

Rapport Final Lot 4

AO6 Zone 1



Version 2 du 28/02/2023

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

- page laissée intentionnellement vide -

	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

Référence	Date	Version	Évolution
AO6_Mediterranée_Zone1_Lot4_Rapport-final_V1_20221220	20/12/2022	V1	Livraison (Rapport final 12 mois)
AO6_Mediterranée_Zone1_Lot4_Rapport-final_V2_20230228	28/02/2023	V2	Livraison (Rapport final 12 mois avec prise en compte remarques CEREMA)

	2019	2020
Overall		
Gender		
Age		

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	6
2	Méthodologie appliquée	8
2.1	Présentation du modèle AROME	8
2.2	Type de données fournies par le LiDAR	9
2.3	Les outils statistiques	10
2.3.1	Affectation d'un code qualité aux séries DD, FF et FXI	10
2.3.1.1	Seuils de référence	10
2.3.1.2	Détermination des seuils adaptés au LiDAR	11
2.3.1.3	Codes qualité	11
2.3.2	Statistiques de contrôle de la mesure	12
3	Analyse des données de vent mesurées par le LiDAR	14
3.1	Suivi des données	14
3.1.1	Disponibilité des données brutes	14
3.1.2	Monitoring des données FF brutes	16
3.1.3	Monitoring des erreurs	17
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	22
3.3.2.1	Vent moyen horizontal à 100 m du LiDAR	22
3.3.2.2	Distributions	24
3.3.2.3	Variation diurne de la force du vent horizontal (données horaires)	25
3.3.2.4	Variation mensuelle de la force du vent horizontal (données horaires)	26
3.3.2.5	Roses des vents (données horaires)	28
3.3.2.6	Profils verticaux de vent (données horaires)	29
3.3.2.7	Cisaillement du vent (données 10 minutes)	30
3.3.2.8	Analyse des risques de turbulence atmosphérique à 100 m	32
3.3.2.9	Séries horaires FF et FXI à 100 m	33
4	Analyse des données de vent mesurées par l'anémomètre	34
5	Conclusion	36
6	Bibliographie	36
	Annexes	37

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 Leucate (11202001) sur la période 2001/2020	4
Illustration 3 : Carte marine du large de Narbonne (source portail Data - SHOM)	5
Illustration 4 : Emplacement du LiDAR et de la zone d'étude du futur parc éolien (source OpenStreetMap)	5
Illustration 5 : Photo de la plateforme de mesure	6
Illustration 6 : Photo du LiDAR	7
Illustration 7 : Localisation des points de grille AROME (source OpenStreetMap)	9
Illustration 8 : Exemple de tableau mensuel de disponibilité des données	14
Illustration 9 : Monitoring des données 10 minutes sur les 11 niveaux de mesure (à gauche) et comparaison avec le modèle à 100 m (à droite)	16
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)	20
Illustration 14 : Dépassements des seuils de force (à gauche) et de direction (à droite) du vent du LiDAR	21
Illustration 15 : Distributions des vents horaires du LiDAR	24
Illustration 16 : Répartitions horaires des forces du vent du LiDAR	25
Illustration 17 : Répartitions mensuelles des forces du vent du LiDAR ; la largeur des boîtes à moustaches est fonction du nombre de données	26
Illustration 18 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite)	28
Illustration 19 : Profils des vents avec quantiles du LiDAR	29
Illustration 20 : Cisaillement des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite)	30
Illustration 21 : Exposant du cisaillement de vent du LiDAR	31
Illustration 22 : Turbulence du LiDAR	32
Illustration 23 : Séries FF et FXI à 100 m du LiDAR	33
Illustration 24 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) de l'anémomètre avec le modèle	34
Illustration 25 : Distribution des vents horaires de l'anémomètre (à gauche) et diagramme « quantile-quantile » (à droite)	35
Illustration 26 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'anémomètre	35
Illustration 27 : Anasyg du samedi 30 octobre à 06 UTC	38
Illustration 28 : Pmer et Vent>30 nœuds le 30 octobre 2021 à 06 UTC	38
Illustration 29 : Radar précipitations le 30 octobre 2021 à 05 UTC	38
Illustration 30 : Comparaison des mesures du LiDAR avec le modèle AROME les 29 et 30 octobre 2021	39
Illustration 31 : Roses des vents à l'été 2021 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Leucate	40
Illustration 32 : Roses des vents à l'automne 2021 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Leucate	41

Illustration 33 : Roses des vents de l'hiver 2021-2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 pour la station de Leucate	42
Illustration 34 : Roses des vents au printemps 2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 pour la station de Leucate	43
Illustration 35 : Roses des vents en juin et juillet 2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 pour la station de Leucate	44
Illustration 36 : Anomalies mensuelles de températures minimales et maximales de juin 2021 à juillet 2022 à la station de Leucate (11) - Période de référence : 1991 - 2020	46
Illustration 37 : Cumuls mensuels de précipitations de juin 2021 à juillet 2022 à la station de Leucate (11) (histogrammes en bleu) et normale de précipitations (segments en vert) - Période de référence : 1991 - 2020	47

Liste des tableaux

Tableau 1 : Taux de présence (en %) des données (DD,FF) 10 minutes du LiDAR. Les cases colorées en vert ou rouge indiquent respectivement la validité ou l'invalidité par rapport aux deux KPI.	15
Tableau 2 : Récapitulatif des problèmes techniques rencontrés sur le LiDAR	18
Tableau 3: Classes de vitesses par mois. Taux « brut » (en italique) et « reconstitué » (en gras) du LiDAR	23
Tableau 4: Valeurs de l'exposant α en fonction de la nature du terrain (source http://eolienne.f4jr.org/vent)	31

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'AO6 Méditerranée – zone 1, au large de Gruissan (cf. Illustration 1). Le but est d'identifier et de lever les risques susceptibles de se présenter dans la zone retenue comme favorable au développement de l'éolien off-shore.

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

L'objet de ce rapport consiste au suivi/contrôle de la mesure sur site à partir d'un appareil de type LiDAR durant une campagne de mesures de 12 mois et ce pour différentes hauteurs d'intérêt dont la hauteur 100 m revêtant un caractère important pour la production éolienne. Ce rapport traite des quatorze mois de mesures qui ont été nécessaires à la validation de la campagne.

1.1 Zone d'étude

Le futur parc éolien se situe sur une zone au large de Gruissan (Parc naturel régional de la Narbonnaise en Méditerranée).



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

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

- un flux largement dominant de secteur nord-ouest relatif à la Tramontane dont l'orientation et l'intensité sont liées aux caractéristiques géographiques de la zone. En effet, le vent est le plus souvent canalisé par le couloir du seuil de Naurouze entre les Montagnes Noires du sud du Massif Central et les contreforts pyrénéens. Cette situation s'observe après le passage d'une perturbation Atlantique qui est suivie d'une forte poussée anticyclonique sur l'ouest de la France. Si le ciel est le plus souvent dégagé par effet orographique, le vent peut souffler jusqu'au niveau Tempête très loin des côtes ;
- un flux de sud-est, bien moins fréquent, lié aux situations perturbées en présence d'une dépression sur la Péninsule Ibérique alors qu'un anticyclone persiste sur le continent européen. Le vent peut souffler très fortement en générant, qui plus est, de fortes vagues de secteur sud-est, la zone d'action du vent (appelée Fetch) étant de plusieurs centaines de kilomètres ;
- enfin, des situations calmes, de direction variable et d'intensité faible, peuvent survenir lors d'une situation dite de « marais barométrique », sans gradient de pression, celle-ci étant comprise entre 1010 et 1015hPa ;
- même si situation perturbée décrite ci-dessus peut s'observer toute l'année, sa fréquence est néanmoins accrue au printemps et à l'automne.

Météo-France dispose d'une station de mesure distante de quelques dizaines de kilomètres localisée sur la côte à Leucate (11).

Le point de mesure de Leucate se trouve à la pointe sud-est du département de l'Aude. Cette station permet d'avoir une information pratique sur le vent dans le secteur de la zone d'étude.

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

- Les allures générales des roses de vent sont très proches également tout au long de l'année avec une très nette prédominance des vents de nord-ouest (de 50 à 60 % des cas pour les secteurs 300°-320°-340°) puis, dans une bien moindre mesure, de secteur sud-est (10 à 15 % des cas pour les secteurs 120°-140°-160°). Toutes les autres origines potentielles ne sont observées que bien plus rarement ;
- Pour les deux directions prédominantes, l'intensité du vent peut atteindre le seuil de la tempête. Dans le cas du vent de sud-est, le vent génère également de fortes vagues très dangereuses pour la navigation.
- Les vents les plus forts viennent en majorité du secteur nord-ouest, ainsi que du secteur sud-est. La fréquence de ces vents forts est similaire quelle que soit la saison, sauf en été où les vents forts de sud-est sont moins fréquents.
- Les périodes de vent calme ($< 1,5$ m/s) sont assez fréquentes (entre 5.0 et 6.0 %) en étant globalement réparties tout au long de l'année.

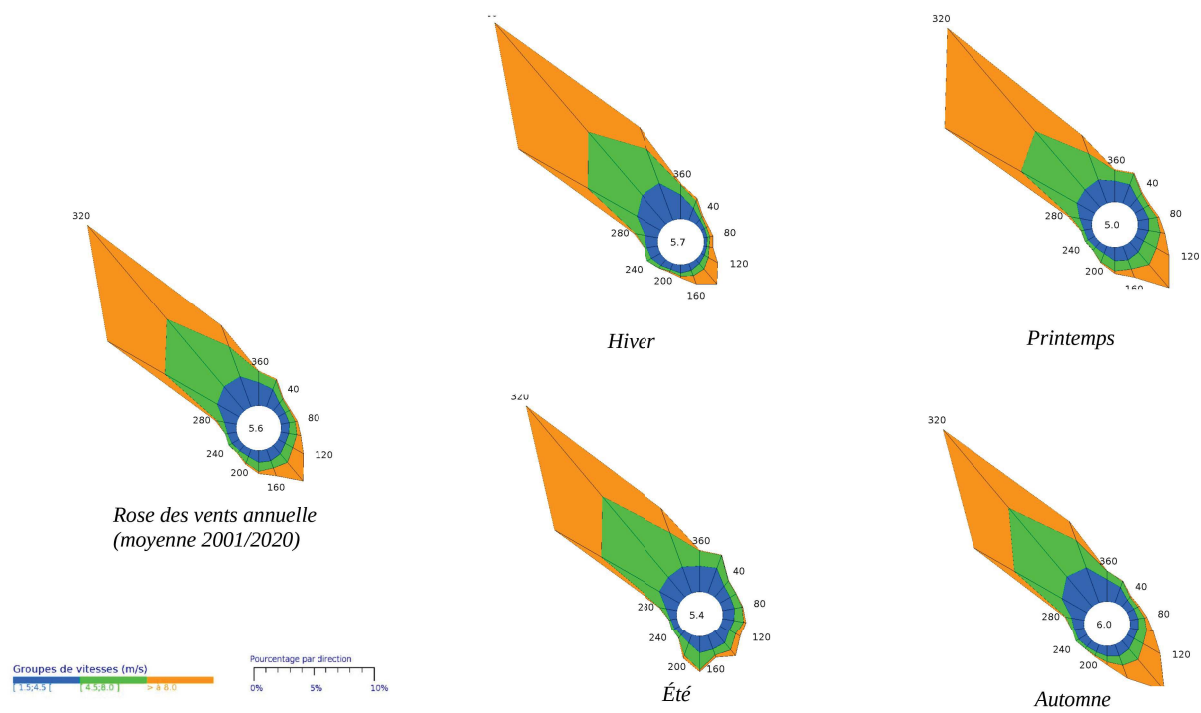


Illustration 2 : Roses des vents annuelle et saisonnières de la station de Leucate (11202001) sur la période 2001/2020

1 Contexte

D'un point de vue de la géographie marine, la zone d'étude se situe au niveau du plateau continental de faible pente vers le large et d'une profondeur d'environ 90 mètres. Les fonds sont réguliers.

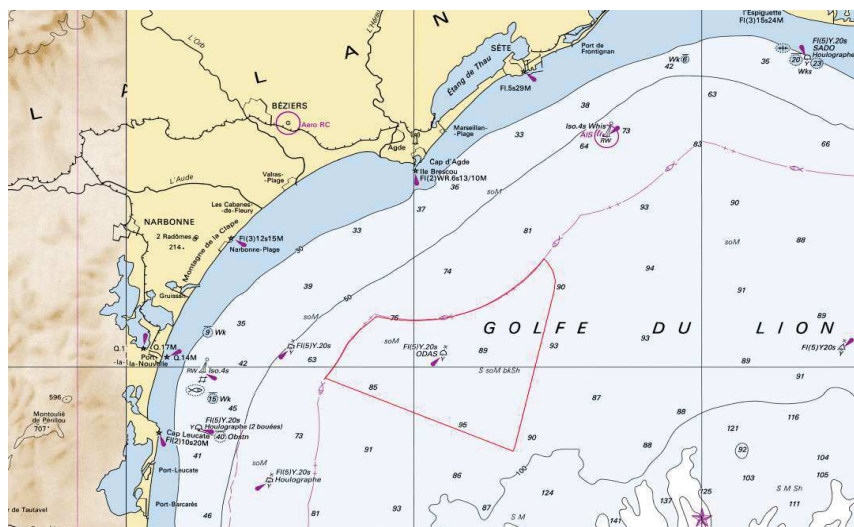


Illustration 3 : Carte marine du large de Narbonne (source portail Data - SHOM)

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 de type LiDAR. La campagne de mesures est réalisée à proximité du point de coordonnées WGS84 Lon : 3,550° Lat : 43,017°. Les coordonnées exactes du point de mesure sont disponibles dans les données brutes produites. La bouée LiDAR a un rayon théorique maximal de 80 m de déplacement autour de son point d'ancrage. La campagne a débuté officiellement à compter du 10 juin 2021 et s'est terminée le 9 juillet 2022.



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

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

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

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



Illustration 5 : Photo de la plateforme de mesure

La plateforme flottante embarque des instruments pour effectuer différentes mesures :

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

La mesure de vent en altitude est réalisée à l'aide d'un LiDAR de chez LEOSPHERE : Windcube V2 Offshore 8.66 pour bouée, modèle WLS866-4 (les caractéristiques techniques de l'appareil sont décrites dans le document « WindCube_WLS866_Specification.pdf » faisant partie du livrable dont Météo-France a la charge). Ce LiDAR (Light Detection And Ranging) envoie une impulsion laser infrarouge vers l'atmosphère. Quatre faisceaux sont envoyés successivement dans les quatre directions cardinales formant un cône de 28°. Un cinquième faisceau vertical permet de vérifier et préciser les mesures. Les impulsions

laser sont rétrodiffusées par les particules (poussières, gouttes d'eau, aérosol...) circulant selon la vitesse du vent. Ces impulsions permettent de calculer la vitesse et la direction du vent sur la base du décalage de leur longueur d'onde dû à l'effet Doppler. Ces mesures peuvent être réalisées sur 11 hauteurs différentes, de 40 à 200 mètres.

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



Illustration 6 : Photo du LiDAR

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

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

Enfin, la plateforme est également équipée d'un houlographe (les caractéristiques techniques de l'appareil sont décrites dans le document « AANDERAA_Motus_Wave_Sensor_5729_Specification.pdf »), d'un courantomètre fournissant des informations à différents niveaux de profondeurs (caractéristiques techniques décrites dans le document « ADCP_Nortek_Signature250.pdf ») et d'un profondimètre (caractéristiques techniques décrites dans le document « Echorange_Specification.pdf »). L'analyse de ces différents paramètres océanographiques fait l'objet d'un rapport spécifique rédigé par le Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM).

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

2 Méthodologie appliquée

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

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

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

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

Afin de pouvoir valider les données fournies par le LiDAR, Météo-France s'appuiera sur son modèle météorologique à maille fine AROME qui dispose des hauteurs suivantes en 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 de l'état de l'atmosphère à un instant donné, car elles combinent une prévision récente (qui donne une première ébauche du vent qu'il fait) avec toutes les observations du même instant. C'est à partir de cet état initial « le plus parfait » que le modèle va calculer l'évolution des paramètres météorologiques sur la grille en 3D qui représente l'atmosphère, en s'appuyant sur les lois physiques qui régissent son comportement.

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

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

2.1 Présentation du modèle AROME

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

2.2 Type de données fournies par le LiDAR

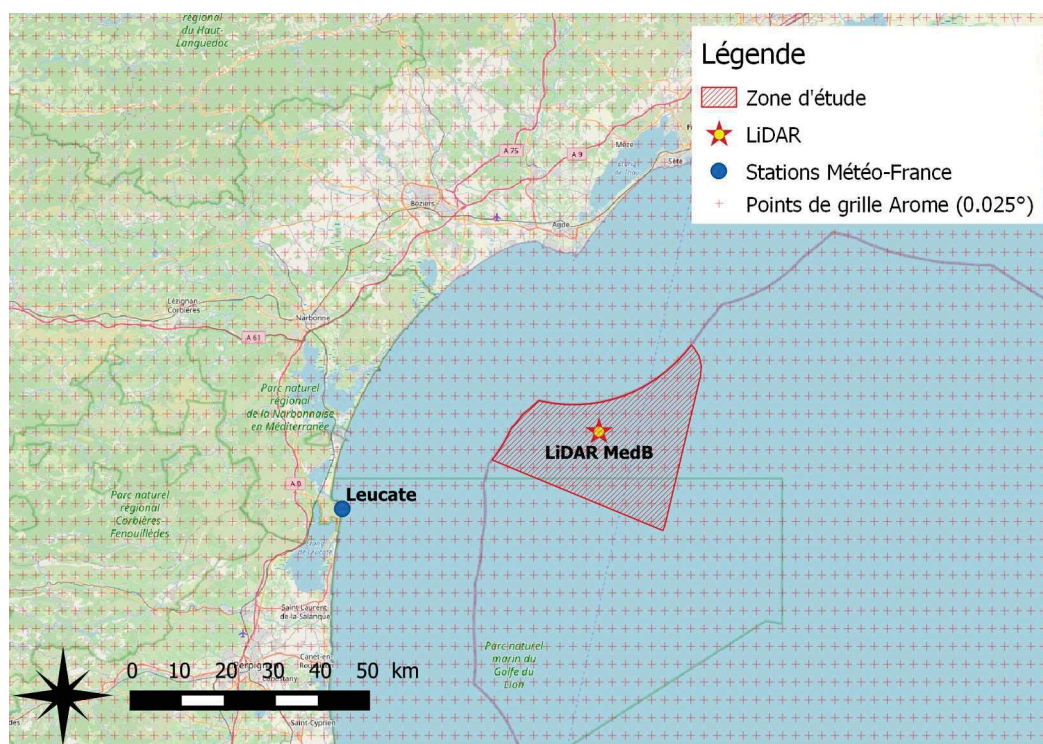


Illustration 7 : Localisation des points de grille AROME (source OpenStreetMap)

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

- Les données **reconstituées**
 - Données moyennées sur 10 minutes non corrigées (fichier *.sta) et corrigées par la prise en compte du mouvement du LiDAR par rapport au nord magnétique (fichiers *lidar_{N}.csv). Ces données incluent :
 - Vitesse en m/s et direction du vent horizontal moyennées sur 10 minutes, minimum, maximum, et écart type,
 - Vitesse verticale en m/s du vent moyennée sur 10 minutes, minimum, maximum, écart type.
- Les données **brutes** (1 seconde)
 - Données brutes non corrigées du nord magnétique (fichiers *.rtd),
 - Données de cap du LiDAR (fichiers *trimble_{N}.csv).

Les autres données présentes dans ces trames sont :

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

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

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

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

2.3 Les outils statistiques

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

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

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

2.3.1.1 Seuils de référence

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

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

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

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

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

2.3.1.2 Détermination des seuils adaptés au LiDAR

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

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

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

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

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

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

2.3.1.3 Codes qualité

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

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

Séries DD, FF :

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

Pour une donnée dite douteuse (cf. §2.3.1.2), on affectera le code qualité '3'.

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

- '1' : la donnée est validée.

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

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

Série FXI :

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

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

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

Les codes qualités définis plus haut sont fournis dans le fichier « SerieLidarH100_MedB_20210601-20220709.csv »

2.3.2 Statistiques de contrôle de la mesure

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3 Analyse des données de vent mesurées par le LiDAR

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

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

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

3.1 Suivi des données

3.1.1 Disponibilité des données brutes

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

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

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

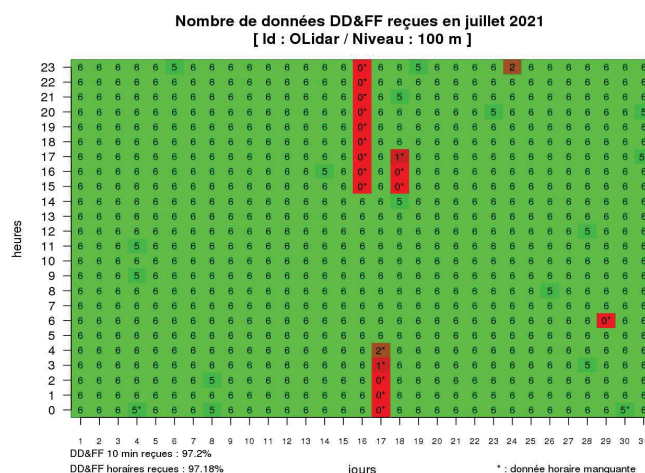


Illustration 8 : Exemple de tableau mensuel de disponibilité des données

3 Analyse des données de vent mesurées par le LiDAR



Le taux de présence des données du LiDAR décroît naturellement avec l'altitude. De 40 à 120m, les taux de disponibilité des données dépassent généralement les 85 % (cf. Tableau 1).

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

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

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

	2021							2022							MOY (426j)
	6 (21j)	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7 (9j)	
200 m	92,4	82,0	86,6	45,0	96,2	99,8	94,7	94,4	92,2	98,9	96,9	93,1	97,6	90,7	90,2
180 m	95,7	88,1	89,6	45,5	96,4	99,9	95,9	96,5	94,4	99,1	97,7	94,0	98,1	90,7	91,8
160 m	97,2	92,4	91,0	45,9	96,6	99,9	97,2	97,9	96,4	99,1	98,5	94,8	98,3	90,7	92,9
150 m	97,7	94,2	91,3	46,2	96,6	99,9	97,9	98,2	97,2	99,1	98,7	95,2	98,3	90,7	93,3
140 m	97,8	95,5	91,7	46,6	96,6	99,9	98,2	98,5	98,1	99,1	98,8	95,3	98,3	90,7	93,6
120 m	98,4	96,7	92,0	47,0	96,6	99,9	99,4	98,8	99,3	99,1	99,0	95,5	98,3	90,7	94,0
100 m	98,5	97,2	92,3	47,1	96,6	99,9	99,7	99,2	99,6	99,1	99,0	95,5	98,3	90,7	94,1
80 m	98,8	97,3	92,5	47,1	96,7	99,9	99,7	99,2	99,8	99,1	99,0	95,5	98,3	90,7	94,2
60 m	98,9	97,6	92,6	47,1	96,7	99,9	99,7	99,1	99,8	99,1	99,0	95,5	98,3	90,7	94,2
50 m	98,9	97,7	92,7	47,1	96,7	99,9	99,7	99,1	99,9	99,1	99,0	95,5	98,3	90,7	94,2
40 m	98,9	97,6	92,6	47,1	96,7	99,9	99,7	99,2	99,9	99,1	99,0	95,5	98,3	90,7	94,2
MOY (60, 100 et 160 m)	98,2	95,7	92,0	46,7	96,6	99,9	98,9	98,7	98,6	99,1	98,8	95,3	98,3	90,7	93,7

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

La réception des données du LiDAR débute le 10 juin 2021. Le mois de septembre 2021 enregistre un taux de disponibilité inférieur à 80 %, en raison de plusieurs problèmes techniques (cf. Tableau 2). Afin de compenser ces mois « non valides » et atteindre le taux de disponibilité fixé de 85 % aux niveaux 60, 100 et 160 m, la campagne de mesures a été prolongée jusqu'au 9 juillet 2022.

3.1.2 Monitoring des données FF brutes

Un suivi de l'ensemble des données du LiDAR et du modèle est effectué au fil de l'eau grâce à la production de graphiques de monitoring. Ils permettent en amont de rapidement vérifier la cohérence des données avec la situation synoptique. Les graphiques ci-dessous présentent les relevés du vent moyen du LiDAR les 29 et 30 octobre 2021 au passage d'une perturbation active, suivie d'une activité orageuse dans la traîne. On note une bonne, voire très bonne corrélation entre l'observation LiDAR et le modèle aussi bien dans la chronologie que l'intensité des phénomènes (en particulier au plus fort de la perturbation).

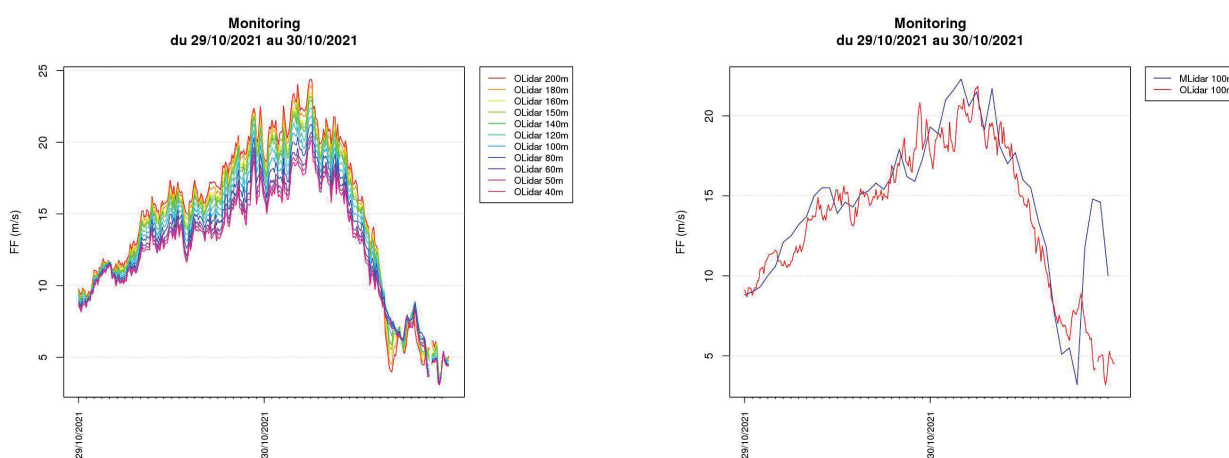


Illustration 9 : Monitoring des données 10 minutes sur les 11 niveaux de mesure (à gauche) et comparaison avec le modèle à 100 m (à droite)

3.1.3 Monitoring des erreurs

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

Nous effectuons un suivi mensuel des moyennes glissantes sur 24 heures, des erreurs sur les forces FF et les directions DD afin de déceler d'éventuelles dérives. Les résultats restent dans la plupart des cas en dessous de 2 m/s et de 20°, et sont donc très inférieurs aux seuils fixés (cf. § 2.3.1.1). L'exemple de monitoring pour le mois de novembre 2021 figure dans l'illustration ci-dessous.

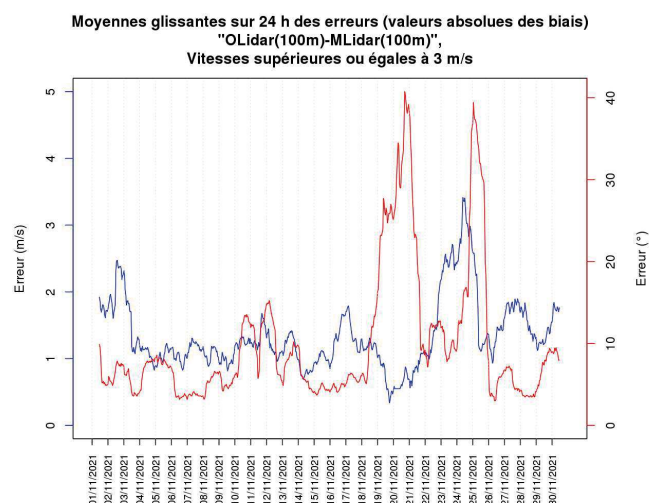


Illustration 10 : Monitoring des erreurs de forces (courbe bleue)
et de directions (courbe rouge)

3.2 Retour sur des cas de données manquantes ou douteuses

Le LiDAR fournit moins de données d'observations lorsque l'altitude augmente, les nuages bas créant un obstacle à la mesure. Au-dessus de 140 m, les manques deviennent plus nombreux.

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

	Incidents techniques impactant la mesure du LiDAR
Juin 2021	Réception des données à compter du 10/06.
Juillet 2021	RAS
Août 2021	RAS
Septembre 2021	Données manquantes du 20/09 au 30/09 en raison de la saturation du disque interne SSD du Lidar
Octobre 2021	Données manquantes du 01/10 au 05/10 en raison de la saturation du disque interne SSD du Lidar
Novembre 2021	RAS
Décembre 2021	RAS
Janvier 2022	RAS
Février 2022	RAS
Mars 2022	RAS
Avril 2022	RAS
Mai 2022	RAS
Juin 2022	RAS
Juillet 2022	Fin de la campagne le 09/07/22

Tableau 2 : Récapitulatif des problèmes techniques rencontrés sur le LiDAR

L'analyse de la situation météorologique du 30 octobre 2021 ayant pu impacter les mesures horaires du LiDAR figure en Annexe 1.

3.3 Statistiques de contrôle et descriptives de la mesure

3.3.1 Statistiques de contrôle de la mesure

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

Seulement 10 % des valeurs enregistrées par le LiDAR sortent des seuils fixés, à savoir avec un écart de force de vent supérieur à 5 m/s et/ou un écart en direction supérieur à 30°. L'essentiel des dépassements de seuil concerne le critère de direction (croix oranges) pour des forces inférieures à 10 m/s (cf. Illustration 11).

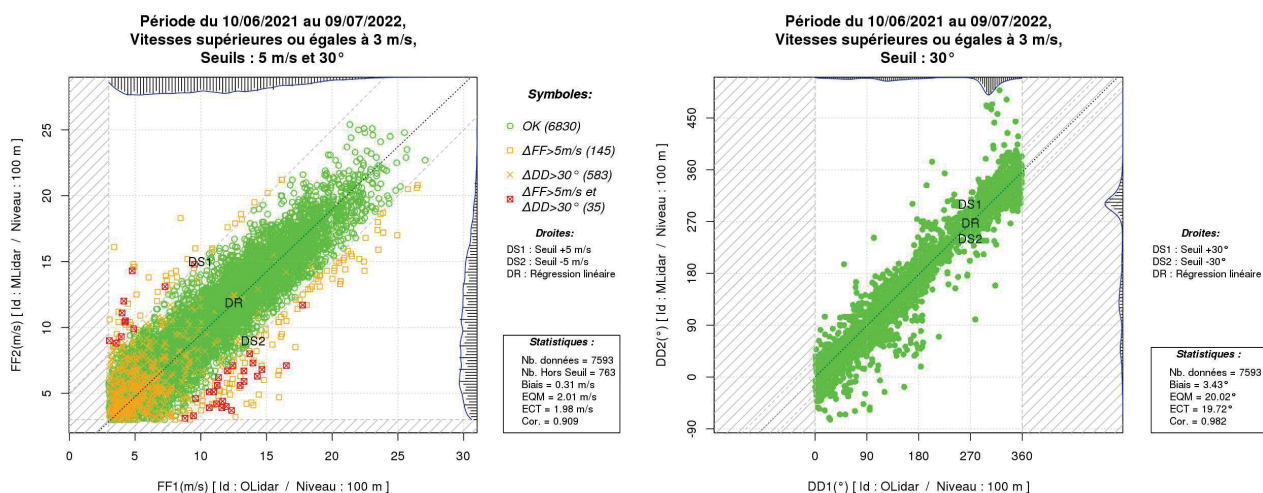


Illustration 11 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) du LiDAR avec le modèle

Le diagramme « quantile-quantile » des forces de vent du LiDAR et du modèle AROME ci-dessous présente des points alignés sur la première bissectrice mais avec un léger décalage perceptible à partir de la médiane. Au-dessus de cette valeur, le modèle AROME sous-estime légèrement la mesure, de l'ordre de 0,5 m/s.

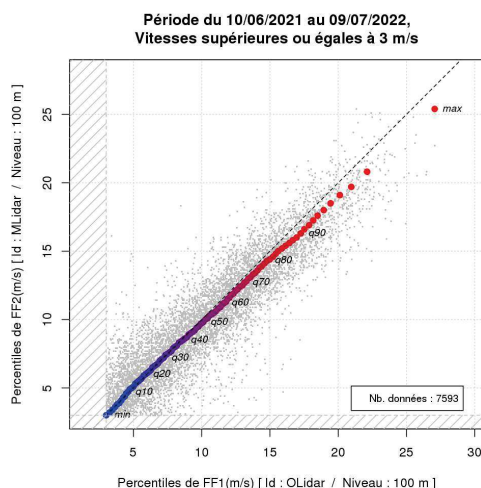


Illustration 12 : Diagramme « quantile-quantile »

Quelle que soit l'heure, l'observation présente donc un faible biais positif (par rapport à AROME toujours) systématique sur les directions, de moins de 5° par rapport au modèle. Suivant la direction considérée, on note un biais légèrement plus marqué pour le secteur nord à nord-est, mais n'excédant pas les 10° (cf. Illustration 13).

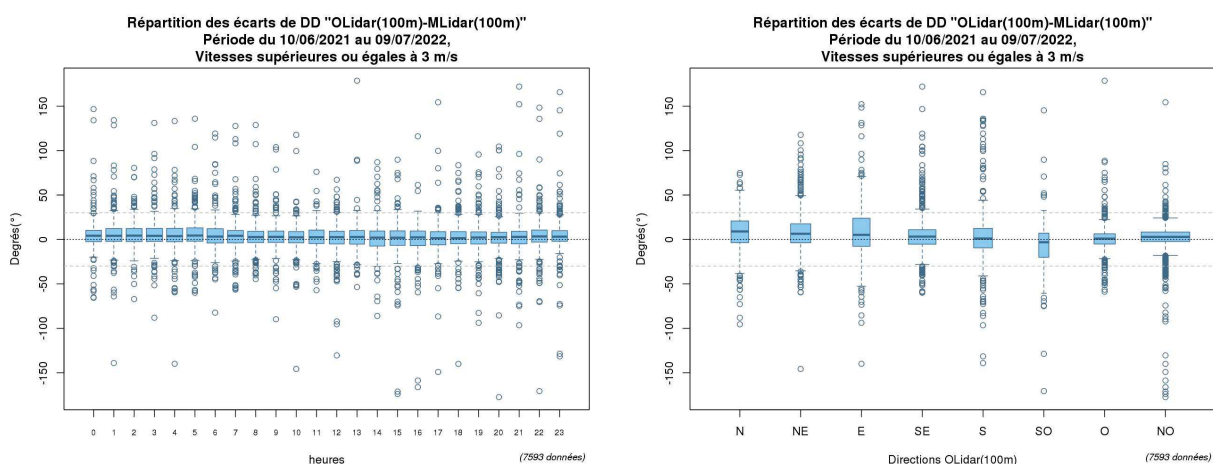


Illustration 13 : Répartitions des écarts de directions du LiDAR en fonction de l'heure (à gauche) et de la direction (à droite)

Les dépassements du seuil pour la force du vent (écart supérieur à 5 m/s entre le LiDAR et le modèle) sont de l'ordre de 4 % pour les secteurs sud et sud-est. Pour le secteur nord-ouest qui est prépondérant, les dépassements du seuil de force sont de l'ordre de 2 % (cf. Illustration 14 à gauche).

Pour des vitesses supérieures à 9 m/s, on enregistre des dépassements du seuil de direction (écart supérieur à 30° entre le LiDAR et le modèle) dans moins de 5 % des cas. On note également que plus le flux est établi avec des vitesses de vent importantes, moins les erreurs de directions surviennent. A contrario, il est rappelé que plus le vent est faible et plus celui-ci a tendance à prendre un caractère variable sans secteur bien défini. Ceci explique le nombre plus important d'écarts pour les vitesses les plus faibles (cf. Illustration 14 à droite).

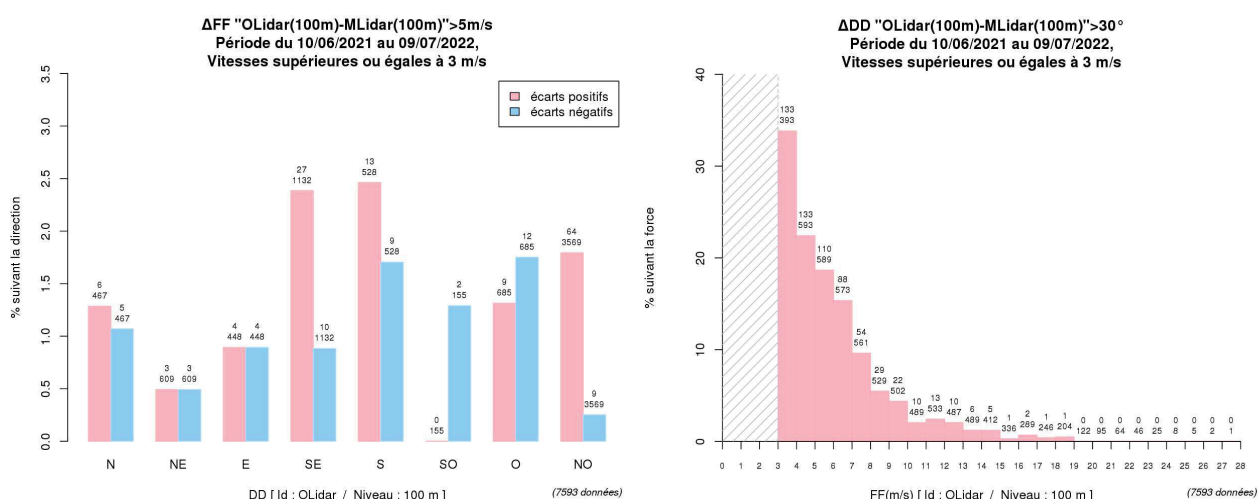


Illustration 14 : Dépassements des seuils de force (à gauche) et de direction (à droite) du vent du LiDAR

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.

3.3.2 Statistiques descriptives du vent mesuré

En préambule, afin de se faire une idée plus précise des conditions météorologiques rencontrées durant les six mois de mesure, une description détaillée de la climatologie saisonnière figure en Annexe 2.

3.3.2.1 Vent moyen horizontal à 100 m du LiDAR

Dans le tableau suivant, le taux « brut » 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).

La campagne a débuté le 10 juin. Par ailleurs, fin septembre, suite à un problème technique (cf. Tableau 2), le LiDAR n'a pas effectué de mesures. Ceci explique, les différences constatées sur certaines classes de vitesse entre les taux bruts et reconstitués.

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

Année	Mois	Nombre de cas	0 à 3 m/s	3 à 5 m/s	5 à 10 m/s	10 à 15 m/s	15 à 20 m/s	20 à 25 m/s	25 à 30 m/s	30 à 35 m/s
2021	6	2679	6.6%	13.3%	44.4%	33.0%	2.7%	.	.	.
		719	6.0%	11.1%	45.8%	35.2%	1.9%	.	.	.
	7	4343	11.8%	15.8%	34.6%	24.1%	12.2%	1.5%	.	.
		744	11.7%	14.8%	34.5%	25.3%	12.2%	1.5%	.	.
	8	4439	17.4%	19.7%	35.1%	17.8%	9.8%	0.2%	.	.
		744	17.7%	19.5%	35.3%	17.6%	9.5%	0.3%	.	.
	9	2224	15.4%	24.7%	46.1%	13.8%	.	.	.	.
		720	14.6%	17.6%	40.4%	24.6%	2.8%	.	.	.
	10	4342	12.0%	12.6%	29.5%	33.8%	10.3%	1.8%	.	.
		744	13.3%	12.8%	29.2%	33.2%	9.8%	1.7%	.	.
	11	4316	4.2%	5.7%	22.6%	44.2%	18.5%	4.8%	.	.
		720	3.8%	6.2%	22.2%	43.9%	19.0%	4.9%	.	.
2022	12	4462	14.8%	15.5%	31%	16.0%	20.1%	2.6%	.	.
		744	14.2%	16.4%	30.4%	17.2%	19.1%	2.7%	.	.
	1	4462	11.5%	12.9%	28.8%	28.0%	16.1%	2.5%	0%	.
		744	11.2%	12.9%	29.2%	27.7%	16.1%	3.0 %	.	.
	2	4017	10.7%	10.6%	18.8%	30.7%	20.9%	7.6%	0.7%	.
		672	10.9%	10.1%	18.3%	31.5%	21%	7.4%	0.7%	.
	3	4460	6.3%	16.9%	36.9%	22.2%	13.8%	4.0%	.	.
		744	6.6%	17.1%	36.6%	22.0%	13.7%	4.0%	.	.
	4	4313	4.8%	7.4%	32.5%	36.0%	12.7%	6.2%	0.4%	.
		720	5.0%	7.6%	32.4%	36.7%	11.4%	6.5%	0.4%	.
	5	4388	16.8%	19.3%	25.3%	20.4%	17.3%	0.8%	.	.
		744	17.6%	18.7%	25.4%	20.0%	17.5%	0.8%	.	.
	6	4316	9.0%	17.2%	41.4%	24.6%	7.3%	0.4%	.	.
		720	9.3%	16.4%	42.2%	24.2%	7.6%	0.3%	.	.

3 Analyse des données de vent mesurées par le LiDAR



	7	1295	11.7%	10.1%	25.9%	30.4%	21.6%	0.3%	.	.
		216	12.0%	10.2%	25.9%	28.2%	23.1%	0.5%	.	.
Total		54056	10,9 %	12,7 %	28,0 %	24,1 %	12,3 %	2,5 %	0,1 %	.
		9695	15,8 %	12,5 %	28,7 %	25,1 %	11,6 %	2,4 %	0,1 %	.

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 proches (cf. Illustration 15). Les quantiles apparaissant ci-dessous dans l'encart ne diffèrent pas de plus de 1 m/s au dernier décile et la valeur maximale de 2 m/s.

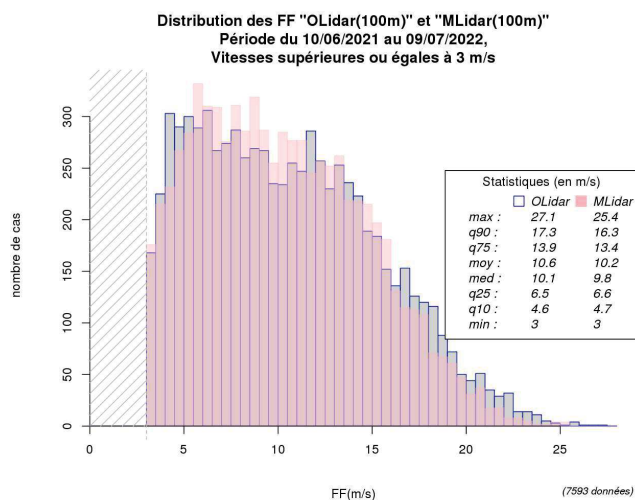


Illustration 15 : Distributions des vents horaires du LiDAR

Les distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100 m figurent en Annexe 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 soirée et en début de nuit (globalement de 18h à 00h UTC), les médianes horaires des observations et du modèle sont supérieures à la médiane de la période totale (d'environ 1 m/s). En journée (de 8h à 12h), on observe plutôt l'effet inverse.

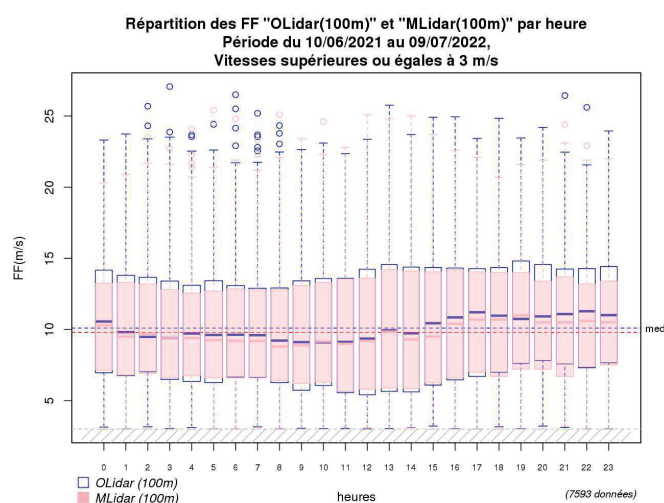


Illustration 16 : Répartitions horaires des forces du vent du LiDAR

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

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

On observe quelques disparités sur les répartitions mensuelles (cf. Illustration 17) qui s'expliquent par la climatologie de la période.

Au regard de la période étudiée, les mois de juin, août et surtout septembre 2021, puis juin 2022 ont été des mois calmes. En revanche, novembre 2021, février et avril 2022 ont été des mois agités notamment en raison d'épisodes de forte tramontane.

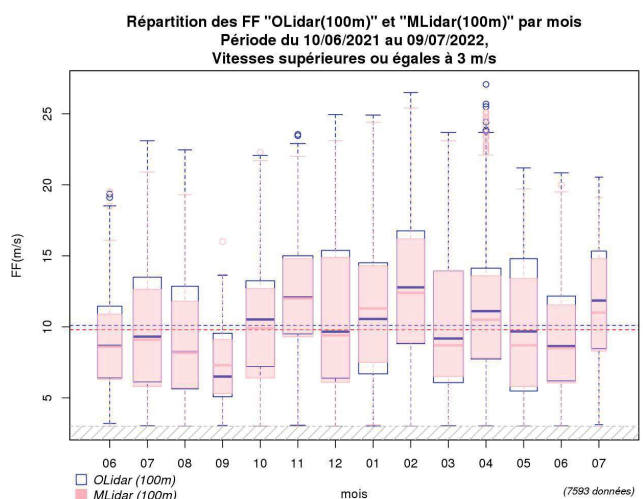


Illustration 17 : Répartitions mensuelles des forces du vent du LiDAR ; la largeur des boîtes à moustaches est fonction du nombre de données

3 Analyse des données de vent mesurées par le LiDAR



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

Au regard de la climatologie (statistiques 2001-2020), les mois de la campagne de mesure ont été peu venteux. On enregistre sur l'ensemble de la période presque deux fois moins de vent fort que la normale. En revanche, les vents modérés ont été prépondérants en juin, octobre et novembre 2021 puis février, avril et juillet 2022.

Vitesses en m/s	2021							2022							Total
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	
> 8	25,8	27,1	22,9	25,1	30,8	36,7	33,2	36,2	40,1	35,7	35,0	33,8	25,8	27,1	30,5
	<i>9,9</i>	<i>14,4</i>	<i>9,3</i>	<i>12,7</i>	<i>17,9</i>	<i>26,5</i>	<i>11,0</i>	<i>21,4</i>	<i>24,7</i>	35,1	<i>20,7</i>	<i>18,1</i>	<i>16,5</i>	<i>9,1</i>	<i>16,4</i>
[4.5, 8.0[	36,7	38,8	38,7	34,0	30,7	29,8	29,1	31,3	27,6	31,6	33,3	33,4	36,7	38,8	34,0
	<i>56,9</i>	42,1	34,4	<i>26,3</i>	<i>39,5</i>	<i>47,6</i>	27,2	34,8	<i>39,9</i>	<i>25,8</i>	<i>47,4</i>	32,9	32,3	<i>47,5</i>	38,1
[1.5, 4.5[	32,1	29,0	32,6	34,4	32,3	28,2	31,7	26,7	27,0	27,3	26,7	28,2	32,1	29,0	30,0
	31,4	<i>37,3</i>	<i>48,1</i>	<i>53,6</i>	34,9	24,2	<i>51,7</i>	<i>36,3</i>	31,4	<i>32,4</i>	28,5	<i>40,6</i>	<i>45,1</i>	<i>38,8</i>	<i>39,4</i>
[0, 1.5[	5,4	5,1	5,8	6,5	6,2	5,3	6,0	5,8	5,3	5,4	5,0	4,6	5,4	5,1	5,5
	1,8	6,2	8,2	7,4	7,7	1,7	10,1	7,5	4,0	6,7	3,4	8,4	6,1	4,6	6,0

Tableau 4 : Statistiques 2001-2020 (en gras, en %) et valeurs 2021-2022 (en italique, en %) des forces de vent de la station de Leucate ; 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 parfaitement avec la rose des vents obtenue à partir des données observées par le LiDAR (à gauche dans l'illustration ci-dessous). Seul le secteur 270° est légèrement surestimé par le modèle (+2%).

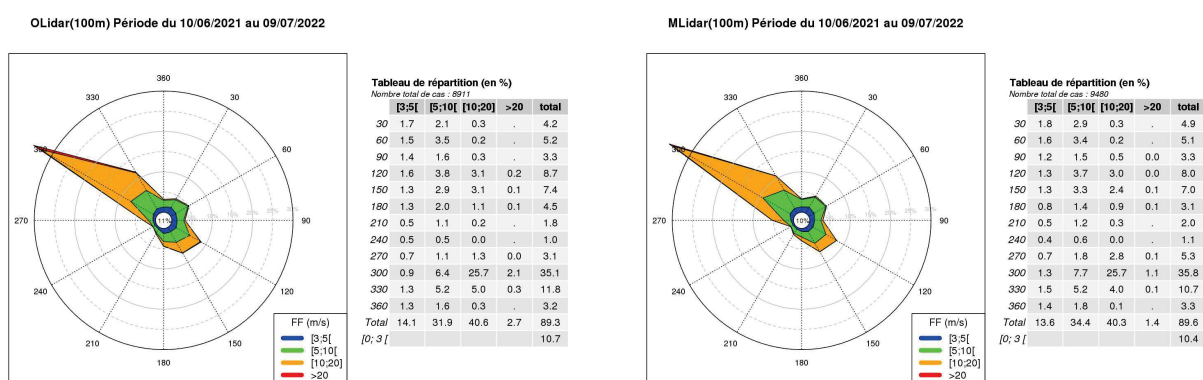


Illustration 18 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite)

Le tableau de contingence détaillé, présentant les forces de vents du LiDAR par classes de 1 m/s et par secteur de 30° figure en Annexe 5.

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

3.3.2.6 Profils verticaux de vent (données horaires)

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

On constate que durant la période de la campagne de mesure, les profils horaires observés sur la couche allant de 40 m à 200 m sont parfaitement cohérents avec les profils modélisés. Les quantiles sont très proches. Les premiers quartiles observés et modélisés sont quasi-identiques. La médiane et le troisième quartile observés sont supérieurs d'environ 0,5 m/s par rapport aux modélisés.

Par ailleurs, de 40 m à 160 m, les vitesses du profil moyen observé (profil bleu en pointillés) sont quasi identiques avec celles du profil du vent moyen issu de la climatologie AROME sur 20 ans (profil vert en pointillés). Enfin, ces vitesses sont supérieures d'environ 0,4 m/s par rapport à celles du profil moyen modélisé (profil rouge en pointillés).

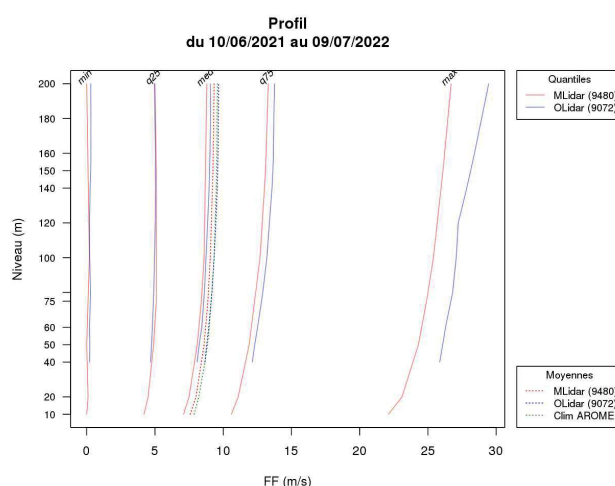


Illustration 19 : Profils des vents avec quantiles du LiDAR

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 1,5 m/s pour les directions de sud-est à sud et d'ouest à nord-ouest (cf. Illustration 20). Ces directions témoignent respectivement du passage des perturbations qui créent du cisaillement en altitude et des situations de tramontane. Nous avons décidé de représenter le cisaillement de vent du modèle entre les niveaux disponibles les plus proches, 50 m et 150 m. Sans grande surprise, on constate que les caractéristiques sont comparables avec toutefois un cisaillement légèrement plus faible pour les directions indiquées précédemment.

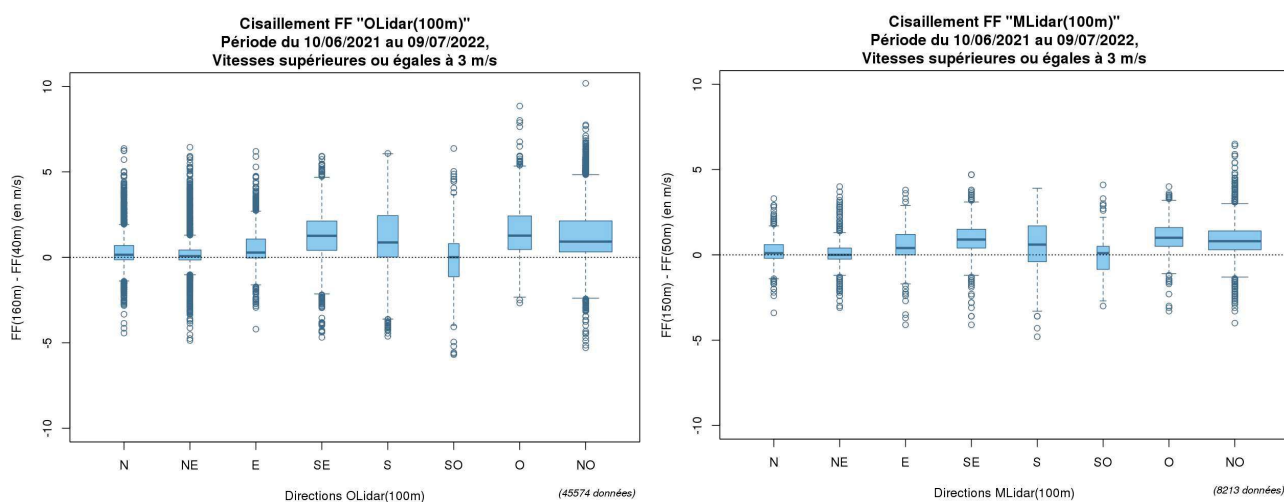


Illustration 20 : Cisaillement des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite)

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

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

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

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

3 Analyse des données de vent mesurées par le LiDAR

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

Tableau 4: Valeurs de l'exposant α en fonction de la nature du terrain (source <http://eolienne.f4jr.org/vent>)

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

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

Pour les vents de secteur sud-est à sud et d'ouest à nord-ouest, où le coefficient α est le plus fort, on ne constate pas de cycle diurne.

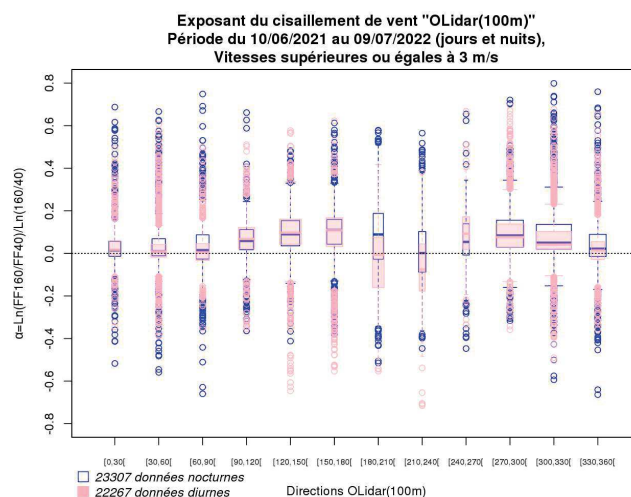


Illustration 21 : Exposant du cisaillement de vent du LiDAR

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 nord-nord-est, nord-ouest, et sud-ouest présentent une intensité de turbulence légèrement plus forte que pour les autres directions. (cf. Illustration 22)

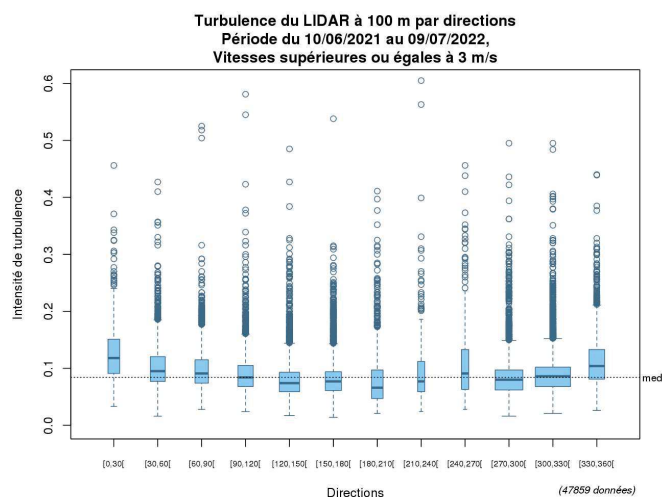
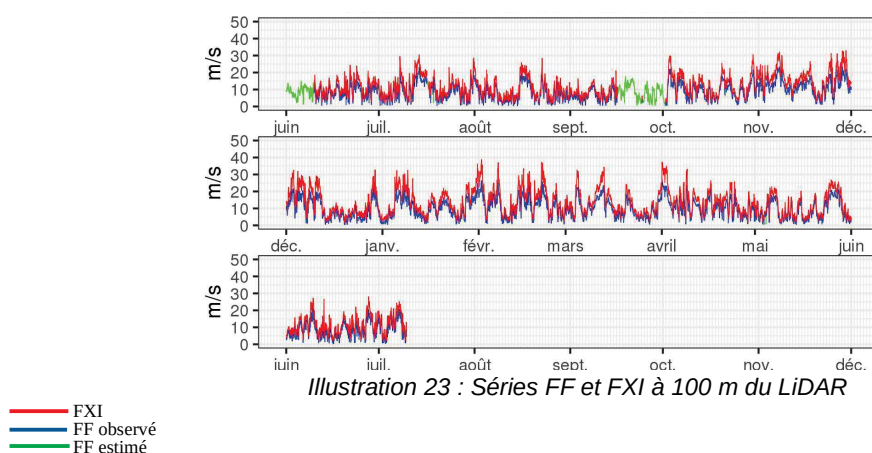


Illustration 22 : Turbulence du LiDAR

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.



Météo-France fournit au travers du fichier « SerieLidarH100_MedB_20210601-20211130.csv » les séries de données horaires de vent à 100 m comportant le vent moyen (FF et DD) et la vitesse du vent maximal (FXI) pour la période du 01/06/2021 au 09/07/2022. Ces paramètres sont accompagnés des codes qualité QFF, QDD et QFXI (cf. §2.3.1.3 Codes qualité).

4 Analyse des données de vent mesurées par l'anémomètre

Nous effectuons des contrôles semblables à ceux du LiDAR sur la présence et la cohérence des données de vent de surface mesuré par l'anémomètre en considérant les seuils d'erreurs de forces et de directions respectivement de 3 m/s et 30° (cf. §2.3.1.2 p11).

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 9 % des valeurs enregistrées par l'anémomètre sort des seuils de force. Ce qui est nettement plus important que pour le LiDAR. La plupart des dépassements en force sont dus à des forces modélisées inférieures à celles relevées par l'anémomètre.

Les dépassements du seuil de direction sont assez nombreux. La majorité de ces dépassements correspondent à des forces relativement faibles (inférieures à 10 m/s). On enregistre des dépassements du seuil de direction (écart supérieur à 30° entre l'anémomètre et le modèle) et du seuil de vitesse (écart supérieur à 3 m/s entre l'anémomètre et le modèle) dans moins de 3 % des cas.

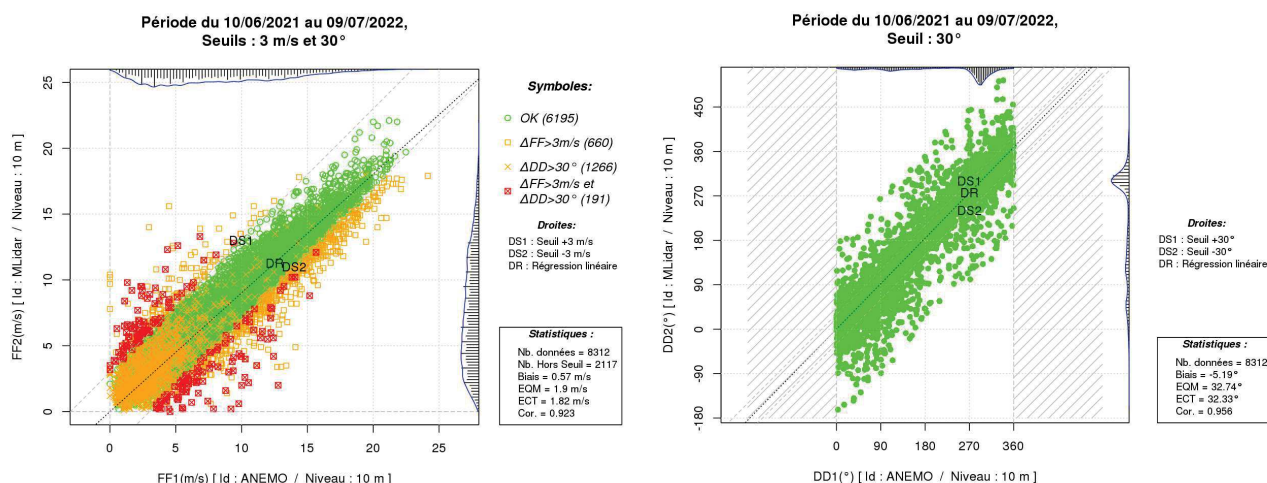


Illustration 24 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) de l'anémomètre avec le modèle

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

4 Analyse des données de vent mesurées par l'anémomètre



Les distributions statistiques horaires des observations et du modèle à 10 m sont assez proches. Le diagramme « quantile-quantile » des forces de vent de l'anémomètre présente des points légèrement décalés par rapport à la première bissectrice avec des forces de vent inférieures pour le modèle. Les quantiles sont très proches jusqu'au quatrième décile mais diffèrent ensuite sensiblement avec des écarts atteignant 1 m/s au dernier décile.

Les résultats de l'anémomètre restent globalement corrects, compte tenu de la difficulté de l'extrapolation de la mesure à 10 m.

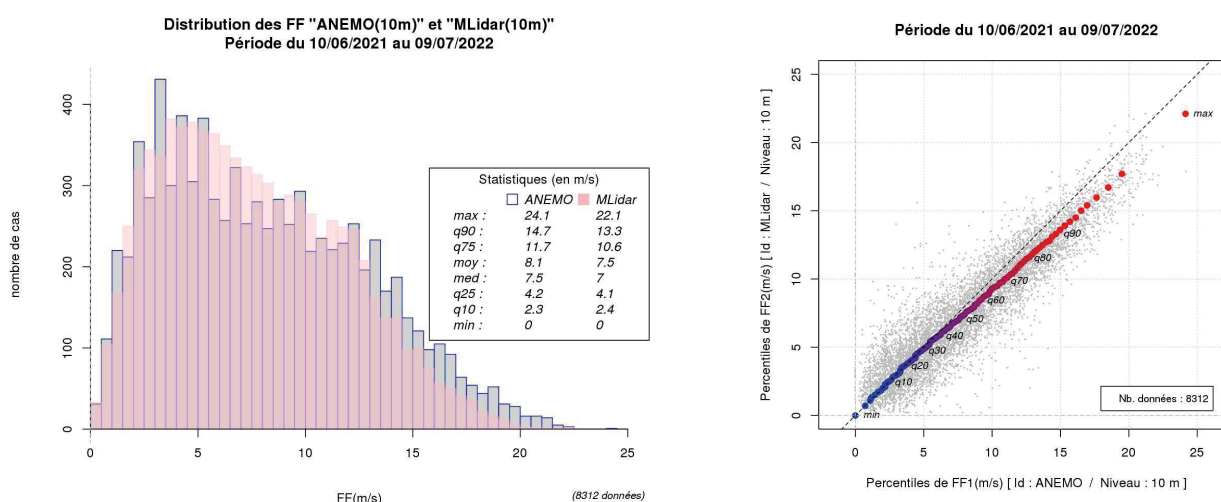


Illustration 25 : Distribution des vents horaires de l'anémomètre (à gauche) et diagramme « quantile-quantile » (à droite)

La rose des vents de l'anémomètre présente de nombreuses ressemblances avec celle du modèle AROME à 10 m. On note toutefois des différences assez marquées avec notamment des composantes ouest et est moins fréquentes pour le modèle et en revanche une composante nord-nord-ouest plus fréquente.

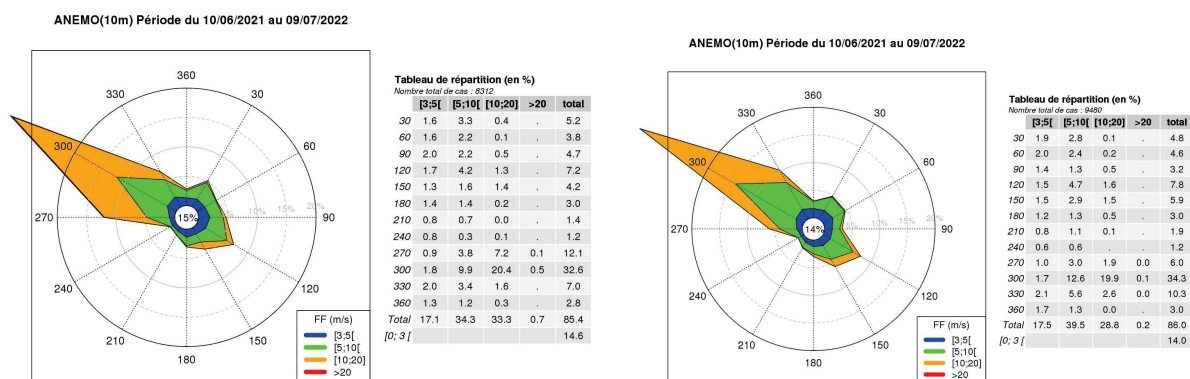


Illustration 26 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'anémomètre

5 Conclusion

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

Le monitoring du LiDAR a permis de contrôler la présence des données sur les 11 niveaux de mesure et plus précisément de vérifier la cohérence des observations de force et de direction à 100 m. Cette vérification s'est faite par des statistiques descriptives détaillant les distributions de vent, les dépassements de seuils, ou encore les répartitions par période ou secteurs.

Suite à ce contrôle, une série complète du vent horaire à 100 m a pu être créée et estimée sur quelques périodes manquantes (notamment sur la période du 20 septembre au 1^{er} octobre).

6 Bibliographie

Chatel, V., Dalphiné, A., Merle, R., Mezdoor, A., Rouchy, N., Roule, 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 du 30 octobre 2021 (coup de vent de secteur sud-est).....	39
Annexe 2 : Climatologie du 1er juin 2021 au 31 juillet 2022.....	41
Annexe 3 : Distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	49
Annexe 4 : Répartitions horaires par mois des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	51
Annexe 5 : Tableau de contingence des forces de vent du LiDAR.....	54
Annexe 6 : Roses des vents mensuelles du LiDAR à 100m (données brutes).....	54
Annexe 7 : Profils de vent du LiDAR.....	57
Annexe 8 : Cisaillement du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	60
Annexe 9 : Turbulence du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	62

Annexe 1 : Situation du 30 octobre 2021 (coup de vent de secteur sud-est)

Un vaste système dépressionnaire circule au nord des îles britanniques, se prolongeant par un profond thalweg jusqu'au nord de l'Espagne. Un minimum dépressionnaire voisin de 1000hPa se creuse en début de matinée sur l'Occitanie, générant un fort vent de sud-est sur le Golfe du Lion. Cette dépression s'accompagne d'une perturbation active avec des pluies bien marquées prenant parfois un caractère orageux. La température de mer, encore assez chaude en cette période sur la Méditerranée, accentue l'instabilité de la masse d'air.

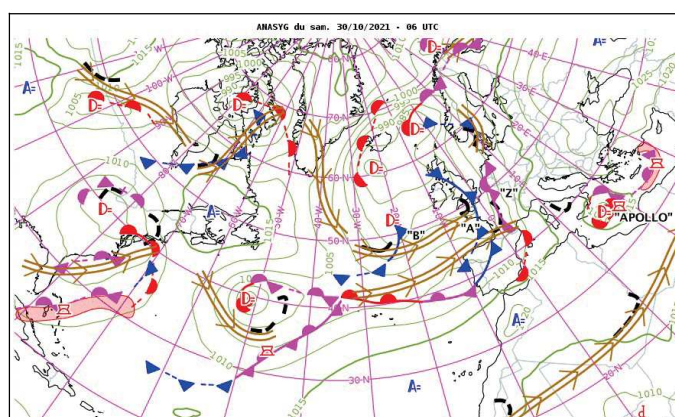


Illustration 27 : Anasyg du samedi 30 octobre à 06 UTC

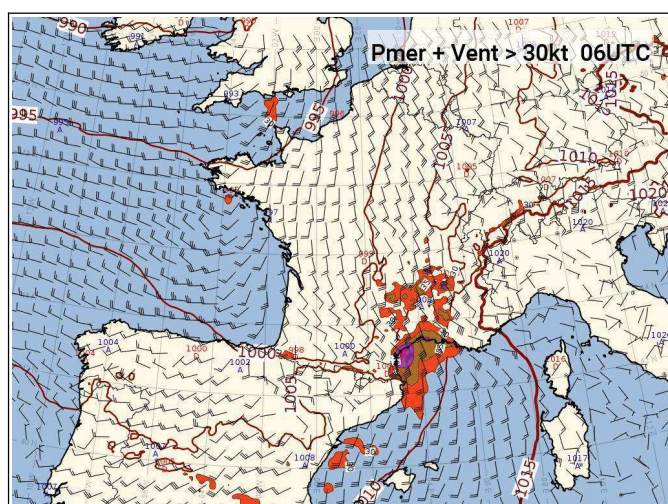


Illustration 28 : Pmer et Vent > 30 nœuds
le 30 octobre 2021 à 06 UTC

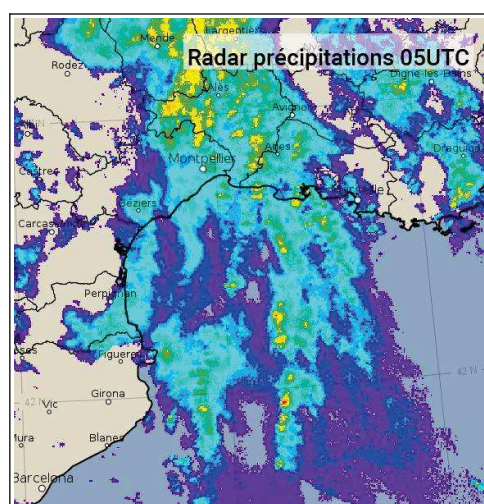


Illustration 29 : Radar précipitations
le 30 octobre 2021 à 05 UTC

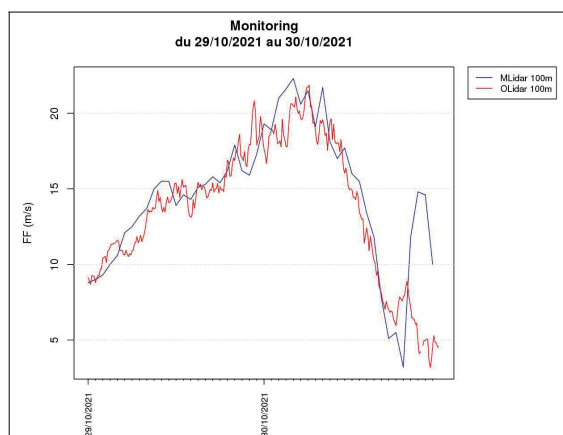


Illustration 30 : Comparaison des mesures du LiDAR avec le modèle AROME les 29 et 30 octobre 2021

On observe une très bonne corrélation entre les valeurs enregistrées par le LiDAR et celles issues de la modélisation AROME. La contiguïté des courbes traduit une excellente concordance des données que ce soit en termes d'intensité des vents ou de synchronisation temporelle. On remarque toutefois un biais plus important en fin de période qui s'explique par le passage du minimum dépressionnaire sur la zone surveillée, avec des vents qui deviennent alors très variables en direction et en force. La résolution temporelle des observations, bien meilleure que celle du modèle, fait également apparaître des variations plus rapides liées aux phénomènes locaux (averses, grains, orages,...).

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

La station météorologique de référence pour qualifier la climatologie de la zone étudiée est située à Leucate (11). La période sur laquelle portent les statistiques s'étend de 2001 à 2020.

1- Le vent

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

Les roses de vent observé pendant l'été 2021 et celles des périodes estivales 2001-2020 sont très similaires. Néanmoins, quelques différences sont à noter :

- la direction 020°-040° déjà relativement peu présente (7 % des cas), a quasiment disparu en 2021 avec 2.9 % de présence ;
- la direction 100°-120° est, par contre, plus fréquente (5.3 % sur 20 ans, 8.6 % en 2021)
- dans le secteur nord-ouest, c'est la direction 320° qui est très nettement prédominante (33.9 % en 2021 contre 28.2 % d'habitude) ;
- l'intensité du vent en 2021 est bien plus faible qu'à l'accoutumée. On n'observe, ainsi, des vents supérieurs à 8.0 m/s que dans 11.2 % des cas au lieu de 25.3 % sur 20 ans. C'est l'intensité 1.5 – 4.5 m/s qui en bénéficie le plus avec 39.1 % des cas en 2021 contre 31.2 % habituellement. A noter que la fréquence des vents calmes est inchangée.

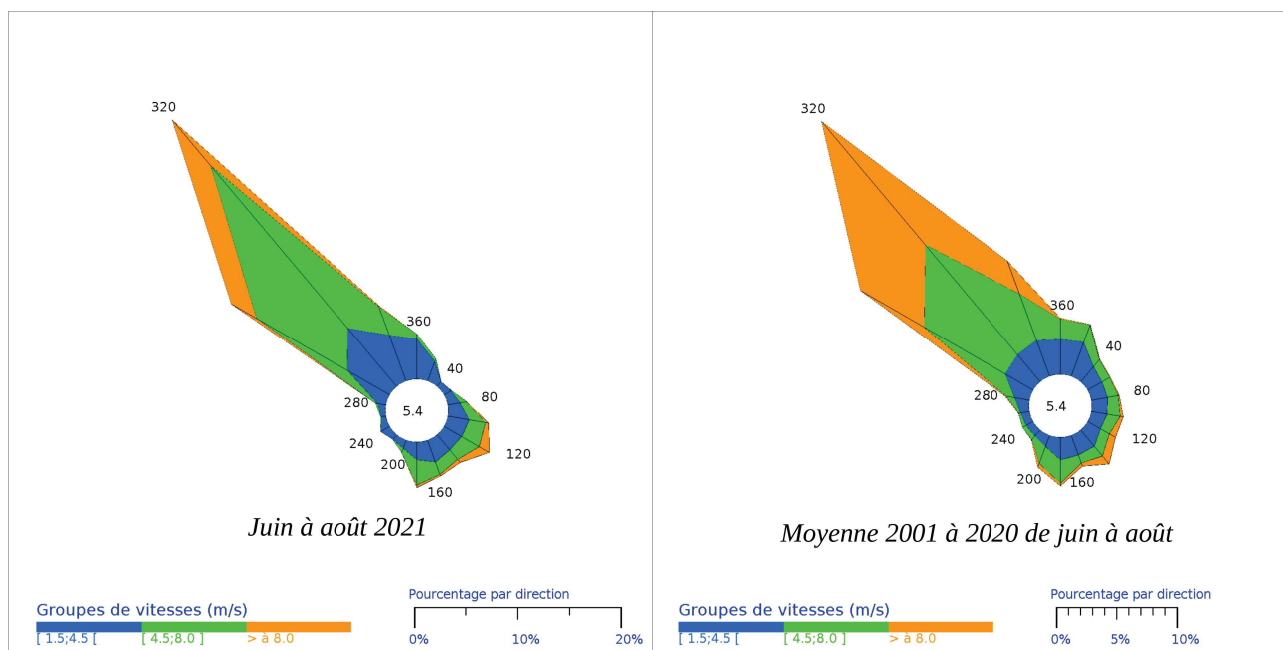


Illustration 31 : Roses des vents à l'été 2021 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Leucate

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

Ici également les formes des deux roses de vent (2021 versus 2001-2020) sont très similaires. Parmi les différences, on notera :

- un vent du secteur sud-est (du 120° au 160 °) moins présent en 2021 avec 12.7 % des cas au lieu de 16.4 % habituellement ;
- un vent de nord-ouest bien plus présent dans l'axe 320° (35.3 % en 2021 contre 27.3%) et l'axe 300° (20.5 % contre 15.3%) au détriment, entre autres du secteur 340° (7.2 % au lieu de 10.2%) ;
- mais c'est surtout en termes d'intensité que l'on retrouve les mêmes caractéristiques qu'à l'été 2021 avec une nette baisse de l'intensité globale des vents les plus forts (> 8.0 m/s) qui ont fortement diminué en fréquence en 2021 (19.1 % des cas) par rapport à la normale sur 20 ans (30.8%). Cette diminution s'est également répartie entre les vents assez forts (compris entre 4.5 et 8.0 m/s) avec une augmentation de 6.3 % en 2021 et les vents modérés (1.5 à 4.5 m/s) avec une hausse de 6.1 % de cas ;
- les vents faibles sont restés aussi présents que d'habitude avec 5.5 % des cas.

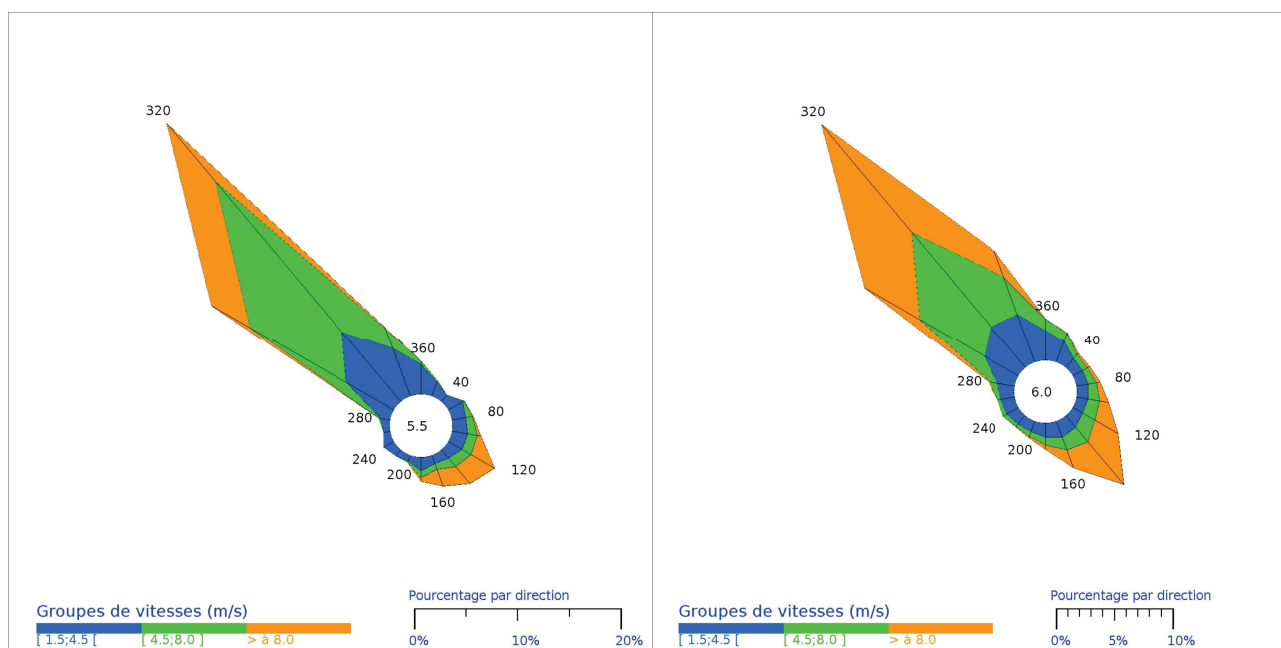


Illustration 32 : Roses des vents à l'automne 2021 et en moyenne sur la période 2001-2020 de la station de Leucate

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

Les profils de roses de vent observées pendant l'hiver 2021-2022 et celles des périodes hivernales 2001-2020 sont très similaires. Néanmoins, plusieurs différences sont à noter :

- la direction 120°-160° est très peu fréquente au cours de l'hiver 2021-2022, observé dans seulement 3.8 % des cas alors qu'elle est rencontrée dans 8.7 en moyenne sur 20 ans ;

- par contre, la direction 300°-320° est plus fréquente (51.3 % sur 20 ans, 59.2 % en 2021)
- enfin, les vents faibles à modérés (de 0 à 4.5 m/s) sont nettement plus fréquents au cours de l'hiver 2021-2022 par rapport à la normale sur 20 ans (47.5 % au lieu de 33.9 % en général) dans le secteur nord-ouest, c'est la direction 320° qui est très nettement prédominante (33.9 % en 2021 contre 28.2 % d'habitude) ;
- cette baisse d'intensité est notable sur les vents forts (supérieurs à 8.0 m/s) dont la fréquence d'occurrence est de 18.8 % lors de l'hiver 2021-2022 alors qu'ils sont habituellement observés dans 36.9 % des cas.

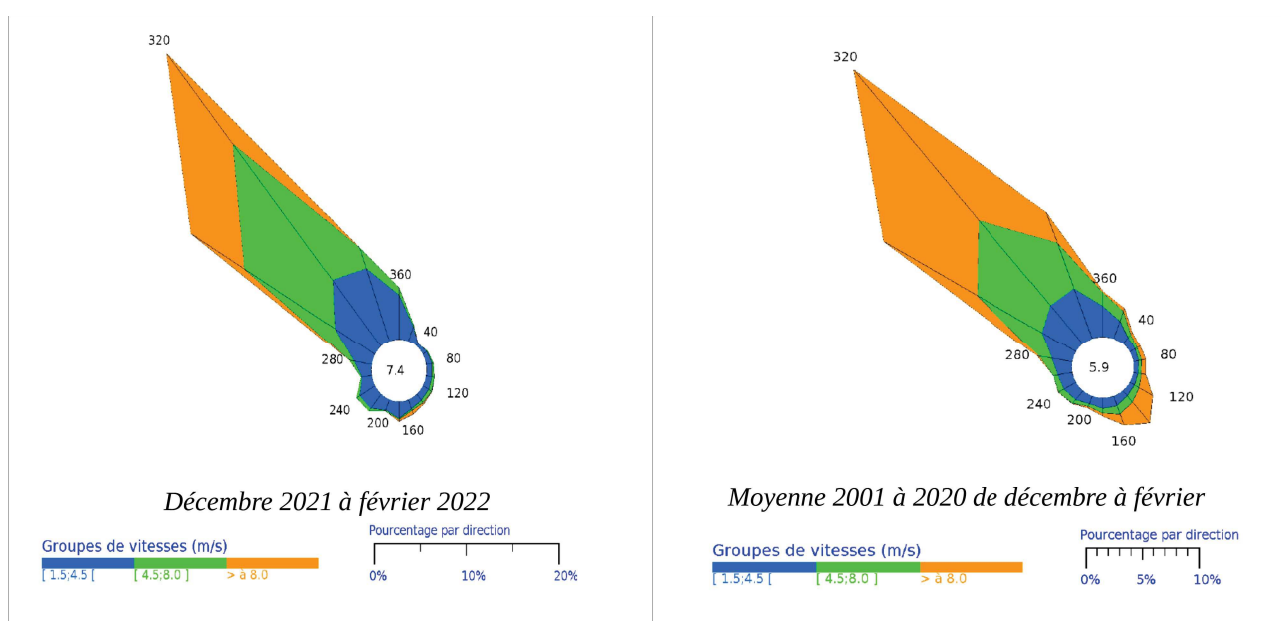


Illustration 33 : Roses des vents de l'hiver 2021-2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 pour la station de Leucate

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

Ici également les formes des deux roses de vent (2022 versus 2001-2020) sont très similaires. Parmi les différences, on notera :

- la direction 120° est plus fréquemment observée en 2022 (8.2 % au lieu de 4.3%) ;
- dans la suite de l'hiver précédent, les vents faibles à modérés (0 à 4.5 m/s) sont toujours plus fréquents que d'habitude (40 % cette année 2022 contre 32.4 % habituellement) ;
- comme pour l'hiver précédent, cette hausse des cas de vents faibles à modérés se fait au détriment des vents forts supérieurs à 8.0 m/s (24.7 % en 2022 contre 35.0 sur la période 2001-2020).

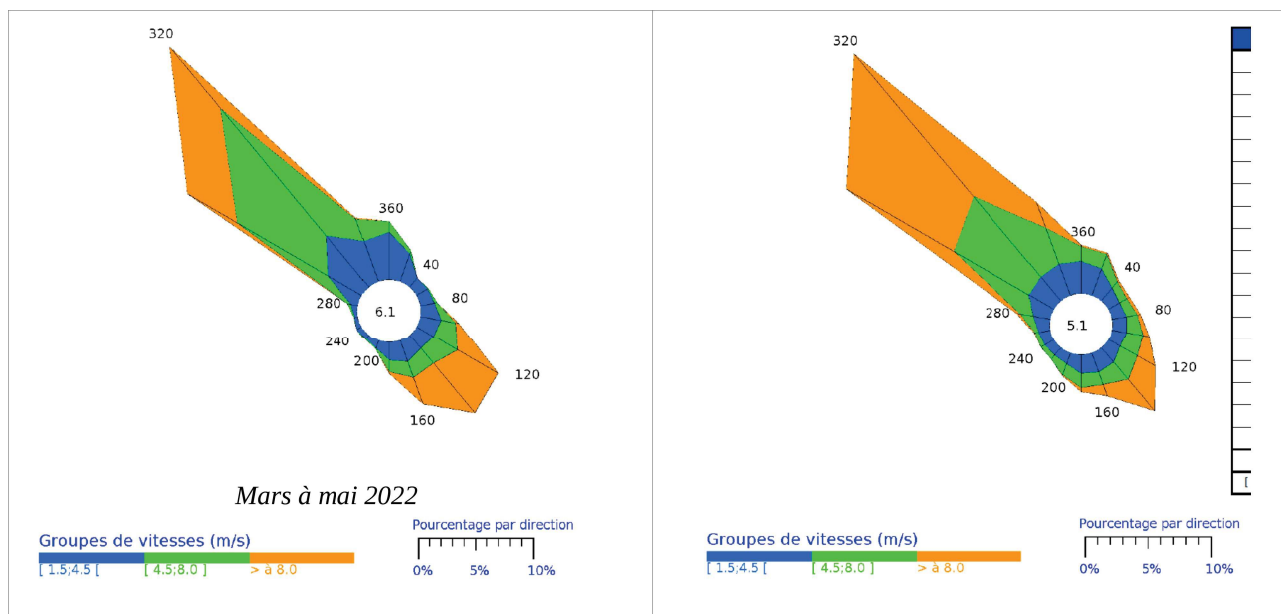


Illustration 34 : Roses des vents au printemps 2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 pour la station de Leucate

e) Analyse d'une partie de l'été 2022 (mois de juin à juillet)

On observe toujours des formes de roses de vent (2022 versus 2001-2020) très similaires au cours de cette période juin-juillet 2022 mais, parmi les différences, on notera :

- la direction 120°/160° est plus fréquemment observée en 2022 (15.1 % au lieu de 9.5%) ;
- dans la suite de l'hiver et du printemps précédents, les vents faibles à modérés (0 à 4.5 m/s) demeurent de façon notable toujours plus fréquents que d'habitude (46.7 % cette année 2022 contre 35.6 % habituellement) ;
- comme pour l'hiver précédent, cette hausse des cas de vents faibles à modérés se fait au détriment des vents forts, supérieurs à 8.0 m/s (12.9 % en 2022 contre 26.6 % habituellement).

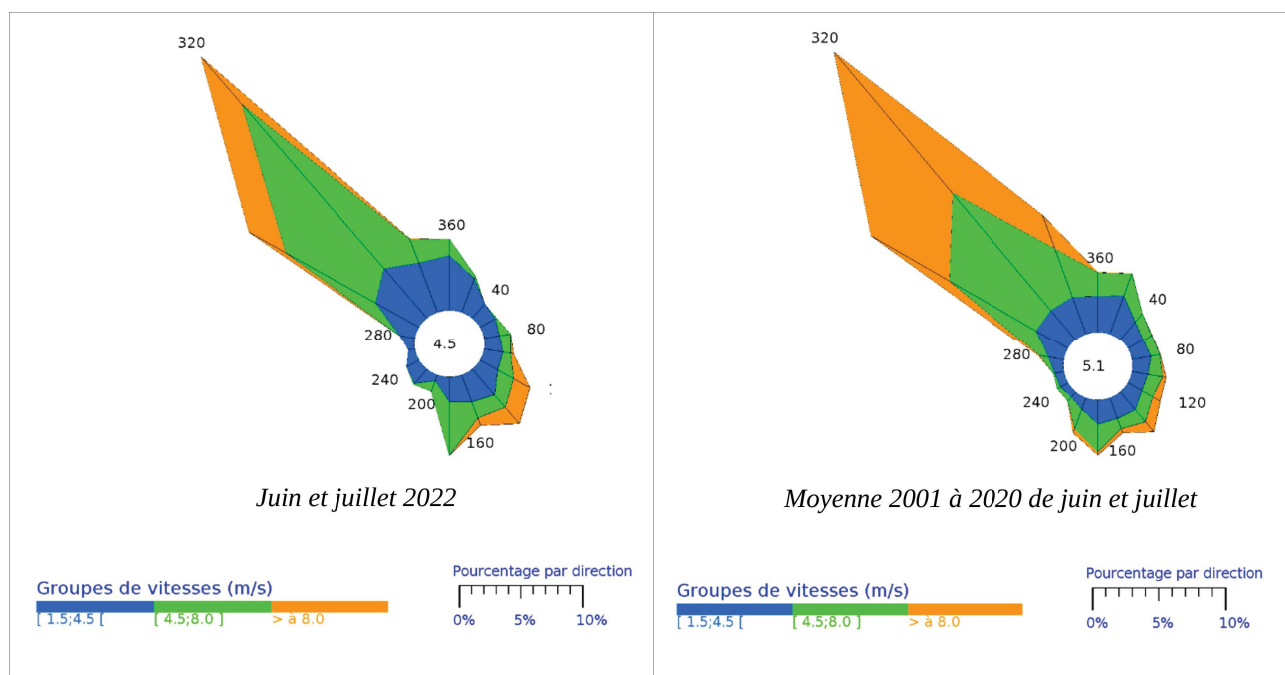


Illustration 35 : Roses des vents en juin et juillet 2022 et en moyenne sur la période 2001-2020 pour la station de Leucate

f) Tempêtes

Sur la période 2021 de la campagne, les vents forts (supérieurs à 27 m/s) ont été très rares. Ils n'ont ainsi été observés que 3 fois en novembre et une seule fois en décembre. On notera qu'habituellement on observe chaque année 13 cas de tempête sur cette période, répartis le plus souvent entre octobre et décembre.

Sur la période 2022, les vents forts sont restés relativement rares. Ils n'ont été observés que 13 fois, notamment en janvier (3 cas), en février (4 cas) puis en avril (3 cas). On notera que, statistiquement, ce nombre d'occurrences est plus faible qu'au cours de la période 1991/2020 pendant laquelle on a observé environ 20 cas de tempête chaque année sur cette période.

Date	Vent maxi (m/s)
07/11/21	30.8
08/11/21	30.3
26/11/21	27.9
04/12/21	27.3
05/01/22	31.5
09/01/22	35.0

31/01/22	33.2
01/02/22	33.9
02/02/22	28.8
07/02/22	27.4
21/02/22	30.7
12/03/22	27.5
13/03/22	28.4
01/04/22	28.7
02/04/22	29.5
23/04/22	29.9
09/06/22	27.2

3- Les températures

Sur la période 2021 de l'étude, on observe une grande variabilité des températures, plutôt à la hausse pour les températures minimales, parfois fortement en juin et en septembre et plutôt en baisse pour les températures maximales.

Sur la période 2022, les températures sont généralement supérieures aux normales avec, parfois, des anomalies chaudes particulièrement fortes. C'est le cas notamment pour les températures minimales, avec des pics supérieurs à +3°C en février, mai et juin 2022. Ces anomalies positives, bien que moins importantes pour les températures maximales, sont parfois proches des +2°C en juillet ainsi qu'en février de la même année. Par contraste, on pourra noter que le mois de mars se distingue par de fortes anomalies froides, proches de -2°C pour les maximales alors que les minimales restent très nettement supérieures aux normales.

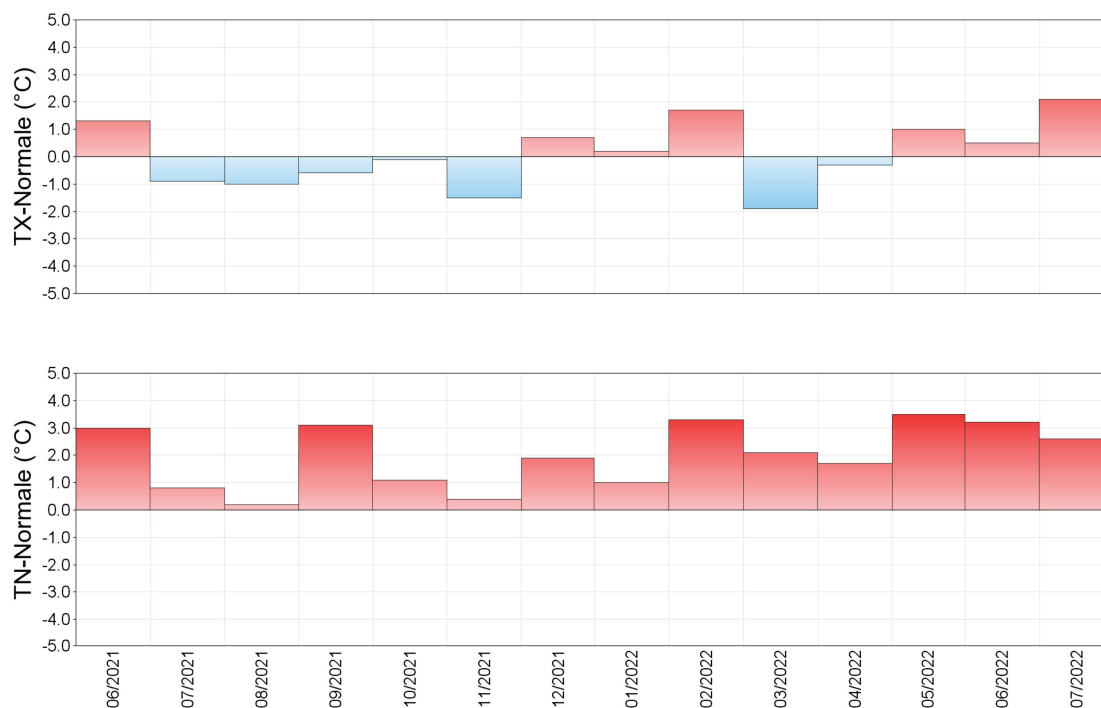


Illustration 36 : Anomalies mensuelles de températures minimales et maximales de juin 2021 à juillet 2022 à la station de Leucate (11) - Période de référence : 1991 - 2020

4- Les précipitations

Les cumuls mensuels de précipitations ont été très contrastés avec une majorité de mois secs voire très secs (février 2022 puis mai, juin, juillet et août 2022 ont enregistré des cumuls proches de 0). Juillet et septembre 2021 ainsi qu'avril 2022 ont enregistré des cumuls globalement conformes aux normales. En revanche novembre 2021 et mars 2022 ont reçu 3 à 4 fois la normale.

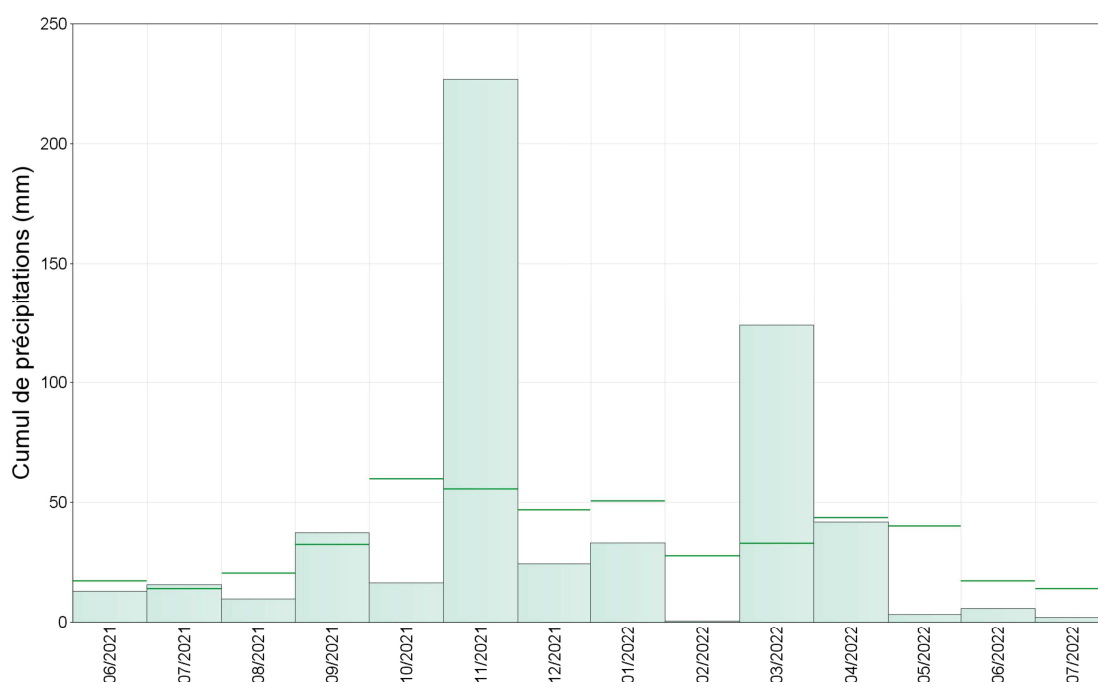
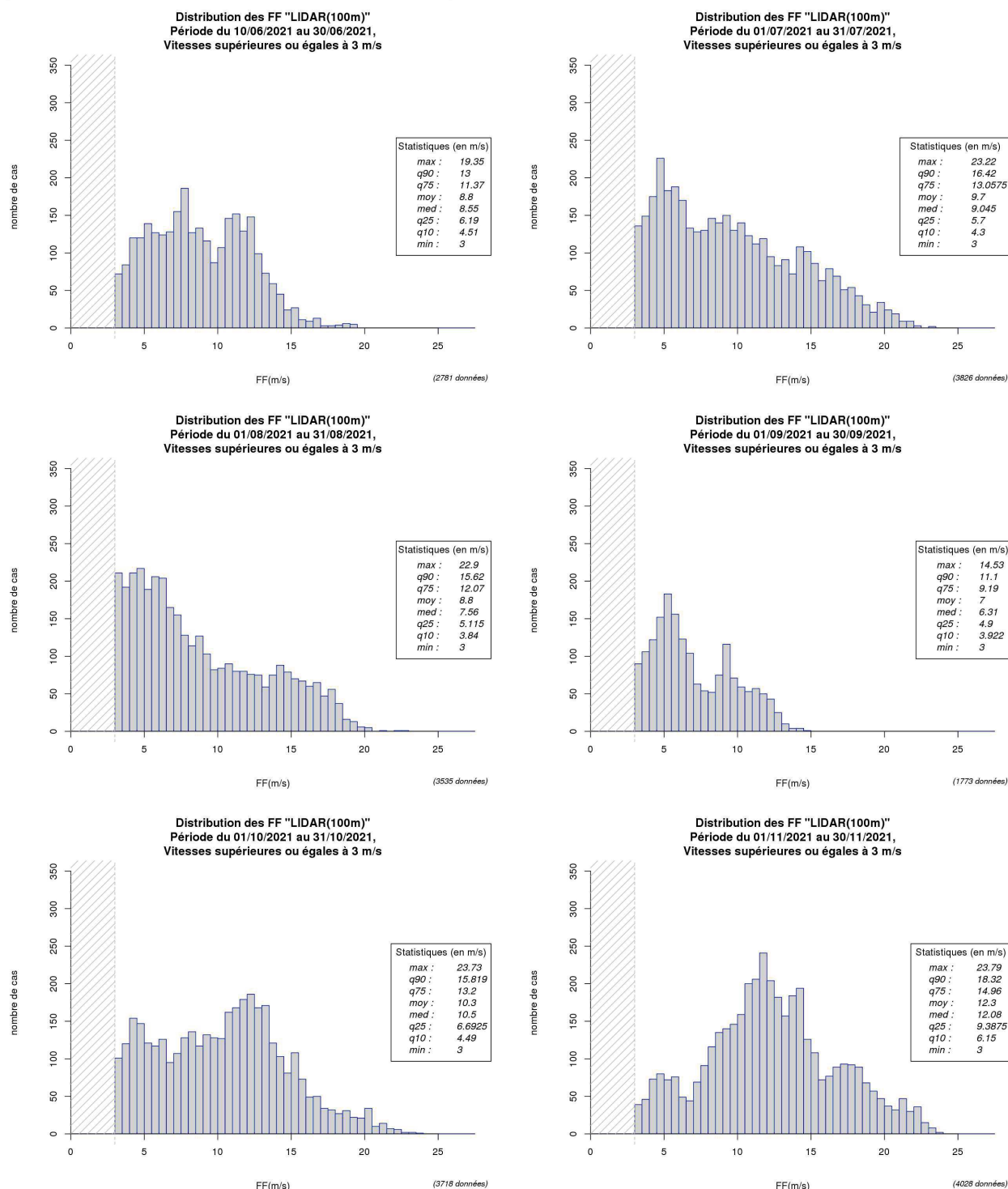
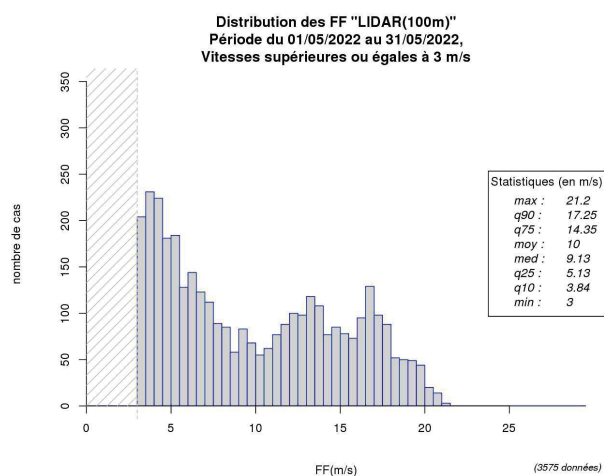
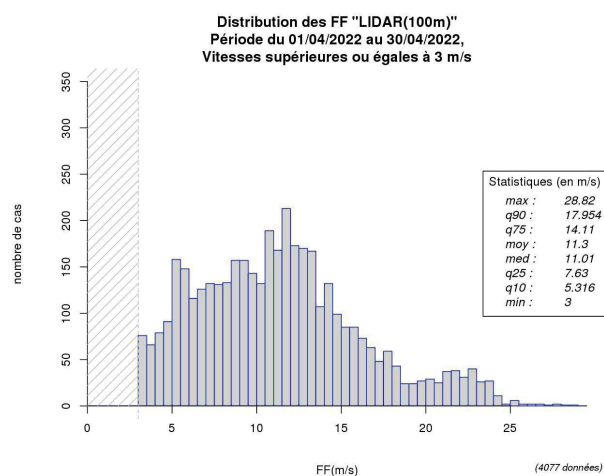
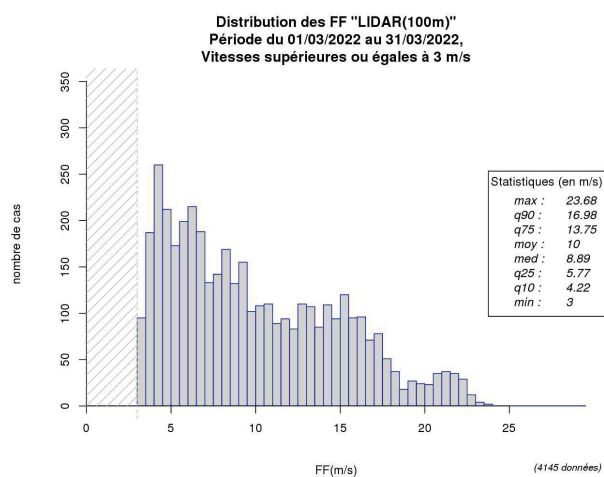
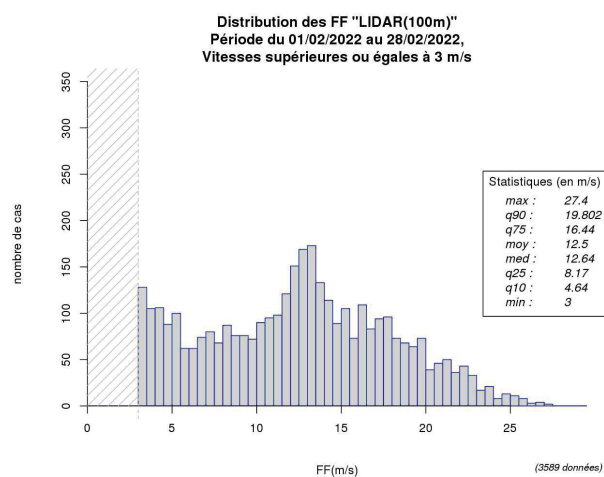
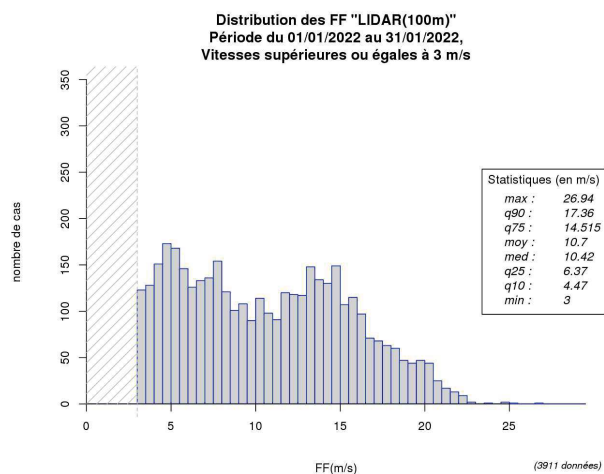
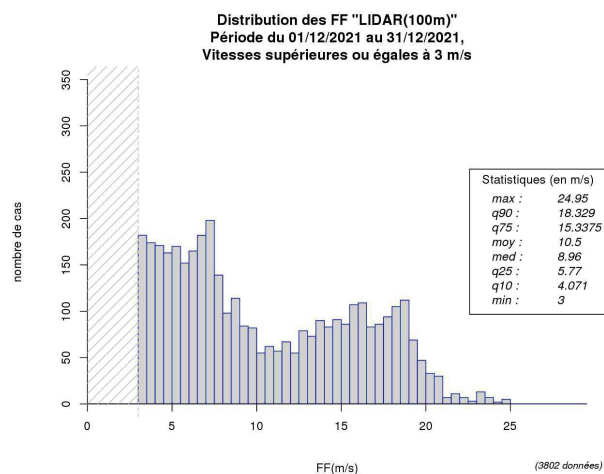
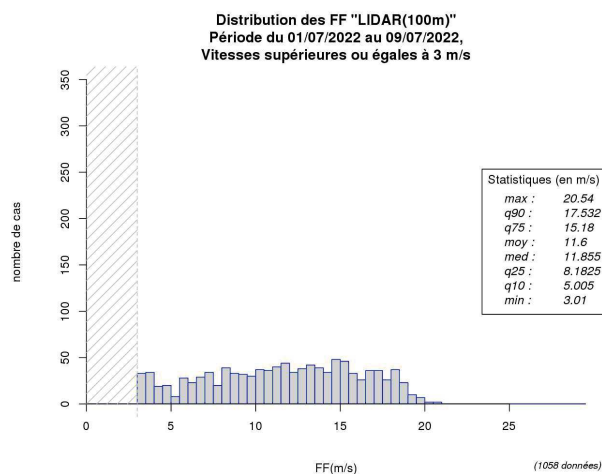
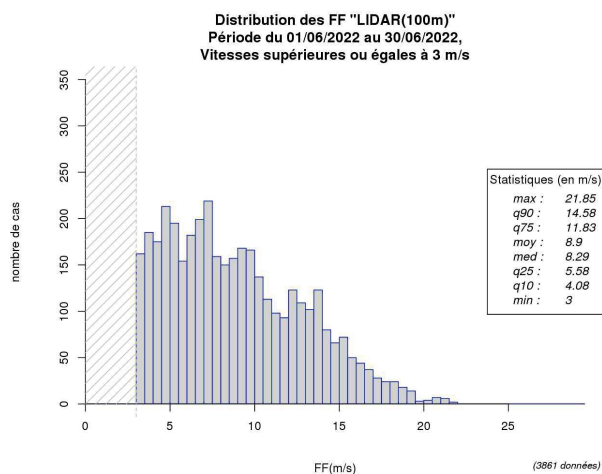


Illustration 37 : Cumuls mensuels de précipitations de juin 2021 à juillet 2022 à la station de Leucate (11) (histogrammes en bleu) et normale de précipitations (segments en vert) - Période de référence : 1991 - 2020

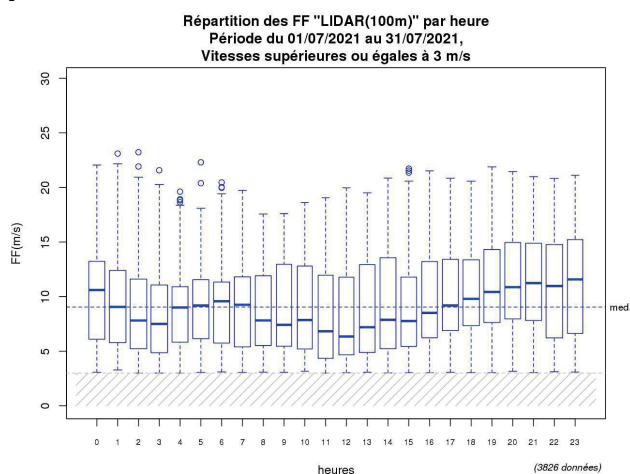
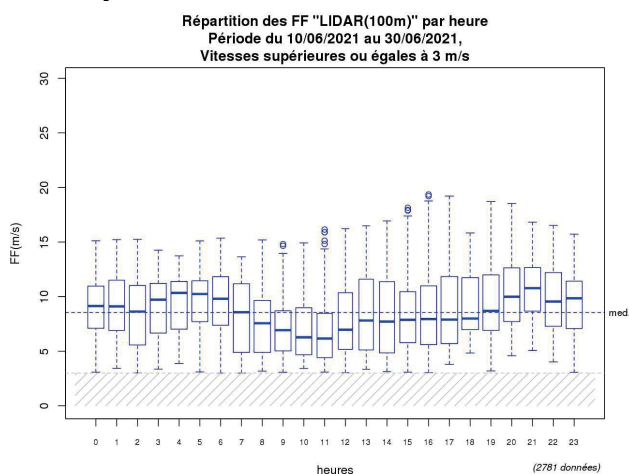
Annexe 3 : Distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)



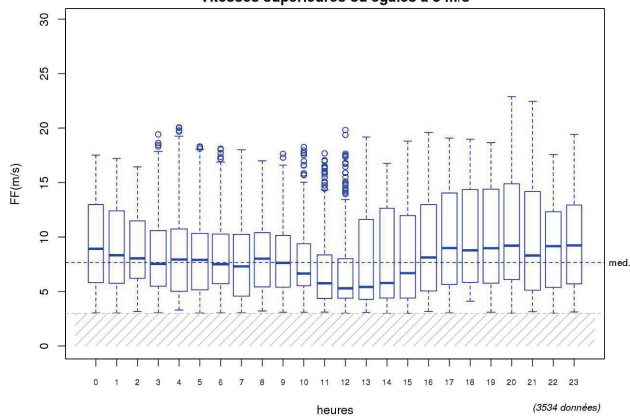




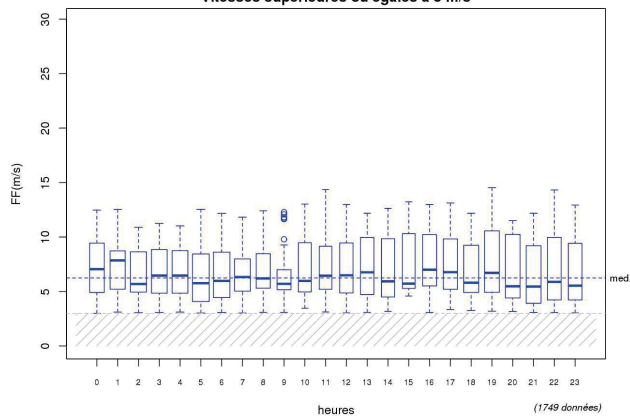
Annexe 4 : Répartitions horaires par mois des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)



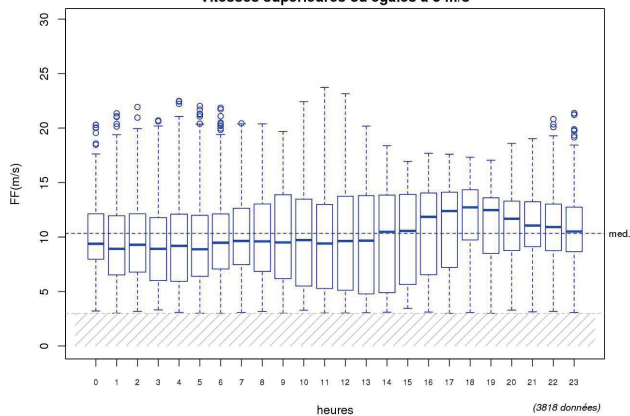
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/08/2021 au 31/08/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



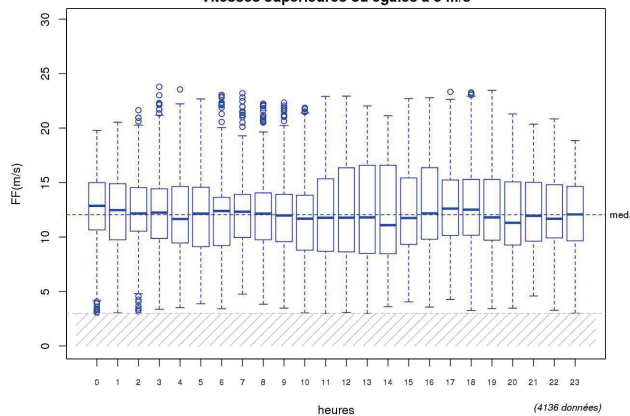
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/09/2021 au 30/09/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



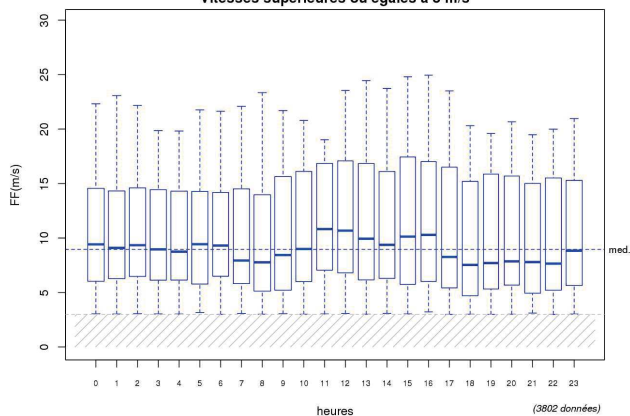
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/10/2021 au 31/10/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



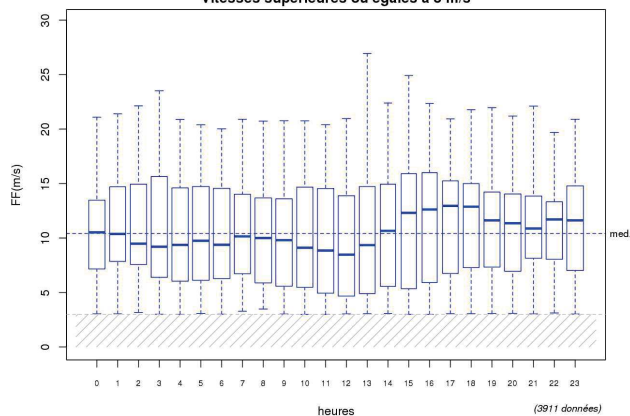
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/11/2021 au 30/11/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



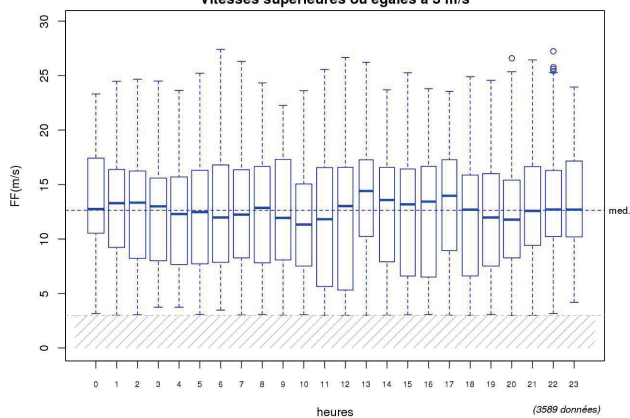
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/12/2021 au 31/12/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



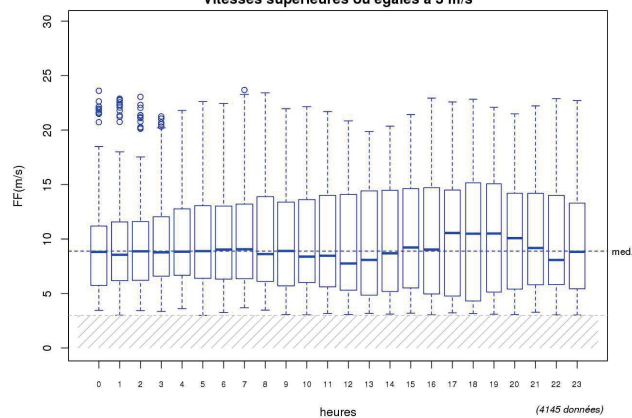
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/01/2022 au 31/01/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



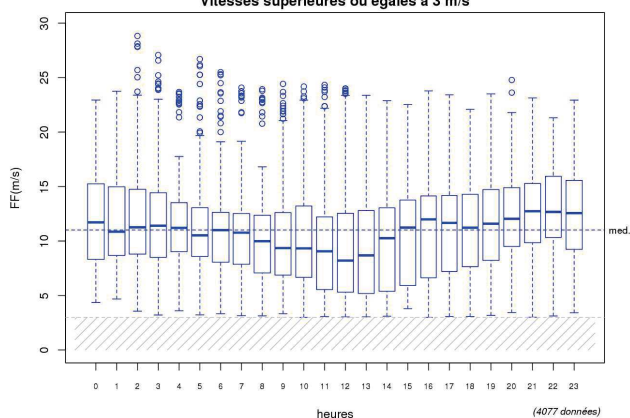
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/02/2022 au 28/02/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



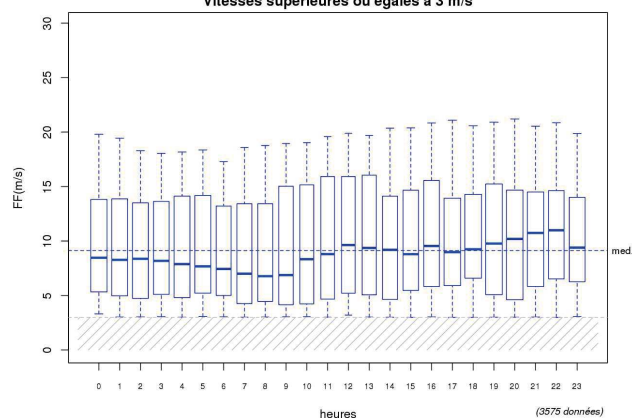
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/03/2022 au 31/03/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



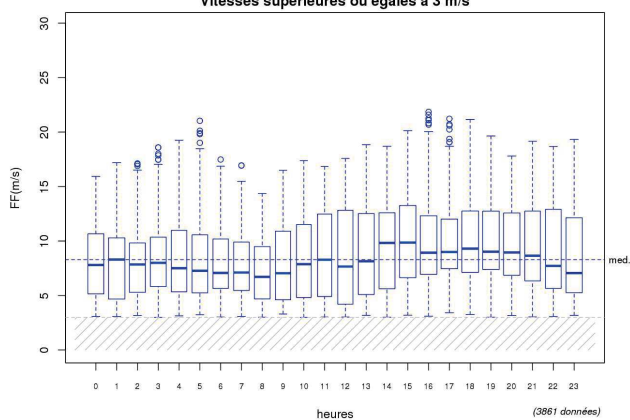
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/04/2022 au 30/04/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



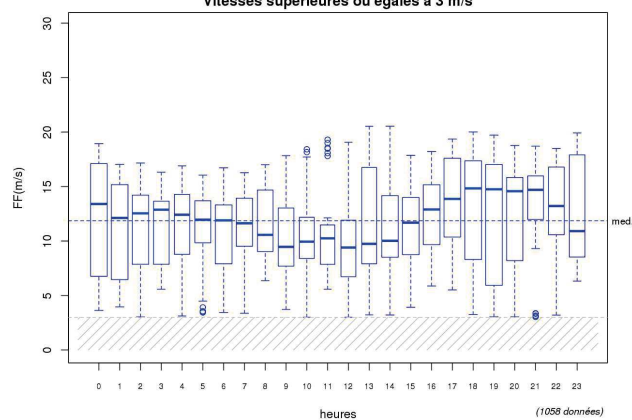
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/05/2022 au 31/05/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



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



Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/07/2022 au 09/07/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



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

	Directions en degrés												Total
	30,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	210,0	240,0	270,0	300,0	330,0	360,0	
[34,35[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[33,34[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[32,33[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[31,32[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[30,31[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[29,30[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[28,29[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0	.	.	0
[27,28[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.1	.	.	0.1
[26,27[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.2	0.1	.	0.2
[25,26[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.5	0	.	0.5
[24,25[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.7	0.1	.	0.8
[23,24[	.	.	.	0.1	.	0.1	.	.	.	2.0	0.3	.	2.5
[22,23[	.	.	.	0.4	.	0.1	.	.	0	4.2	0.3	.	5.1
[21,22[	.	.	.	0.7	0.3	0.1	.	.	0	5.7	0.8	.	7.6
[20,21[	.	.	0.1	0.7	0.7	0.4	.	.	0.3	7.0	0.9	.	10.1
[19,20[	.	.	0.1	0.8	0.5	0.9	.	.	0.4	10.6	1.5	0	14.9
[18,19[	.	.	0.2	1.0	0.7	1.0	.	.	0.5	16.5	1.4	0.1	21.3
[17,18[	.	.	0.3	1.7	1.6	0.8	.	.	0.7	21.1	1.7	0.1	28
[16,17[	.	.	0.2	1.3	2.9	0.8	.	.	0.6	24.4	3.0	0.1	33.3
[15,16[	.	.	0	1.8	3.4	0.6	0	.	1.0	27.0	3.9	0	37.7
[14,15[	0	0.1	0.1	2.2	3.4	0.7	0.1	.	1.4	33.0	4.9	0.1	46.0
[13,14[	0.2	0.3	0.2	4.6	3.4	0.6	0.1	.	2.4	34.5	6.2	0.2	52.8
[12,13[	0.8	0.7	0.4	6.7	3.6	1.1	0.4	.	1.5	34.8	7.8	0.5	58.2
[11,12[	0.7	0.5	0.6	7.0	4.4	1.6	0.7	0	1.8	31.0	9.6	0.7	58.5
[10,11[	1.0	0.8	0.6	4.8	5.7	2.8	1.0	0	2.0	26.0	9.5	1.0	55.2
[9,10[	1.1	1.8	0.8	6.6	6.5	2.7	1.7	0.4	2.0	22.0	10.0	1.8	57.3
[8,9[	2.4	3.8	1.6	6.3	5.8	3.4	2.4	1.3	1.7	16.3	11.8	2.2	58.9
[7,8[	6.0	7.6	1.6	7.0	5.3	3.8	2.3	1.1	2.5	10.6	11.3	3.4	62.5
[6,7[	5.9	10.4	4.1	8.9	5.5	4.5	2.0	1.1	2.5	8.1	9.7	3.8	66.5
[5,6[	6.7	11.5	6.4	8.9	6.7	5.5	2.0	1.7	2.9	6.2	8.3	6.5	73.4
[4,5[	8.1	9.3	7.8	9.3	8.0	6.6	2.4	1.9	3.4	5.7	7.8	7.0	77.4
[3,4[	7.7	5.7	6.9	7.8	6.0	6.1	2.3	2.5	3.6	4.4	5.7	6.4	65.1
[0,3[	9.6	9.6	11.4	12.3	9.7	8.2	6.5	6.7	6.0	7.1	9.2	9.7	106.1
Total	50.3	62	43.4	101	83.9	52.4	23.8	16.8	37.3	359.6	125.9	43.6	1000

*Analyse de répartition du vent LiDAR observé à 100 m sur la période du 10 juin 2021 au 9 juillet 2022
(en pour mille)*

Les vents inférieurs à 3 m/s (non comptabilisés dans les statistiques) apparaissent ici en surligné dans le tableau. Ils représentent 10.6 % des cas.

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

JUIN 2021 - LIDAR (100m)

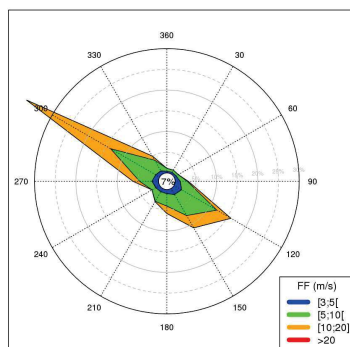


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 2979

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.5	0.6	-	-	1.1
60	0.6	0.6	-	-	1.2
90	1.2	1.7	0.2	-	3.2
120	2.1	9.8	4.0	-	15.9
150	1.7	5.8	3.4	-	11.0
180	1.0	3.0	1.8	-	5.8
210	0.9	2.7	0.1	-	3.7
240	1.1	1.0	-	-	2.1
270	1.6	3.0	1.6	-	6.2
300	1.1	12.6	23.4	-	37.1
330	0.9	3.0	1.1	-	5.0
360	0.4	0.7	-	-	1.1
Total	13.3	44.4	35.7	-	93.4
[0; 3[					6.6

JUILLET 2021 - LIDAR (100m)

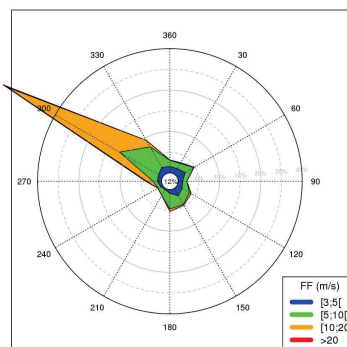


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4339

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.5	1.4	0.2	-	3.2
60	2.3	2.4	0.1	-	4.8
90	1.1	1.0	-	-	2.1
120	1.4	2.0	0.5	-	3.9
150	2.1	2.4	0.3	-	4.7
180	0.9	3.8	0.6	-	5.3
210	0.3	1.6	0.0	-	1.9
240	0.6	0.8	0.0	-	1.4
270	1.0	1.0	1.5	0.3	3.9
300	1.2	10.9	31.3	1.2	44.5
330	1.9	5.7	1.8	-	9.4
360	1.5	1.5	0.1	-	3.1
Total	15.8	34.5	36.3	1.5	88.2
[0; 3[					11.8

AOÛT 2021 - LIDAR (100m)

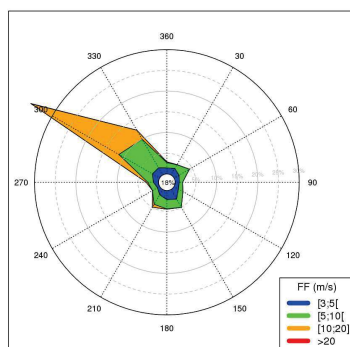


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4294

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.8	1.0	0.0	-	2.9
60	1.4	2.9	-	-	4.3
90	1.0	0.8	-	-	1.8
120	1.2	1.2	-	-	2.5
150	2.7	2.3	-	-	5.0
180	2.2	2.2	0.1	-	4.5
210	1.5	2.7	0.8	-	5.0
240	0.6	1.4	-	-	2.0
270	1.3	1.4	0.4	-	3.0
300	2.0	9.4	24.4	0.2	36.0
330	2.0	7.9	2.6	-	12.5
360	1.5	1.3	0.2	-	2.9
Total	19.4	34.3	28.5	0.2	82.3
[0; 3[					17.7

SEPTEMBRE 2021 - LIDAR (100m)

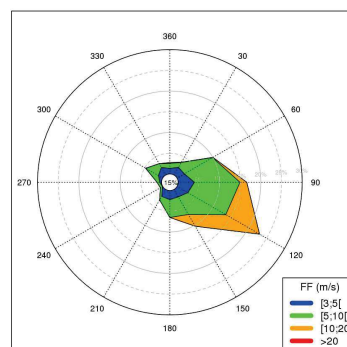


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 2080

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	2.2	1.3	0.0	-	3.6
60	2.1	7.8	0.1	-	10.0
90	3.9	11.0	1.6	-	16.6
120	3.0	10.6	9.4	-	23.0
150	2.1	4.9	3.3	-	10.2
180	2.2	4.3	-	-	6.5
210	1.9	1.0	-	-	2.9
240	0.1	0.5	-	-	0.6
270	0.4	0.7	-	-	1.1
300	1.2	3.5	0.0	-	4.8
330	2.1	1.1	-	-	3.2
360	1.3	1.2	0.2	-	2.7
Total	22.6	47.9	14.7	-	85.2
[0; 3[					14.8

OCTOBRE 2021 - LIDAR (100m)

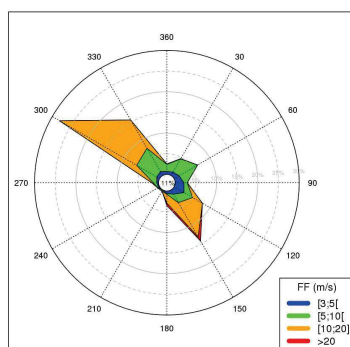


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4314

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.0	3.7	0.1	-	4.7
60	1.4	5.2	-	-	6.6
90	2.2	0.8	-	-	2.9
120	2.8	2.4	2.7	-	7.9
150	1.2	2.3	9.6	1.1	14.3
180	0.6	0.2	2.1	0.6	3.5
210	0.1	0.3	-	-	0.3
240	0.3	0.2	-	-	0.5
270	0.4	0.9	0.3	-	1.7
300	0.8	5.6	21.6	-	28.0
330	1.1	6.5	7.9	-	15.5
360	0.7	1.7	0.1	-	2.5
Total	12.6	29.7	44.4	1.7	88.5
[0; 3[					11.5

NOVEMBRE 2021 - LIDAR (100m)

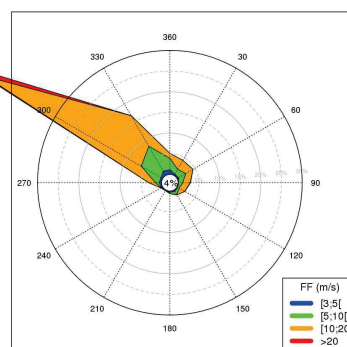


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4208

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.4	1.4	2.5	-	4.3
60	0.4	2.0	2.0	-	4.5
90	0.1	1.0	1.8	0.1	3.0
120	0.2	0.4	1.6	0.0	2.2
150	0.4	0.9	0.1	-	1.4
180	0.4	0.3	-	-	0.6
210	0.1	0.1	-	-	0.2
240	0.4	0.1	0.0	-	0.5
270	0.6	0.9	1.6	0.0	3.1
300	0.4	5.6	43.4	4.8	54.1
330	1.2	6.9	8.5	0.0	16.7
360	1.1	2.8	1.2	-	5.1
Total	5.7	22.3	62.9	4.9	95.7
[0; 3[					4.3

DÉCEMBRE 2021 - LIDAR (100m)

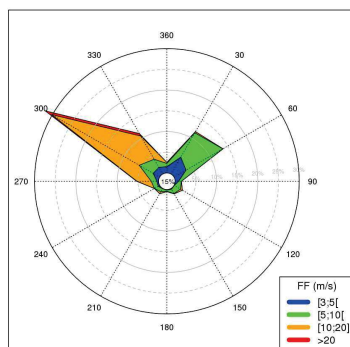


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4452

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	4.7	6.8	0.3	.	11.8
60	3.4	10.3	0.0	.	13.7
90	0.9	0.7	.	.	1.5
120	0.1	1.7	0.5	.	2.3
150	0.2	1.2	0.1	.	1.5
180	0.1	0.3	0.1	.	0.5
210	0.1	0.8	0.5	.	1.5
240	0.4	1.1	.	.	1.5
270	0.4	1.3	3.5	0.1	5.3
300	1.8	3.9	24.5	1.8	32.0
330	1.9	2.3	6.4	0.7	11.3
360	1.5	0.8	0.2	.	2.5
Total	15.5	31.1	36.2	2.6	85.4
[0; 3 [					14.6

JANVIER 2022 - LIDAR (100m)

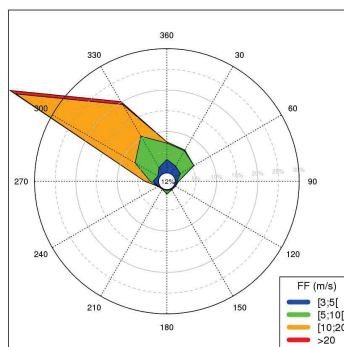


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4426

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	2.2	4.3	0.2	.	6.7
60	1.8	3.8	.	.	5.5
90	0.5	0.3	.	.	0.8
120	0.4	.	.	.	0.4
150	0.4	.	.	.	0.4
180	0.2	0.8	.	.	1.1
210	0.2	.	.	.	0.2
240	0.4	0.0	.	.	0.5
270	1.3	0.7	1.3	.	3.3
300	0.5	6.4	33.3	1.7	41.8
330	1.8	8.7	8.8	0.8	20.2
360	3.3	3.9	0.3	.	7.5
Total	13.0	29.0	43.8	2.6	88.4
[0; 3 [					11.6

FÉVRIER 2022 - LIDAR (100m)

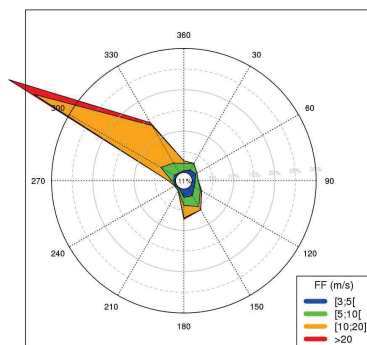


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4017

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.0	1.8	0.0	.	2.8
60	1.3	0.3	.	.	1.6
90	0.8	0.7	.	.	1.5
120	0.9	1.7	0.3	.	3.0
150	2.2	3.0	0.9	.	6.1
180	2.1	1.9	3.0	0.3	7.3
210	0.2	0.4	0.1	.	0.8
240	0.4	0.2	.	.	0.5
270	0.4	0.5	0.8	.	1.7
300	0.7	3.7	35.3	7.1	46.9
330	0.2	2.7	10.5	0.8	14.2
360	0.4	1.8	0.6	.	2.8
Total	10.6	18.8	51.6	8.3	89.3
[0; 3 [					10.7

MARS 2022 - LIDAR (100m)

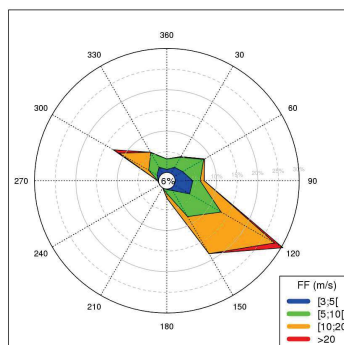


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4424

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.7	2.8	0.2	.	4.7
60	2.4	5.9	0.2	.	8.5
90	4.3	1.8	1.0	.	7.0
120	4.4	8.8	15.0	2.3	30.4
150	0.8	7.3	10.4	.	18.4
180	0.2	0.9	1.1	.	2.2
210	.	.	.	.	.
240	.	.	.	.	.
270	0.1	0.1	0.0	.	0.2
300	0.8	2.3	8.3	1.7	13.0
330	1.7	4.0	0.2	.	6.0
360	0.7	2.5	.	.	3.3
Total	17.0	36.3	36.3	4.0	93.7
[0; 3 [					6.3

AVRIL 2022 - LIDAR (100m)

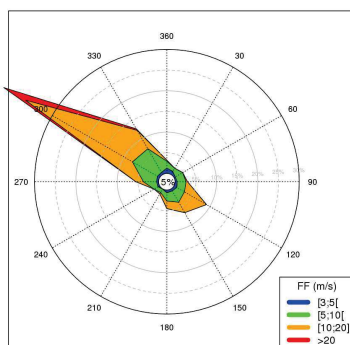


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 4277

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.9	0.9	0.0	.	1.8
60	0.3	2.1	0.0	.	2.4
90	0.5	2.1	0.4	.	3.0
120	0.8	2.1	6.1	.	9.0
150	0.6	3.1	2.9	.	6.6
180	0.7	2.0	1.8	0.0	4.5
210	0.1	0.9	0.4	.	1.4
240	0.4	1.1	.	.	1.6
270	0.5	3.2	1.8	.	5.5
300	0.6	7.0	29.8	6.1	43.5
330	0.6	6.6	5.1	0.4	12.8
360	1.3	1.7	0.3	.	3.2
Total	7.3	32.8	48.7	6.5	95.3
[0; 3 [					4.7

MAI 2022 - LIDAR (100m)

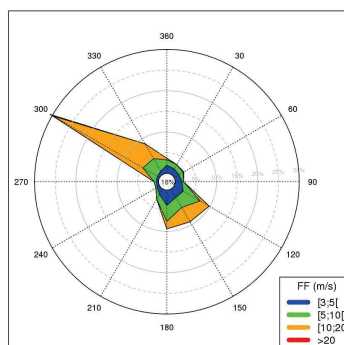
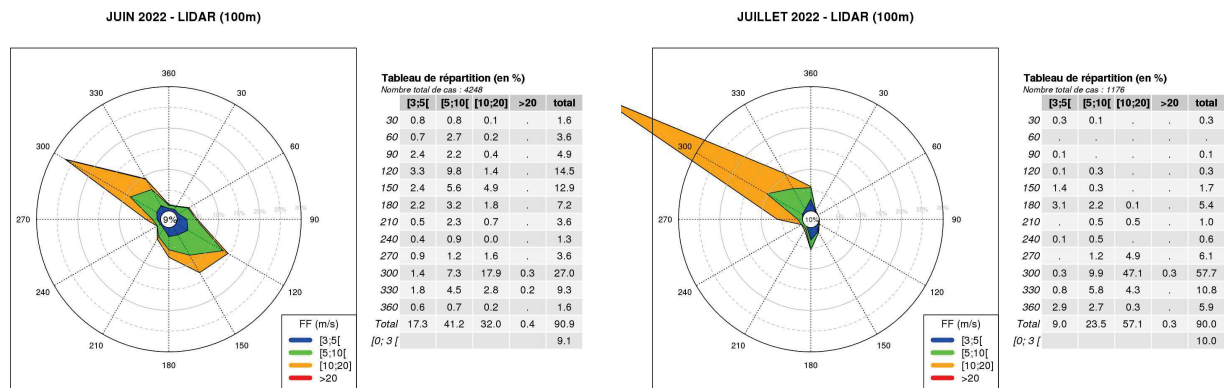


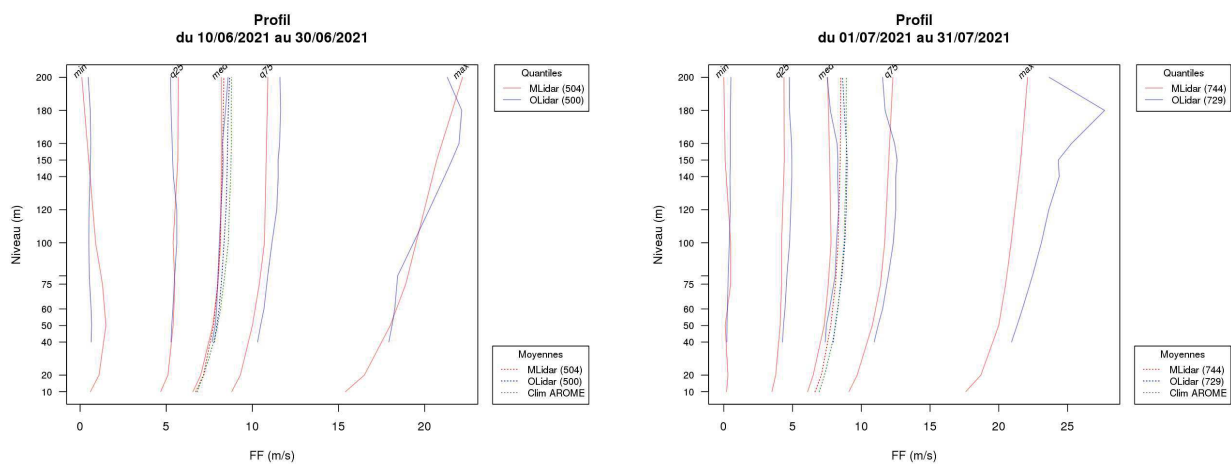
Tableau de répartition (en %)

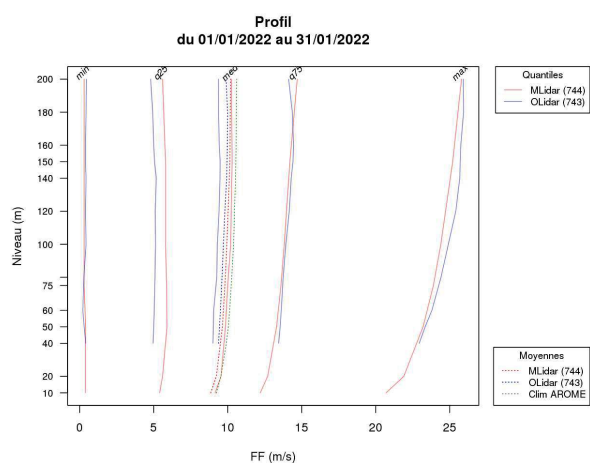
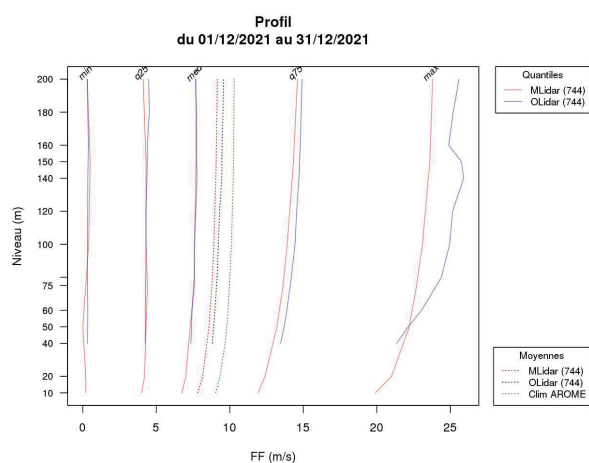
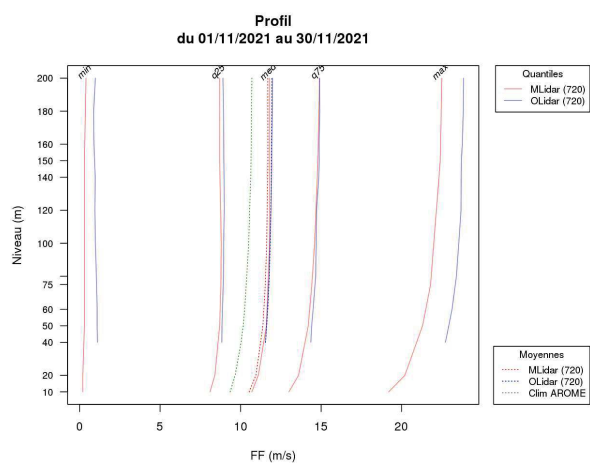
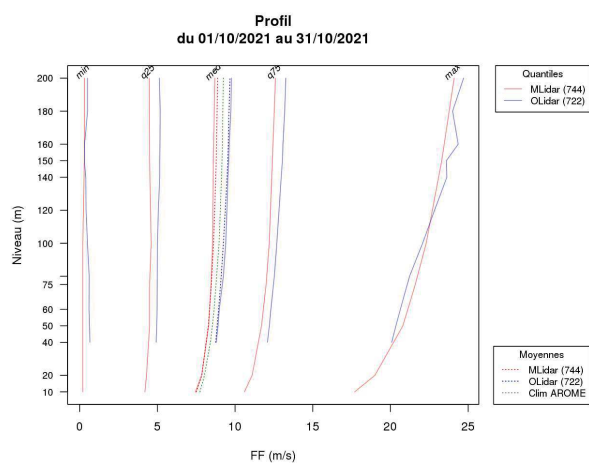
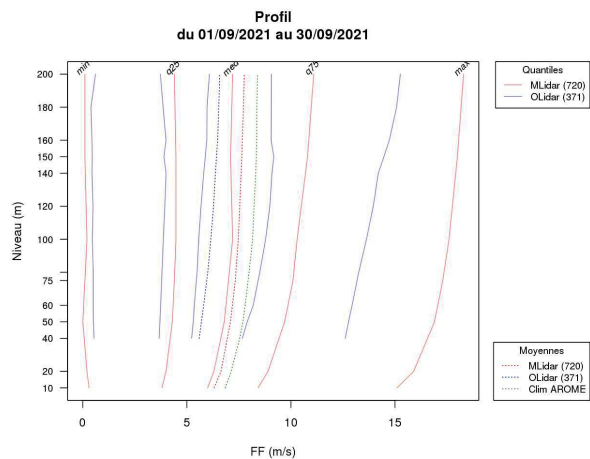
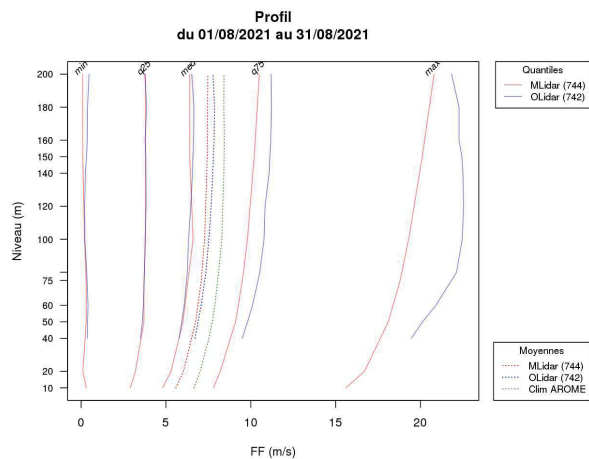
Nombre total de cas : 4285

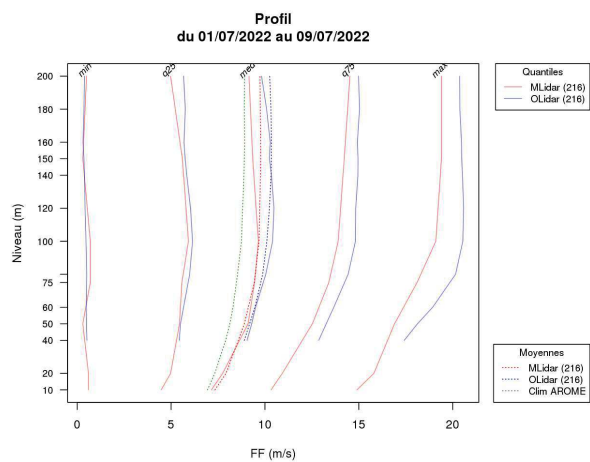
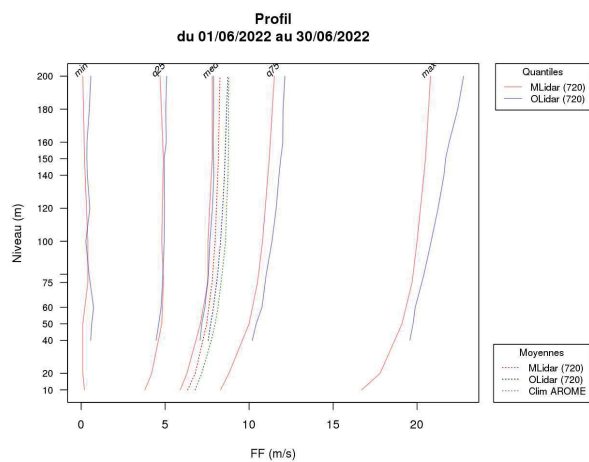
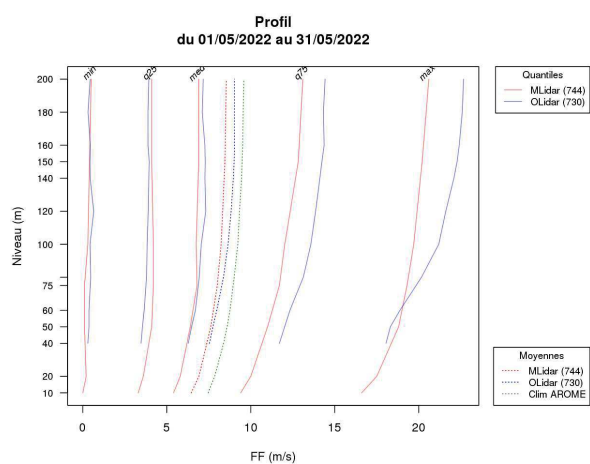
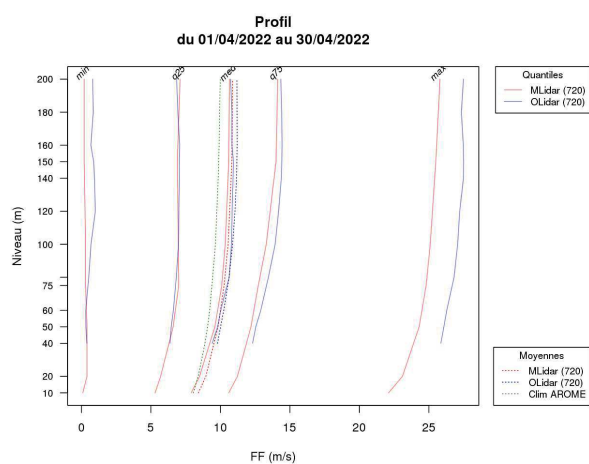
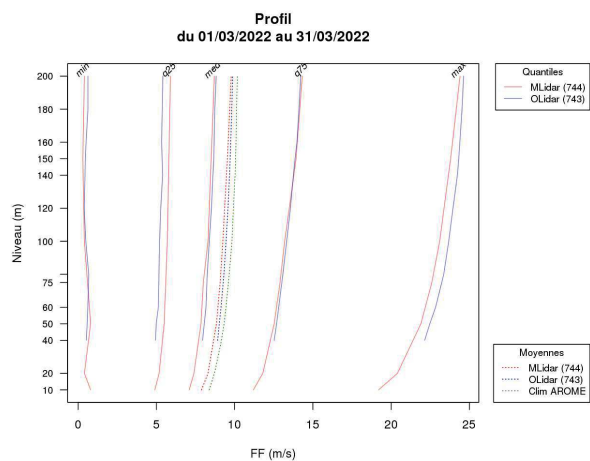
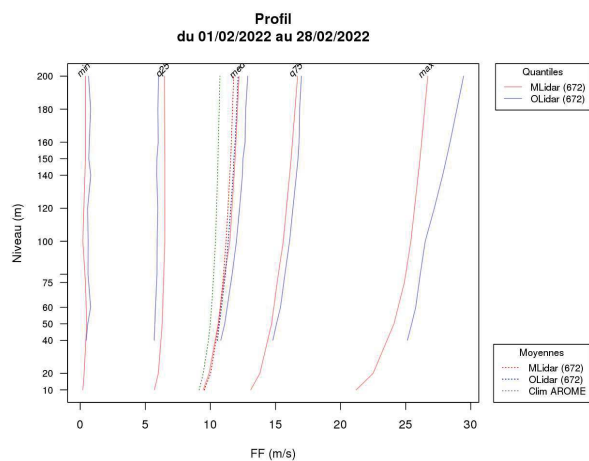
	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.5	1.2	.	.	2.8
60	1.4	1.1	0.2	.	2.7
90	1.7	0.4	.	.	2.0
120	2.6	4.7	2.5	.	9.8
150	2.4	2.8	4.0	.	9.2
180	3.7	3.9	1.8	.	9.4
210	1.6	1.3	.	.	2.9
240	0.7	0.4	.	.	1.1
270	0.6	0.5	.	.	1.1
300	0.6	4.1	25.0	0.9	30.6
330	0.9	3.5	4.2	.	8.6
360	2.0	1.3	0.4	.	3.7
Total	19.7	25.2	38.1	0.9	83.8
[0; 3 [					16.2



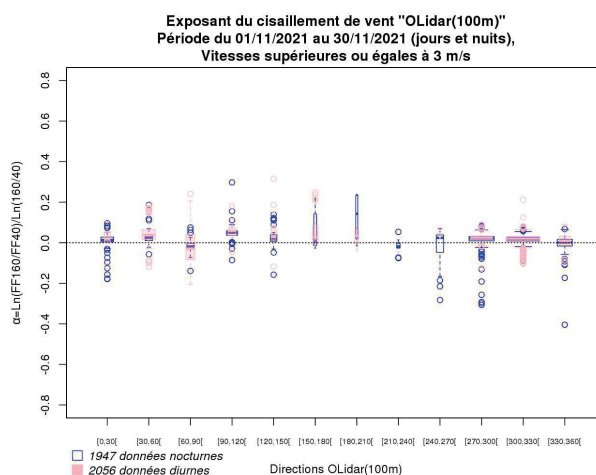
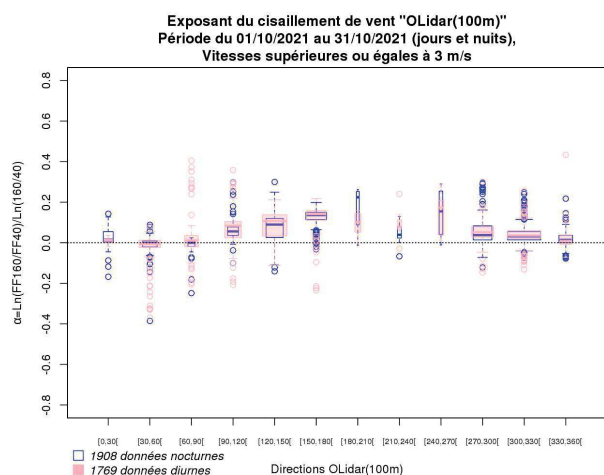
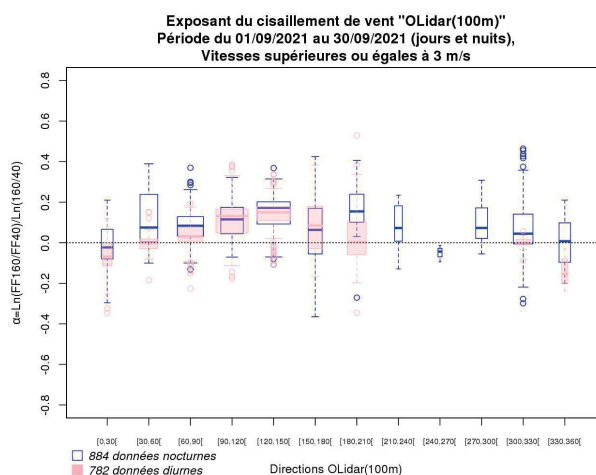
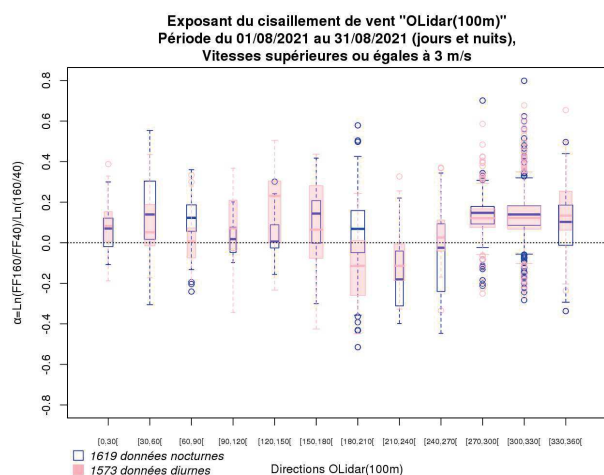
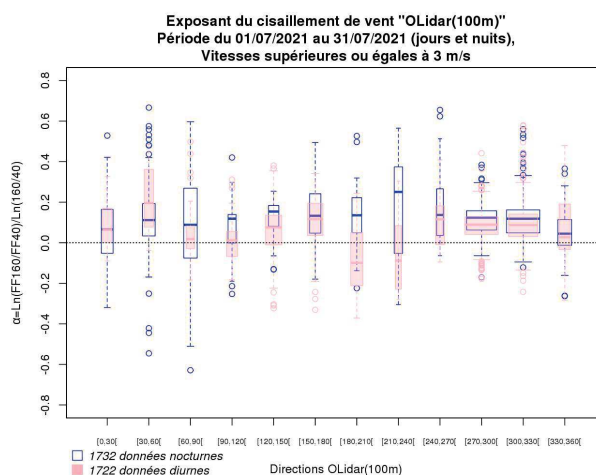
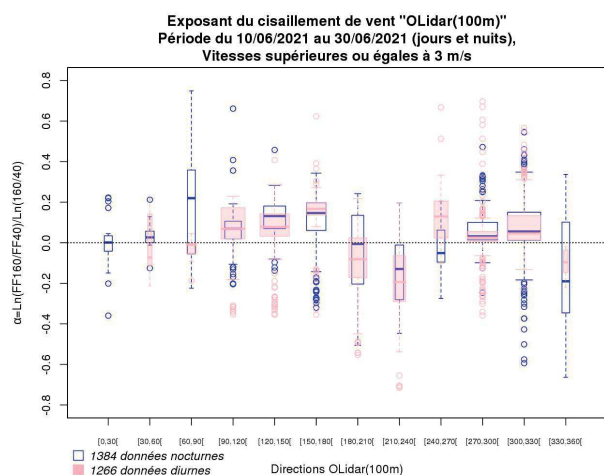
Annexe 7 : Profils de vent du LiDAR



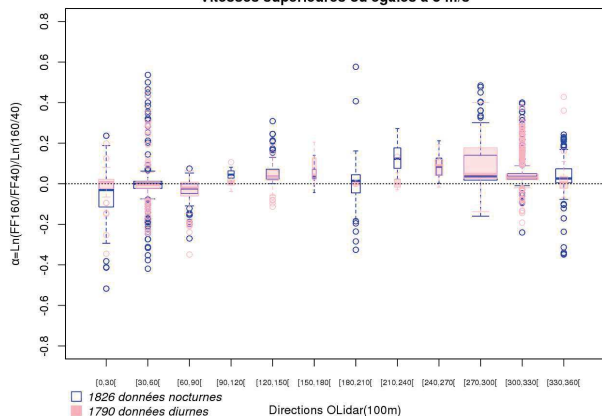




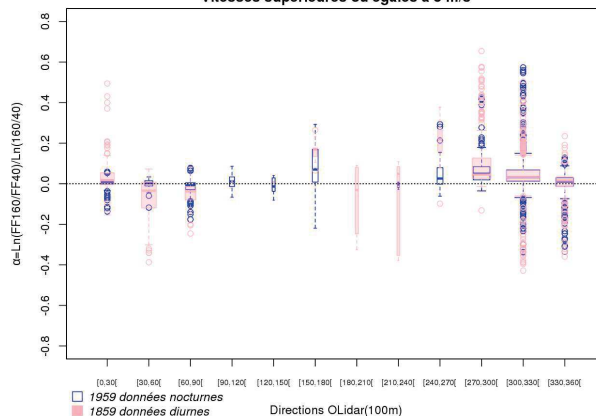
Annexe 8 : Cisaillement du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)



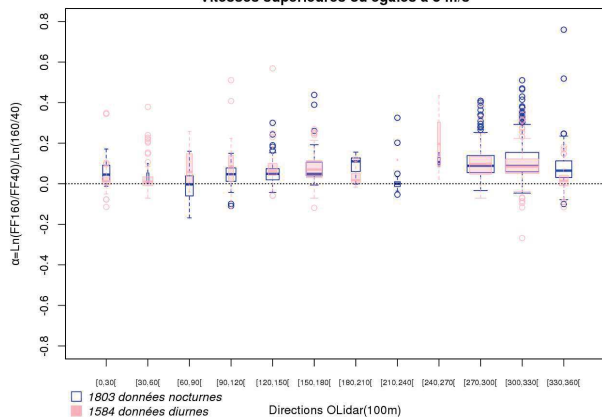
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/12/2021 au 31/12/2021 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



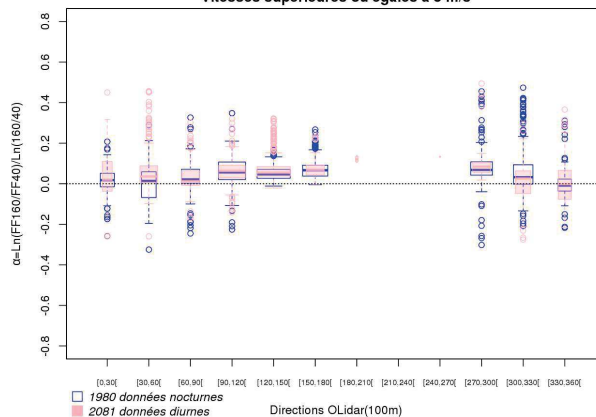
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/01/2022 au 31/01/2022 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



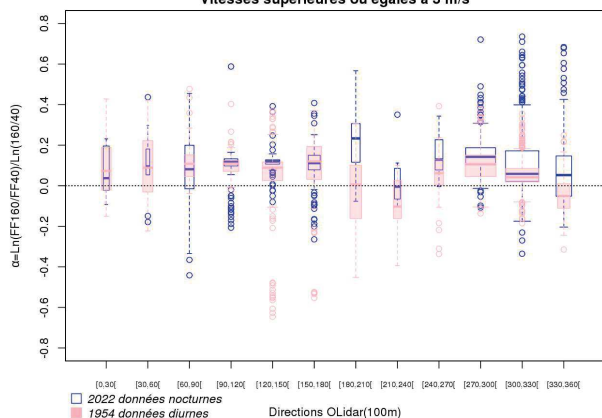
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/02/2022 au 28/02/2022 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



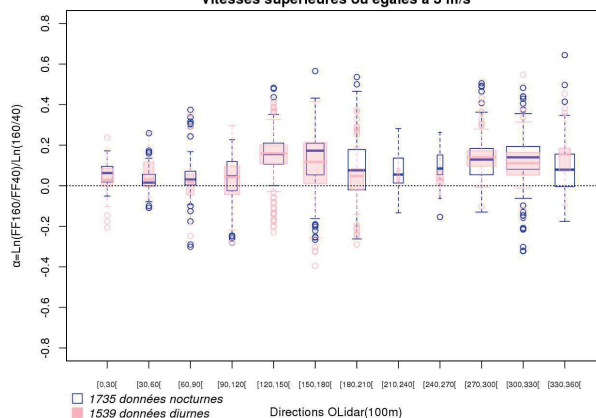
Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/03/2022 au 31/03/2022 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s

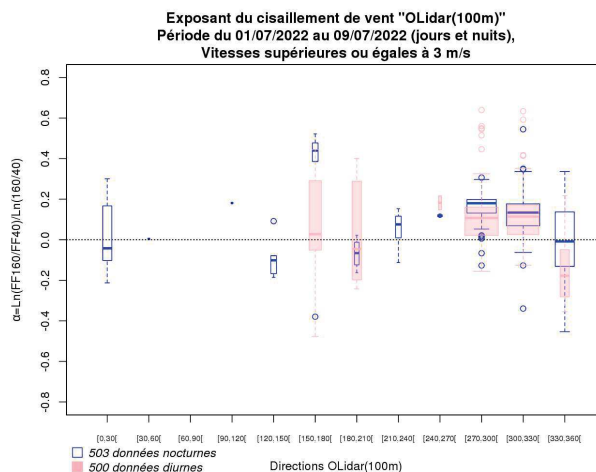
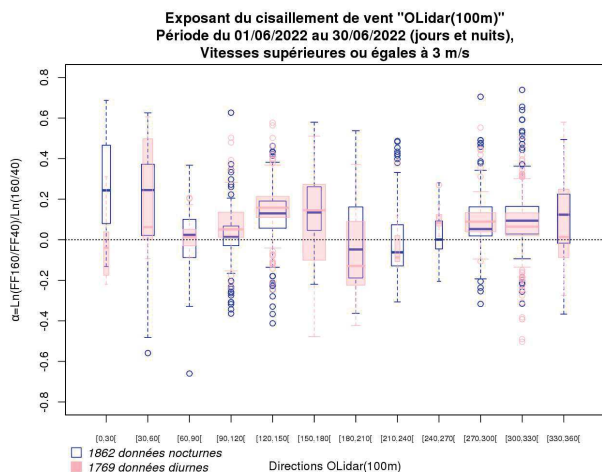


Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/04/2022 au 30/04/2022 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s

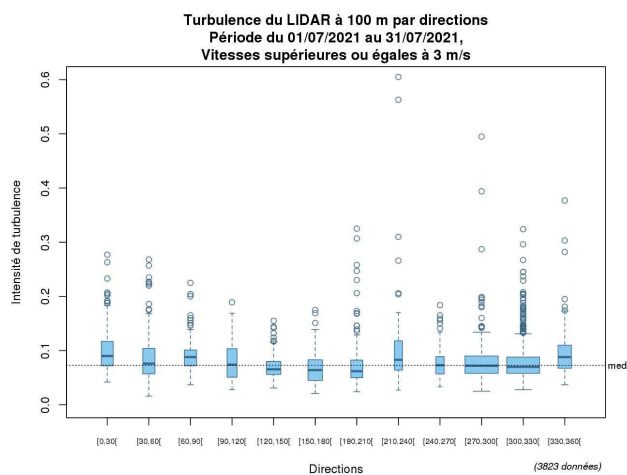
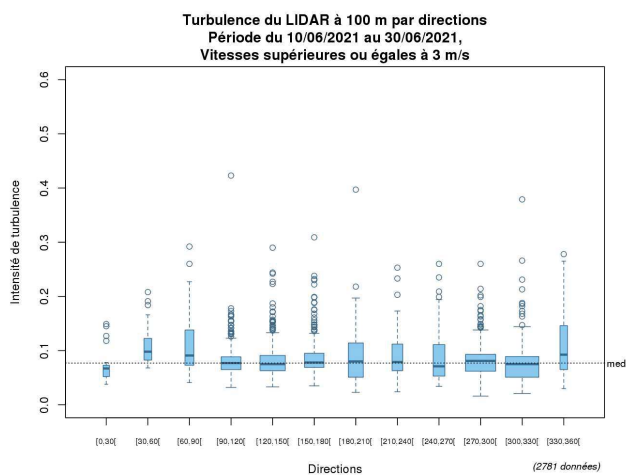


Exposant du cisaillement de vent "OLidar(100m)"
Période du 01/05/2022 au 31/05/2022 (jours et nuits),
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s

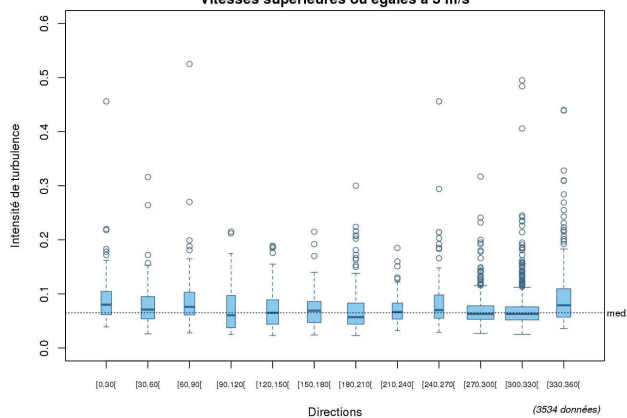




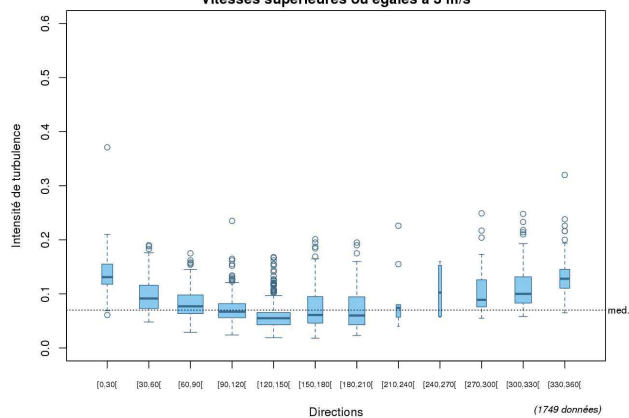
Annexe 9 : Turbulence du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)



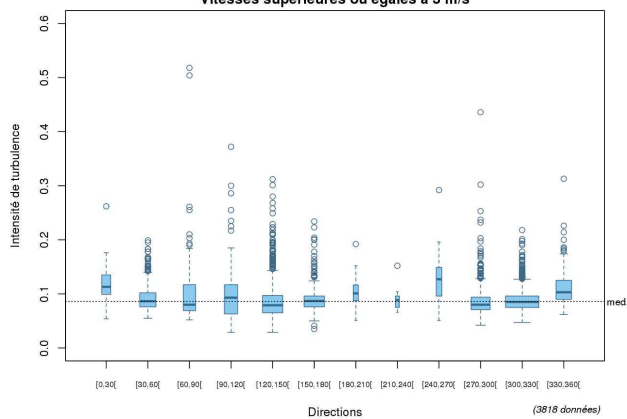
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/08/2021 au 31/08/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



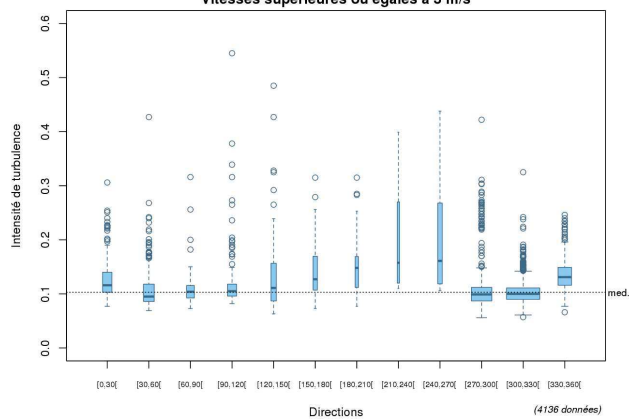
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/09/2021 au 30/09/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



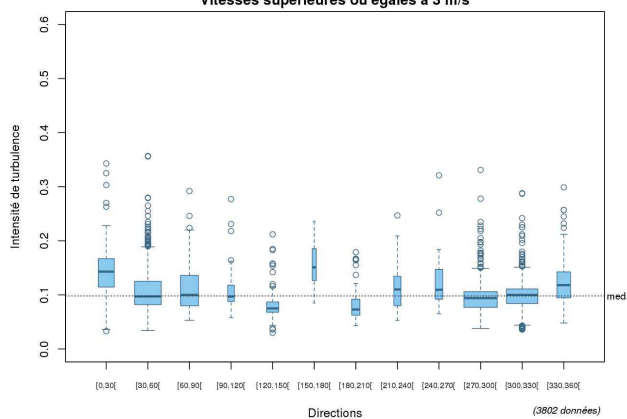
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/10/2021 au 31/10/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



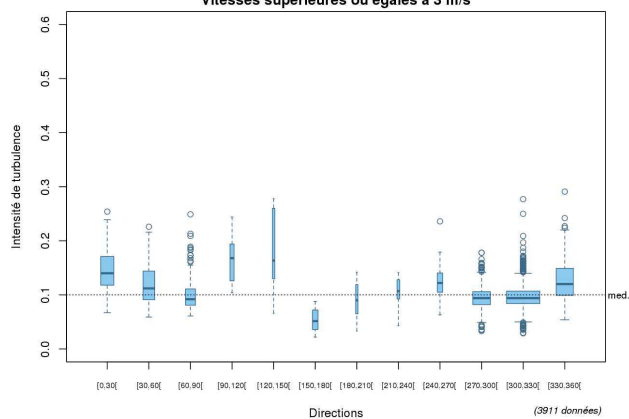
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/11/2021 au 30/11/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



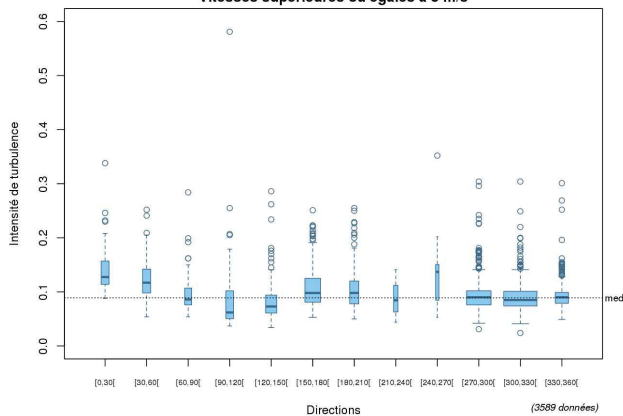
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/12/2021 au 31/12/2021,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



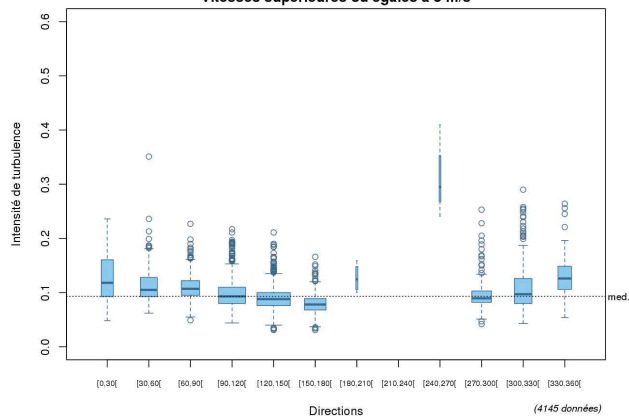
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/01/2022 au 31/01/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



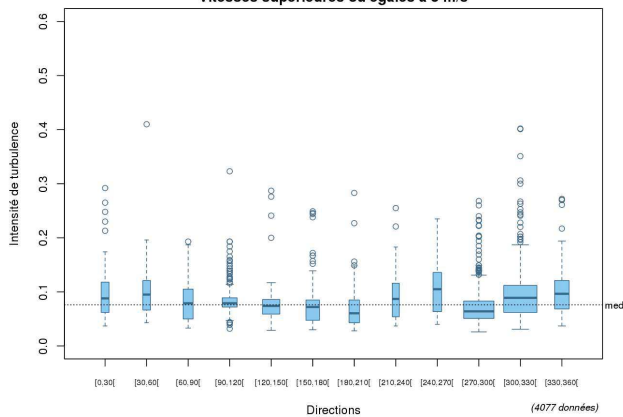
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/02/2022 au 28/02/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



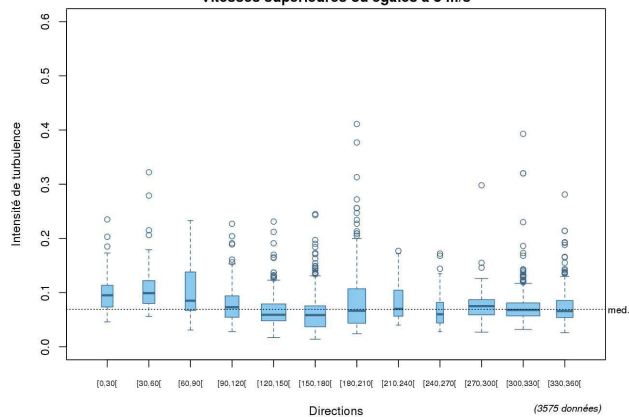
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/03/2022 au 31/03/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



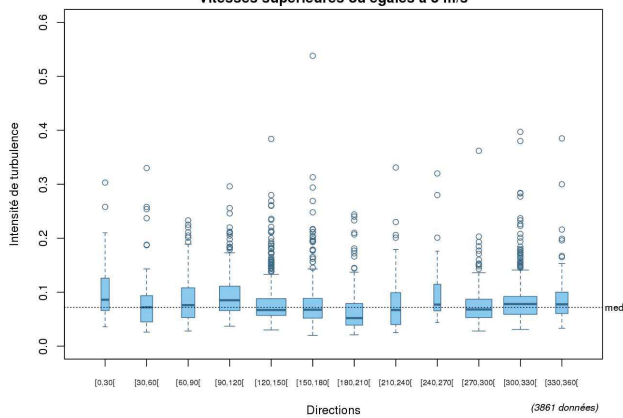
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/04/2022 au 30/04/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



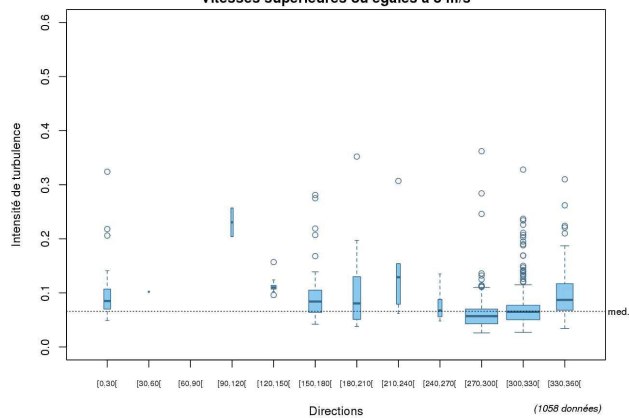
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/05/2022 au 31/05/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



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



Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/07/2022 au 09/07/2022,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



FIN DE DOCUMENT
