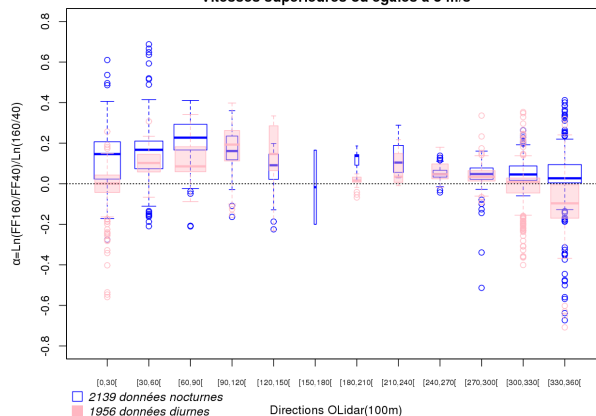




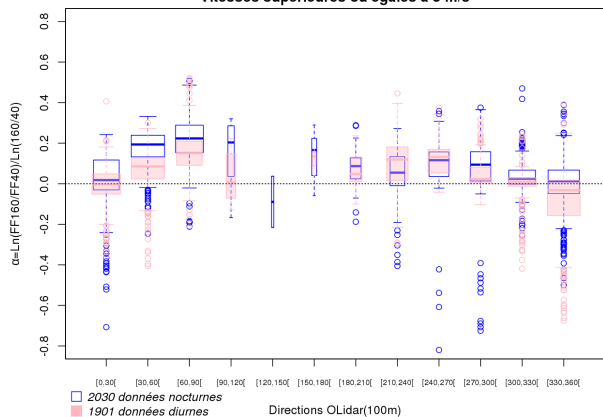
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/06/2022 au 30/06/2022 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



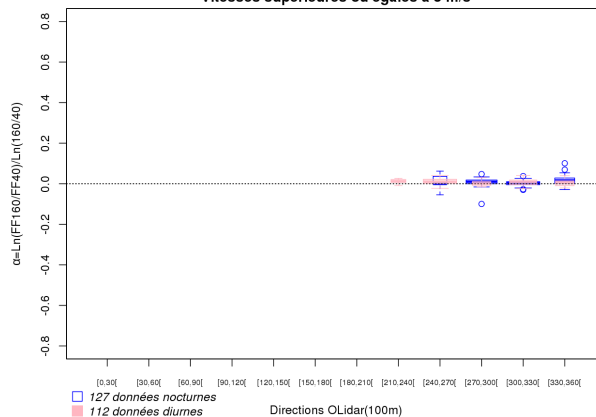
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/07/2022 au 31/07/2022 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



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

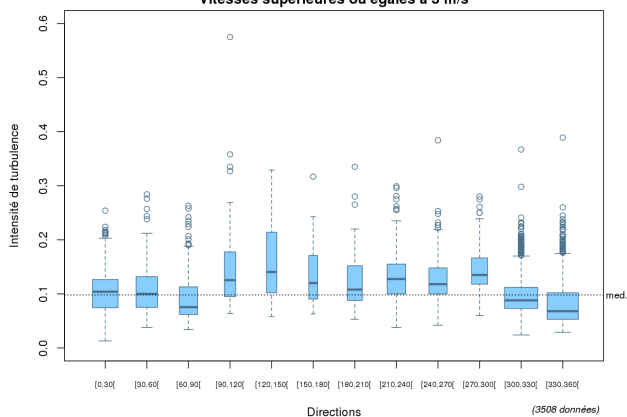


Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/09/2022 au 02/09/2022 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s

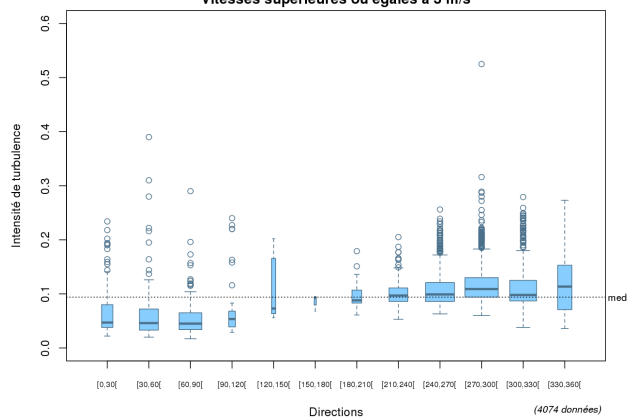


Annexe 9 : Turbulence du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)

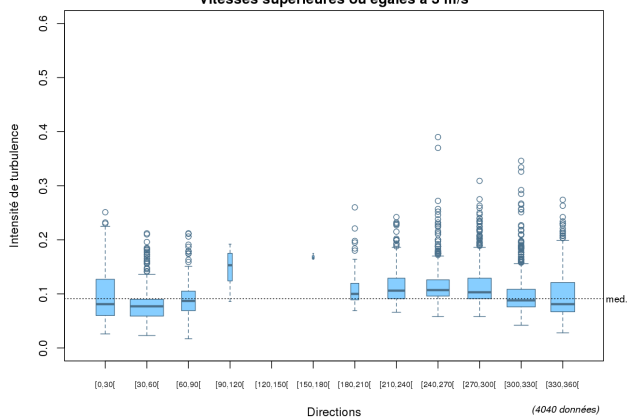
Turbulence du LiDAR à 100 m par directions
Période du 03/06/2021 au 30/06/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



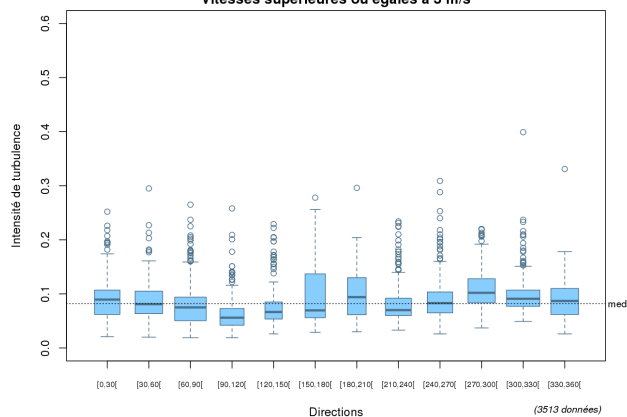
Turbulence du LiDAR à 100 m par directions
Période du 01/07/2021 au 31/07/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



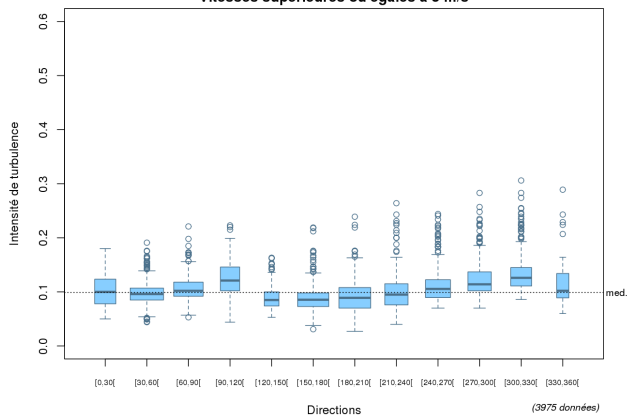
Turbulence du LiDAR à 100 m par directions
Période du 01/08/2021 au 31/08/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



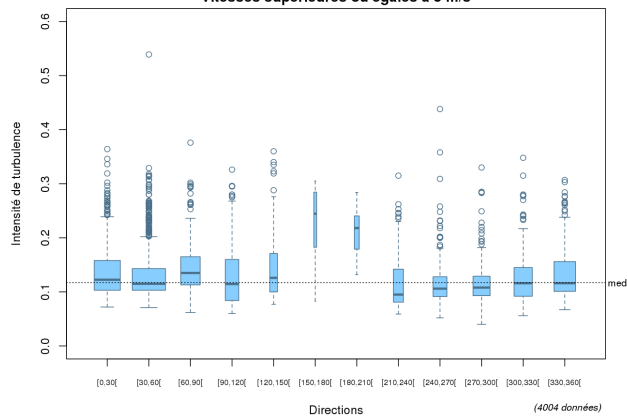
Turbulence du LiDAR à 100 m par directions
Période du 01/09/2021 au 30/09/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



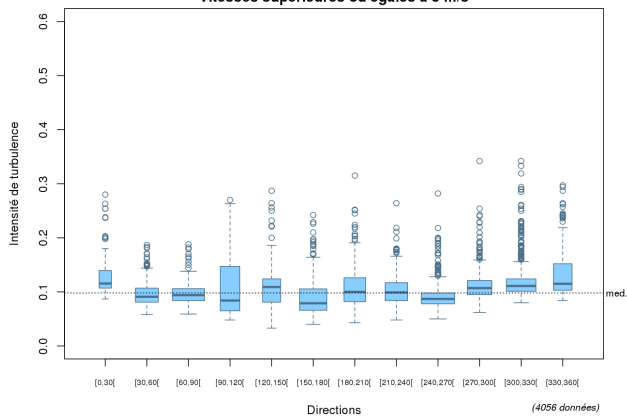
Turbulence du LiDAR à 100 m par directions
Période du 01/10/2021 au 31/10/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



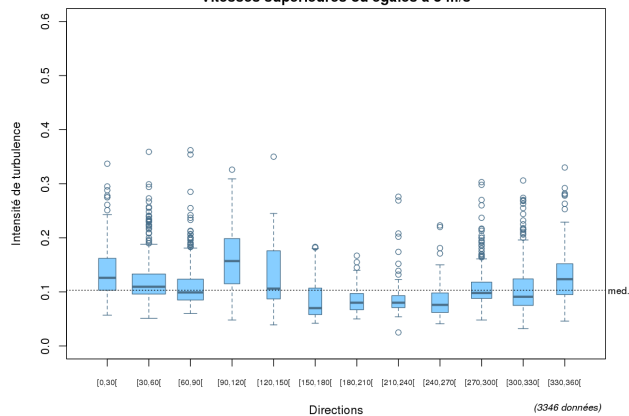
Turbulence du LiDAR à 100 m par directions
Période du 01/11/2021 au 30/11/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



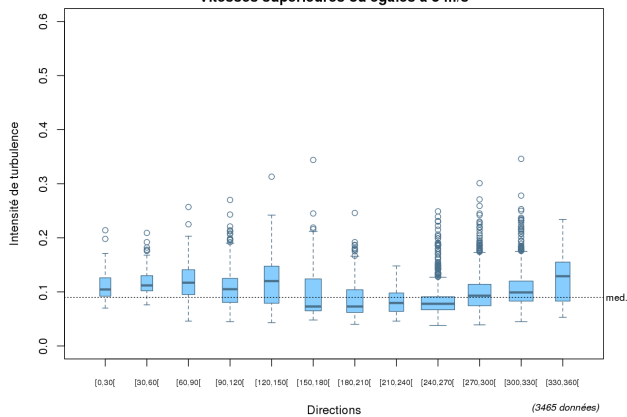
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/12/2021 au 31/12/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



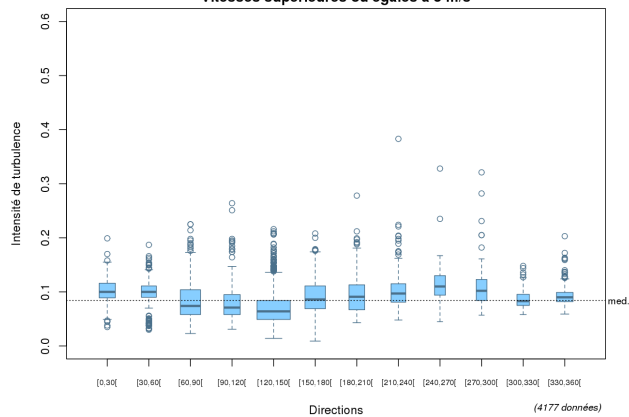
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/01/2022 au 31/01/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



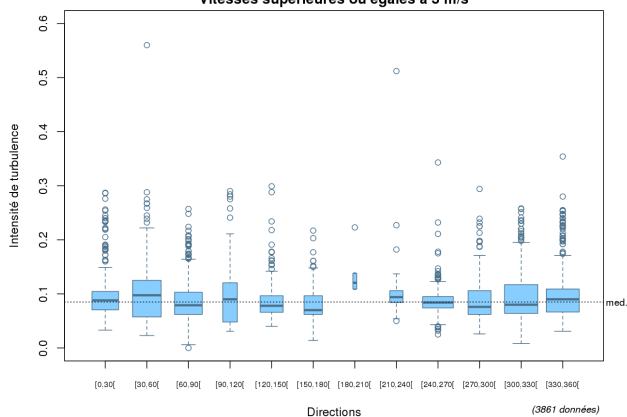
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/02/2022 au 28/02/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



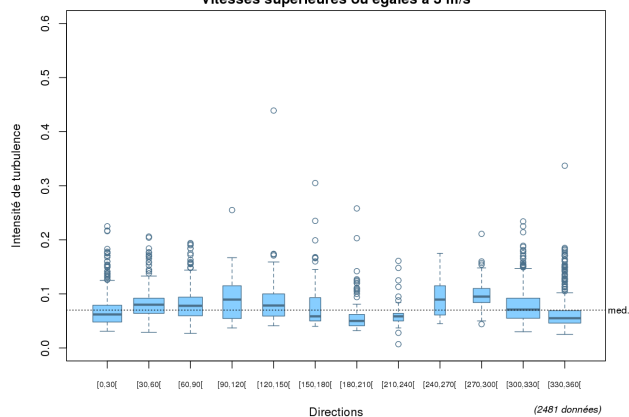
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/03/2022 au 31/03/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



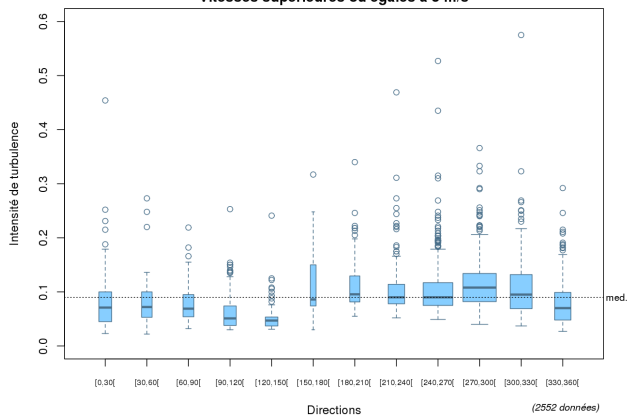
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/04/2022 au 30/04/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



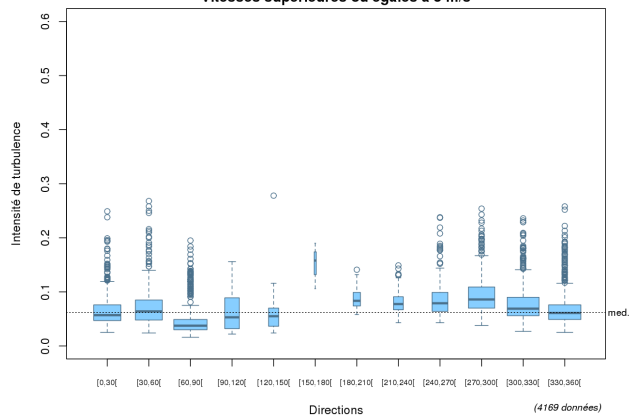
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/05/2022 au 31/05/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



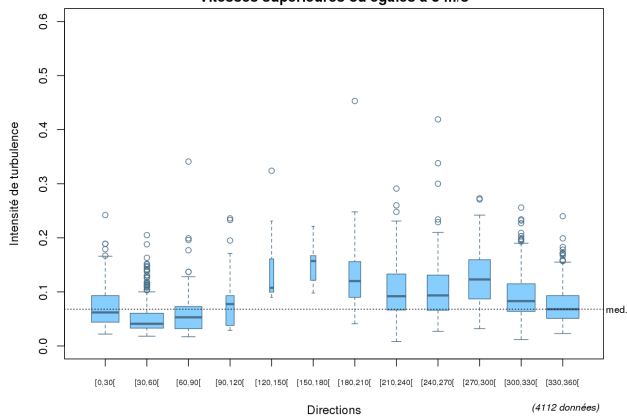
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/06/2022 au 30/06/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



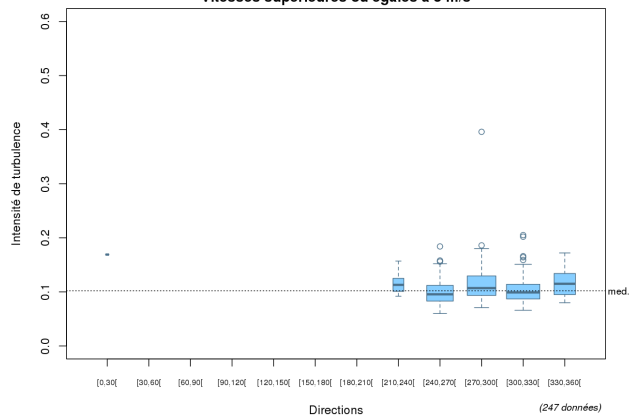
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/07/2022 au 31/07/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



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 02/09/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



FIN DE DOCUMENT
