RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Rapport d'étude

METEO FRANCE

Rapport final Lot 6a

AO7 Oléron



Version 12 du 08/01/2024

Client : Direction Générale de l'Énergie et du Climat du Ministère de la Transition Énergétique	[redacted] guillaume.rouviere@developpement-durable.gouv.fr [redacted]	MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Responsable commercial : Météo-France D2C Toulouse	[redacted] christophe.jacolin@meteo.fr	METEO FRANCE
Responsable technique : Météo France DSM/CS/DC	[redacted] aphael.legrand@meteo.fr	

- 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
DR3	Projet de parc éolien off-shore au large de l'île d'Oléron	AO7_Oléron_Lot4_Rapport-final_V2_20230512	12/05/2023	V2

Évolutions successives

Référence	Date	Version	Évolution
AO7_Oléron_Lot6_202209-202309_v1_nondéfinitive	28/11/2023	V1	Livraison
DGEC_AO7_Lot6a_Rapport_202209-202309_v2_20240108	08/01/2024	V2	Livraison

Signatures

[redacted]	[redacted]	[redacted]
[redacted]	[redacted]	[redacted]
[redacted]	[redacted]	[redacted]

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 et à la station météo 10
2.2.1.3 Codes qualité 11
2.2.2 Statistiques de contrôle de la mesure 12
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 18
3.3 Statistiques de contrôle et descriptives de la mesure 19
3.3.1 Statistiques de contrôle de la mesure 19
3.3.2 Statistiques descriptives du vent mesuré 24
3.3.2.1 Vent moyen horizontal à 100 m du LiDAR 24
3.3.2.2 Distributions 26
3.3.2.3 Variation diurne de la force du vent horizontal (données horaires) 27
3.3.2.4 Variation mensuelle de la force du vent horizontal (données horaires) 28
3.3.2.5 Roses des vents (données horaires) 30
3.3.2.6 Profils verticaux de vent (données horaires) 31
3.3.2.7 Cisaillement du vent (données 10 minutes) 32
3.3.2.8 Analyse des risques de turbulence atmosphérique à 100 m 34
3.3.2.9 Séries horaires FF et FXI à 100 m 35
4 Analyse des données de vent mesuré par l'anémomètre 36
5 Conclusion 39
6 Bibliographie 39
Annexes 40

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 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) 17
Illustration 11 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) du LiDAR avec le modèle 19
Illustration 12 : Diagramme « quantile-quantile » 20
Illustration 13 : Répartitions des écarts de directions du LiDAR en fonction de l'heure (à gauche) et de la direction (à droite) 21
Illustration 14 : Dépassements des seuils de force (à gauche) et de direction (à droite) du vent du LiDAR 23
Illustration 15 : Distributions des vents horaires du LiDAR 26
Illustration 16 : Répartitions horaires des forces du vent du LiDAR 27
Illustration 17 : Répartitions mensuelles des forces du vent du LiDAR ; la largeur des boîtes à moustaches est fonction du nombre de données 28
Illustration 18 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) 30
Illustration 19 : Profils de vents avec quantiles du LiDAR 31
Illustration 20 : Cisaillement des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) 32
Illustration 21 : Exposant du cisaillement de vent du LiDAR 33
Illustration 22 : Turbulence du LiDAR 34
Illustration 23: Séries FF et FXI à 100 m du LiDAR 35
Illustration 24 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) de l'anémomètre avec le modèle 37
Illustration 25 : Distribution des vents horaires de l'anémomètre (à gauche) et diagramme « quantile-quantile » (à droite) 38
Illustration 26 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'anémomètre 38
Illustration 27 : Analyse Isofront du mercredilundi 16 20 janvier octobre 20231 à 0018 UTC 41
Illustration 27 : Analyse Isofront du mercredilundi 16 20 janvier octobre 20231 à 0018 UTC 41
Illustration 28 : Comparaison des mesures de l'*anémomètre installé sur la bouée* Lidar d'Oléron avec le modèle AROME les 15 et 16 janvier 2023 41
Illustration 29 : Comparaison des mesures à 100 m du Lidar d'Oléron avec le modèle AROME les 15 et 16 janvier 2023 42
Illustration 30 : Comparaison des biais entre les mesures du Lidar d'Oléron et le modèle AROME les 15 et 16 janvier 2023 42
Illustration 31 : Analyse Isofront du vendredi 10 mars 2023 à 00 UTC 43

Illustration 32 : Comparaison des mesures de l'*anémomètre installé sur la bouée* Lidar d'Oléron avec le modèle AROME les 9 et 10 mars 2023 43
Illustration 33 : Comparaison des mesures à 100 m du Lidar d'Oléron avec le modèle AROME les 9 et 10 mars 2023 44
Illustration 34 : Comparaison des biais entre les mesures du Lidar d'Oléron et le modèle AROME les 9 et 10 mars 2023 44
Illustration 35 : Roses des vents de l'automne 2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Chassiron 45
Illustration 36 : Roses des vents de l'hiver 2022-2023 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Chassiron 46
Illustration 37 : Roses des vents du printemps 2023 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Chassiron 47
Illustration 38 : Roses des vents de l'été 2023 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Chassiron 48
Illustration 39 : Anomalies mensuelles de températures minimales et maximales de septembre 2022 à août 2023 à la station de Chassiron - Période de référence : 1991 - 2020 50
Illustration 40 : Cumuls mensuels de précipitations de septembre 2022 à août 2023 à la station de Chassiron, histogrammes (en vert) et normale de précipitations (segments en vert) - Période de référence : 1991 - 2020 51

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 18
Tableau 3: Classes de vitesses par mois. Taux « brut » (en italique) et « reconstitué » (en gras) du LiDAR 25
Tableau 4: Statistiques 2001-2020 (en gras, en %) et valeurs 2022-2023 (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 29
Tableau 5: Valeurs de l'exposant α en fonction de la nature du terrain (source http://eolienne.f4jr.org/vent) 33

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 sous forme de lots, 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.

Une première campagne de mesure dans le cadre du « lot4 » (03/06/2021 - 02/09/2022) a été menée sur site à partir d'un appareil de type LiDAR pour différentes hauteurs d'intérêt dont la hauteur 100 m revêtant un caractère important pour la production éolienne. Cette campagne a fait l'objet d'un rapport de suivi et de contrôle de la mesure ainsi que d'un livrable de données (cf Documents de référence antérieurs).

A l'issue de cette première phase, une extension de un an de la campagne de mesure en mer a été commandée par la DGEC à Météo-France, dans le cadre du « lot6 ». Le présent rapport traite des douze mois de mesure effectuées au cours de cette extension. Celle-ci a débuté officiellement à compter du 3 septembre 2022 et s'est terminée le 2 septembre 2023.

1.1 Zone d'étude

Le futur parc éolien de l'AO7 se situe sur une zone au large d'Oléron.

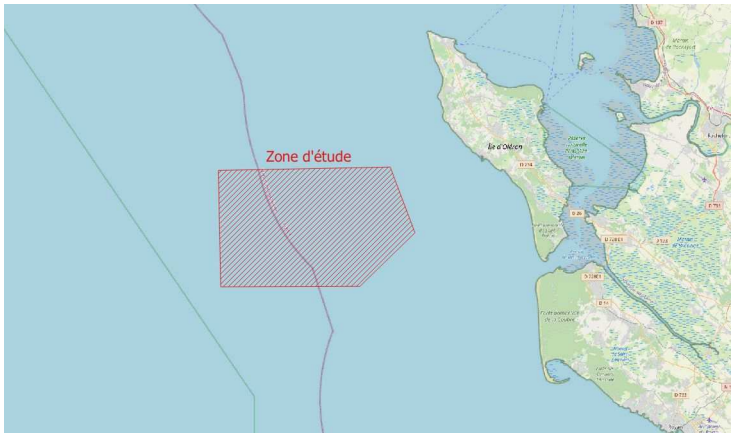


Illustration 1 : Situation géographique de la zone (source www.geoportail.gouv.fr)

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.

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.

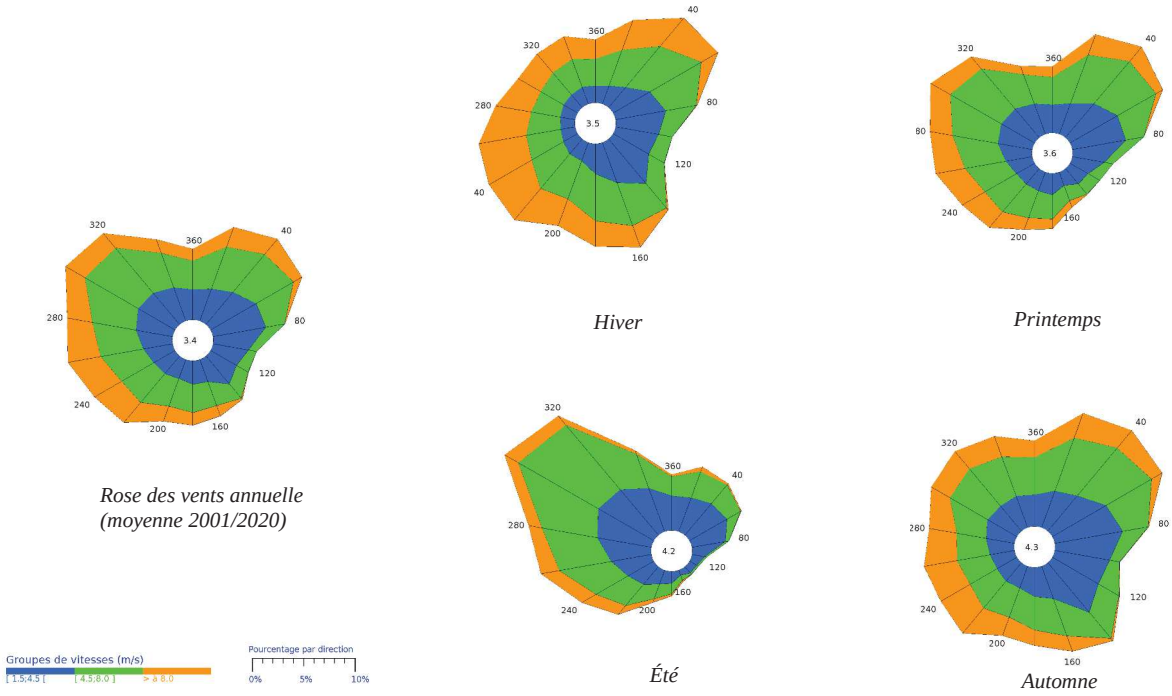


Illustration 2 : Roses des vents annuelle et saisonnières de la station de Chassiron (17323001) sur la période 2001/2020

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 20 et 50 mètres. Les fonds sont réguliers.

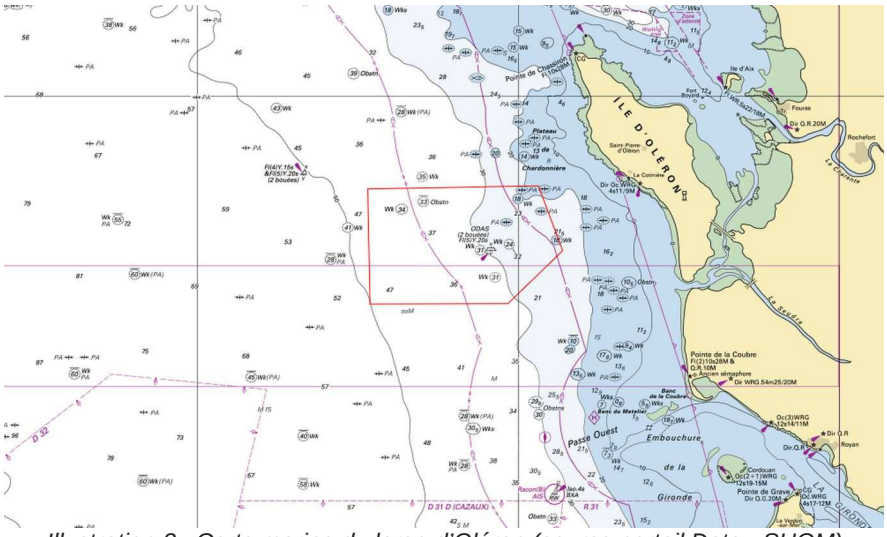


Illustration 3 : Carte marine du large d'Oléron (source portail Data - SHOM)

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 atmosphériques (dont un LiDAR) et océaniques. 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.

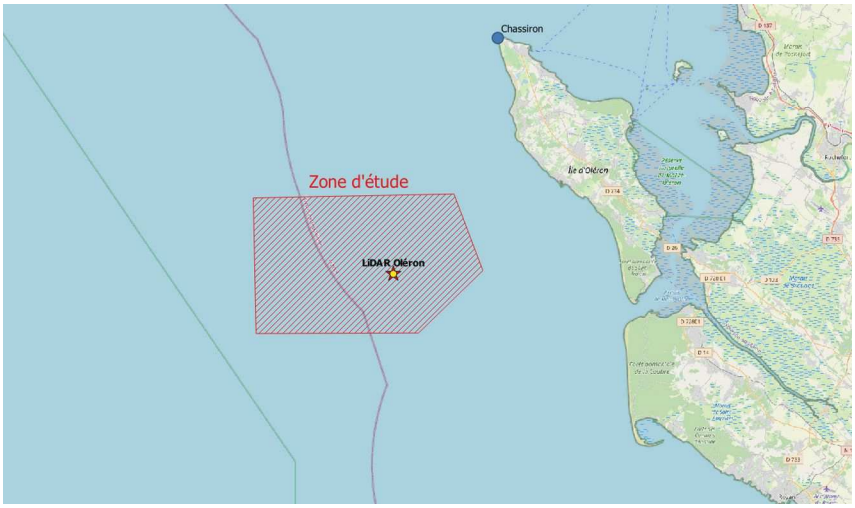


Illustration 4 : Emplacement du LiDAR et de la zone d'étude du futur parc éolien (source OpenStreetMap)

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

Cette section décrit plus précisément les équipements déployés au point de mesure.

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



Illustration 5 : Photo de la plateforme de mesure

La plateforme flottante embarque des instruments pour effectuer différentes mesures :

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

La mesure de vent en altitude est réalisée à l'aide d'un LiDAR (Light Detection And Ranging) de chez LEOSPHERE : Windcube V2 Offshore 8.66 pour bouée, modèle WLS866-4 (les caractéristiques techniques de l'appareil sont décrites dans le document « WindCube_WLS866_Specification.pdf » faisant partie du livrable dont Météo-France a la charge). Ce LiDAR envoie une impulsion laser infrarouge vers l'atmosphère. Quatre faisceaux sont envoyés successivement dans les quatre directions cardinales formant un cône de 28°. Un cinquième faisceau vertical permet de vérifier et préciser les mesures. Les impulsions laser sont rétrodiffusées par les particules (poussières, gouttes d'eau, aérosol…) circulant selon la vitesse du vent. Ces impulsions permettent de calculer la vitesse et la direction du vent sur la base du décalage de leur longueur d'onde dû à l'effet Doppler. Ces mesures 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 +/- 25° (limite de la technologie développée par LEOSPHERE). Compte tenu de ses dimensions, les mesures de gîtes maximales observées sur la plateforme n'ont jamais dépassé 18° et garantissent donc une plage de fonctionnement optimale et complète du LiDAR.

Les paramètres atmosphériques au niveau de la bouée sont mesurés à l'aide d'une station météo multi-capteurs « MaxiMet GMX500 » (les caractéristiques techniques de l'appareil sont décrites dans le document « Maximet_GMX500_Specification.pdf » faisant partie du livrable dont Météo-France a la charge). La vitesse et la direction du vent sont en particulier mesurées par un anémomètre à ultrasons. A noter que la mesure de vent se fait au point le plus haut de la bouée (environ 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 « AANDERAA_DCPS_Specification.pdf ») et d'un profondimètre (caractéristiques techniques décrites dans le document « Echorange_Specification.pdf »). L'analyse de ces différents paramètres océanographiques fait l'objet d'un rapport spécifique rédigé par le Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM).

1 Norme OMM pour le vent: le vent est mesuré à 10 m de hauteur pour s'affranchir en partie des effets de rugosité du sol qui provoque des turbulences, ce qui peut se traduire par une forte variabilité 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.

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

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

2.1 Type de données fournies par le LiDAR

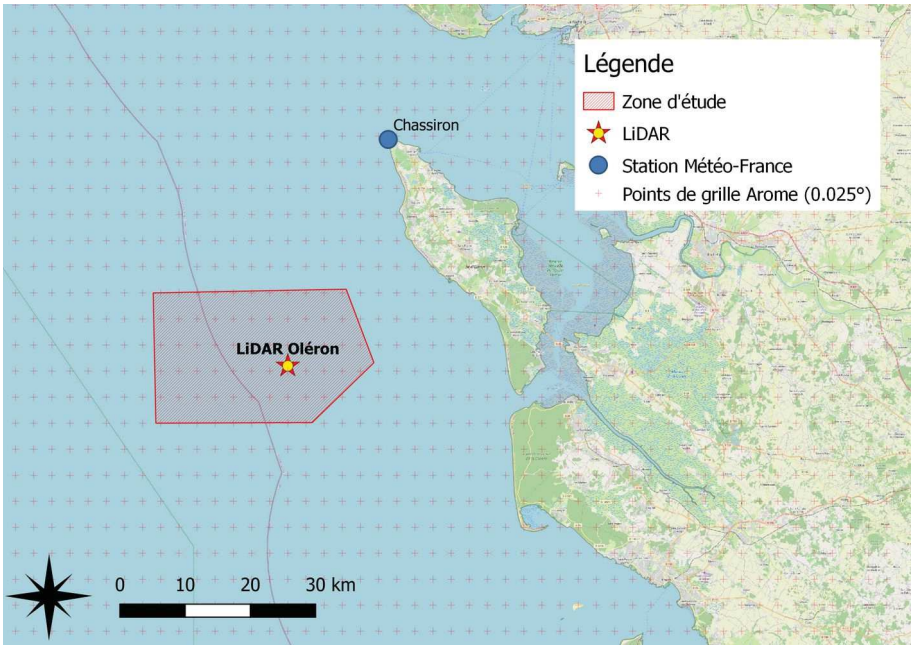


Illustration 7 : Localisation des points de grille AROME (source OpenStreetMap)

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

- Les données **reconstituées**
  - Données moyennées sur 10 minutes non corrigées (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 (autrement-dit, 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 :

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

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 :

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

2.2.1.2 Détermination des seuils adaptés au LiDAR et à la station météo

Nous avons souhaité utiliser des critères plus ou moins semblables afin de contrôler les données du LiDAR et de la station météorologique. 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 (station météorologique) est qualifiée de douteuse si respectivement :**

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

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 :

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

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 a un taux de validité inférieur à 30%. Le taux de validité correspond au nombre de données secondes disponibles pour obtenir une valeur moyennée sur une période de 10 minutes (*cf.* §2.1). 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 précédemment sont fournis dans une des colonnes du fichier « SerieLidarH100_Oléron - _20220903-20230902.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, 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 réellement mesurées par le 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.

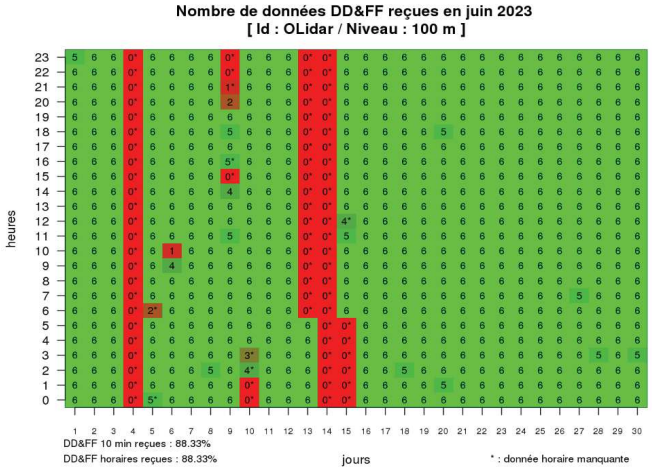


Illustration 8 : Exemple de tableau mensuel de disponibilité des données

Le taux de présence des données du LiDAR décroît naturellement avec l'altitude, les nuages bas créant un obstacle à la mesure.Cependant, dans le cas de la présente campagne, la décroissance de ce taux est quasi nulle entre 40 et 160 m et reste très limitée au delà (*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 doit être supérieur à 80 %.
- « KPI global » : le taux de disponibilité sur l'ensemble de la campagne pour les niveaux 60, 100 et 160m doit être supérieur à 85 %.

A l'issue de la campagne, le taux de disponibilité global est largement supérieur au taux de 85 % de données attendu sur les trois niveaux 60, 100 et 160 m. Les taux de disponibilité mensuels sont également respectés,

	2022				2023									MOY (365j)
	9 (28j)	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (2j)	
200 m	97,12	95,14	95,93	95,52	90,48	84,77	90,52	81,18	92,27	85,76	99,44	95,09	99,65	92,03
180 m	98,59	95,65	96,5	97,04	92,03	86,76	92,23	84,28	93,84	87,36	99,69	96,8	100	93,48
160 m	99,33	96,03	96,55	98,25	93,71	88,74	93,12	86,25	94,33	87,8	99,73	98,1	**100**	94,4
150 m	99,33	96,19	96,53	98,72	94,27	89,96	93,46	87,11	94,62	87,85	99,75	98,68	100	94,77
140 m	99,36	96,26	96,55	99,33	94,87	90,92	93,77	88,38	94,85	88,01	99,78	98,95	100	95,14
120 m	99,36	96,28	96,55	99,75	95,68	92,53	94,27	89,93	95,18	88,19	99,82	99,6	100	95,65
100 m	99,36	96,3	96,55	99,82	95,88	93,35	94,56	90,86	95,56	88,33	99,84	99,8	**100**	95,9
80 m	99,36	96,3	96,55	99,78	94,74	93,28	94,49	91,27	95,41	88,31	99,84	99,8	100	95,8
60 m	99,33	96,3	96,55	99,15	92,61	92,61	94,33	91,37	95,34	88,47	99,84	99,75	**100**	95,52
50 m	99,36	96,3	96,55	98,92	91,58	92,56	94,27	91,81	95,5	88,43	99,84	99,73	100	95,45
40 m	99,33	96,3	96,55	98,7	90,68	92,34	94,24	92,06	95,54	88,4	99,84	99,73	100	95,35
MOY (60, 100 et 160 m)	99,34	96,21	96,55	99,07	94,06	91,57	94	89,49	95,08	88,2	99,81	99,22	100	95,27

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.

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 15 et 16 janvier 2023 au passage de la tempête « Gerard ». On note une bonne corrélation entre l'observation LiDAR et le modèle aussi bien dans la chronologie que l'intensité des phénomènes avec toutefois une sous-estimation de la part du modèle au plus fort de la perturbation (le 16/01 entre 00 et 01h). Précisons que la résolution temporelle des observations toutes les 10 minutes est bien plus fine que celle du modèle qui est horaire. Ainsi le maximum de force du vent moyen a été observé le 16/01 à 00h50 avec 27,8 m/s mais les valeurs aux « heures rondes » (00h00 et 01h00) qui sont les seules à être produites également par le modèle n'affichent que des valeurs de l'ordre de 25,5 m/s contre 23,9m/s pour le modèle ; une sous-estimation de ce pic existe donc mais elle est reste limitée (6%)

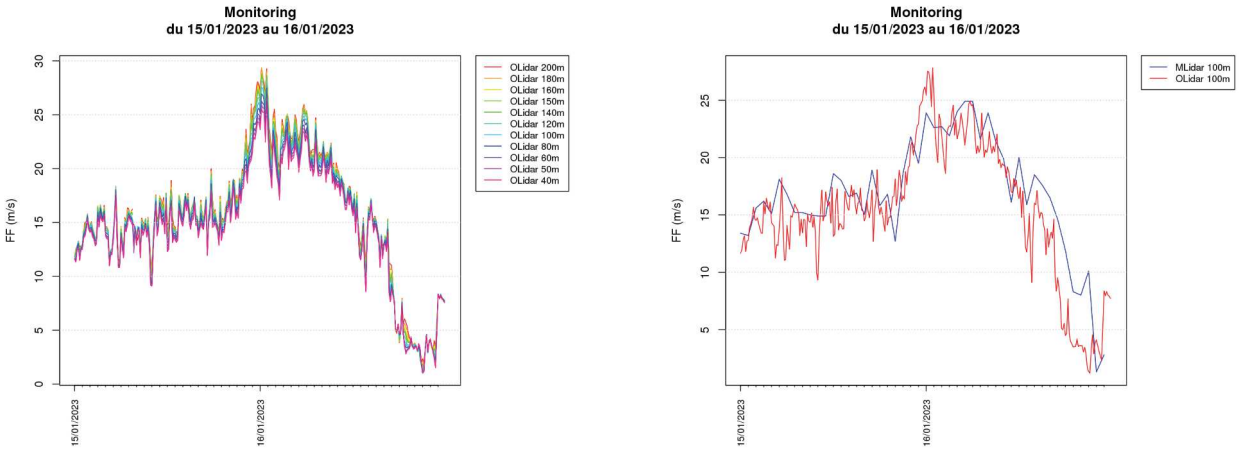


Illustration 9 : Monitoring des données 10 minutes sur les 11 niveaux de mesure (à gauche) et comparaison avec le modèle à 100 m (à droite)

3.1.3 Monitoring des erreurs

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

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

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

Les graphiques de monitoring mis à disposition dans le livrable accompagnant ce rapport sont donc à mettre en regard avec le code qualité des données LiDAR et avec la force du vent moyen. Ces informations peuvent être retrouvées dans le fichier SerieLidarH100_20220903-20230902.csv

L'exemple de monitoring pour le mois de juin 2023 en est une bonne l'illustration (cf illustration 10).

- Le seul pic d'erreur concernant la force du vent (écart > 3m/s) sur 24 heures glissantes intervient à la mi-journée le 13/06. Il convient de préciser que le calcul sur 24 heures glissantes est centré sur l'heure en abscisse, autrement-dit les données des 12 heures précédentes et des 12 heures suivantes sont prises en compte. Par exemple, pour le 13/06 à 14h, les données considérées sont celles entre le 13/06 à 02h et le 14/06 à 02h. Or, la bouée a subi un arrêt de son système d'acquisition entre le 13/06 à 06h et le 15/06 à 06h (cf 3.1.1 et 3.2). Ainsi, seules 4 données horaires sont considérées lors du calcul qui donne ce pic et une seule s'avère finalement être au-dessus du seuil de 3m/s d'écart entre la valeur lidar et celle du modèle. Ce cas est mis en évidence en violet dans l'illustration 10.
- la période du 17/06 au 20/06 des écarts en direction assez nettement supèrieurs au seuil de 30°. Cette période correspond à une séquence déventée avec une quasi-totalité des mesures < 5m/s
- a contrario, la fin du mois a été plus ventée avec des forces de vent à partir du 25/06 à la mi-journée généralement comprises entre 7 et 9m/s, voire excédant par moment les 10m/s. Les résultats s'avèrent alors nettement en dessous des seuils.

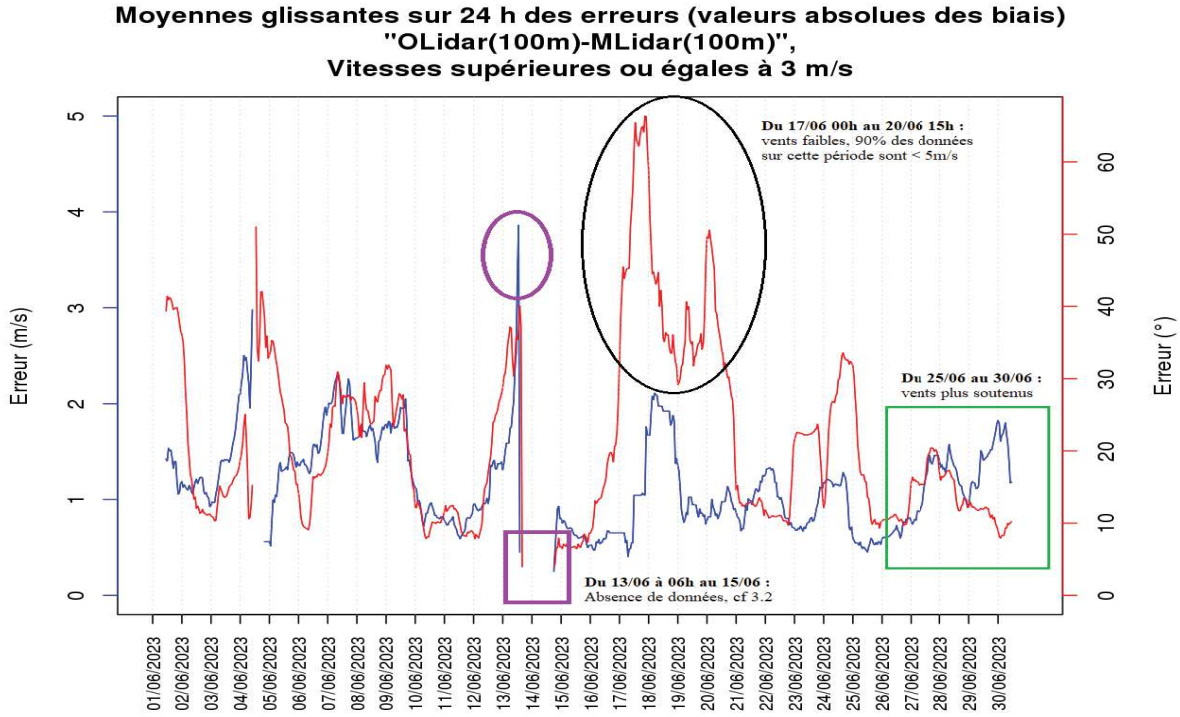


Illustration 10 : Monitoring des erreurs de forces (courbe bleue) et de directions (courbe rouge)

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, 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 10m et 100 m.

	Incidents techniques impactant la mesure du LiDAR
Septembre 2022	Début de l'extension de la campagne de mesures (lot 6) : 03/09/2022 Incidents : RAS. La grille de présence (exemple au 3.1.1) mensuelle des données pour le mois de septembre 2022 fournie dans le livrable débute au 03/09. Les données du 01 et 02/09 ne sont pas scrutées ici (lot 4) mais cela ne signifie pas qu'elles sont absentes.
Octobre 2022	Absence de données lidar le 14/10/2022. Cause non fournie par le prestataire de mesures.
Novembre 2022	RAS
Décembre 2022	RAS
Janvier 2023	Absences ponctuelles les 23, 24 et 29 janvier. Usure probable de l'essuie-glace servant au nettoyage du hublot du lidar. Remplacement de l'essuie-glace lors de la maintenance du 30/01.
Février 2023	Absence de données fin février 27/02 mi journée) – début mars (02/03 début de journée).
Mars 2023	Absence de données fin février (27/02 mi journée) – début mars (02/03 début de journée). L'absence de données ne s'étant pas prolongée au-delà et ayant été courte (moins de 72h), l'hypothèse d'une pièce défectueuse a été écartée. Aucune cause technique ne semble pouvoir expliquer cette baisse de disponibilité. La cause est probablement liée aux conditions météorologiques pouvant créer un obstacle à la mesure (brouillard, nuages bas ou pluies). Dans le cas présent, les conditions météorologiques sur cette période correspondant à un puissant anticyclone hivernal paraissent favorables à la formation de brouillard ou de nuages bas.
Avril 2023	Baisse de disponibilités ponctuelles et de courtes durées probablement dues aux conditions météorologiques (nuages bas, pluie ou brouillard). Aucune défaillance technique n'a été relevée ce mois là.
Mai 2023	RAS
Juin 2023	Arrêt du système d'acquisition entre le 13/06/2023 et 15/06/2023 et par conséquent absence de données. Redémarrage du système le 15/06/23.
Juillet 2023	RAS
Août 2023	RAS
Septembre 2023	Fin de la campagne de mesures le 02/09/2023

Tableau 2 : Récapitulatif des problèmes techniques rencontrés sur le LiDAR

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.

Comme lors de la campagne initiale de mesures, 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 *(croix oranges sur le graphique de gauche)* pour des forces de vent faible ce qui s'explique par le fait que le flux dans ces situations n'est pas clairement établi, le vent prenant un caractère « variable ». Les écarts en direction se font d'autant plus rares que la force du vent considérée est importante (quasiment aucun cas pour de vents de plus de 10 m/s) ;
- Les dépassements de seuil pour le seul critère de force du vent sont quant à eux très marginaux (moins de 1% des mesures)

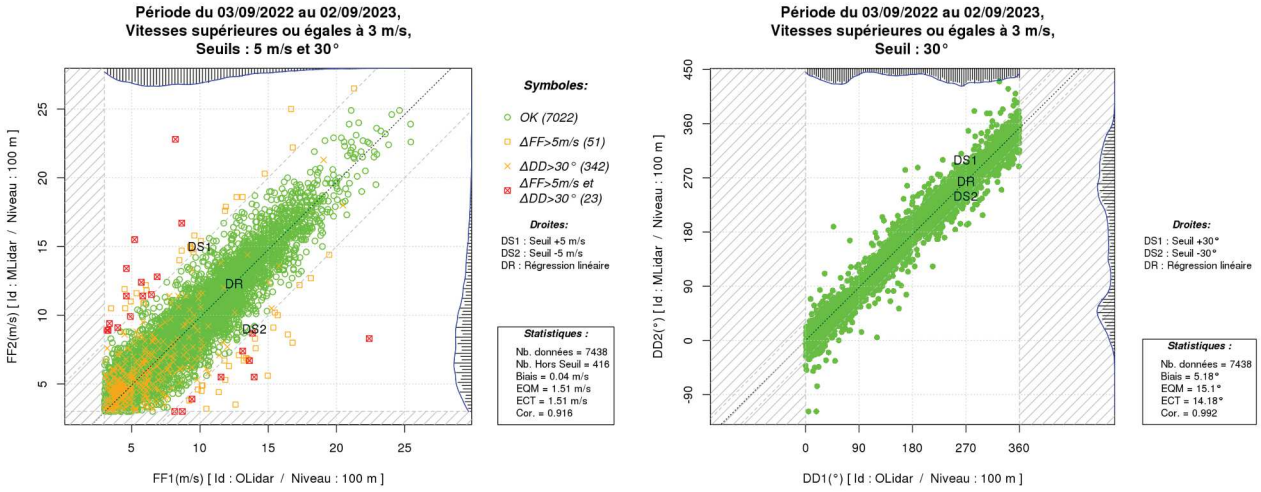


Illustration 11 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) du LiDAR avec le modèle

Le diagramme « quantile-quantile » des forces de vent du LiDAR et du modèle AROME ci-dessous présente des points parfaitement alignés sur la première bissectrice. En effet, les différents quantiles du modèle ou du lidar ont la même valeur ce qui montre les vents observés par le lidar ont la même distribution que les vents modélisés.

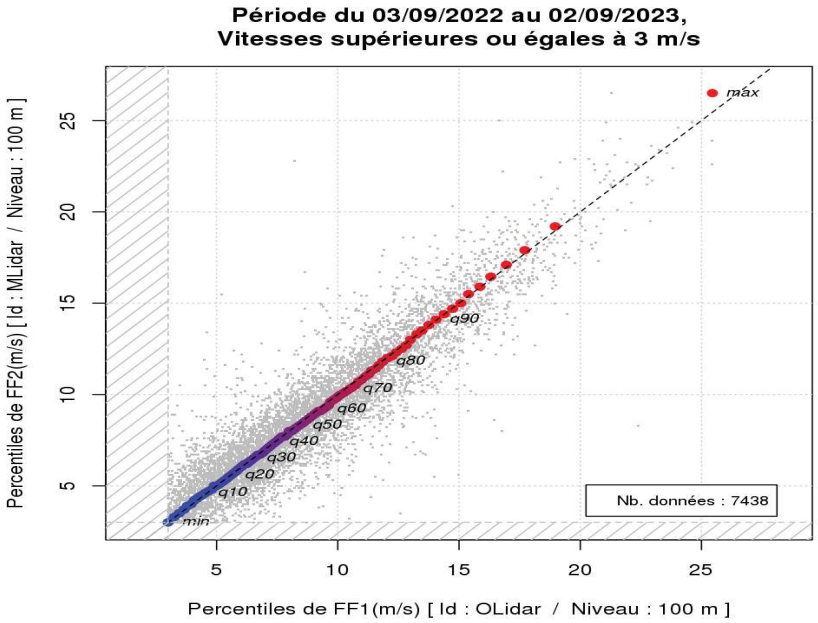


Illustration 12 : Diagramme « quantile-quantile »

Quelle que soit l'heure, l'observation présente un très faible biais non systématique sur les directions, de moins de 6° par rapport au modèle (cf. Illustration 13 à gauche). De plus, pour la moitié des données (intervalle inter-quartile des boites à moustaches), les différences de direction entre le lidar et le modèle n'excèdent jamais les 15°. A noter que les valeurs apparaissant comme aberrantes, matérialisées par des ronds, correspondent à des différences quasiment systématiquement > 30°. Il s'agit ainsi des données qualifiées de douteuses car hors seuil (cf paragraphe 2.2.1.3).

Suivant la direction considérée, on note un biais légèrement plus marqué pour le secteur est, de l'ordre de 9° (cf. Illustration 13 à droite) ; secteur de vent qui reste par ailleurs peu fréquent dans la zone (4 % des cas seulement)

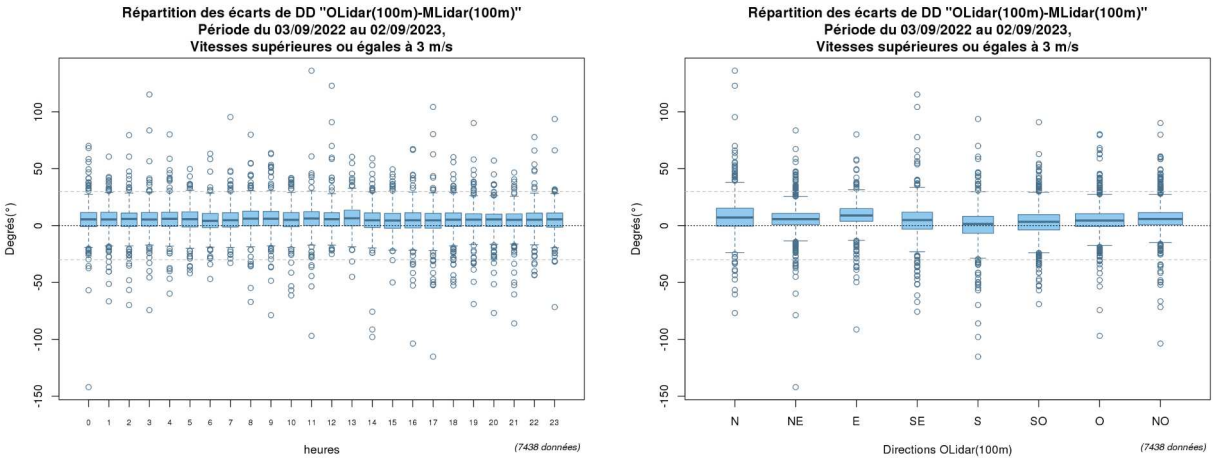


Illustration 13 : Répartitions des écarts de directions du LiDAR en fonction de l'heure (à gauche) et de la direction (à droite)

Quel que soit le secteur, les dépassements du seuil pour la force du vent (écart > 5 m/s entre le LiDAR et le modèle) restent très rares : ils représentent moins de 1,3 % des données (cf. Illustration 14 à gauche).

D'une manière générale 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 le seuil de direction (écart supérieur à 30° entre le LiDAR et le modèle) pour les vitesses les plus faibles (*cf.* Illustration 14 à droite) tandis que pour des vitesses supérieures à 7 m/s , on enregistre des dépassements du seuil de direction dans moins de 3% des cas à l'exception des trois histogrammes qui se détachent à droite du graphique et que nous allons détailler :

- Ces histogrammes pour les classes [19-20 m/s], [20-21 m/s] et [22-23 m/s] avec des ratios de données hors seuil pour la direction de respectivement 4,5%, 5,5% et 11% peuvent interpeller et potentiellement traduire une difficulté de mesure du lidar ou de modélisation de AROME pour les vents les plus forts.
- 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.
- Il convient donc de noter que les vents ayant excédé les 19 m/s durant la campagne de mesure ont été très rares et que ces trois histogrammes ne sont le fait qu'une seule valeur hors seuil à chaque fois. Ces ratios sont donc à interpréter avec précaution. Météo-France a vérifié dans le détail les 3 situations correspondantes :
    - L'unique dépassement de seuil observé pour la classe [19-20 m/s] correspond au 04/11/2022 à 02h avec une mesure du lidar à 100m de 19,06 m/s. Le modèle quant à lui est cohérent en force avec une valeur de 21,3 m/s. Concernant la direction il convient de noter que l'écart est tout juste supérieur au seuil fixé de 30° avec un écart de 34° : 308° (composante ouest/nord-ouest pour le lidar 274° pour le modèle (composante ouest). De plus, la situation météorologique correspondait à une traîne modérée pour laquelle la direction des rafales sous un nuage convectif peut être très difficile à parfaitement appréhender par le modèle.
    - Même constatation pour le dépassement de seuil observé pour la classe [20-21 m/s] avec des valeurs proches en force et un écart en direction de 33° juste au dessus du seuil pour une situation météorologique du même type le 09/01/2023 à 02h (traîne modérée dans un flux de Nord-Ouest)
    - L'unique dépassement de seuil observé pour la classe [22-23 m/s] provient des données du 24/08/2023 à 02h avec des écarts notoires aussi bien en force qu'en direction lors d'un passage pluvio-orageux par flux de Sud-Ouest. : vent d'ouest très fort de 22,4 m/s mesuré par le LiDAR tandis que le modèle ne voyait qu'un vent modéré de sud modélisé par AROME. Il est probable que le modèle n'ait pas simulé un orage « noyé dans la masse » et ses rafales associées. Une mesure douteuse du lidar ne peut pas être complètement exclu pour autant dans ce cas précis. Il s'agit du seul cas sur les 3 situations réellement en écart.
- En conclusion, les ratios paraissant élevés à première vue pour certaines gammes de vents forts ne remettent absolument pas en cause la qualité et la fiabilité des mesures du lidar ni la très bonne corrélation entre le modèle et le lidar y compris pour les vents les plus forts. Il est inévitable dans de rares cas que la situation météorologique ne soit pas correctement modélisée.

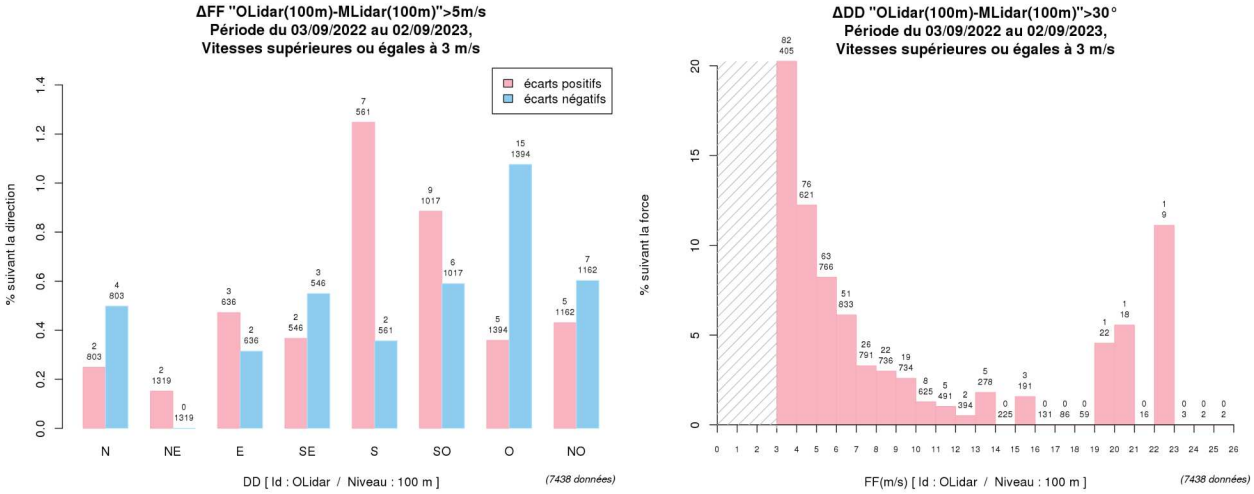


Illustration 14 : Dépassements des seuils de force (à gauche) et de direction (à droite) du vent du LiDAR

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

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

Sur l'ensemble de la campagne, le tableau suivant permet de constater que les forces de vent se distribuent de manière identique que l'on regarde les données mesurées toutes les 10 minutes ou seulement les données horaires (cf tableau 3). En effet, quelle que soit la classe de vitesse de vent ou le mois considéré, les taux ne diffèrent pas de plus de 3% et sont même généralement inférieurs à 1%.

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

Année	Mois	Nombre de cas	0 à 3 m/s	3 à 5 m/s	5 à 10 m/s	10 à 15 m/s	15 à 20 m/s	20 à 25 m/s	25 à 30 m/s	30 à 35 m/s
2022	9	*4006*	*9,9 %*	*15%*	*53,4 %*	*18,6 %*	*3%*			
		672	**10,7 %**	**13,5 %**	**54%**	**18,6 %**	**3,1 %**			
	10	*4299*	*13%*	*15,1 %*	*40,7 %*	*24,6 %*	*6,5 %*	*0,2 %*		
		744	**12,2 %**	**15,5 %**	**39,4 %**	**26,1 %**	**6,7 %**	**0,1 %**		
	11	*4312*	*3,2 %*	*8,1 %*	*45,7 %*	*31%*	*10,6 %*	*1,5 %*		
		720	**2,9 %**	**9,2 %**	**45,3 %**	**30,4 %**	**10,7 %**	**1,5 %**		
	12	*4456*	*1,4 %*	*7%*	*37,1 %*	*40,5 %*	*14%*	*0%*		
		744	**1,5 %**	**6,7 %**	**37,6 %**	**40,1 %**	**14,1 %**			
2023	1	*4316*	*5,7 %*	*8,1 %*	*39%*	*34,2 %*	*11,2 %*	*1,7 %*	*0,2 %*	
		744	**5,4 %**	**8,1 %**	**38,6 %**	**34,9 %**	**10,9 %**	**1,9 %**	**0,3 %**	
	2	*3764*	*10,8 %*	*18,7 %*	*48,6 %*	*18,4 %*	*3,6 %*	*0%*		
		672	**10,4 %**	**17,3 %**	**47%**	**21,4 %**	**3,9 %**			
	3	*4257*	*7,4 %*	*12,2 %*	*38%*	*26,8 %*	*12,7 %*	*2,8 %*	*0%*	
		744	**7,1 %**	**10,9 %**	**41,3 %**	**25,5 %**	**12,4 %**	**2,8 %**		
	4	*3927*	*8%*	*14%*	*50,8 %*	*23,8 %*	*3,4 %*			
		720	**8,5 %**	**15,4 %**	**49,9 %**	**23,1 %**	**3,2 %**			
	5	*4374*	*3,1 %*	*9,7 %*	*55%*	*32,1 %*	*0,1 %*			
		744	**3,4 %**	**10,6 %**	**53,5 %**	**32,4 %**	**0,1 %**			
	6	*3817*	*17%*	*24,4 %*	*51,3 %*	*7,3 %*				
		720	**15,7 %**	**24,9 %**	**51,4 %**	**8,1 %**				
	7	*4457*	*11,2 %*	*23,9 %*	*53,2 %*	*11,8 %*				
		744	**10,5 %**	**25,1 %**	**52,8 %**	**11,6 %**				
	8	*4457*	*12,1 %*	*19,5 %*	*46,5 %*	*19,4 %*	*2,5 %*	*0%*		
		744	**12,1 %**	**19,5 %**	**46,4 %**	**19,5 %**	**2,4 %**	**0,1 %**		
	9	*288*	*4,9 %*	*29,5 %*	*63,9 %*	*1,7 %*				
		48	**4,2 %**	**29,2 %**	**66,7 %**					
Total		*50730*	*8,4 %*	*14,6 %*	*46,6 %*	*24,2 %*	*5,7 %*	*0,5 %*	*0,02 %*	*0,0 %*
		8760	**8,3 %**	**14,8 %**	**46,5 %**	**24,3 %**	**5,6 %**	**0,5 %**	**0,02 %**	**0,0 %**

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

3.3.2.2 Distributions

Les distributions statistiques horaires des observations et du modèle à 100 m sont très proches (*cf.* Illustration 15). Hormis pour les percentiles les plus élevés (> Q90), les quantiles apparaissant ci-dessous dans l'encart sont parfaitement identiques, ce qui est remarquable.

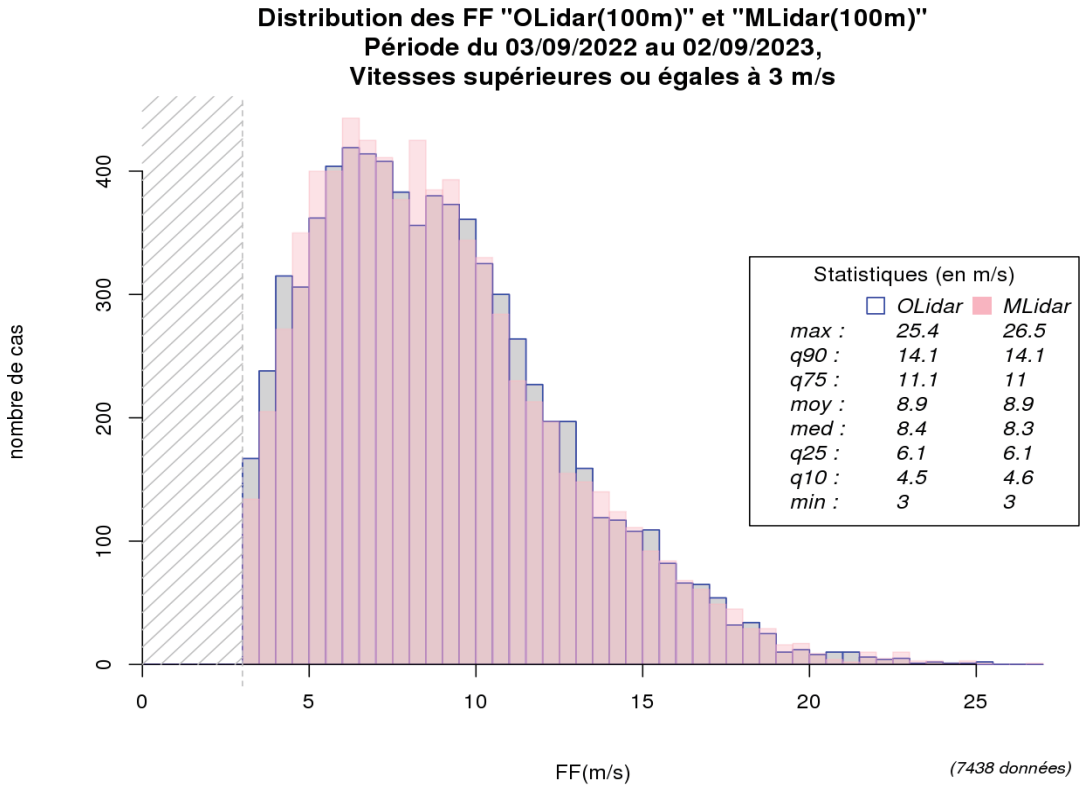


Illustration 15 : Distributions des vents horaires du LiDAR

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 8h à 15h UTC), les médianes horaires des observations et du modèle sont légèrement inférieures à la médiane de la période totale. En soirée et en première partie de nuit, on observe l'effet inverse.

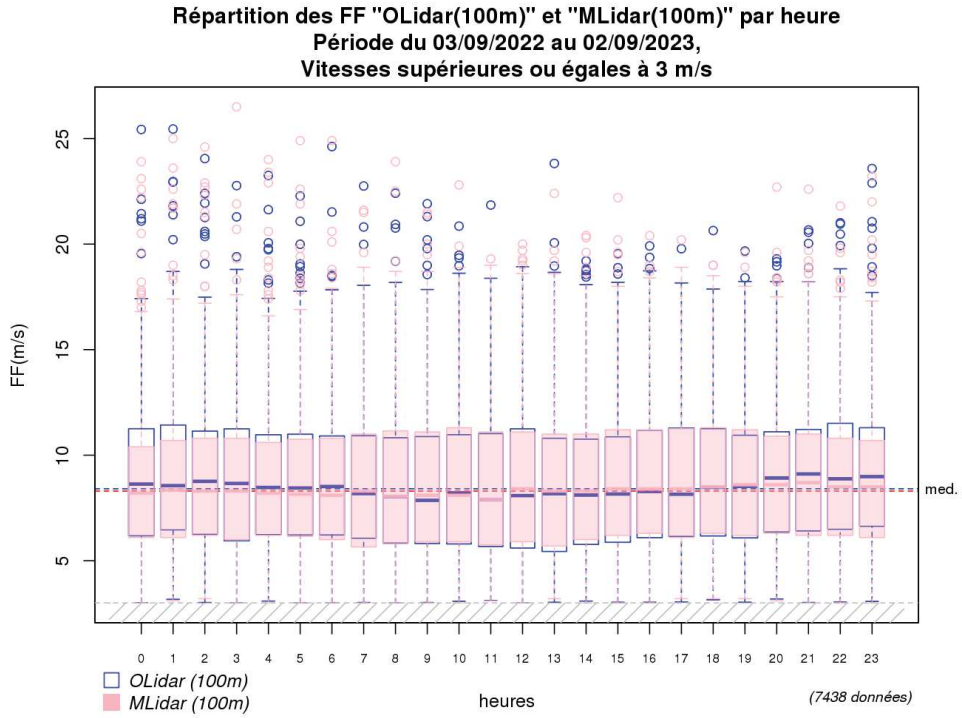


Illustration 16 : Répartitions horaires des forces du vent du LiDAR

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

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

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

Il est intéressant de noter que les boites à moustaches issues des données du modèle sont très proches de celles issues du lidar attestant une nouvelle fois la très bonne corrélation des mesures. La différence plus grande au mois de juin 2023 (écart sur les médianes notamment) peut s'expliquer par l'absence de données mesurées par le lidar en milieu de mois (cf Tableau 2).

Assez logiquement les vents les plus forts en fréquence apparaissent pour des mois hivernaux (novembre 2022, décembre 2023, janvier 2023 et mars 2023 pour lesquels les médianes mensuelles sont bien au-dessus de la médiane des forces de vent sur l'ensemble de la campagne). A contrario, la période estivale 2023 est en dessous de la médiane de l'ensemble avec 75 % des vents ne dépassant pas 10m/s environ. Le mois de février 2022 apparaît quant à lui comme assez singulier dans cette série. En effet, ce mois hivernal a été particulièrement calme avec des vents bien en deçà de la normale (cf Tableau 4).

Précisons que la ligne pointillée dans cette illustration montre la médiane des forces de vent sur l'ensemble des 12 mois de la campagne mais ne doit pas être confondue avec une normale climatologique. Par conséquent, l'illustration 17 doit être mise en regard avec le tableau 4 pour ne pas commettre d'erreur d'interprétation. Par exemple, le mois de septembre 2022 dont la médiane mensuelle se confond avec la médiane de l'ensemble de la campagne de mesure, a été plus venté que la normale 2000-2019 à cette période de l'année au niveau de la station de Chassiron.

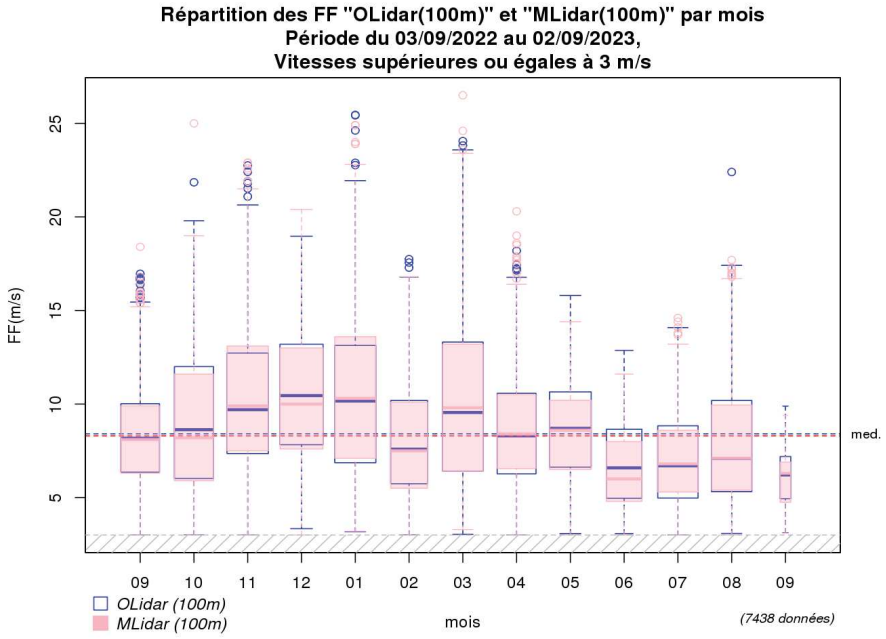


Illustration 17 : Répartitions mensuelles des forces du vent du LiDAR ; la largeur des boîtes à moustaches est fonction du nombre de données

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 sur l'ensemble de la campagne de mesures, les forces de vent ont été globalement un peu plus élevées que la normale.

Plus en détail :

- le début de campagne, à l'automne 2022 s'avère contrasté avec un mois de Septembre plus venté que la normale mais un mois d'octobre 2023 très proche de la normale, voire légèrement déventé.
- lors de l'hiver « étendu » de Novembre à Mars, le mois calme de Février 2023 contraste avec les autres mois de cette période qui ont été plus ventés que la normale ; en particulier les mois de décembre 2021 (+6 % de vents forts > 8m/s, -11 % de vents faibles < 5m/s par rapport à la normale) et janvier 2022 marqué notamment par le passage de la tempête « Gerard » (+16 % de vents forts > 8m/s, -12 % de vents faibles < 5m/s). Ce constat s'étend au début du printemps en avril 2023 qui a également été plus venté que d'habitude.
- a contrario les mois de février 2023 (-10 % de vents forts, -10 % de vents modérés) et juin 2023 (-7 % de vents forts, 12 % de vents modérés) ont été particulièrement calmes.
- Les mois juillet et août 2023 ont quant à eux été assez proches de la normale.

	2022				2023									
Vitesses en m/s	**9**	**10**	**11**	**12**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**Total**
> 8	**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**	**17**
	15,3	*17,1*	*37,5*	*33,9*	*42,9*	*17*	*24,3*	*19,6*	*10,5*	*2,1*	*9,6*	*18,8*	*6,9*	*19,7*
[4.5, 8.0[	**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**	**39,8**
	45,7	*34,1*	*31,7*	*43,4*	*35,1*	*28,9*	*44,8*	*43,5*	*57,9*	*29,2*	*39,3*	*35,8*	*28,5*	*38,5*
[1.5, 4.5[	**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**	**39,7**
	36,4	*42,7*	*29,7*	*21,4*	*19,8*	*47,9*	*28,5*	*34,7*	*30,5*	*62*	*47*	*42,7*	*59,6*	*38,5*
[0, 1.5[	**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**
	2,6	*6,1*	*1,1*	*1,3*	*2,2*	*6,2*	*2,4*	*2,2*	*1,1*	*6,7*	*4,1*	*2,7*	*5*	*3,3*

Tableau 4: Statistiques 2001-2020 (en gras, en %) et valeurs 2022-2023 (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). Le secteurs 30° (Nord Nord-Est) est très légèrement surestimé par le modèle (+2 %) au détriment d'une composante purement de nord pour le lidar. D'une manière générale les directions sont représentées de manière tout à fait comparable. Il en va de même pour les forces des vents comme cela avait déjà été montré dans l'Illustration 15.

OLidar(100m) Période du 03/09/2022 au 02/09/2023

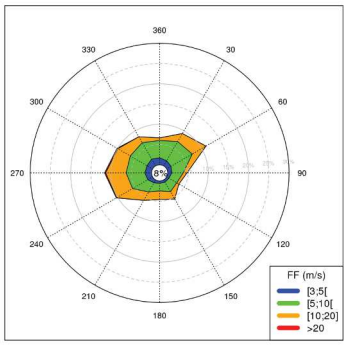


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 8392

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.5	5.4	2.3	.	9.2
60	1.2	6.1	3.9	.	11.2
90	1.0	2.8	0.9	.	4.8
120	0.6	2.2	0.6	.	3.5
150	0.7	2.7	2.1	.	5.4
180	0.5	1.9	2.1	.	4.6
210	0.8	2.6	2.4	0.0	5.8
240	1.4	4.3	4.6	0.1	10.4
270	1.7	4.6	5.1	0.3	11.6
300	1.6	4.8	3.6	0.2	10.2
330	1.9	4.7	1.7	0.0	8.3
360	1.7	4.3	0.6	.	6.6
Total	14.7	46.5	29.9	0.6	91.6
[0; 3 [					8.4

MLidar(100m) Période du 03/09/2022 au 02/09/2023

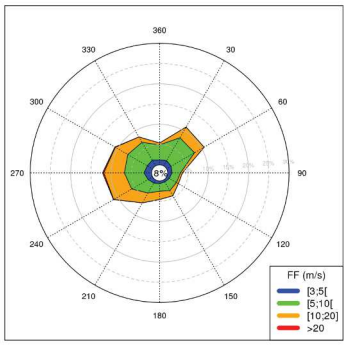


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 8757

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.5	6.5	3.0	.	11.1
60	1.3	6.7	2.8	.	10.7
90	1.0	2.1	0.5	.	3.6
120	0.8	2.0	0.6	.	3.3
150	0.6	2.5	1.5	.	4.5
180	0.7	1.9	2.0	0.0	4.6
210	0.9	2.8	2.8	0.0	6.5
240	1.3	4.7	5.2	0.1	11.2
270	1.9	4.8	5.1	0.3	12.1
300	1.5	5.6	3.6	0.1	10.8
330	1.7	5.1	1.5	0.0	8.2
360	1.2	3.7	0.5	.	5.4
Total	14.3	48.3	28.9	0.6	92.1
[0; 3 [					7.9

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 quasiment superposés. Les différences sur les profils de valeurs maximales sont à considérer avec précaution. En effet, ces courbes sont obtenues avec une seule et unique valeur par niveau. Rappelons aussi que l'écart d'environ 1m/s entre 100 et 160m ne représente une erreur que de l'ordre de 5 %.

Par ailleurs, de 40 m à 160 m, les vitesses du profil moyen observé (profil bleu en pointillés) sont là aussi quasiment confondues à celles du profil moyen modélisé (profil rouge en pointillés). Il est intéressant de noter que ces 2 profils représentatifs de la période de la campagne de mesure sont tous deux légèrement supérieurs à la climatologie sur 20 ans issue du modèle AROME (profil vert en pointillés). Comme cela été le cas avec la station de mesure de Chassiron, ceci atteste à nouveau que la période de campagne sur la zone d'étude a été un peu plus ventée que la normale.

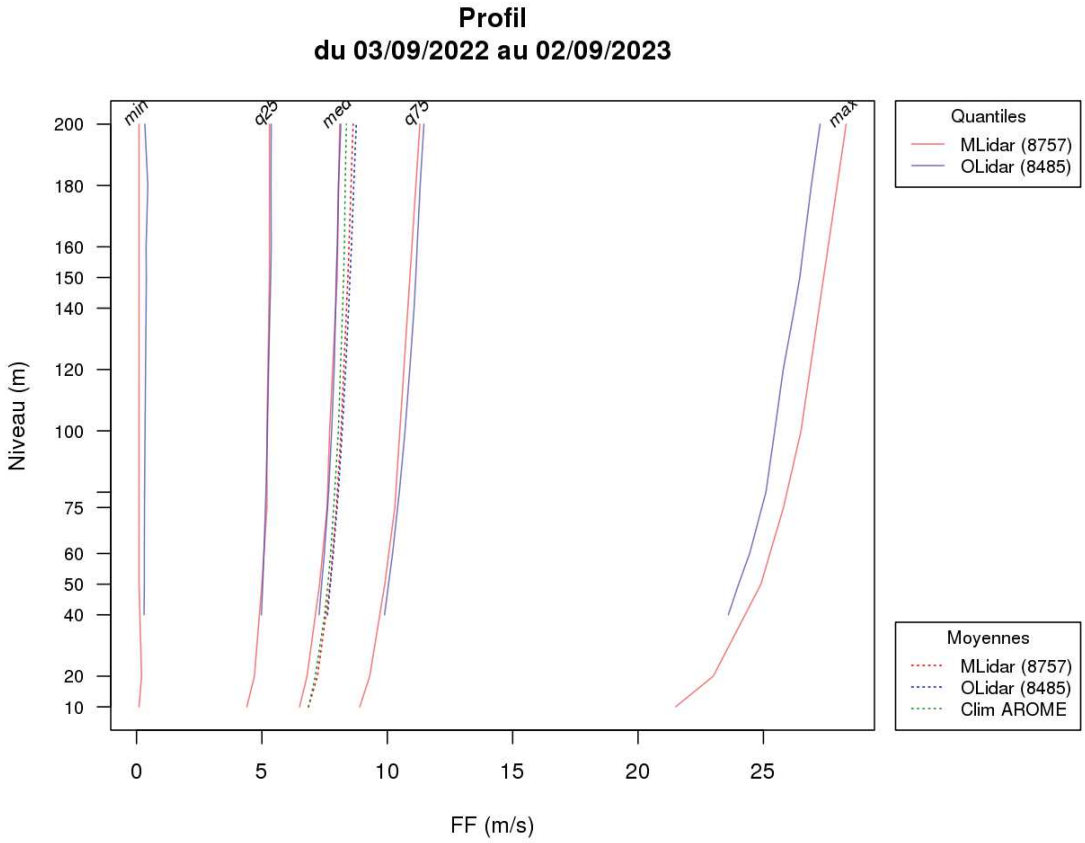


Illustration 19 : Profils de vents avec quantiles du LiDAR

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 1 à 1,6 m/s pour une large secteur sud allant des directions de sud-est à sud-ouest (*cf.* Illustration 20). A noter que les vents de secteur sud-est sont peu représentatifs et très rares sur cette zone (*cf.* Illustration 18), ceux de sud-ouest en revanche sont beaucoup plus communs et 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 plus faible (de 0,9 à 1,2 m/s) pour les directions indiquées précédemment.

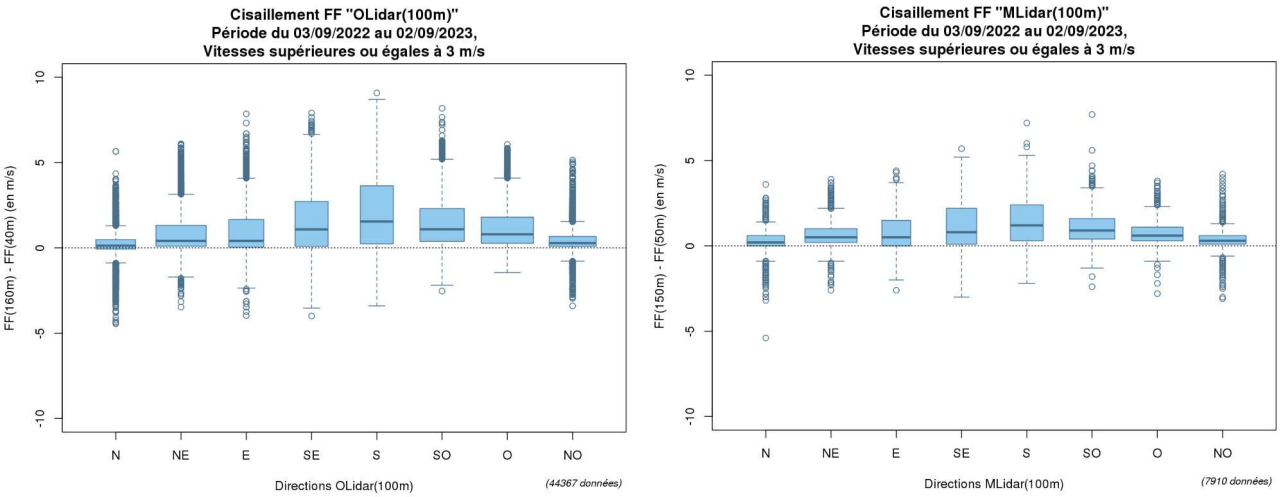


Illustration 20 : Cisaillement des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite)

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) »** :

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

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

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

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

Tableau 5: Valeurs de l'exposant α en fonction de la nature du terrain (source http://eolienne.f4jr.org/vent)

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

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

Pour les vents de secteurs sud à ouest, correspondant au régime classique de temps perturbé, on ne constate pas de cycle diurne et Le coefficient alpha est assez faible (médiane < 0.1)

En revanche, pour les vents de secteur nord-est à sud-est, le coefficient alpha est plus élevé et on observe un cisaillement plus important la nuit que le jour qui peut probablement s'expliquer par un effet de brise (brise de terre la nuit amplifiant les vents d'un large secteur est et brise de mer le jour atténuant ceux-ci).

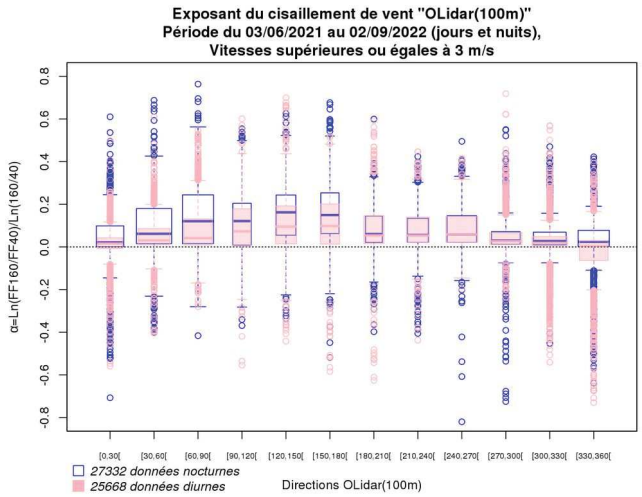


Illustration 21 : Exposant du cisaillement de vent du LiDAR

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

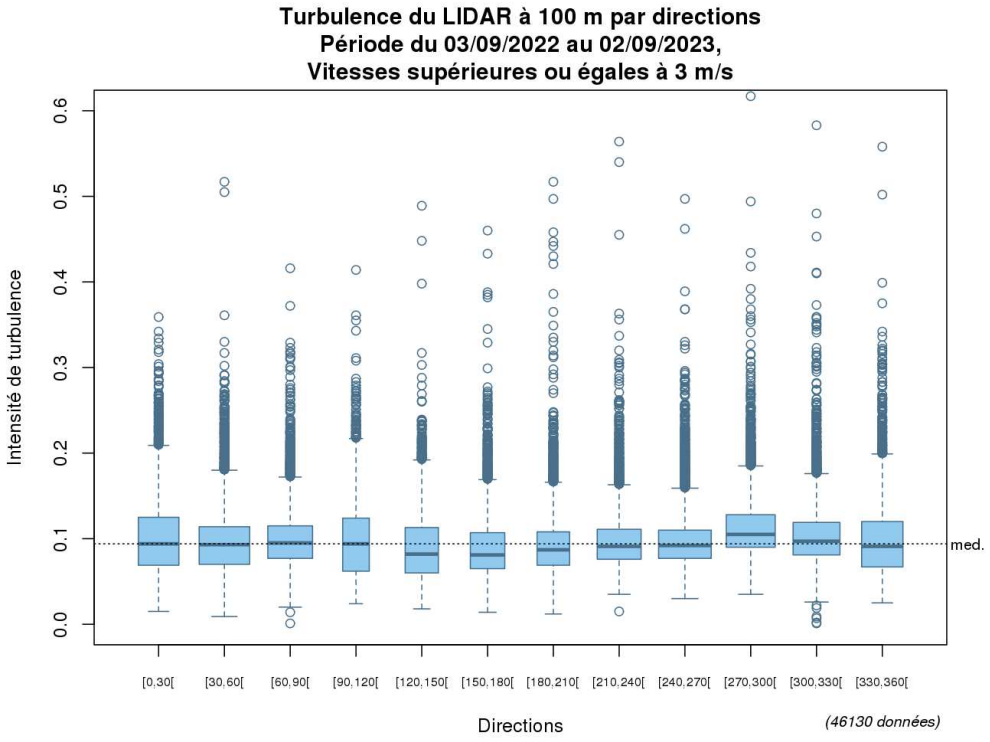


Illustration 22 : Turbulence du LiDAR

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.

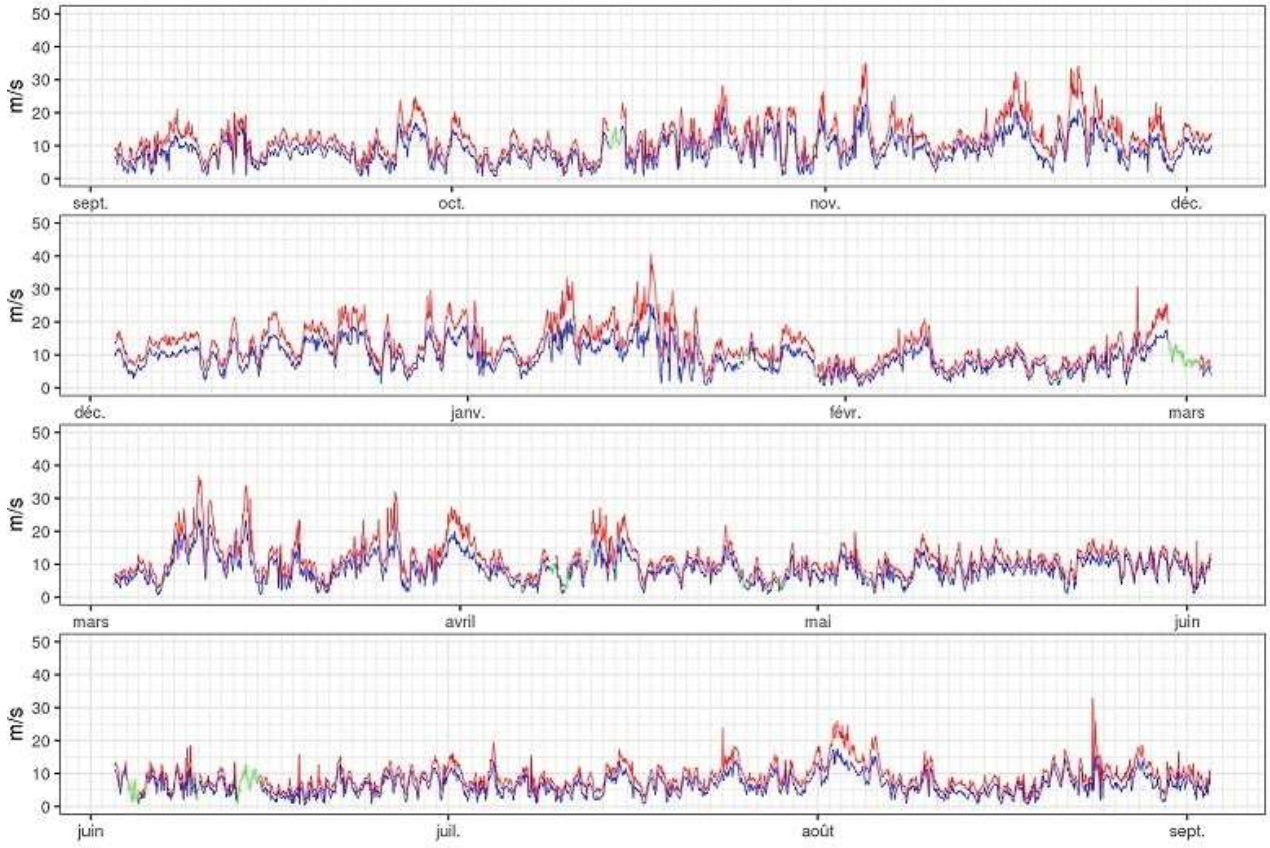


Illustration 23: Séries FF et FXI à 100 m du LiDAR

Météo-France fournit au travers du fichier « SerieLidarH100_20220903-20230902.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 03/09/2022 au 02/09/2023. 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 14 % des valeurs enregistrées par l'anémomètre et extrapolées à 10 m sortent des seuils, ce qui est nettement supérieur à ce qui a été constaté pour le LiDAR (moins de 6 %).

Notons que pour l'intégralité des campagnes de mesures du même type sur d'autres zones, le taux de données hors seuil s'est systématiquement avéré plus important à 10 mètres qu'à 100 mètres. Ceci peut s'expliquer par le fait que les mesures de l'anémomètre sont extrapolées de 4 à 10 mètres de hauteur ce qui reste moins précis qu'une mesure directe à 10 mètres (impossible pour des raisons techniques). De plus, pour l'anémomètre toutes les données mesurées sont considérées (même les vents très faibles < 3m/s), ce qui n'est pas le cas pour le LiDAR (cf § 3.1.3). Or, en général, la plupart des dépassements surviennent pour les faibles forces de vent sur le critère de direction (ces cas de dépassement sont donc comptabilisés pour l'anémomètre alors qu'ils ne le sont pas le LiDAR).

Pour la présente campagne, nous constatons sur l' Illustration 24 que :

- à l'instar d'autres campagnes de mesures, les dépassements du seuil de direction sont nombreux, notamment lorsque les forces de vent sont relativement faibles, autrement-dit dans des situations où le flux n'est pas clairement établi, le vent prenant un caractère « variable » (les dépassements deviennent rares pour des vents > 7m/s, moins de 3,5% des cas) ;
- environ 4 % des valeurs enregistrées par l'anémomètre sort des seuils de force. Ce qui est plus important que pour le LiDAR (moins de 1%). La plupart des dépassements en force sont dus à des forces modélisées inférieures à celles relevées par l'anémomètre (*cf*. Illustration 25). Ce constat avait déjà été effectué lors de la campagne initiale et semble confirmer une tendance du modèle AROME à sous-estimer légèrement les vents à 10 mètres.

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.

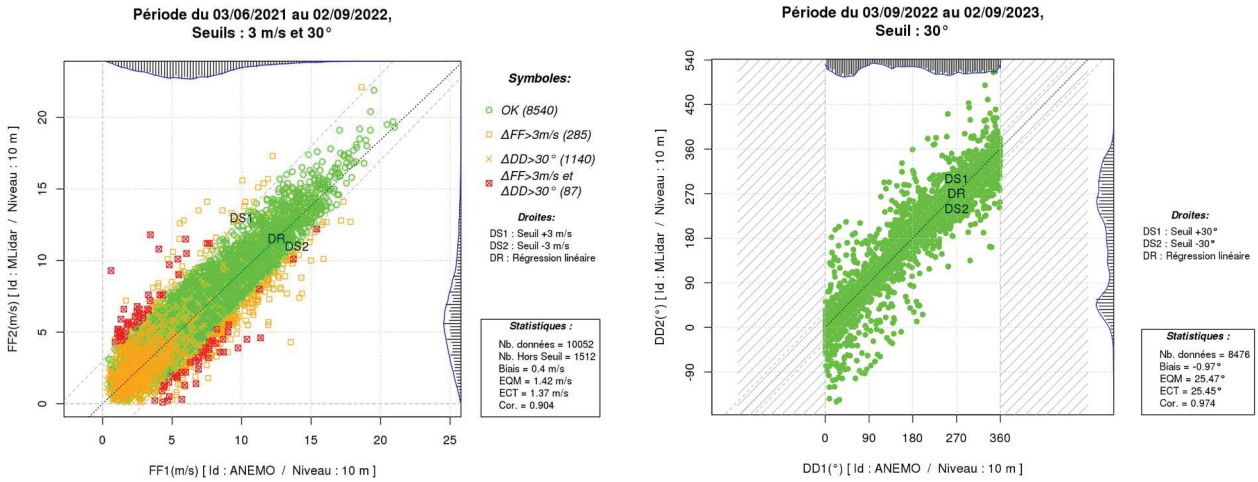


Illustration 24 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) de l'anémomètre avec le modèle

Les distributions statistiques horaires des observations et du modèle à 10 m sont assez proches. Toutefois, on note plus de cas de vents plutôt faibles compris entre 2 et 8 m/s avec les données du modèle et a contrario des vents entre 8 et 15 m/s moins fréquents. 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 0,6 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.

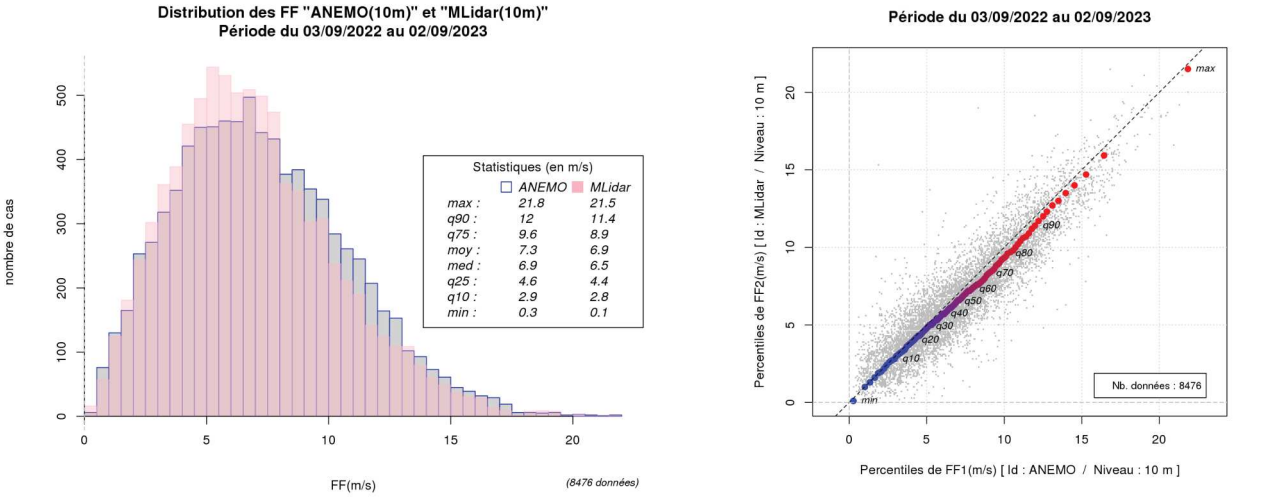


Illustration 25 : Distribution des vents horaires de l'anémomètre (à gauche) et diagramme « quantile-quantile » (à droite)

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:

- sur les directions, une composante nord moins fréquente pour le modèle (-1,9%) comme cela été également le cas pour les roses des vents à 100m
- sur les forces les roses le même constat que celui qui a été fait à l'Illustration 24. Les roses des vents ci-dessous permettent de préciser cela avec une légère surestimation de 2 % du modèle pour les vents faibles (< 5m/s), et à l'inverse une sous-estimation de 4,5 % des vents compris entre 10 et 20 m/s.

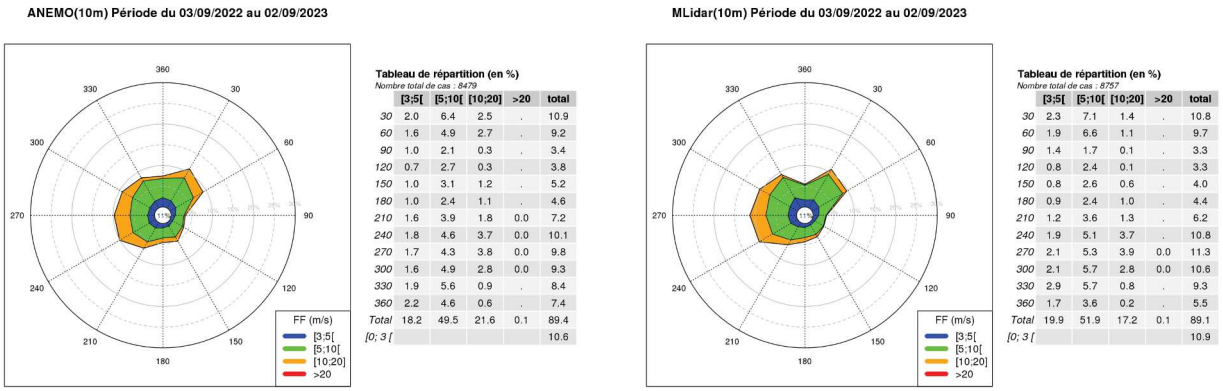


Illustration 26 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'anémomètre

5 Conclusion

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. Cette campagne n'a connu aucun problème technique majeur et a permis des taux de disponibilité élevés de données quelque-soit la saison de l'année.

Suite à ce contrôle, une série complète du vent horaire à 100 m a pu être créée et estimée sur quelques périodes manquantes.

Au cours de ces douze mois de campagne, nous avons pu établir que les mesures de vent d'altitude, effectuées sur la zone d'étude au large d'Oléron, étaient parfaitement cohérentes avec les données du modèle AROME.

Il en va de même pour les vents de surface à 10m avec toutefois une tendance du modèle AROME à légèrement sous-estimer leur force.

Ces constats confirment et renforcent ceux formulés lors de la campagne initiale de mesures (03/06/2021 – 02/09/2022).

6 Bibliographie

Chatel, V., Dalphinet, 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 15 et 16 janvier 2023 (tempête « Gérard »).....40
Situation des 9 et 10 mars 2023 (tempête « Larisa»).....42
Annexe 2 : Climatologie du 1er septembre 2022 au 31 août 2023.....44
Annexe 3 : Distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....51
Annexe 4 : Répartitions horaires par mois des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....54
Annexe 5 : Tableau de contingence des forces de vent du LiDAR.....57
Annexe 6 : Roses des vents mensuelles du LiDAR à 100m (données brutes).....58
Annexe 7 : Profils de vent du LiDAR.....61
Annexe 8 : Cisaillement du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....64
Annexe 9 : Turbulence du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....67

Annexe 1 : Situation des 15 et 16 janvier 2023 (tempête « Gérard »)

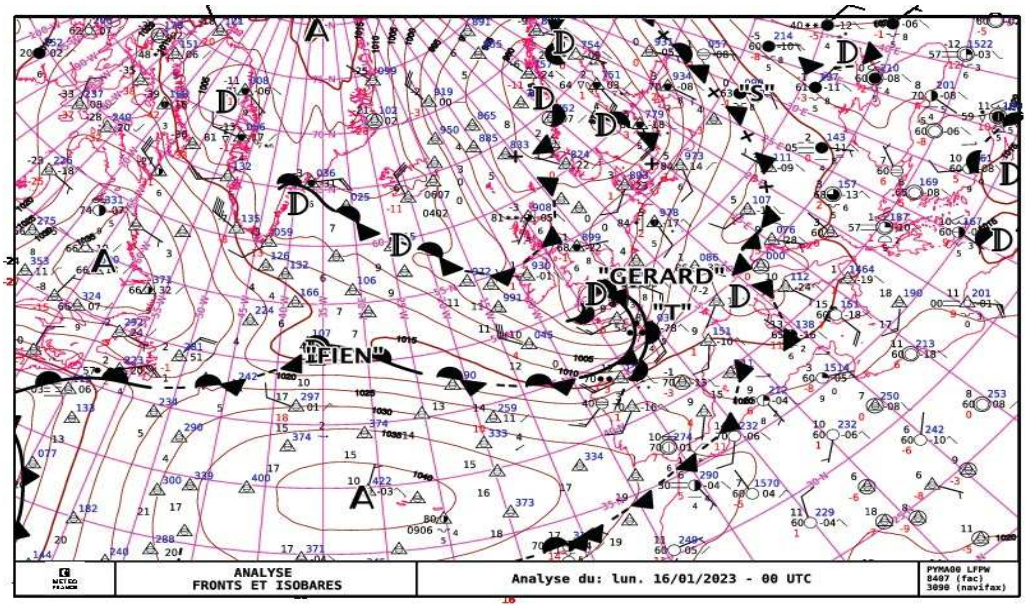


Illustration 27 : Analyse Isofront du mercredilundi 16 20 janvier octobre 20231 à 0018 UTC

Dans un flux de Nord-Ouest très rapide, une dépression se creuse en soirée du 15 janvier au large de la Bretagne, puis circule la nuit suivante sur le nord du Pays en prenant un caractère tempétueux. Cette tempête nommée « Gérard », qualifiée de modérée sur un plan national, touchera principalement le Nord-Ouest de la France. En Charente-Maritime, on enregistrera des rafales de vent à 35,7 m/s (126 km/h) à Saint-Clément-des-Baleines et 33,5 m/s (119 km/h) à Chassiron.

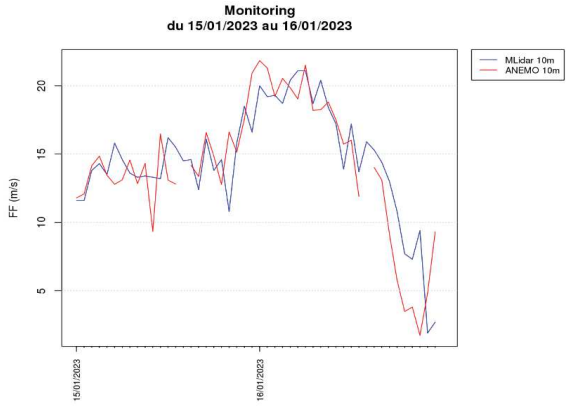


Illustration 28 : Comparaison des mesures de l'anémomètre installé sur la bouée Lidar d'Oléron avec le modèle AROME les 15 et 16 janvier 2023

La comparaison entre les données enregistrées par l'anémomètre du Lidar (vent moyen mesuré à 4m, et extrapolé à 10m) avec le modèle AROME traduit une excellence convergence entre observation et modélisation.

Ainsi, au plus fort de la tempête (le 16 entre 00h et 07h UTC) l'anémomètre a enregistré des vents moyens compris entre 19 et 22 m/s, en accord avec les valeurs proposées par la modélisation. On peut juste noter qu'un premier pic de vent enregistré à 22 m/s (00h UTC) a été légèrement sous-estimé par le modèle (20 m/s).

En ce qui concerne la mesure du vent Lidar à 100 m, on note également une bonne corrélation entre l'observation et la modélisation AROME, que ce soit en termes d'intensité ou de temporalité.

On peut toutefois remarquer en début et fin de graphique, une légère surestimation de l'intensité du vent AROME par rapport au Lidar, à l'exception toutefois du pic de vent à 27 m/s observé le 16 vers 00UTC, supérieur d'environ 3 m/s au modèle.

Par ailleurs, la résolution temporelle du modèle ne permet pas de voir les phénomènes de courte durée enregistrés par les capteurs.

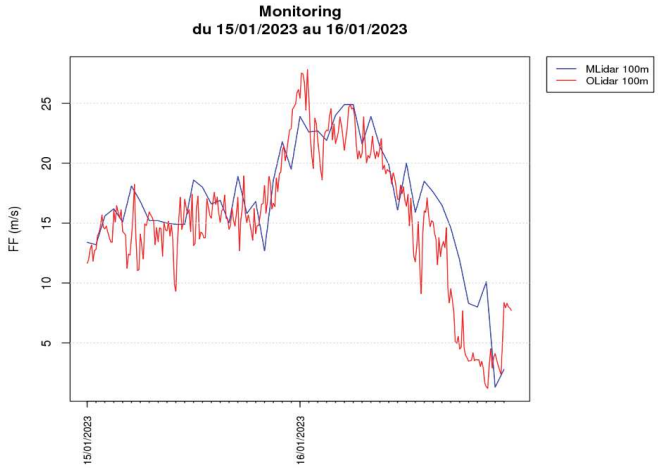


Illustration 29 : Comparaison des mesures à 100 m du Lidar d'Oléron avec le modèle AROME les 15 et 16 janvier 2023

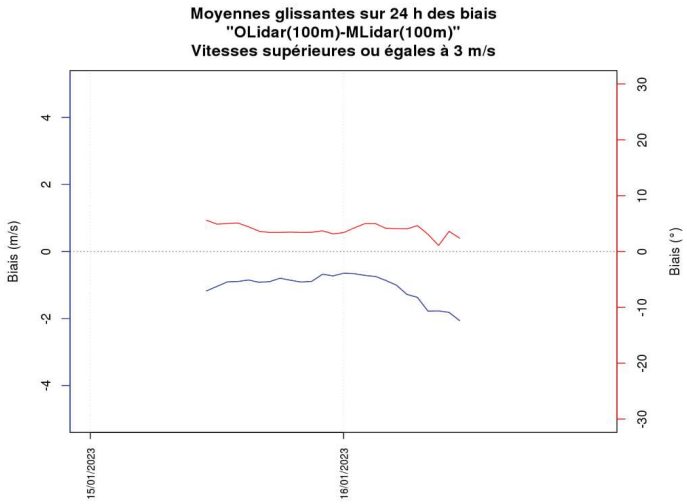


Illustration 30 : Comparaison des biais entre les mesures du Lidar d'Oléron et le modèle AROME les 15 et 16 janvier 2023

La moyenne glissante sur 24h du biais d'intensité de vent (courbe bleue) entre la mesure du vent Lidar à 100 m et la modélisation AROME confirme la légère surestimation du vent issu du modèle (écart variant entre -1 et -2 m/s).

Le biais de direction (courbe rouge) n'excède pas 5 degrés.

Situation des 9 et 10 mars 2023 (tempête « Larisa»)

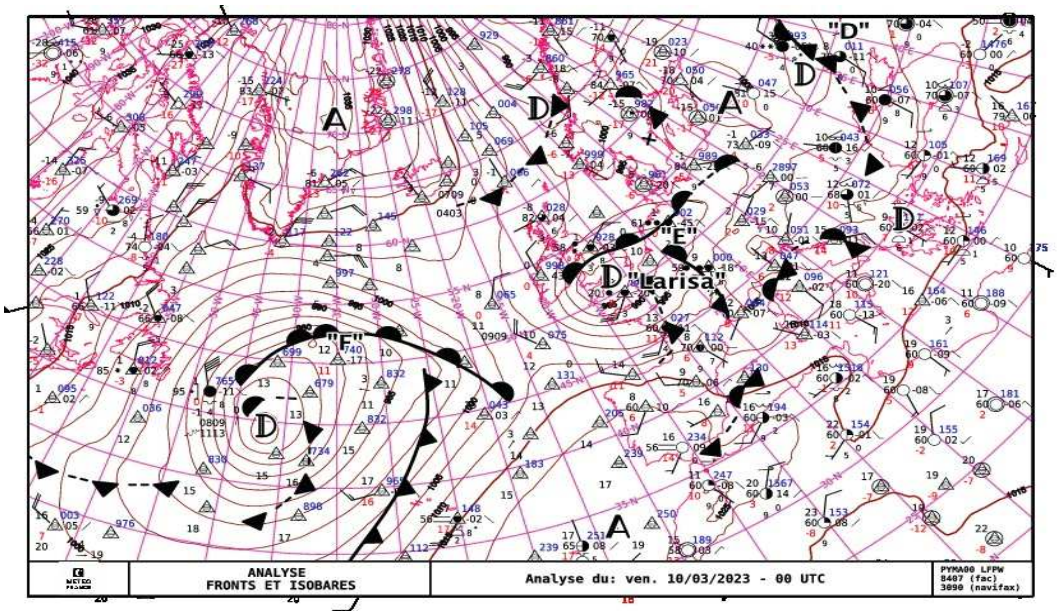


Illustration 31 : Analyse Isofront du vendredi 10 mars 2023 à 00 UTC

Une dépression se creuse le jeudi 9 mars 2023 au sud-ouest de L'Irlande, puis traverse le sud de l'Angleterre la nuit suivante. La tempête associée, nommée « Larisa », balayera une grande partie de la France, avec des vents violents observés de la Bretagne jusqu'au Nord de la Corse. En Charente-Maritime, on enregistrera des rafales à 34,1 m/s (122 km/h) à Saint-Clément-des-Baleines et 29,2 m/s (104 km/h) à Chassiron.

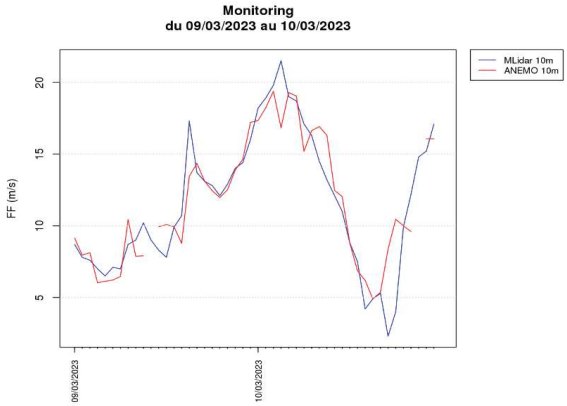


Illustration 32 : Comparaison des mesures de l'anémomètre installé sur la bouée Lidar d'Oléron avec le modèle AROME les 9 et 10 mars 2023

La comparaison entre les données enregistrées par l'anémomètre du Lidar (vent moyen mesuré à 4 m et extrapolé à 10 m) avec le modèle AROME témoigne d'une très bonne convergence entre données observées et modélisées.

On note cependant des pics de vents forts surestimés par le modèle, en particulier le 9 mars vers 15h UTC (écart de 4 m/s) et le 10 mars vers 04h UTC (écart de 2 à 3 m/s).

On retrouve ici une remarquable corrélation entre l'observation du vent Lidar à 100 m et la modélisation AROME, que ce soit en termes d'intensité ou de temporalité.

Il est à noter que la courbe bleue du vent AROME est beaucoup plus lissée que la courbe rouge des observations Lidar. La résolution temporelle du modèle (au pas horaire) ne permet pas de voir les phénomènes de courte durée enregistrés par les capteurs.

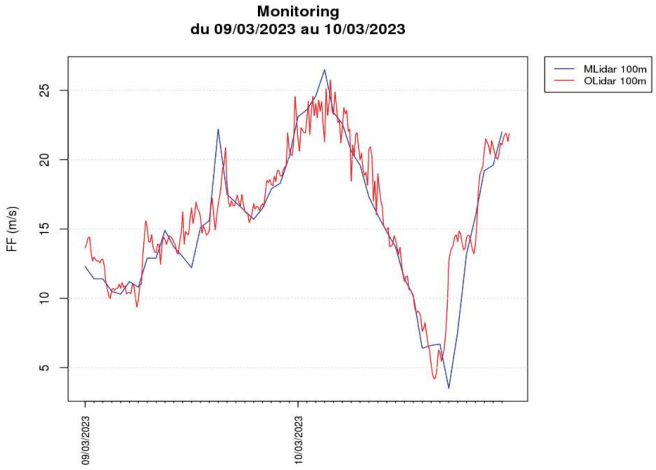


Illustration 33 : Comparaison des mesures à 100 m du Lidar d'Oléron avec le modèle AROME les 9 et 10 mars 2023

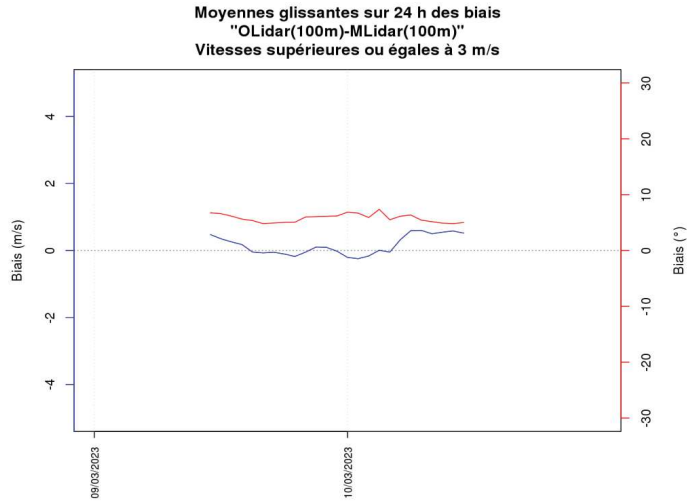


Illustration 34 : Comparaison des biais entre les mesures du Lidar d'Oléron et le modèle AROME les 9 et 10 mars 2023

La moyenne glissante sur 24h des biais entre la mesure du vent Lidar à 100 m et le modèle AROME confirme le faible écart entre observation et modélisation, avec un biais d'intensité (courbe bleue) inférieur à 1 m/s, et de direction de vent (courbe rouge) inférieur à 10 degrés.

Annexe 2 : Climatologie du 1er septembre 2022 au 31 août 2023

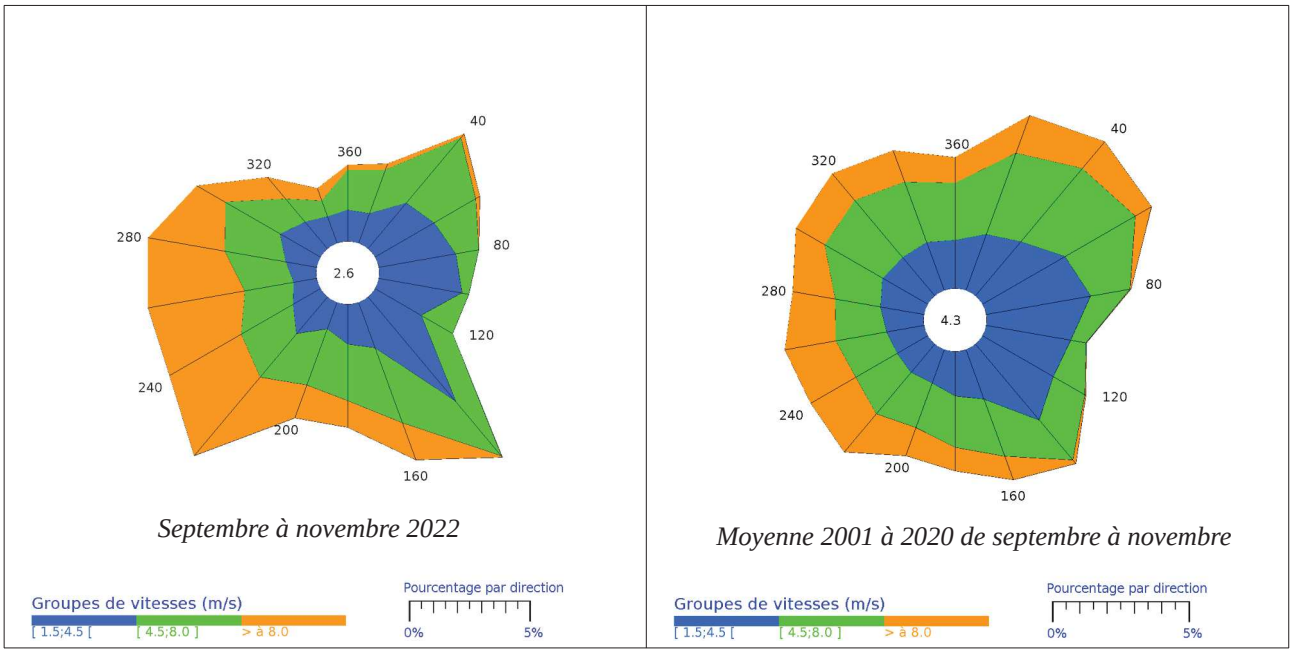
La station météorologique de référence pour qualifier la climatologie de la zone étudiée est située à Chassiron sur l'île d'Oléron (17). La période sur laquelle portent les statistiques s'étend de 2001 à 2020.

1) Le vent

a) Analyse de l'automne 2022 (septembre à novembre)

On observe ici une sous-représentation des vents de secteur Nord à Nord-Est (320°-080°) avec une fréquence de ces directions inférieure de 14,4 % par rapport aux normales. Ce déficit est compensé en grande partie sur les vents de secteurs Sud-Sud-Est à Sud-Ouest 140°-240° (+12,2 %).

Les vents forts (> 8m/s) ont été plus fréquents avec 23,2 % (pour une normale à 18,3%), avec une très forte contribution d'un large secteur Sud-Ouest (15 %, soit un excédent de +7,8% par rapport à la normale)



Septembre à novembre 2022

Moyenne 2001 à 2020 de septembre à novembre

Illustration 35 : Roses des vents de l'automne 2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Chassiron

b) Analyse de l'hiver 2022-2023 (mois de décembre à février)

On observe sur la période hivernale 2022-2023, une rose des vents au profil plus étiré sur un axe Sud-Ouest/Nord-Est que la normale saisonnière 2001-2020. Ceci s'explique par une moindre fréquence des vents de secteur Ouest à Nord-Ouest (-11.7 % sur les directions allant du 240° au 340°). En contrepartie, on note une plus grande fréquence (+6.7 %) des vents d'un grand secteur Nord-Est (directions 20° à 80°), et dans une moindre mesure du Sud-Ouest (200 à 220°) avec un excédent de +2.4 %.

Les vents forts (> 8m/s) ont été plus fréquents avec 31,9 % (pour une normale à 27,0%) , notamment du au secteur Nord-Nord-Est excédentaire de +7,6 %.

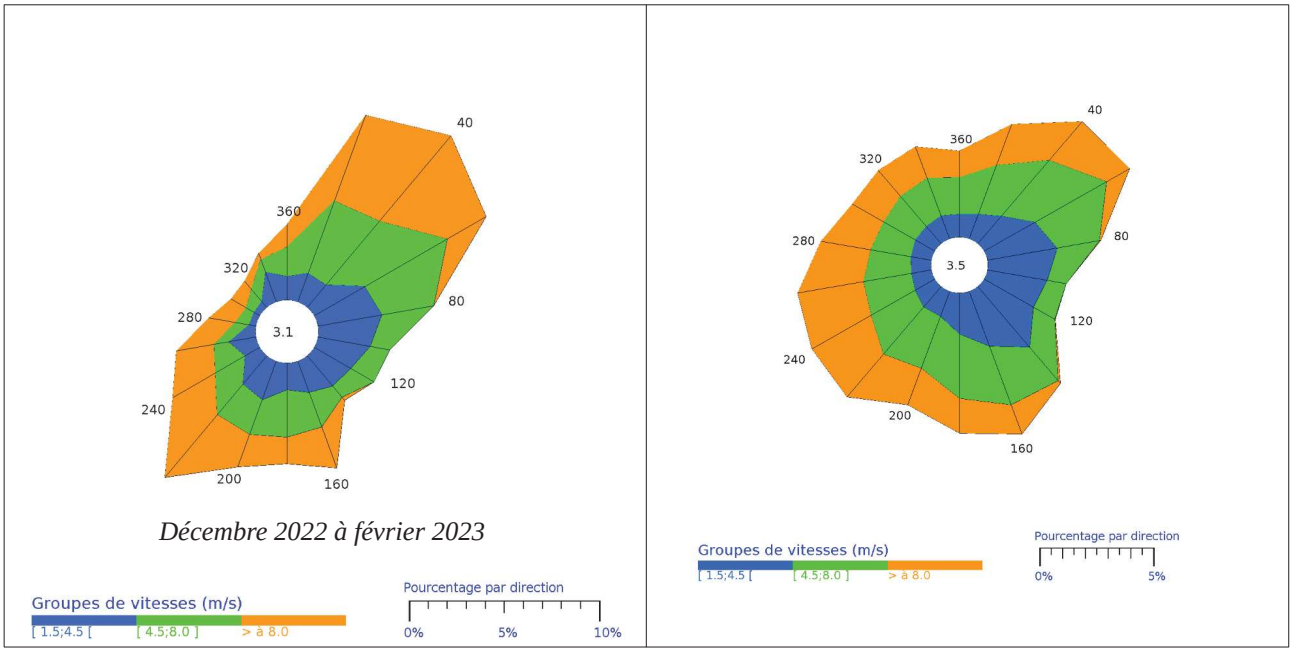


Illustration 36 : Roses des vents de l'hiver 2022-2023 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Chassiron

c) Analyse du printemps 2023 (mois de mars à mai)

On remarque visuellement que les vents de Nord-Nord-Est (20°-40°) ont été en 2023 nettement plus fréquents avec 23,8 % (pour une normale de 15,4 %), ceci au détriment des vents de secteur Nord-Nord-Ouest (300° à 340°) déficitaires de -5 %, ainsi que de secteur Est-Sud-Est (100° à 140°) déficitaires de -3,2 %.

Sur cette période printanière 2023, les vents faibles (< 4,5 m/s) ont été nettement moins présents avec 31,4 % (pour une normale de 41,8 %) au bénéfice en grande partie des vents modérés (+8,1 % pour les intensités entre 4.5 et 8 m/s).

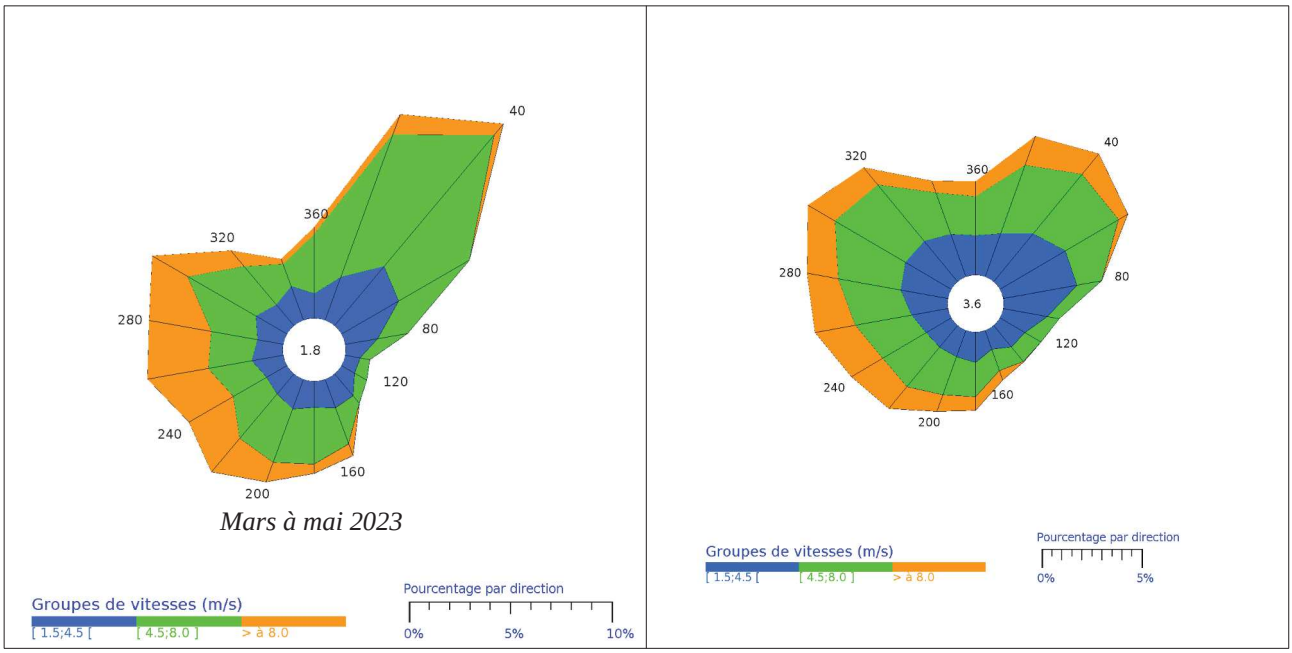
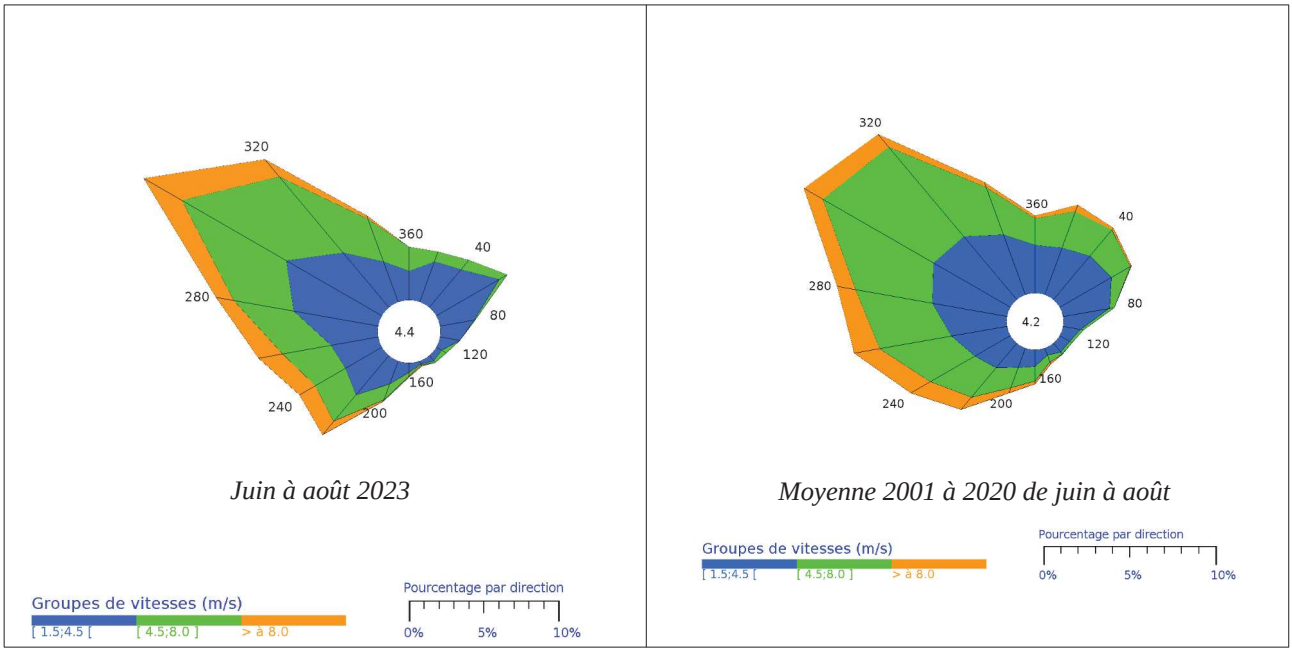


Illustration 37 : Roses des vents du printemps 2023 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Chassiron

d) Analyse de l'été 2023 (mois de juin à août)

On retrouve des roses de vents été 2023 et été 2001-2020 relativement ressemblantes. Les différences portent essentiellement sur une plus grande fréquence des vents de secteur Nord-Ouest (280° à 320°) avec 42,2 % (pour une normale à 36,5%) au détriment des vents de secteur Nord-Nord-Est (360° à 40°) déficitaires de -4,4 %, et dans une moindre mesure de secteur Sud-Sud-Est (160° à 180°) déficitaires de -1,9 %.

Les vents faibles (< à 4,5 m/s) ont été plus fréquents que la normale avec un excédent de +4,7 %. Cela se compense avec les vents modérés (intensités de vent comprises entre 4.5 et 8 m/s) qui ont été eux moins fréquents avec -5,8 % par rapport aux normales.



Juin à août 2023

Moyenne 2001 à 2020 de juin à août

Illustration 38 : Roses des vents de l'été 2023 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Chassiron

f) Tempêtes

Sur la période 2022 de la campagne (septembre à décembre 2022), les vents tempétueux (supérieurs à 27 m/s) ont été observés à 3 reprises, les 4, 16 et 22 novembre. On notera que cela est tout à fait conforme aux statistiques établies sur la période 2001/2020 avec en moyenne 2,4 cas de tempête sur cette même période de septembre à décembre.

Sur la période 2023 de la campagne (janvier à août 2023), les vents tempétueux ont été observés à 3 reprises, les 09 et 16 janvier ainsi que le 10 mars. Ce nombre d'occurrences est conforme aux statistiques établies sur la période 2001/2020 avec en moyenne 2,4 cas de tempête chaque année sur cette même période de janvier à août.

Date	Rafales maxi (m/s)	Remarques
04/11/2022	29.2	
16/11/2022	28.0	
22/11/2022	27.1	
09/01/2023	27.2	
16/01/2023	**33.5**	Tempête « Gérard »
10/03/2023	29.2	Train active à l'arrière de la tempête Larisa

2) Les températures

Concernant les températures maximales, excepté pour le mois de décembre 2022 (-0,6°C), elles sont toutes supérieures aux normales, de manière marquée pour les mois de septembre (+1,1°C), octobre (+3,1°C) et novembre 2022 (+2,7°C), de mai (+1,8°C) et juin 2023 (+2,8°C), et un peu moindre pour les autres mois.

On observe la même tendance concernant les températures minimales, avec seulement les mois de décembre 2022 et février 2023 qui sont déficitaires (avec respectivement -0,6°C et -0,3°C). Tous les autres mois sont excédentaires, en particulier octobre (+2,9°C) et novembre 2022 (+2,2°C), ainsi que janvier (+1,2°C) et juin 2023 (+2,2°C).

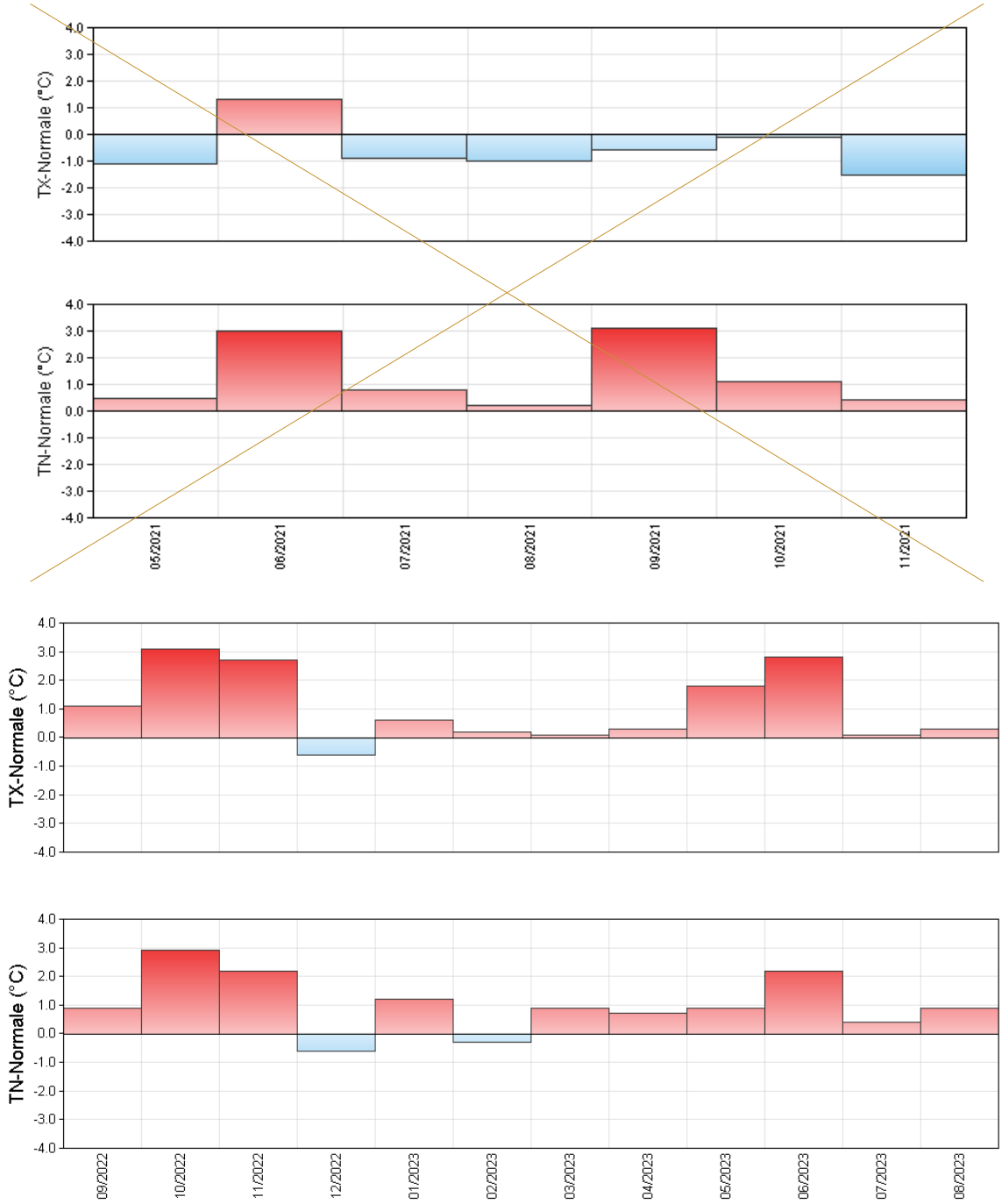


Illustration 39 : Anomalies mensuelles de températures minimales et maximales de septembre 2022 à août 2023 à la station de Chassiron - Période de référence : 1991 - 2020

3) Les précipitations

Seuls 3 mois sont très arrosés sur toute la période ; janvier 2023 avec 105,4 mm (+53,4 % par rapport à la normale), mars 2023 avec 71,0 mm (+46,5%), et plus particulièrement juin 2023 avec 73,2 mm (+102,2%).

Pour les autres, le déficit est souvent marqué, notamment octobre 2022 avec 32,7 mm (-55,5 % par rapport à la normale), février 2023 avec 20,7 mm (-58,3%), avril 2023 avec 26,7 mm (-49,3%) et août 2023 avec 19,6 mm (-53,5%).

Au final, il est tombé sur toute la période 578,8 mm, soit un déficit de -15,4 % par rapport à la normale

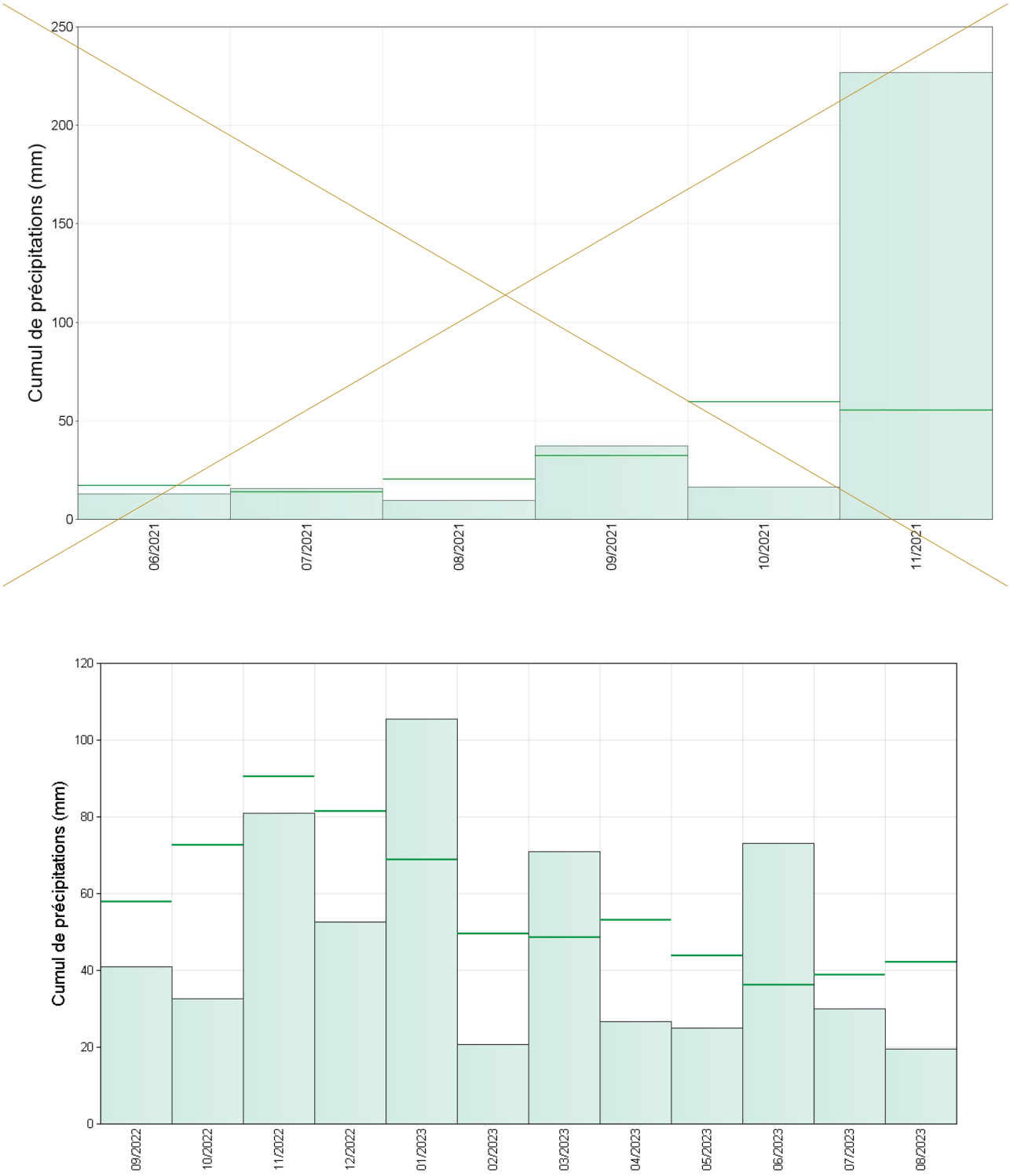
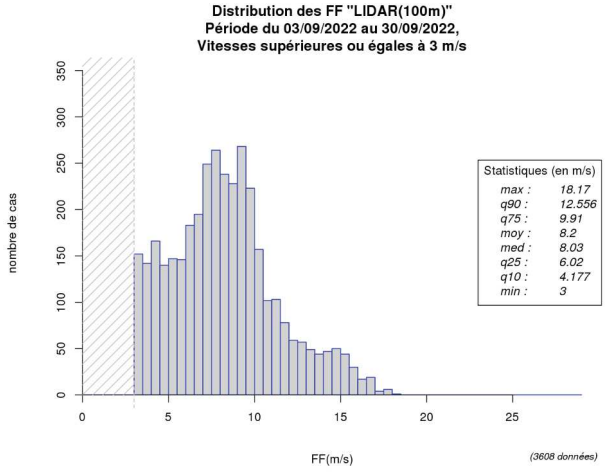
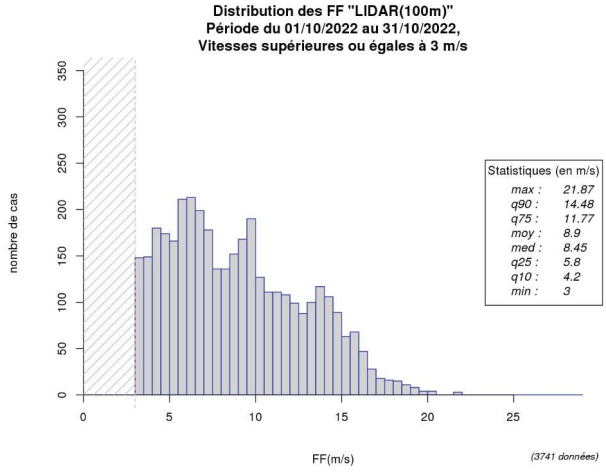
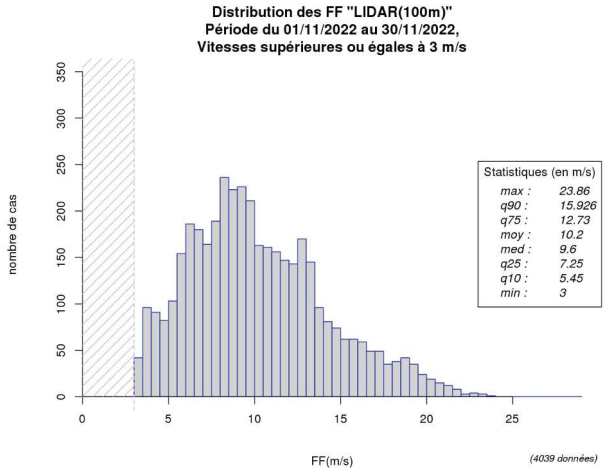


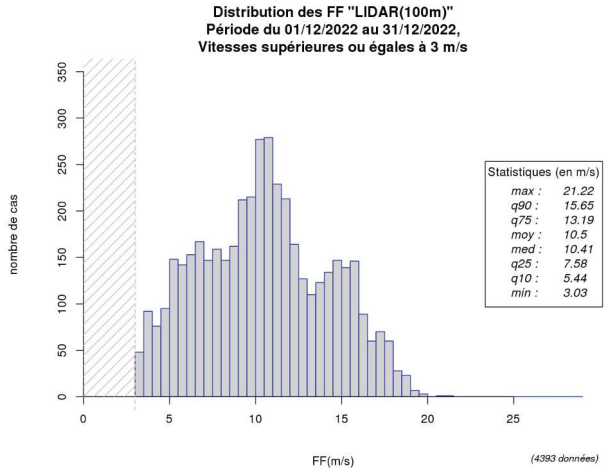
Illustration 40 : Cumuls mensuels de précipitations de septembre 2022 à août 2023 à la station de Chassiron, histogrammes (en vert) et normale de précipitations (segments en vert) - Période de référence : 1991 - 2020

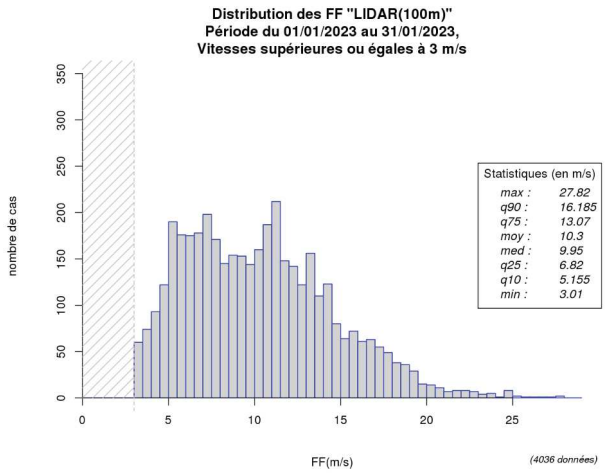
Annexe 3 : Distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)

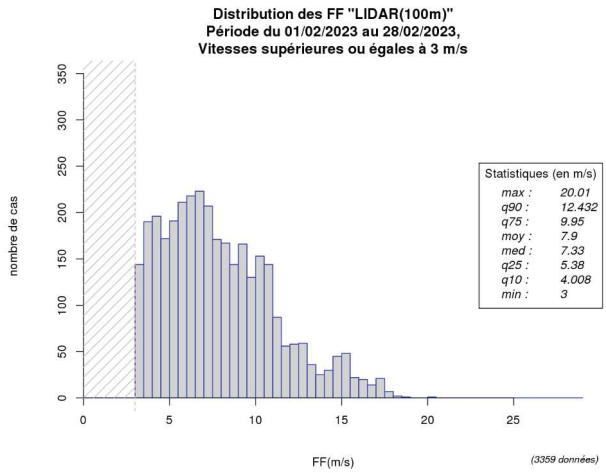


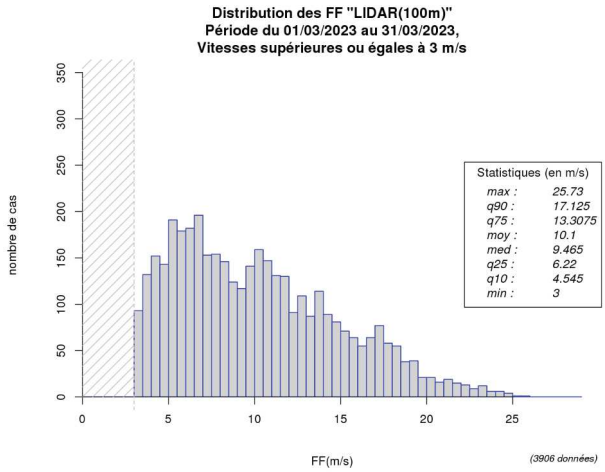


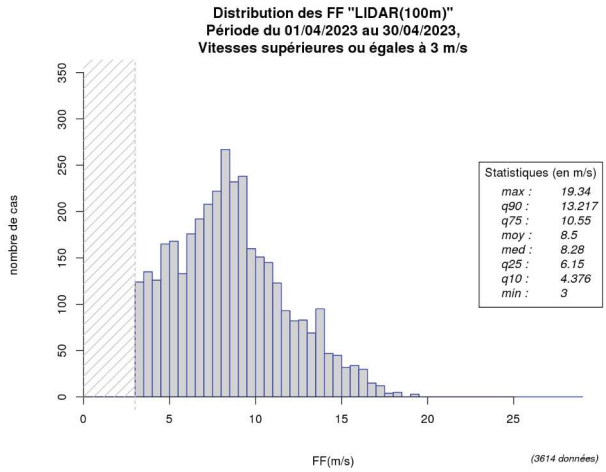


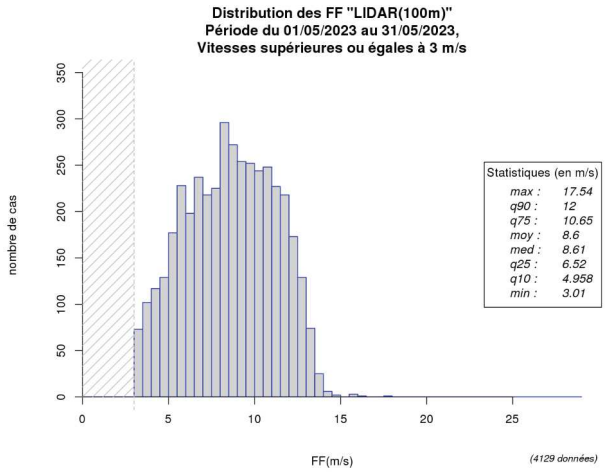


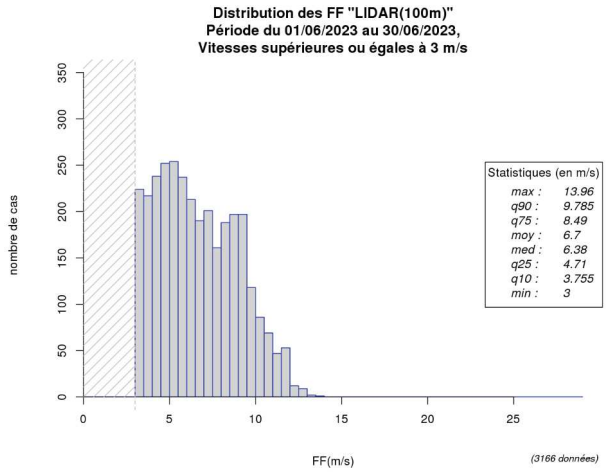


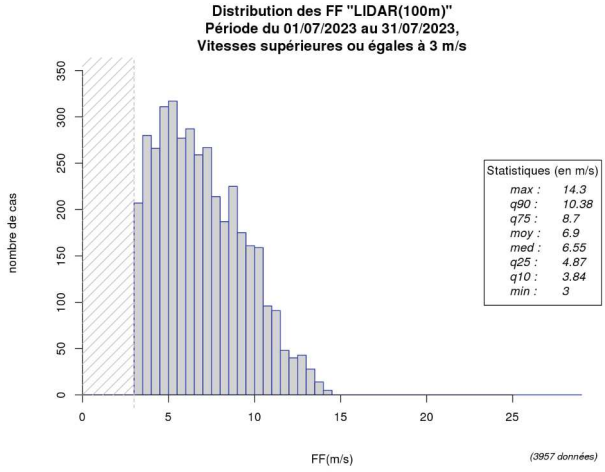


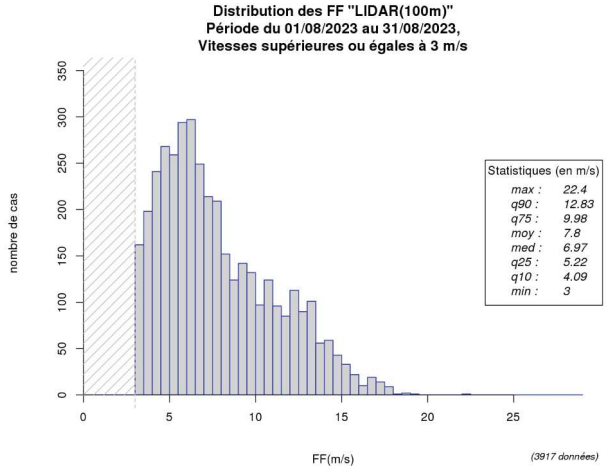

Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/03/2023 au 31/03/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
Statistiques (en m/s)
max : 25.73
q90 : 17.125
q75 : 13.3075
moy : 10.1
med : 9.465
q25 : 6.22
q10 : 4.545
min : 3
nombre de cas
FF(m/s)
(3906 données)

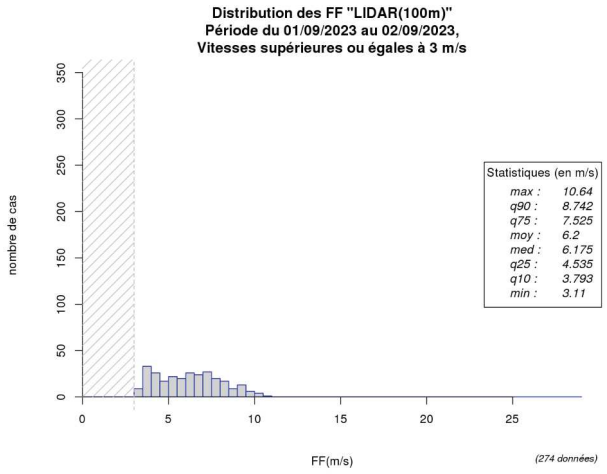

Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/04/2023 au 30/04/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
Statistiques (en m/s)
max : 19.34
q90 : 13.217
q75 : 10.55
moy : 8.5
med : 8.28
q25 : 6.15
q10 : 4.376
min : 3
nombre de cas
FF(m/s)
(3614 données)


Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/05/2023 au 31/05/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
Statistiques (en m/s)
max : 17.54
q90 : 12
q75 : 10.65
moy : 8.6
med : 8.61
q25 : 6.52
q10 : 4.958
min : 3.01
nombre de cas
FF(m/s)
(4129 données)

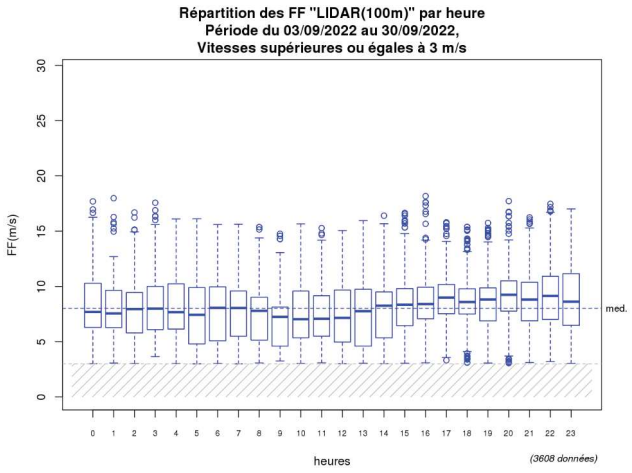

Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/06/2023 au 30/06/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
Statistiques (en m/s)
max : 13.96
q90 : 9.785
q75 : 8.49
moy : 6.7
med : 6.38
q25 : 4.71
q10 : 3.755
min : 3
nombre de cas
FF(m/s)
(3166 données)

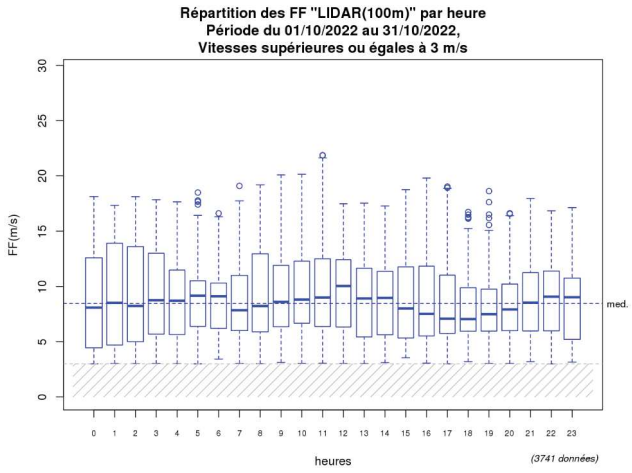

Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/07/2023 au 31/07/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
Statistiques (en m/s)
max : 14.3
q90 : 10.38
q75 : 8.7
moy : 6.9
med : 6.55
q25 : 4.87
q10 : 3.84
min : 3
nombre de cas
FF(m/s)
(3957 données)

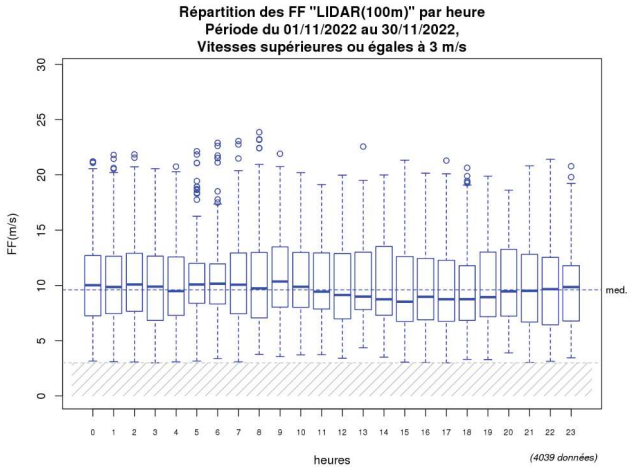

Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/08/2023 au 31/08/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
Statistiques (en m/s)
max : 22.4
q90 : 12.83
q75 : 9.98
moy : 7.8
med : 6.97
q25 : 5.22
q10 : 4.09
min : 3
nombre de cas
FF(m/s)
(3917 données)

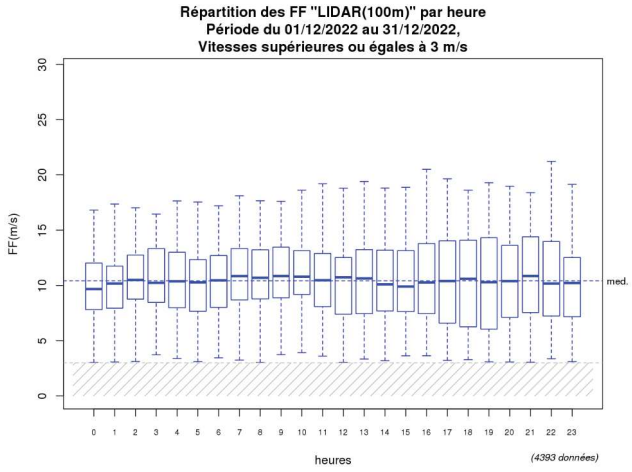

Distribution des FF "LIDAR(100m)"
Période du 01/09/2023 au 02/09/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
nombre de cas
0
50
100
150
200
250
300
350
0
5
10
15
20
25
FF(m/s)
(274 données)
Statistiques (en m/s)
max : 10.64
q90 : 8.742
q75 : 7.525
moy : 6.2
med : 6.175
q25 : 4.535
q10 : 3.793
min : 3.11

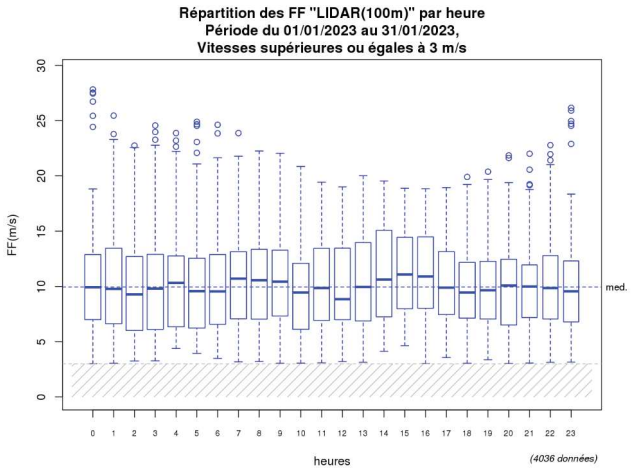
Annexe 4 : Répartitions horaires par mois des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)

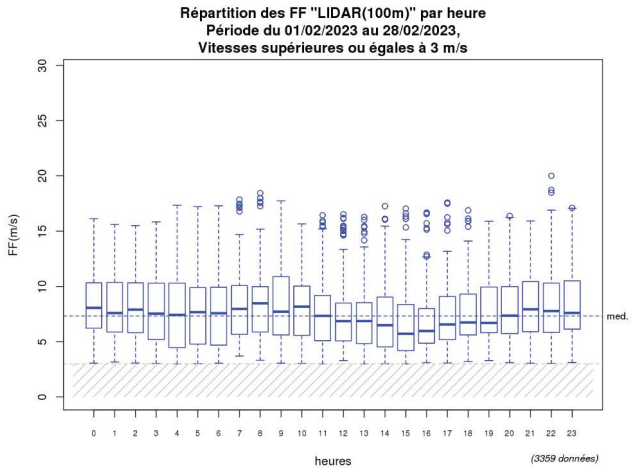


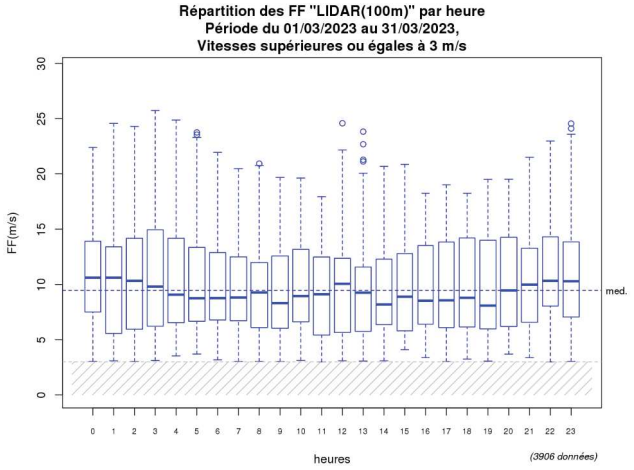


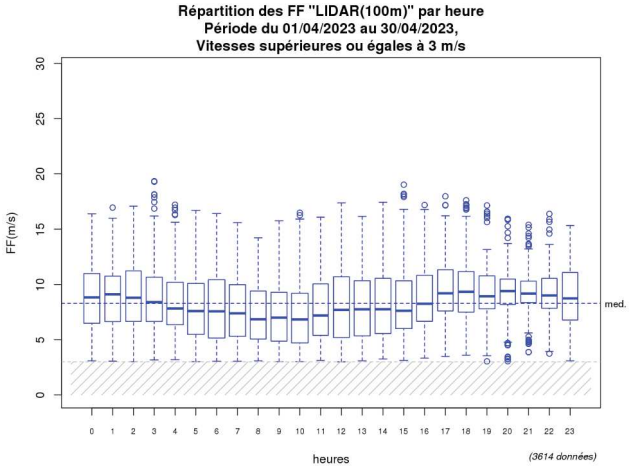


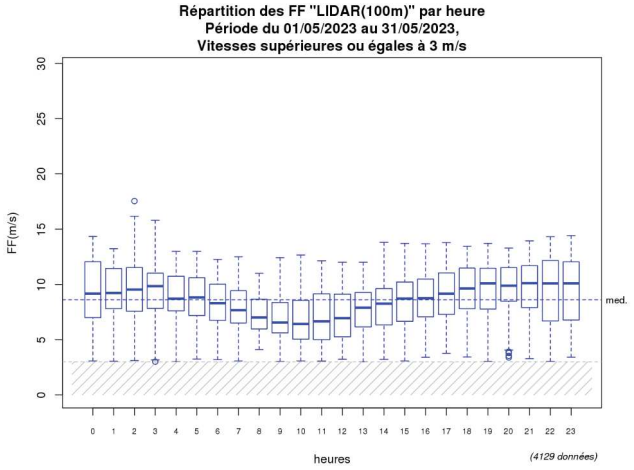


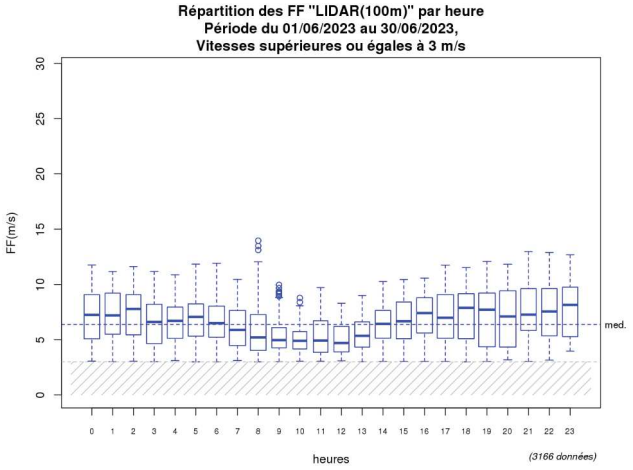


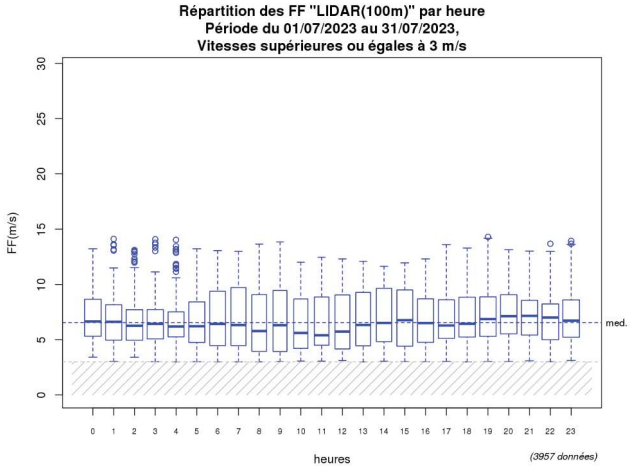


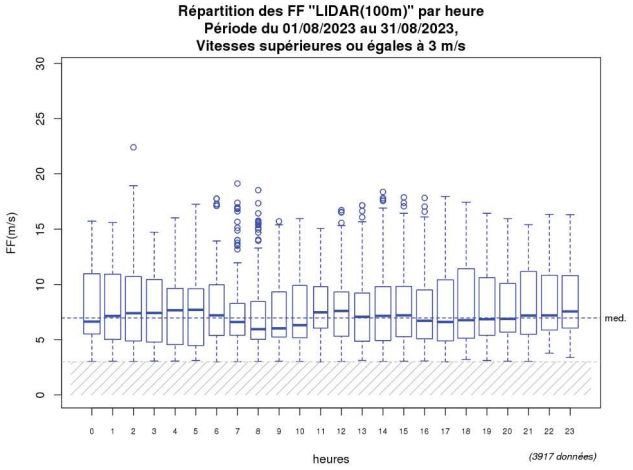

Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/03/2023 au 31/03/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
FF(m/s)
heures
med.
(3906 données)

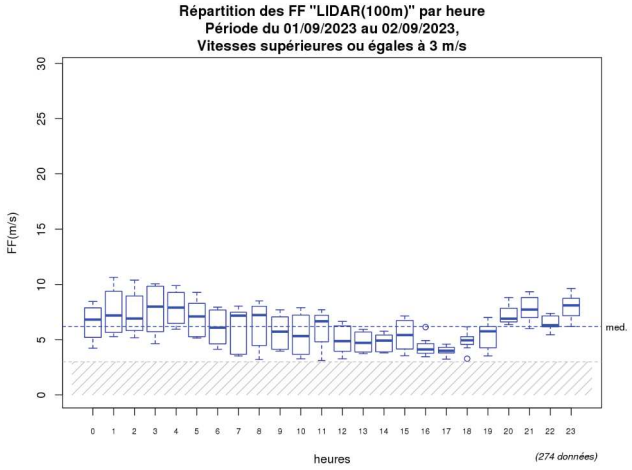

Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/04/2023 au 30/04/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
FF(m/s)
heures
med.
(3614 données)


Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/05/2023 au 31/05/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
FF(m/s)
heures
med.
(4129 données)


Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/06/2023 au 30/06/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
FF(m/s)
heures
med.
(3166 données)


Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/07/2023 au 31/07/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
FF(m/s)
heures
med.
(3957 données)


Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/08/2023 au 31/08/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
FF(m/s)
heures
med.
(3917 données)


Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/09/2023 au 02/09/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
FF(m/s)
0
5
10
15
20
25
30
med.
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
heures
(274 données)

Annexe 5 : Tableau de contingence des forces de vent du LiDAR

	Directions en degrés												
	30	**60**	**90**	**120**	**150**	**180**	**210**	**240**	**270**	**300**	**330**	**360**	**Total**
[34,35[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[33,34[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[32,33[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[31,32[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[30,31[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[29,30[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[28,29[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[27,28[	.	.	.	.	.	.	.	0,1	.	.	.	.	0,1
[26,27[	.	.	.	.	.	.	.	0	.	.	.	.	0
[25,26[	.	.	.	.	.	.	.	0	0	0	.	.	0,1
[24,25[	.	.	.	.	.	.	.	0,1	0,2	0,1	.	.	0,4
[23,24[	.	.	.	.	.	.	.	0	0,3	0,2	0,1	.	0,6
[22,23[	.	.	.	.	.	.	.	0,1	0,4	0,4	0	.	0,9
[21,22[	.	.	.	.	.	.	0,1	0,2	0,7	0,5	0	.	1,4
[20,21[	.	.	.	.	0	0	0,1	0,3	0,6	0,9	0,1	.	2
[19,20[	.	.	.	.	.	0,2	0,4	0,8	0,9	1,4	0,1	.	3,7
[18,19[	0	.	0	.	0,1	0,7	0,7	1,5	1,8	1,6	0,2	.	6,7
[17,18[	0,5	0	0	.	0,2	1	1	3	3,5	1,9	0,1	.	11,2
[16,17[	0,6	0,4	0,2	0	0,7	1,2	1,3	3,9	3,7	2,1	0,1	0	14,3
[15,16[	1,2	1,7	0,2	0,1	2,2	1,7	2,4	4,4	4,7	2,6	0,2	0,1	21,4
[14,15[	0,8	1,3	0,6	0,4	2,9	2,9	3	5,2	6,3	3,2	0,6	0,2	27,4
[13,14[	1,5	2,2	0,8	0,5	3,2	2,7	3,6	6,3	7,6	4,9	1,2	0,6	35,3
[12,13[	4,5	6,5	2,2	0,7	2,4	3,5	3,3	6,4	5,9	5,4	2,9	1,1	44,9
[11,12[	6,2	12,2	1,7	2	3,8	3,1	3,8	6,8	7,3	6,5	4,2	1,8	59,3
[10,11[	7,1	14,9	3,7	2	5,5	3,7	4,7	8,3	8,3	7	6,3	2,8	74,4
[9,10[	9,3	14,7	4,9	2,8	6,9	4,7	5,2	9,2	8,7	8,7	7,3	5,1	87,5
[8,9[	11,3	12,9	5,6	3,9	6,3	4,4	5,5	8,6	7,4	8,4	9,4	7	90,6
[7,8[	10,1	12,3	5,9	3,8	5,5	3,7	4,5	9,7	10,8	8,7	8,7	9,9	93,8
[6,7[	12,9	11,7	6	7	4,5	3,2	5,6	9,1	9,2	9,5	10,8	9,6	99,1
[5,6[	11,2	8,8	5,9	5,5	4,2	2,9	5	7,8	10,2	10,9	11,7	10	94,1
[4,5[	8,3	7,1	5	3,2	3,2	2,3	4,1	6,5	10,3	9,2	11,6	9,3	80,1
[3,4[	7	5,9	4,2	2,7	3	3,6	4,3	6,3	6,7	7,5	7	7,8	66
[0,3[	8,2	7,2	7,4	4,6	4,1	4,6	6,2	7,1	8	8,3	9,3	9,6	84,6
Total	**100,9**	**119,9**	**54,3**	**39,3**	**58,8**	**50**	**64,7**	**111,8**	**123,5**	**109,9**	**91,9**	**75**	**1000**

Nombre de cas : 50730

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 8,5 % des cas.

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

SEPTEMBRE 2022 - LIDAR (100m)

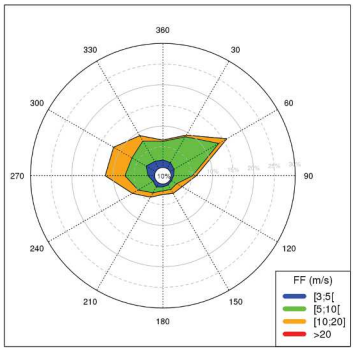


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4006

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.7	7.2	0.4	.	9.3
60	1.1	12.5	2.2	.	15.9
90	0.6	4.6	0.9	.	6.1
120	0.4	1.4	1.5	.	3.3
150	0.5	1.3	1.1	.	2.9
180	0.7	0.9	0.9	.	2.5
210	1.1	1.6	1.2	.	4.0
240	0.7	4.2	1.6	.	6.5
270	1.6	5.6	4.8	.	11.9
300	2.7	3.9	5.1	.	11.8
330	2.0	5.7	1.5	.	9.2
360	1.8	4.5	0.3	.	6.6
Total	15.0	53.4	21.6	.	90.1
[0; 3 [					9.9

OCTOBRE 2022 - LIDAR (100m)

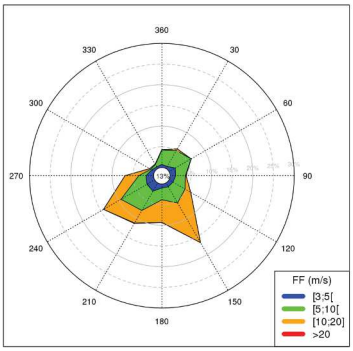


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4299

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.6	4.4	0.5	.	5.5
60	1.7	4.4	.	.	6.2
90	1.3	2.3	0.2	.	3.9
120	1.1	3.4	1.6	.	6.0
150	1.1	4.5	11.1	.	16.7
180	1.0	2.9	5.5	0.0	9.3
210	2.3	5.4	3.5	0.1	11.3
240	2.1	7.3	4.9	.	14.3
270	1.8	1.7	3.3	.	6.9
300	0.8	0.3	0.3	.	1.4
330	0.5	0.7	0.1	.	1.2
360	0.7	3.5	0.1	.	4.3
Total	15.1	40.7	31.0	0.2	87.0
[0; 3 [					13.0

NOVEMBRE 2022 - LIDAR (100m)

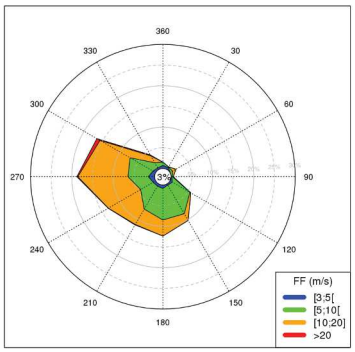


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4171

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.6	0.2	.	.	0.7
60	0.0	0.6	1.0	.	1.7
90	0.2	0.2	0.2	.	0.5
120	0.6	4.9	0.2	.	5.8
150	0.3	8.0	1.9	.	10.2
180	0.9	7.6	3.9	.	12.3
210	0.6	6.4	4.3	0.1	11.5
240	0.7	3.5	9.0	0.0	13.3
270	1.5	4.9	12.1	0.2	18.8
300	0.8	6.4	8.4	0.9	16.4
330	0.5	1.4	1.9	0.3	4.1
360	0.7	0.8	.	.	1.5
Total	7.5	44.9	42.9	1.6	96.8
[0; 3 [					3.2

DÉCEMBRE 2022 - LIDAR (100m)

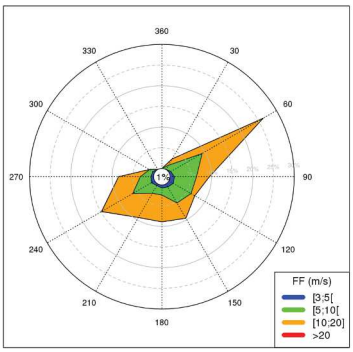


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4456

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.1	1.1	1.8	.	3.0
60	0.5	8.7	17.0	.	26.3
90	1.0	5.3	3.1	.	9.5
120	1.2	5.0	1.0	.	7.2
150	0.9	4.4	4.3	.	9.6
180	0.7	1.7	6.5	.	8.9
210	0.4	2.2	6.8	.	9.4
240	0.9	5.2	8.7	0.0	14.9
270	0.7	2.5	5.3	.	8.5
300	0.5	0.9	0.0	.	1.5
330	0.0	.	.	.	0.0
360	.	.	.	.	.
Total	7.0	37.1	54.5	0.0	98.6
[0; 3 [					1.4

JANVIER 2023 - LIDAR (100m)

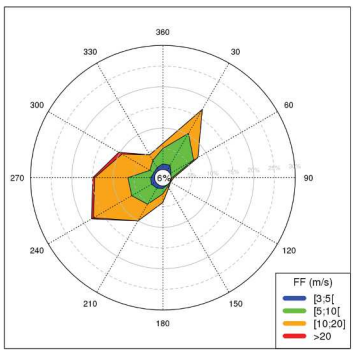


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4280

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.5	8.9	6.7	.	17.1
60	0.3	6.3	1.2	.	7.8
90	.	0.2	0.4	.	0.6
120	.	.	0.1	.	0.1
150	0.1	0.3	0.4	.	0.8
180	0.6	1.3	2.1	.	4.0
210	0.9	4.5	4.7	.	10.1
240	1.1	5.5	10.7	0.5	17.9
270	1.0	5.5	8.0	0.5	15.0
300	0.5	1.1	7.8	0.9	10.3
330	0.8	2.0	1.5	.	4.4
360	1.4	3.7	1.2	.	6.3
Total	8.2	39.3	44.9	1.9	94.3
[0; 3 [					5.7

FÉVRIER 2023 - LIDAR (100m)

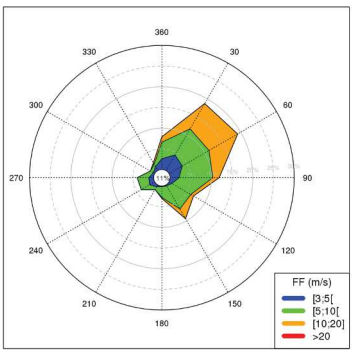


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 3764

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	4.4	7.3	7.1	.	18.7
60	3.7	7.5	8.0	.	19.2
90	2.2	8.2	1.5	.	11.8
120	0.8	5.3	0.7	.	6.8
150	0.3	6.5	2.7	0.0	9.5
180	0.2	2.6	0.2	.	3.0
210	0.5	0.8	.	.	1.3
240	1.4	2.3	.	.	3.7
270	1.1	2.8	.	.	4.0
300	0.4	0.8	0.0	.	1.2
330	1.1	0.7	0.4	.	2.1
360	2.6	4.0	1.3	.	7.9
Total	18.7	48.6	22.0	0.0	89.2
[0; 3 [					10.8

MARS 2023 - LIDAR (100m)

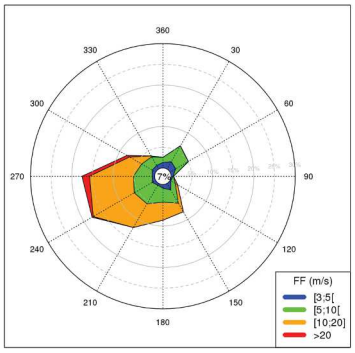


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4221

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	2.1	4.4	.	.	6.4
60	1.6	3.5	0.1	.	5.1
90	0.5	0.1	.	.	0.6
120	0.2	1.2	0.7	.	2.1
150	1.8	3.7	2.4	.	7.9
180	0.9	3.4	4.4	.	8.6
210	0.5	5.2	6.6	.	12.3
240	1.0	5.0	11.4	0.3	17.8
270	0.6	4.5	10.6	1.8	17.6
300	1.0	2.9	3.4	0.7	8.0
330	1.0	2.4	0.2	.	3.6
360	1.3	1.2	.	.	2.5
Total	12.3	37.5	39.8	2.9	92.5
[0; 3 [					7.5

AVRIL 2023 - LIDAR (100m)

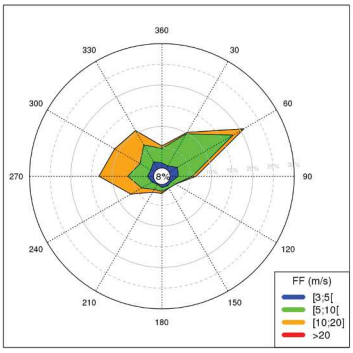


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 3925

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.9	8.9	0.4	.	10.2
60	2.3	15.6	3.0	.	20.9
90	2.0	3.4	0.9	.	6.3
120	0.6	1.2	.	.	1.8
150	0.7	0.6	.	.	1.3
180	0.7	0.9	0.5	.	2.1
210	0.2	1.4	0.8	.	2.4
240	0.8	2.9	3.0	.	6.6
270	1.5	4.8	7.0	.	13.2
300	1.1	3.0	7.1	.	11.2
330	2.0	4.7	4.0	.	10.7
360	1.2	3.5	0.6	.	5.3
Total	14.0	50.9	27.2	.	92.1
[0; 3 [					7.9

MAI 2023 - LIDAR (100m)

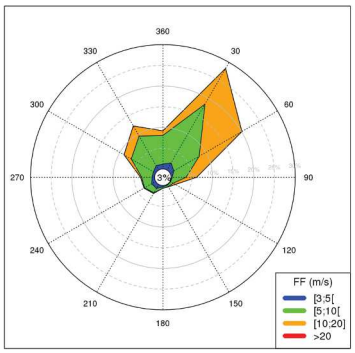


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4266

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	2.0	16.4	10.0	.	28.3
60	1.1	7.1	11.9	.	20.1
90	0.3	3.4	2.6	.	6.2
120	0.2	0.7	0.6	.	1.5
150	0.2	0.4	0.0	.	0.7
180	0.3	0.3	.	.	0.6
210	1.1	1.2	0.2	.	2.5
240	1.1	2.0	0.2	.	3.3
270	0.6	2.5	0.3	.	3.4
300	0.6	6.2	2.0	.	8.8
330	1.2	8.3	2.8	.	12.3
360	1.2	6.9	1.1	.	9.2
Total	9.9	55.3	31.7	.	96.8
[0; 3 [					3.2

JUIN 2023 - LIDAR (100m)

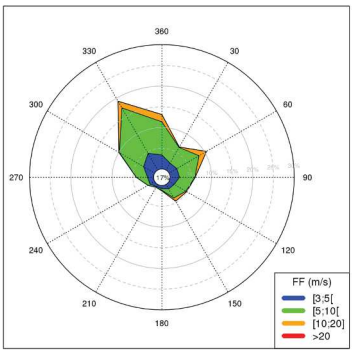


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 3816

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.9	4.4	0.1	.	6.4
60	2.2	6.2	2.1	.	10.5
90	2.3	3.7	0.1	.	6.1
120	1.4	3.3	0.2	.	4.9
150	1.3	2.5	0.9	.	4.7
180	0.8	0.4	0.2	.	1.3
210	0.6	0.2	.	.	0.8
240	1.3	0.6	.	.	1.9
270	1.5	2.7	0.0	.	4.2
300	3.1	6.7	0.2	.	10.0
330	4.7	12.7	1.9	.	19.2
360	3.4	8.0	1.8	.	13.1
Total	24.4	51.3	7.3	.	83.0
[0; 3 [					17.0

JUILLET 2023 - LIDAR (100m)

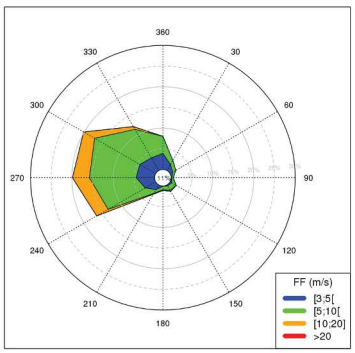


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4457

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.7	1.1	.	.	2.8
60	0.7	0.9	.	.	1.6
90	0.2	0.3	.	.	0.5
120	0.4	1.3	0.0	.	1.7
150	0.3	1.3	0.2	.	1.8
180	0.0	0.9	0.2	.	1.1
210	1.3	1.1	0.2	.	2.6
240	2.9	10.4	3.2	.	16.5
270	4.5	11.3	4.1	.	19.9
300	4.4	12.6	3.1	.	20.1
330	3.5	8.0	0.8	.	12.3
360	3.9	4.1	.	.	8.0
Total	23.9	53.2	11.8	.	88.8
[0; 3 [					11.2

AOÛT 2023 - LIDAR (100m)

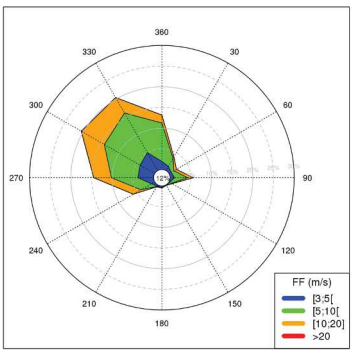


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4455

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.2	2.2	0.4	.	3.8
60	0.6	0.8	0.7	.	2.1
90	1.1	3.1	1.4	.	5.6
120	0.2	0.5	0.2	.	0.9
150	0.1	0.1	.	.	0.1
180	0.4	0.1	.	.	0.4
210	0.3	0.1	0.1	.	0.5
240	0.9	2.9	2.2	.	6.0
270	3.8	6.4	4.3	0.0	14.5
300	4.1	10.0	6.4	.	20.5
330	5.0	11.1	4.3	.	20.4
360	1.9	9.3	1.9	.	13.2
Total	19.5	46.5	21.9	0.0	87.9
[0; 3 [					12.1

SEPTEMBRE 2023 - LIDAR (100m)

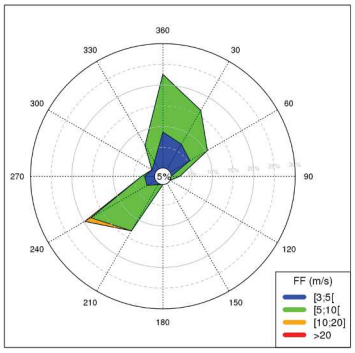
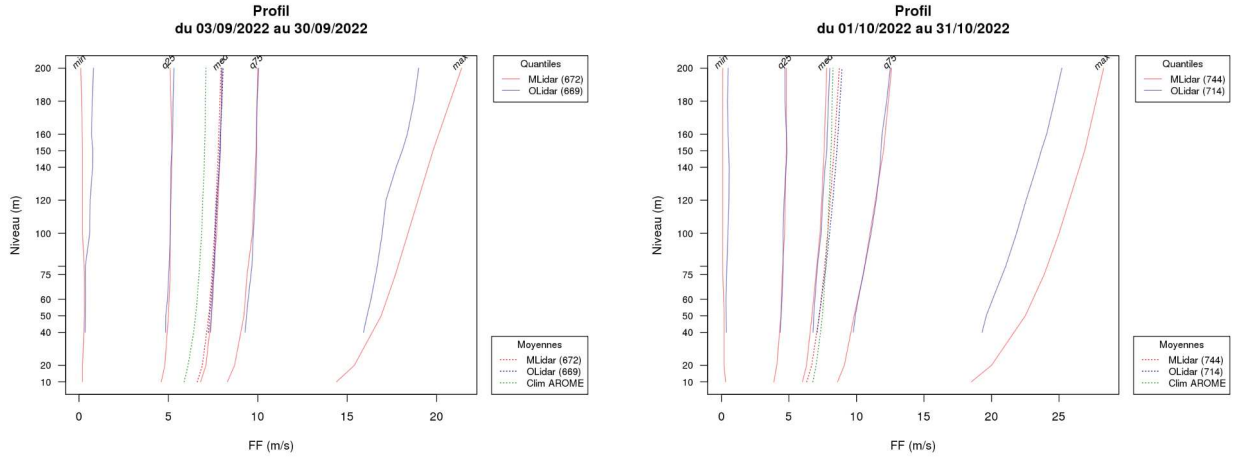


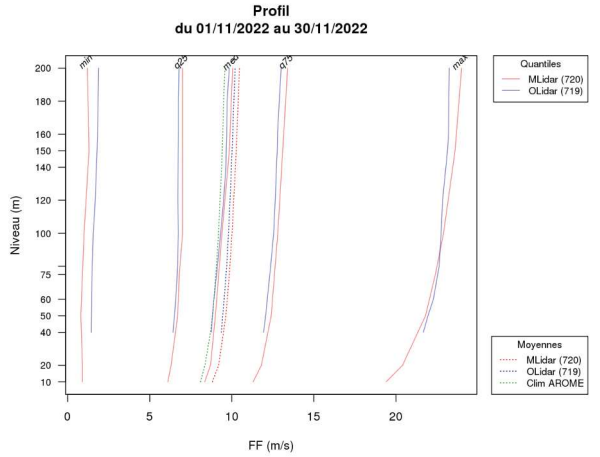
Tableau de répartition (en %)

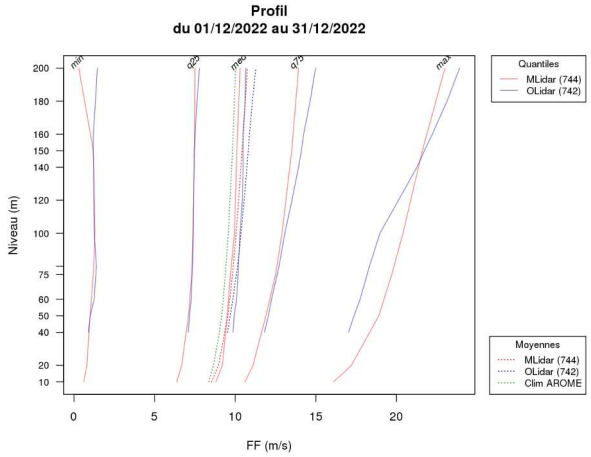
Nombre total de cas : 288

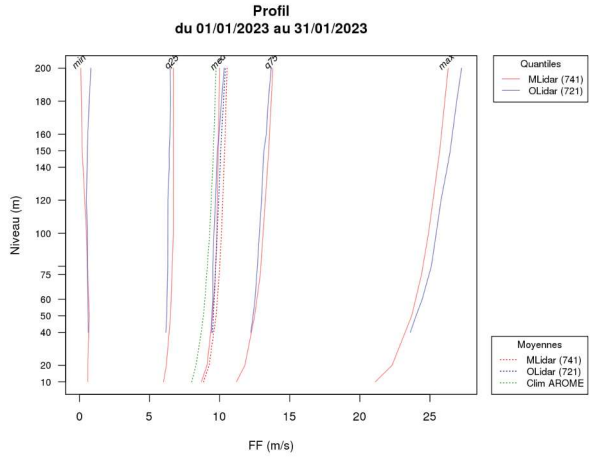
	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	6.9	9.4	.	.	16.3
60	5.6	4.9	.	.	10.4
90	.	2.1	.	.	2.1
120	.	.	.	.	.
150	.	.	.	.	.
180	.	.	.	.	.
210	0.3	12.8	.	.	13.2
240	2.4	15.6	1.7	.	19.8
270	2.4	0.7	.	.	3.1
300	1.0	.	.	.	1.0
330	2.1	4.5	.	.	6.6
360	8.7	13.9	.	.	22.6
Total	29.5	63.9	1.7	.	95.1
[0; 3 [					4.9

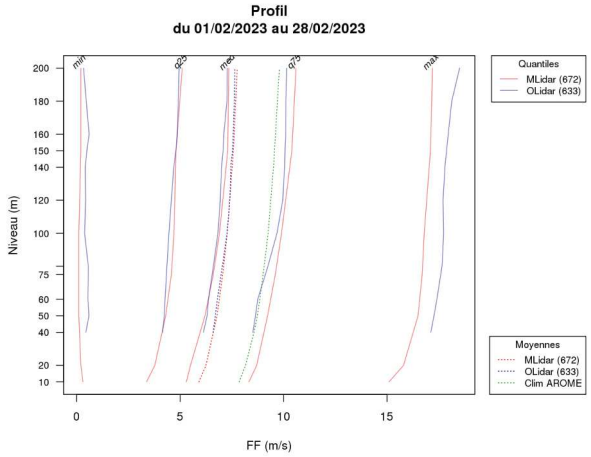
Annexe 7 : Profils de vent du LiDAR

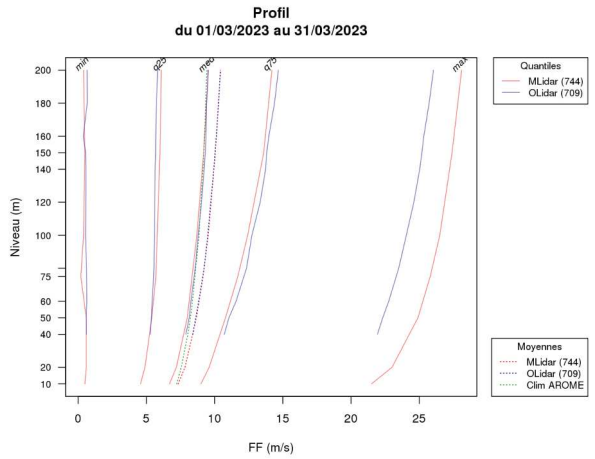


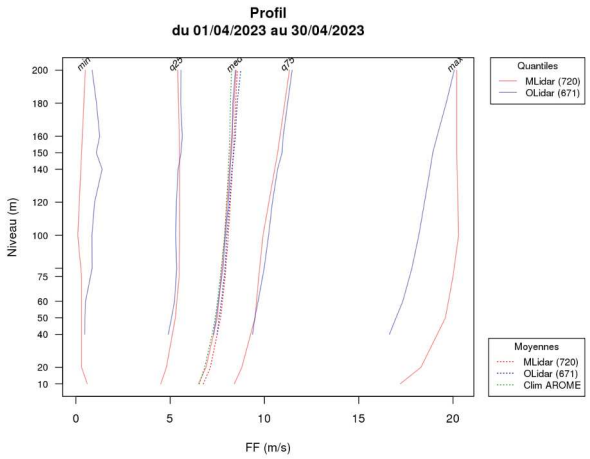


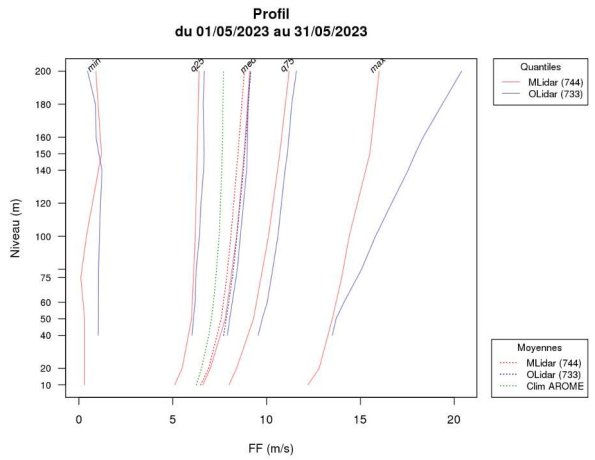


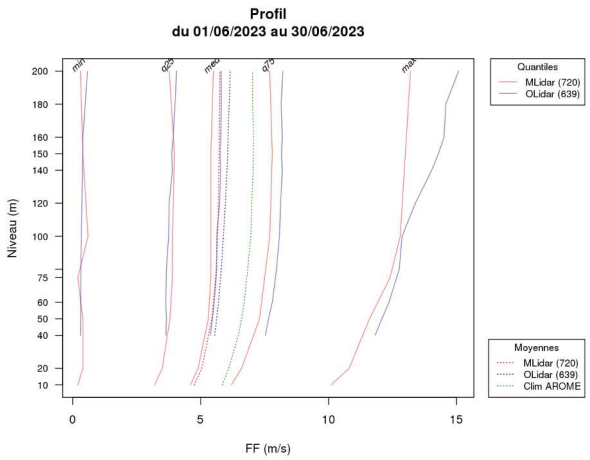


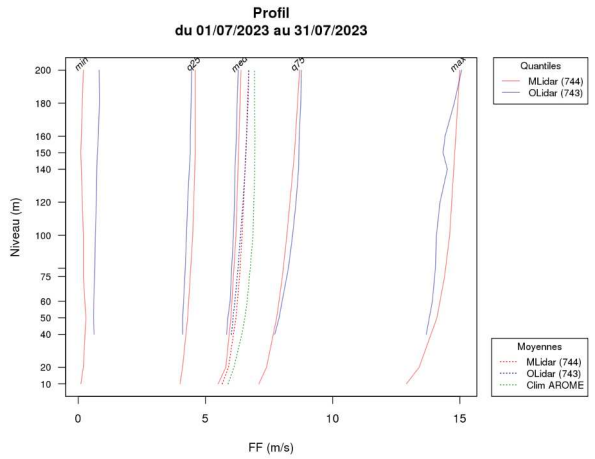


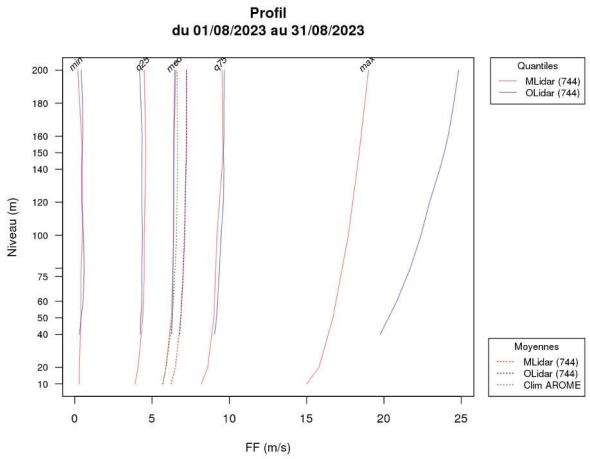

Profil
du 01/03/2023 au 31/03/2023
Niveau (m)
FF (m/s)
Quantiles
MLidar (744)
OLidar (709)
Moyennes
MLidar (744)
OLidar (709)
Clim AROME

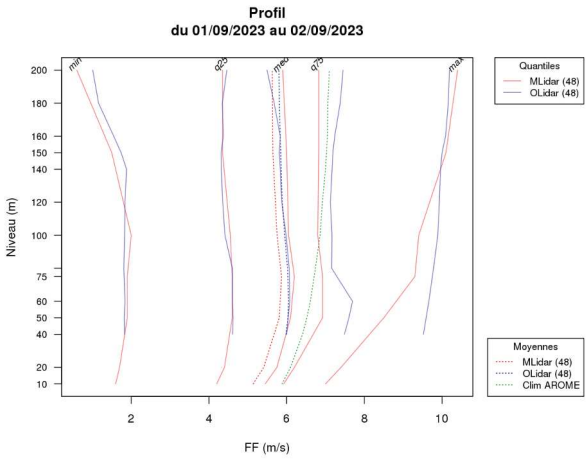

Profil
du 01/04/2023 au 30/04/2023
Niveau (m)
FF (m/s)
Quantiles
MLidar (720)
OLidar (671)
Moyennes
MLidar (720)
OLidar (671)
Clim AROME


Profil
du 01/05/2023 au 31/05/2023
Niveau (m)
FF (m/s)
Quantiles
MLidar (744)
OLidar (733)
Moyennes
MLidar (744)
OLidar (733)
Clim AROME

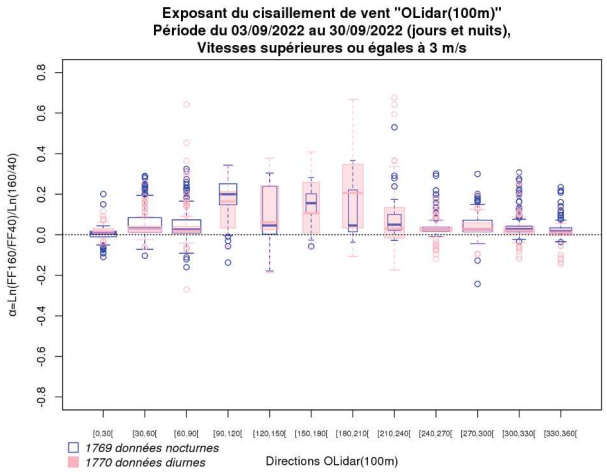

Profil
du 01/06/2023 au 30/06/2023
Niveau (m)
FF (m/s)
Quantiles
MLidar (720)
OLidar (639)
Moyennes
MLidar (720)
OLidar (639)
Clim AROME

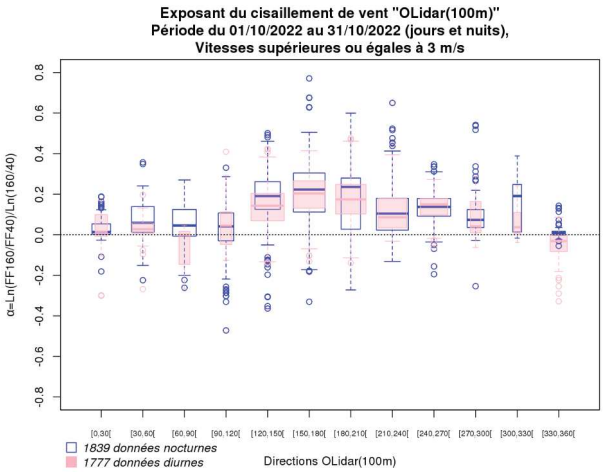

Profil
du 01/07/2023 au 31/07/2023
Niveau (m)
FF (m/s)
Quantiles
MLidar (744)
OLidar (743)
Moyennes
MLidar (744)
OLidar (743)
Clim AROME

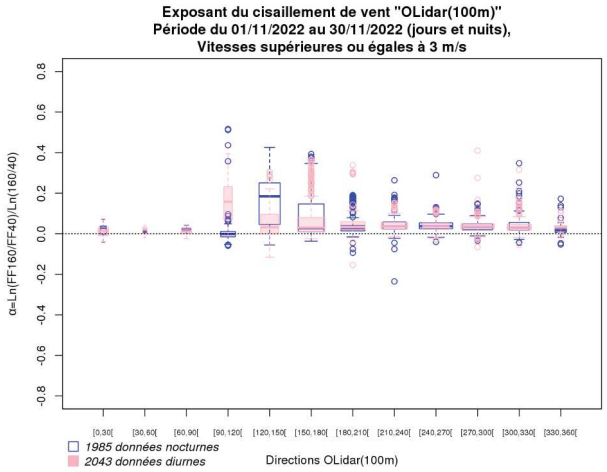

Profil
du 01/08/2023 au 31/08/2023
Niveau (m)
FF (m/s)
Quantiles
MLidar (744)
OLidar (744)
Moyennes
MLidar (744)
OLidar (744)
Clim AROME

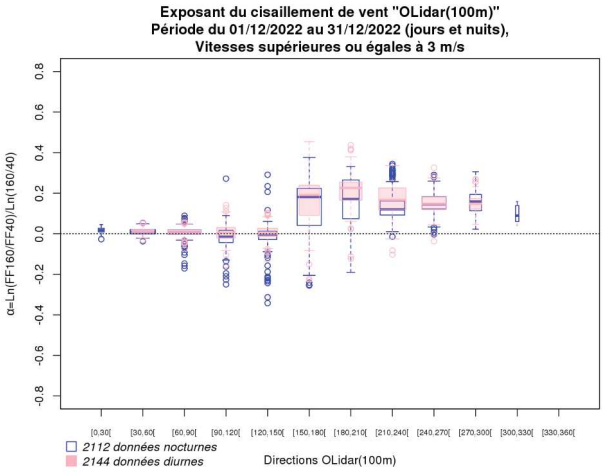

Profil
du 01/09/2023 au 02/09/2023
min
q25
mean
q75
max
Quantiles
MLidar (48)
OLidar (48)
Moyennes
MLidar (48)
OLidar (48)
Clim AROME
Niveau (m)
200
180
160
150
140
120
100
75
60
50
40
20
10
2
4
6
8
10
FF (m/s)

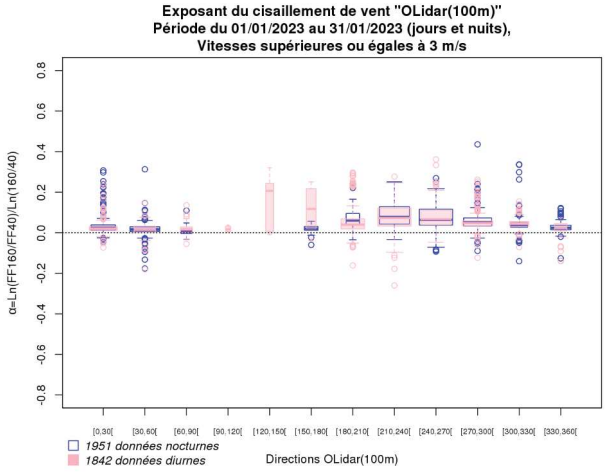
Annexe 8 : Cisaillement du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)

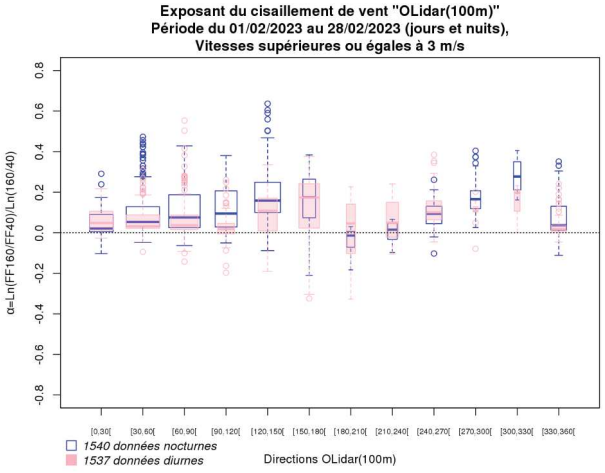




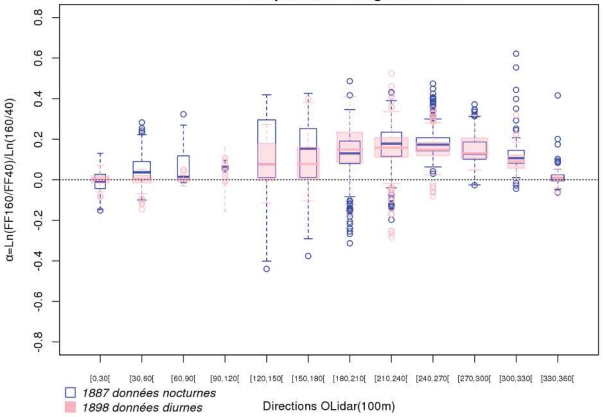




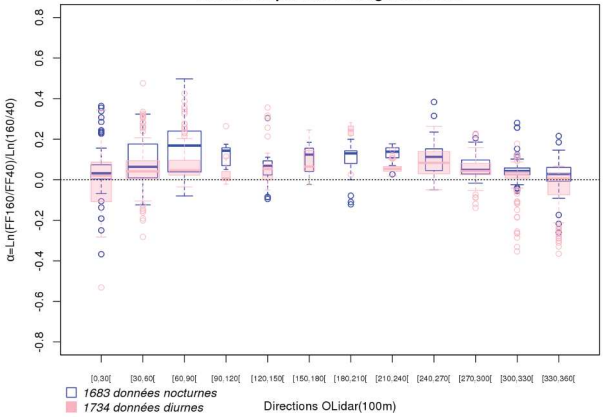




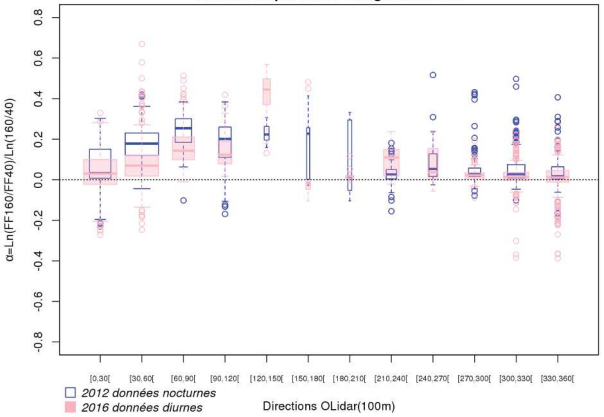
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/03/2023 au 31/03/2023 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



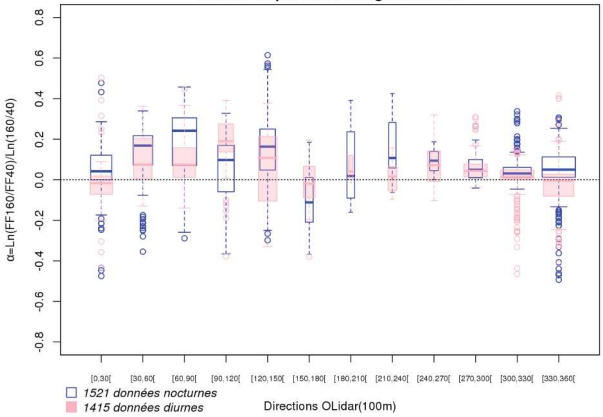
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/04/2023 au 30/04/2023 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



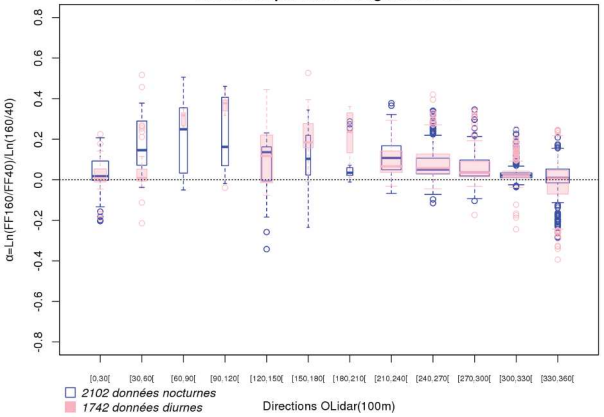
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/05/2023 au 31/05/2023 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



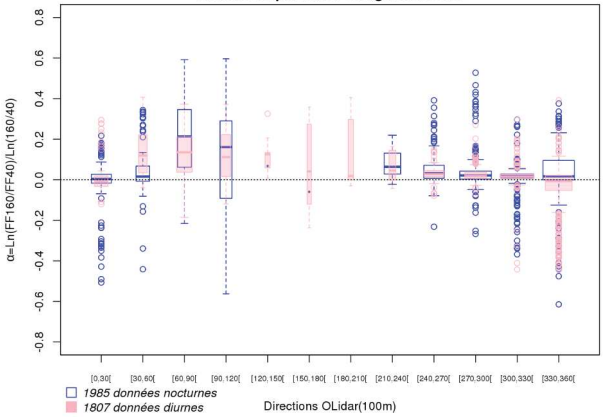
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/06/2023 au 30/06/2023 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s

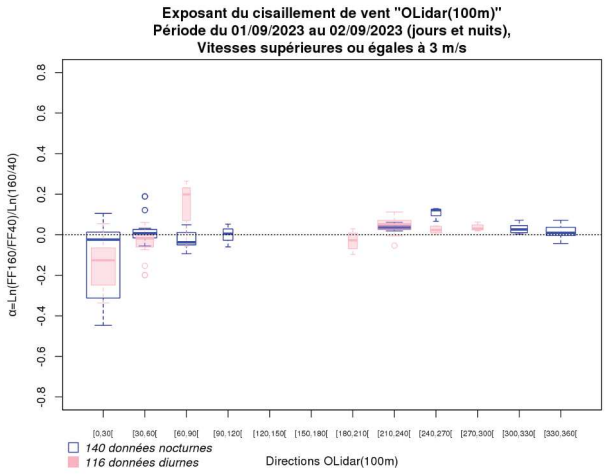


Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/07/2023 au 31/07/2023 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s

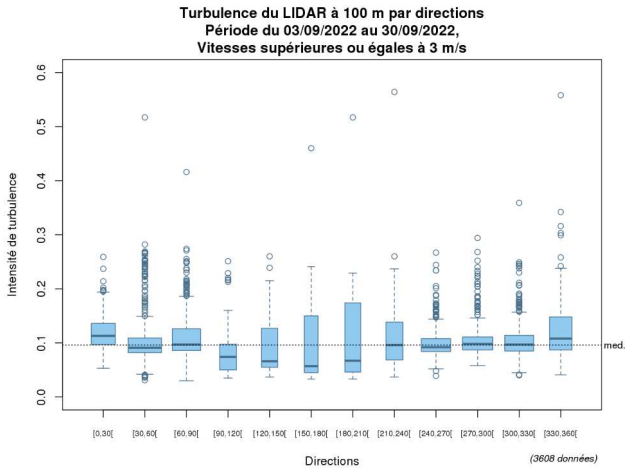


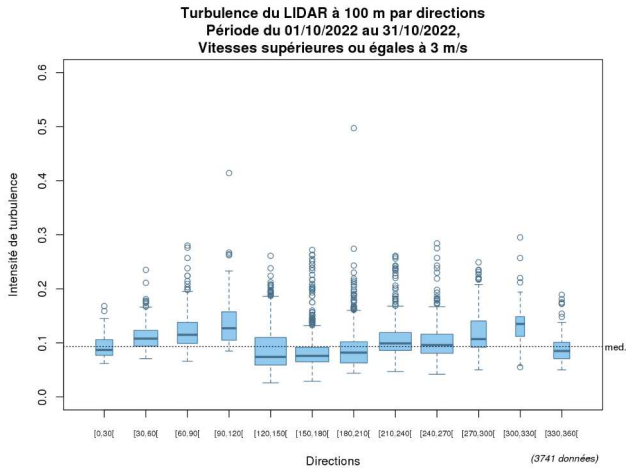
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/08/2023 au 31/08/2023 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s

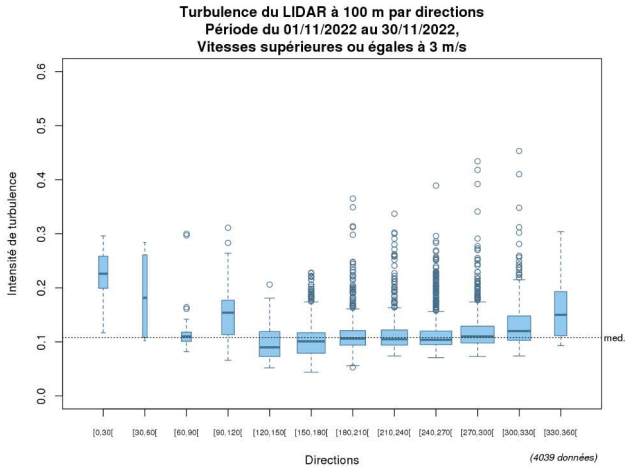


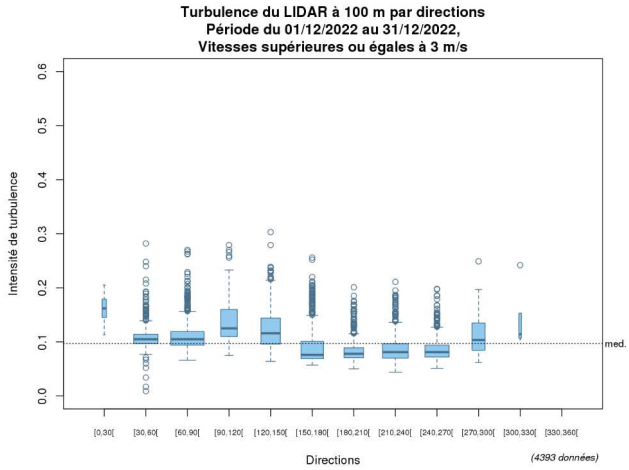

Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/09/2023 au 02/09/2023 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
α=Ln(FF160/FF40)/Ln(160/40)
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
[0,30[
[30,60[
[60,90[
[90,120[
[120,150[
[150,180[
[180,210[
[210,240[
[240,270[
[270,300[
[300,330[
[330,360[
140 données nocturnes
116 données diurnes
Directions OLidar(100m)

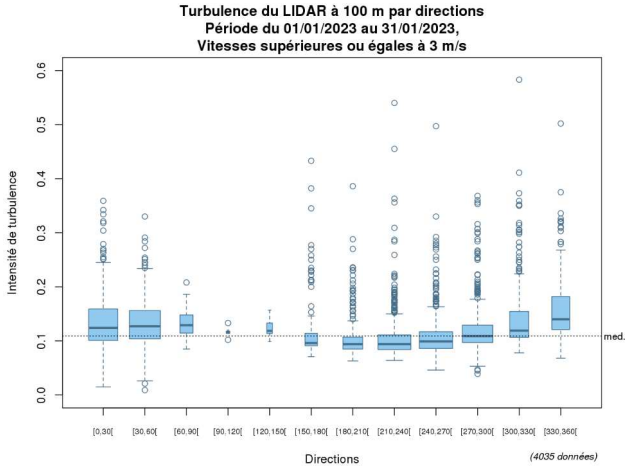
Annexe 9 : Turbulence du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)

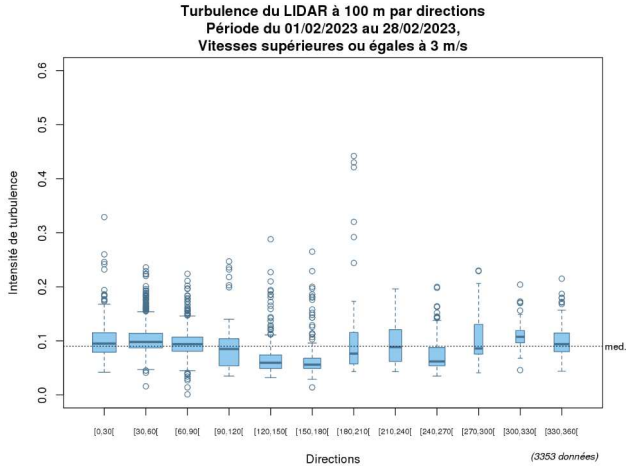


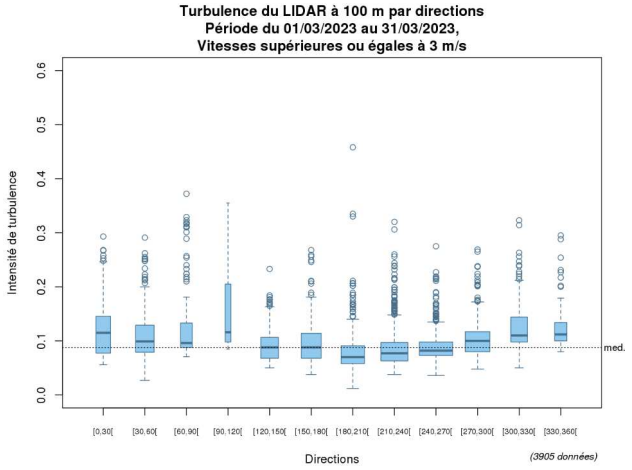


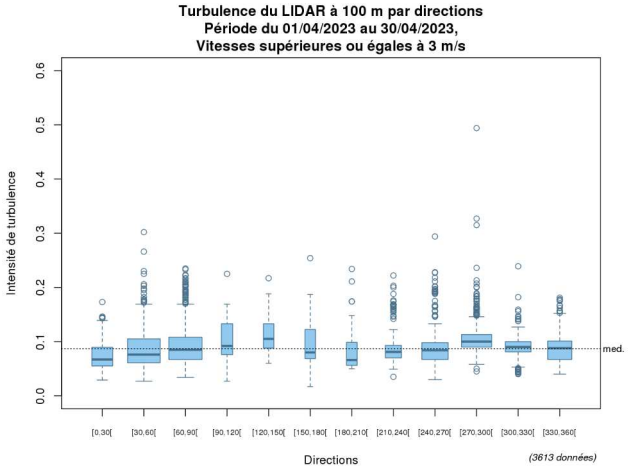


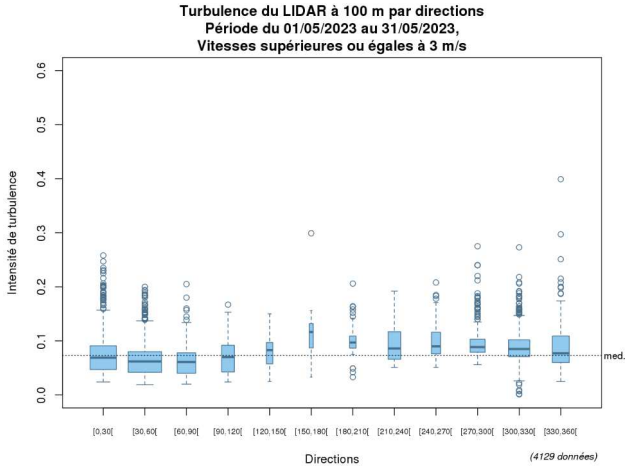


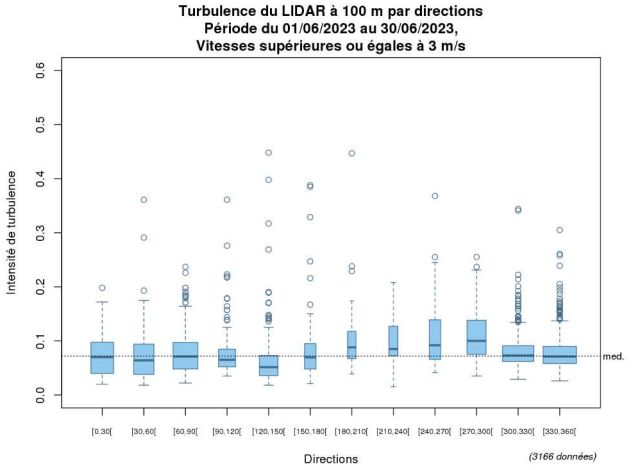


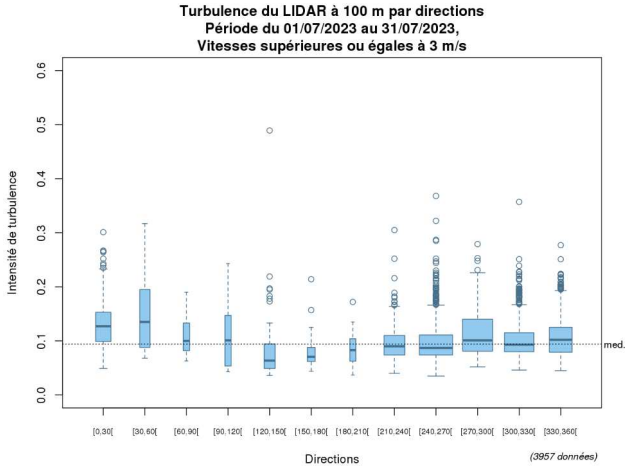


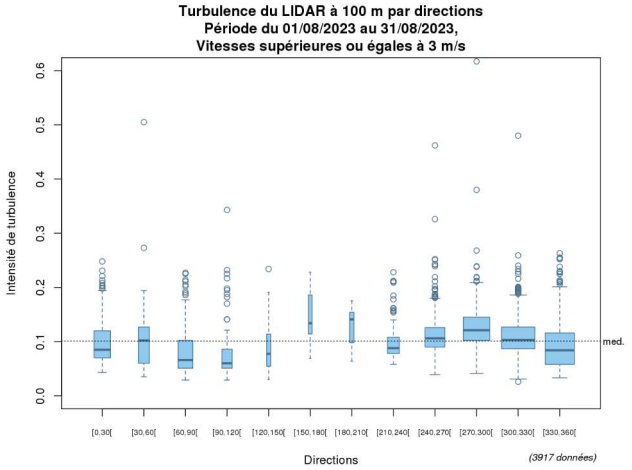

Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/03/2023 au 31/03/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
Intensité de turbulence
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
med.
[0,30[[30,60[[60,90[[90,120[[120,150[[150,180[[180,210[[210,240[[240,270[[270,300[[300,330[[330,360[
Directions
(3905 données)

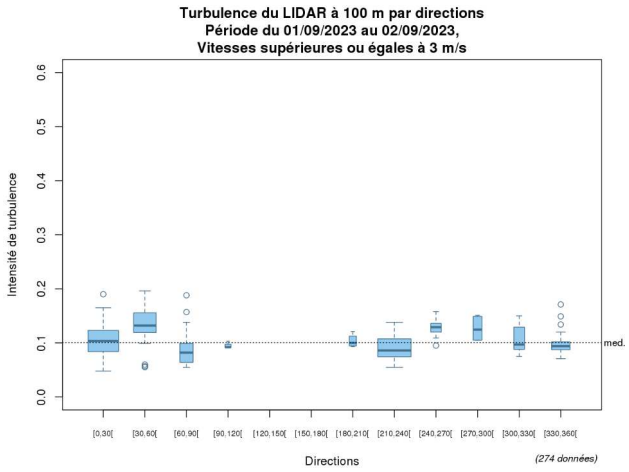

Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/04/2023 au 30/04/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
Intensité de turbulence
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
med.
[0,30[[30,60[[60,90[[90,120[[120,150[[150,180[[180,210[[210,240[[240,270[[270,300[[300,330[[330,360[
Directions
(3613 données)


Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/05/2023 au 31/05/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
Intensité de turbulence
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
med.
[0,30[[30,60[[60,90[[90,120[[120,150[[150,180[[180,210[[210,240[[240,270[[270,300[[300,330[[330,360[
Directions
(4129 données)


Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/06/2023 au 30/06/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
Intensité de turbulence
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
med.
[0,30[[30,60[[60,90[[90,120[[120,150[[150,180[[180,210[[210,240[[240,270[[270,300[[300,330[[330,360[
Directions
(3166 données)


Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/07/2023 au 31/07/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
Intensité de turbulence
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
med.
[0,30[[30,60[[60,90[[90,120[[120,150[[150,180[[180,210[[210,240[[240,270[[270,300[[300,330[[330,360[
Directions
(3957 données)


Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/08/2023 au 31/08/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
Intensité de turbulence
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
med.
[0,30[[30,60[[60,90[[90,120[[120,150[[150,180[[180,210[[210,240[[240,270[[270,300[[300,330[[330,360[
Directions
(3917 données)


Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/09/2023 au 02/09/2023,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s
Intensité de turbulence
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
med.
[0,30[
[30,60[
[60,90[
[90,120[
[120,150[
[150,180[
[180,210[
[210,240[
[240,270[
[270,300[
[300,330[
[330,360[
Directions
(274 données)

FIN DE DOCUMENT