

Rapport d'étude

Rapport final Lot 4

Zone Golfe du Lion Est – GLE



Version 2 du 26/05/2026

Client

Direction Générale de l'Énergie et du
Climat du Ministère de la Transition
Écologique

Responsable commercial :

Météo-France D2C Toulouse

Responsable technique :

Météo-France DSM/CS

- page laissée intentionnellement vide -

Documents de référence antérieurs

	Intitulé	Référence	Date	Version
DR1				

Evolutions successives

Référence	Date	Version	Évolution
Version initiale	01/04/2026	1	
Version B2	07/05/2026	2	Version tenant compte des remarques formulées par DNV et CEREMA
Version A	26/05/2026	2	Version révisée validée par DNV et CEREMA

Signatures

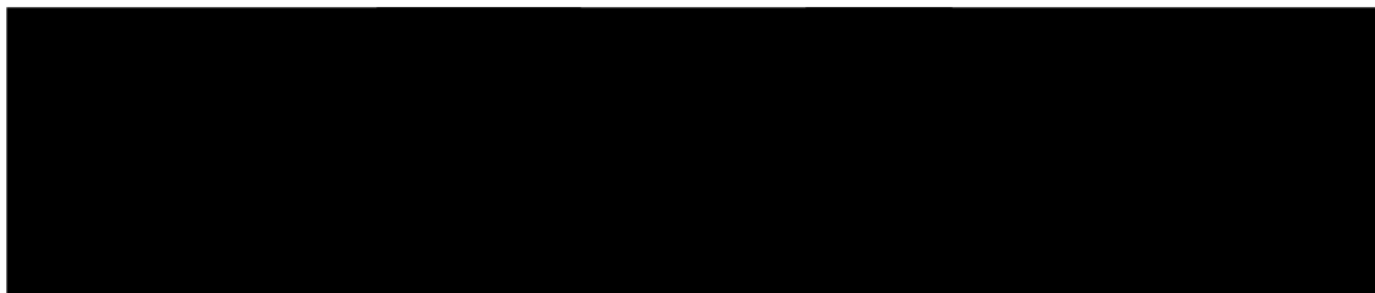


Table des matières

1 Contexte.....	1
1.1 Zone d'étude.....	1
1.2 Descriptif de la solution retenue pour l'acquisition des mesures sur site.....	5
2 Méthodologie appliquée.....	7
2.1 Type de données fournies par le LiDAR.....	7
2.2 Les outils statistiques.....	8
2.2.1 Affectation d'un code qualité aux séries DD, FF et FXI.....	8
2.2.1.1 Seuils de référence.....	9
2.2.1.2 Détermination des seuils adaptés au LiDAR.....	9
2.2.1.3 Codes qualité.....	9
2.2.2 Statistiques de contrôle de la mesure.....	10
3 Analyse des données de vent mesuré par le LiDAR.....	12
3.1 Suivi des données.....	12
3.1.1 Disponibilité des données.....	12
3.1.2 Monitoring des données FF.....	15
3.1.3 Monitoring des écarts.....	16
3.2 Retour sur des cas de données manquantes ou douteuses.....	17
3.3 Statistiques de contrôle et descriptives de la mesure.....	18
3.3.1 Statistiques de contrôle de la mesure.....	18
3.3.2 Statistiques descriptives du vent mesuré.....	21
3.3.2.1 Vent moyen horizontal à 100 m du LiDAR.....	21
3.3.2.2 Distributions.....	22
3.3.2.3 Variation diurne de la force du vent horizontal (données horaires).....	24
3.3.2.4 Variation mensuelle de la force du vent horizontal (données horaires).....	25
3.3.2.5 Roses des vents (données horaires).....	27
3.3.2.6 Profils verticaux de vent (données horaires).....	28
3.3.2.7 Cisaillement du vent (données 10 minutes).....	29
3.3.2.8 Analyse des risques de turbulence atmosphérique à 100 m.....	31
3.3.2.9 Séries horaires FF et FXI à 100 m.....	32
4 Analyse des données du vent mesuré par l'anémomètre.....	33
5 Conclusion.....	35
6 Bibliographie.....	35
Annexes.....	36

Liste des illustrations

Illustration 1 : situation géographique de la bouée avec LiDAR et station météorologique de référence (fond de carte OpenStreetMap).....	1
Illustration 2 : roses des vents annuelle et saisonnières de la station de Sète (34301002) sur la période de 2001 à 2020.....	3
Illustration 3 : carte marine de la zone où se situe la bouée GLE (source data.shom.fr).....	4
Illustration 4 : photo de la plateforme de mesure.....	5
Illustration 5 : photo du LiDAR.....	6
Illustration 6 : exemple de tableau mensuel de disponibilité des données au niveau 100 m pour chacun des 31 jours (abscisses) du mois de juillet 2025 sur chacune des heures de la journée (ordonnées). Chaque case indique le nombre de données 10 min disponibles, 6 étant la meilleure disponibilité.....	13
Illustration 7 : monitoring des données 10 minutes sur les 12 niveaux de mesure (à gauche) et comparaison avec le modèle à 100 m (à droite).....	15
Illustration 8 : monitoring des erreurs de forces (courbe bleue) et de directions (courbe rouge) pour le mois de décembre 2024.....	16
Illustration 9 : comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) du LiDAR avec le modèle (niveau 100 m).....	18
Illustration 10 : diagramme "quantile-quantile".....	19
Illustration 11 : répartitions des écarts de directions du LiDAR en fonction de l'heure (à gauche) et de la direction (à droite).....	19
Illustration 12 : dépassements des seuils de force (à gauche) et de direction (à droite) du vent du LiDAR....	20
Illustration 13 : distributions des vents horaires du LiDAR.....	23
Illustration 14 : répartitions horaires des forces du vent du LiDAR.....	24
Illustration 15 : répartitions mensuelles des forces du vent du LiDAR et du modèle au niveau 100 m. La largeur des boîtes à moustaches est fonction du nombre de données.....	25
Illustration 16 : roses des vents à 100 m, observés (à gauche) et modélisés (à droite).....	27
Illustration 17 : profils des vents avec quantiles du LiDAR.....	28
Illustration 18 : cisaillement des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite).....	29
Illustration 19 : exposant du cisaillement de vent du LiDAR.....	30
Illustration 20 : intensité de la turbulence mesurée par le LiDAR.....	31
Illustration 21 : séries FF (mesuré en bleu, estimé en vert) et FXI (en rouge) à 100 m du LiDAR en m/s. Le tableau p. 17 donne les raisons des principaux manques de données.....	32
Illustration 22 : comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) de l'anémomètre avec le modèle.....	33
Illustration 23 : distribution des vents horaires de l'anémomètre (à gauche) et diagramme « quantile-quantile » (à droite).....	34
Illustration 24 : roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'anémomètre.....	34
Illustration 25 : analyse du dimanche 9 mars 2025 à 12 UTC (à gauche) et image radar/foudre à 10h20 UTC (à droite).....	37
Illustration 26 : à gauche, comparaison des mesures du LiDAR à 100 m avec le modèle AROME le 9 mars 2025,.....	37
Illustration 27 : champ de pression niveau mer du 04/10/25 à 12 UTC (à gauche) et du 5/10/2025 à 00 UTC à droite.....	38

Illustration 28 : à gauche, comparaison des mesures du LiDAR à 100 m avec le modèle AROME les 4 et 5 octobre 2025, à droite, visualisation des vents mesurés par le LiDAR à différentes hauteurs entre 40 et 250 m.....	38
Illustration 29 : roses des vents en hiver 2024-2025 et en moyenne sur la période 2001-2020 pour la station de Sète.....	39
Illustration 30 : roses des vents au printemps 2025 et en moyenne sur la période 2001-2020 pour la station de Sète.....	40
Illustration 31 : roses des vents en été 2025 et en moyenne sur la période 2001-2020 pour la station de Sète.....	41
Illustration 32 : roses des vents en automne 2025 et en moyenne sur la période 2001-2020 pour la station de Sète.....	42

Liste des tableaux

Tableau 1 : taux de présence (en %) des données (DD, FF) 10 minutes du LiDAR.....	14
Tableau 2 : classes de vitesses par mois – taux « brut » (en italique) et « reconstitué » (en gras) du LiDAR	22
Tableau 3 : fréquences (en %) des forces de vent de la station de Sète sur la période 2001-2020 (en gras) et pour la période du 1 ^{er} déc. 2024 au 30 nov. 2025 (en italique) Surlignages : excédent (en rouge) et déficit (en bleu) de plus de 5 points de pourcentage par rapport à la normale.....	26

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)
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 (DGE) et Météo-France ont signé en 2024 une convention pluriannuelle relative à la réalisation d'études d'évaluation des risques météorologiques en vue des appels d'offres pour l'implantation d'éoliennes en mer au large des côtes françaises.

Dans le cadre de cette convention, la DGE a sollicité Météo-France pour la réalisation d'une campagne de mesures atmosphériques et océanographiques dans la zone géographique nommée « Golfe du Lion Est » (GLE) – cf illustration 1.

L'objet de ce rapport consiste à présenter le suivi/contrôle de la mesure sur site à partir d'un appareil de type LiDAR pour différentes hauteurs d'intérêt dont la hauteur 100 m, revêtant un caractère important pour la production éolienne. Ce rapport traite des douze mois de la campagne de mesures, débutée le 1^{er} décembre 2024 et terminée le 30 novembre 2025, ces douze mois étant nécessaires à la validation de la campagne.

1.1 Zone d'étude

Le projet de parc éolien se situe dans une zone à environ 50 km au large de Sète et près de 40 km au sud de la Camargue, appelée Golfe du Lion Est.



Illustration 1 : situation géographique de la bouée avec LiDAR et station météorologique de référence
(fond de carte OpenStreetMap)

Cette zone est caractérisée, d'un point de vue météorologique, par les régimes de vent présents en Méditerranée occidentale :

- le mistral :

Le mistral souffle du nord dans le couloir du Rhône et dans les vallées avoisinantes comme celle de la Durance, puis tourne à l'ouest sur la côte varoise jusqu'à Fréjus ainsi que sur la Corse. Il peut s'étendre à l'ouest jusqu'au golfe du Lion.

La présence du mistral est liée, dans la majorité des cas, à celle d'un flux de secteur nord-ouest sur la région en bordure d'un anticyclone s'étendant sur le proche Atlantique : l'air froid originaire des régions polaires vient buter sur les Alpes et s'accélérer dans le défilé étroit de la vallée du Rhône. Une dépression dynamique s'établit dans les parages du golfe de Gênes. Les vents sont d'autant plus forts que le gradient de pression entre golfe de Gascogne et golfe de Gênes est important. Cette situation peut perdurer plusieurs jours même après l'évacuation de la perturbation vers l'est.

- la tramontane :

La tramontane est un vent de secteur nord à nord-ouest qui parcourt les contreforts des Pyrénées et les monts du sud du Massif central.

Comme le mistral, elle est souvent assez forte et turbulente, dégage le ciel en amenant de l'air plus froid et sec et génère parfois des nuages d'ondes.

La situation météorologique amenant la tramontane est comparable à celle qui engendre le mistral :

- une zone anticyclonique sur l'Espagne et le sud-ouest de la France,
- un flux de nord-ouest à nord (souvent à l'arrière d'un front froid) qui apporte de l'air froid vers les régions méditerranéennes, entre cet anticyclone à l'ouest et, à l'est, une dépression formée sur le golfe de Gênes ou la mer Tyrrhénienne.

La tramontane se forme également lors du déplacement vers l'est d'une perturbation circulant sur la Méditerranée occidentale. Les régions des îles Baléares ou du golfe du Lion se retrouvent sous l'emprise d'une dépression se creusant rapidement au sortir de la péninsule Ibérique (en général en automne et au printemps). Des dépressions peuvent également s'y succéder au sein d'un flux s'écoulant du nord-ouest au sud-est en longeant l'anticyclone des Açores (généralement en hiver).

- le marin :

Il s'agit d'un vent de sud-est soufflant de la Méditerranée vers le Languedoc, la montagne Noire et les Cévennes. Il est généralement modéré et régulier, mais il peut être parfois violent et turbulent sur le relief, très humide, doux et amène le plus souvent des précipitations abondantes.

Il est plus fréquent au printemps et en automne, lorsque les dépressions s'enfoncent en Méditerranée : c'est le vent des situations perturbées et pluvieuses. Il se charge d'humidité lors de son parcours maritime. Il va ensuite la restituer sous forme de grisaille (nuages bas, brumes, brouillards) et de pluies, sur les hauteurs qui bordent la mer : les versants sud-est de la montagne Noire, les Corbières, les contreforts des Cévennes et les premières hauteurs provençales.

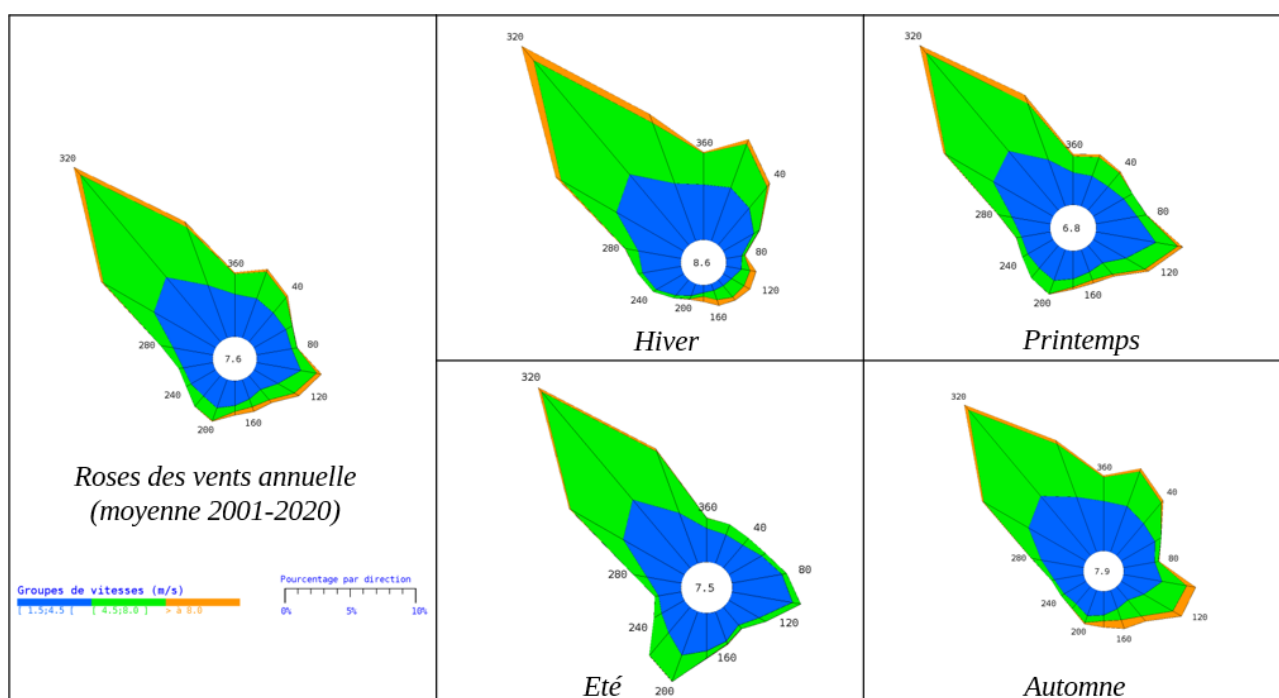
Le marin accompagne les épisodes de fortes pluies méditerranéennes et les épisodes cévenols. Lorsqu'il ne s'accompagne pas de pluie, on l'appelle « marin blanc ».

Le marin est lié à la présence d'un centre dépressionnaire sur la Méditerranée occidentale (Baléares, golfe du Lion) ou vers la péninsule Ibérique et d'un anticyclone vers les Alpes ou l'Europe Centrale. Le relief va ensuite canaliser ce vent, en lui faisant longer les côtes varoises et le renforcer de l'embouchure du Rhône au Languedoc-Roussillon.

Sur la côte, au large de la bouée GLE, Météo-France dispose des stations météorologiques de mesure de Sète, Montpellier et Aigues-Mortes. Dans cette étude, le poste de Sète qui dispose d'un historique nécessaire (au moins 20 ans de données) a été choisi ; il se situe à 75 mètres d'altitude.

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. De leur expertise, il se dégage les caractéristiques suivantes pour le vent observé à Sète sur la période 2001-2020 (cf illustration 2) :

- les périodes de vent calme ($< 1,5$ m/s) sont assez fréquentes sur l'année (7,6 %), en étant un peu moins fréquentes au printemps (6,8 %) et plus observées l'hiver (8,6 %). Les allures générales des roses de vent sont proches tout au long de l'année avec une nette prédominance des vents de nord-ouest ; en dehors de l'hiver, un axe secondaire d'est-sud-est se détache. Un régime de sud-sud-ouest apparaît au printemps s'intensifiant l'été, et un autre de nord-nord-est en automne-hiver ;
- les vents d'est-nord-est et ouest-sud-ouest sont les moins fréquents tout au long de l'année ;
- les vents les plus forts peuvent venir de toutes les directions en dehors du secteur est-nord-est et d'un large secteur sud-ouest.



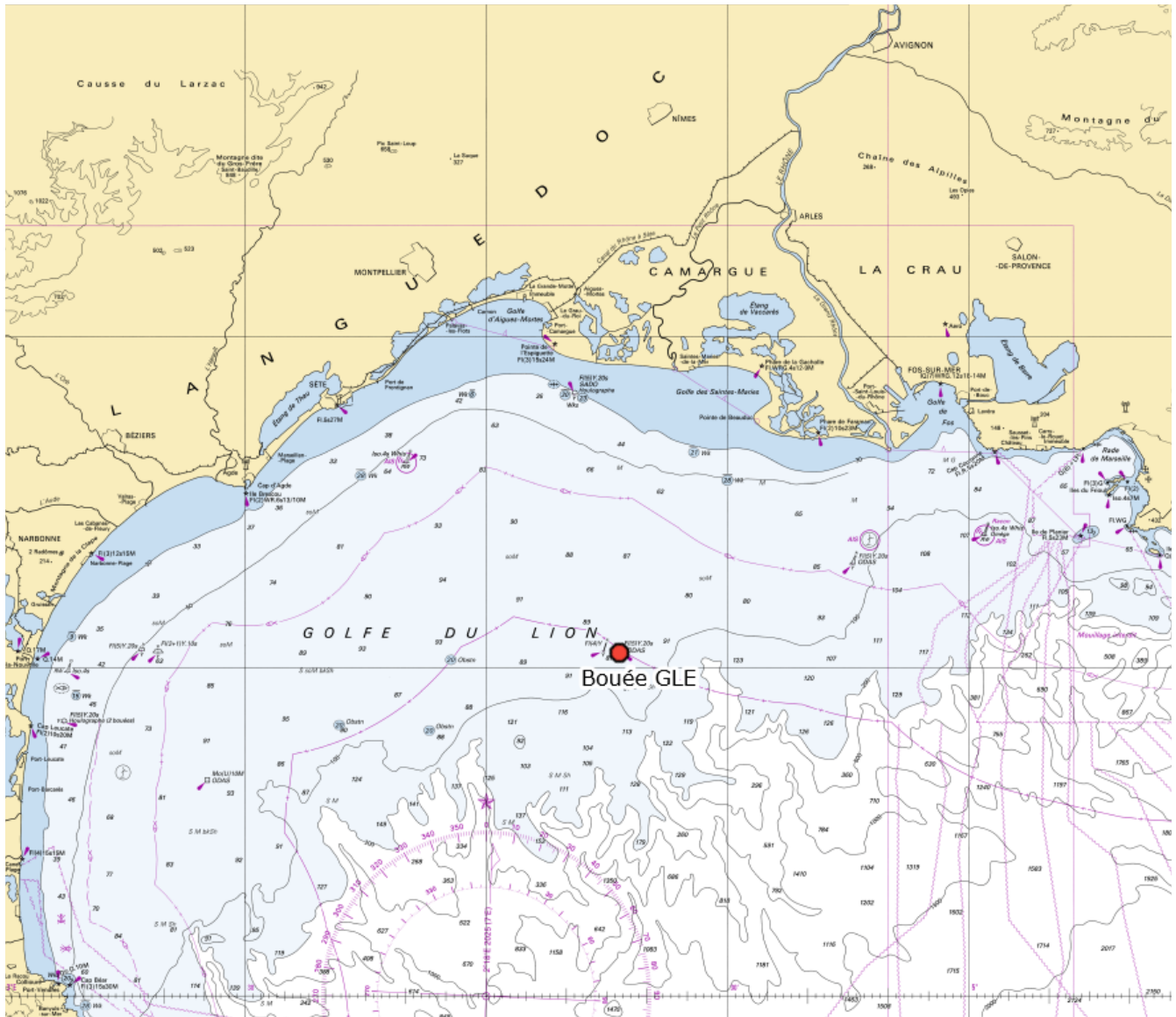


Illustration 3 : carte marine de la zone où se situe la bouée GLE (source data.shom.fr)

Afin d'assurer l'acquisition et le suivi des mesures sur site, Météo-France a retenu un prestataire assurant la fourniture de données relatives à l'observation du vent en mer au moyen d'un système flottant équipé d'une mesure de type LiDAR.

La campagne de mesures est réalisée à proximité du point de coordonnées WGS84 Lon : 4°16,49'E et lat : 43°01,44' N. La bouée LiDAR a un rayon théorique maximal de 500 m de déplacement autour de son point d'ancrage.

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

Cette section décrit plus précisément les équipements déployés pour l'acquisition des mesures sur site.

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



Illustration 4 : photo de la plateforme de mesure

La plateforme flottante embarque des instruments pour effectuer différentes mesures :

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

La mesure de vent en altitude est réalisée à l'aide d'un LiDAR (*Light Detection And Ranging*) embarqué, adapté spécifiquement aux bouées offshore et développé par VAISALA : WindCube Offshore V2.1.

Ce LiDAR envoie une impulsion laser infrarouge vers l'atmosphère. Quatre faisceaux sont envoyés successivement dans les quatre directions cardinales formant un cône de 28°. Un cinquième faisceau vertical permet de vérifier et préciser les mesures. Les impulsions laser sont rétrodiffusées par les particules (poussières, gouttes d'eau, aérosol...) circulant selon la vitesse du vent. Ces impulsions permettent de calculer la vitesse et la direction du vent sur la base du décalage de leur longueur d'onde dû à l'effet Doppler.

Dans le cadre de l'acquisition et du suivi de la mesure durant cette campagne, les altitudes considérées sont les suivantes : 40, 50, 60, 80, 100, 120, 140, 150, 160, 180, 200 et 250 m. Le LiDAR étant situé à 3 m au-dessus de l'eau, les hauteurs indiquées dans les fichiers de données sont ces altitudes moins 3 m.



Illustration 5 : photo du LiDAR

Le système a été conçu pour fonctionner dans des conditions de mer difficiles.

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

Enfin, la plateforme est également équipée d'un houlographe, d'un courantomètre fournissant des informations à différents niveaux de profondeurs et d'un profondimètre. L'analyse de ces différents paramètres océanographiques fait l'objet d'un rapport spécifique rédigé par le Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM).

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

2 Méthodologie appliquée

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

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

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

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

Afin de pouvoir valider les données fournies par le LiDAR, Météo-France s'appuiera sur les données d'analyse de son modèle météorologique à maille fine AROME qui dispose notamment des hauteurs suivantes: 10, 20, 50, 75, 100, 150, 200 et 250 m. Ces données au pas de temps horaire sont la meilleure représentation de l'état de l'atmosphère à un instant donné car elles combinent de manière optimale une prévision récente (qui donne une première ébauche du vent) avec toutes les observations du même instant. C'est à partir de cet état initial que le modèle va calculer l'évolution des paramètres météorologiques sur la grille en trois dimensions du modèle qui représente l'atmosphère, en s'appuyant sur les lois physiques qui régissent son évolution.

À noter que le maximum du vent instantané (rafale) au cours de l'heure qui précède (FXI) n'est disponible que sur le niveau hauteur 10 m.

Nous allons décrire les différents types de données LiDAR, puis une présentation des outils statistiques. Une description des données du modèle de prévision numérique AROME est fournie par [Chatel et al., V2, 2025].

2.1 Type de données fournies par le LiDAR

Pour chaque hauteur de mesures, le LiDAR fournit, en heures UTC, les données suivantes :

- Données moyennées sur 10 minutes pour lesquelles les données de direction sont mesurées par rapport au nord de l'instrument (magnétique) et ne sont pas corrigées par rapport au vrai nord géographique (fichiers WLS866-0XXX_YYYY_MM_DD__HH_mm_ss.sta). Ces données sont calculées à partir des données temps réel (1 seconde - cf. ci-après) et incluent :
 - Vitesse (en m/s) et direction² (en degrés) du vent horizontal moyennées sur 10 minutes, ainsi que le minimum, le maximum, et l'écart type de la vitesse sur ces mêmes 10 minutes ;
 - Vitesse verticale en m/s du vent moyennée et écart type sur 10 minutes.
- Données moyennées sur 10 minutes pour lesquelles les données de direction sont corrigées par la prise en compte du mouvement du LiDAR par rapport au nord magnétique (fichiers wind-seaXX_YYYY_MM_DD__HH_mm_ss_lidar__wind_average.csv). Ces données sont calculées à partir des données temps réel (1 seconde - cf ci-après) et incluent :

2 Direction du vent non corrigée par rapport au vrai nord géographique.

- Vitesse (en m/s) et direction³ (en degrés) du vent horizontal moyennées sur 10 minutes, ainsi que le minimum, le maximum, et l'écart type de la vitesse sur ces mêmes 10 minutes ;
- Vitesse verticale en m/s du vent moyennée et écart type sur 10 minutes.
- Les données temps réel (1 seconde)
 - Données brutes non corrigées du nord magnétique mesurées en temps réel (fichiers WLS866-0XXX_YYYY_MM_DD__HH_mm_ss.rtd)

Les autres données présentes dans les fichiers :

- Rapport porteuse sur bruit (*carrier-to-noise ratio*, CNR) du LiDAR (valeur minimale et moyenne) : cette mesure permet de quantifier la qualité du signal et de la mesure. En effet, cette valeur dépend de la concentration d'aérosols dans l'atmosphère qui rétrodiffusent la lumière du laser. Un coefficient élevé de rétrodiffusion conduit à un haut CNR. Le niveau du CNR dépend des conditions météorologiques. Conformément aux recommandations du constructeur, si le CNR à 1 seconde descend sous le seuil de -23 dB, la mesure est considérée comme invalide. Le CNR moyenné à 10 minutes donne une indication sur la mesure LiDAR mais ne doit être utilisé qu'à titre indicatif (un CNR bas indiquant une mesure du LiDAR altérée).
- Disponibilité des données reconstituées (*data_availability*) : cette valeur est donnée en pourcentage et indique le taux de données temps réel utilisé pour l'élaboration de la donnée reconstituée (moyennée sur 10 minutes). Sous une certaine valeur de CNR (-23 dB), le signal de la mesure est considéré comme trop faible. Conformément aux recommandations du constructeur, la donnée est ainsi évaluée comme erronée et est rejetée de la méthode de calcul 10 min. Les données 10 minutes constituées avec moins de 30 % de données temps réel ne sont pas exploitées par Météo-France.

2.2 Les outils statistiques

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

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

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

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

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

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

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

3 Direction du vent corrigée par rapport au vrai nord (géographique).

2.2.1.1 Seuils de référence

L'Organisation météorologique mondiale (OMM) est une institution spécialisée des Nations unies dont un des principaux rôles est la standardisation des mesures météorologiques.

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

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

Au sein de Météo-France, la division COMPAS (CONtrôle et Monitoring, Prévisibilité, Adaptation Statistique, Gestion des Cycles Opérationnels et Support Informatique) a défini des critères plus stricts en considérant une période de seulement 15 jours.

Pour que la série de données quotidiennes soit qualifiée de douteuse, il faut au moins 10 observations quotidiennes arrivées à temps dans le cycle d'assimilation du modèle où :

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

2.2.1.2 Détermination des seuils adaptés au LiDAR

Dans cette étude, nous utilisons des critères plus ou moins semblables afin de contrôler les données du LiDAR. La problématique n'est pas tout à fait la même car les données du LiDAR ne sont pas préalablement assimilées par le modèle.

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

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

Afin d'extrapoler la condition sur la force à la hauteur 100 m du LiDAR, nous nous appuyons sur notre expérience lors de précédentes campagnes de mesures d'un appareil de type LiDAR auxquelles Météo-France a participé).

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

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

2.2.1.3 Codes qualité

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

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

Séries DD, FF :

Afin de disposer de séries DD et FF horaires complètes au niveau 40, 100 et 200 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 pé-

riodes plus importantes, on remplacera par les données du modèle AROME en donnant aux nouvelles valeurs, le code qualité '21'.

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

Après expertise, les séries DD et FF horaires du LiDAR à 40, 100 et 200 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).
- '99' : La donnée est douteuse car elle ne peut pas être comparée avec le modèle (donnée modèle absente).

Chaque donnée des séries horaires de vent à 40, 100 et 200 m est donc accompagnée de l'un des codes qualité présentés ci-dessus.

Série FXI :

Les séries FXI horaires à 40, 100 et 200 m sont déterminées 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.

2.2.2 Statistiques de contrôle de la mesure

Afin de contrôler leur qualité, les données du LiDAR ont été comparées avec le modèle AROME de façon statistique.

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

- **L'erreur moyenne, ou biais** caractérise l'écart systématique des données LiDAR par rapport au modèle :

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

Plus il est proche de 0, plus les observations sont proches « en moyenne » du modèle.

- **La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne** mesure la distance entre les observations et le modèle :

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

Plus elle est proche de 0, plus les observations sont proches du modèle.

- **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, meilleure est l'adéquation entre les observations et le modèle. À noter que les 3 scores précédemment définis vérifient l'équation suivante : $ECT^2 = EQM^2 - \text{Biais}^2$

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

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

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

3 Analyse des données de vent mesuré par le LiDAR

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

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

- OLidar : données d'observation au point LiDAR ;
- MLidar : données modèle au point LiDAR.

3.1 Suivi des données

3.1.1 Disponibilité des données

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 6). Une donnée absente (force et/ou direction) sur les 10 minutes précédant l'heure ronde est signalée par un astérisque. Pour les niveaux 40, 100 et 200 m, elle devra faire l'objet d'une estimation pour la constitution des séries horaires respectives.

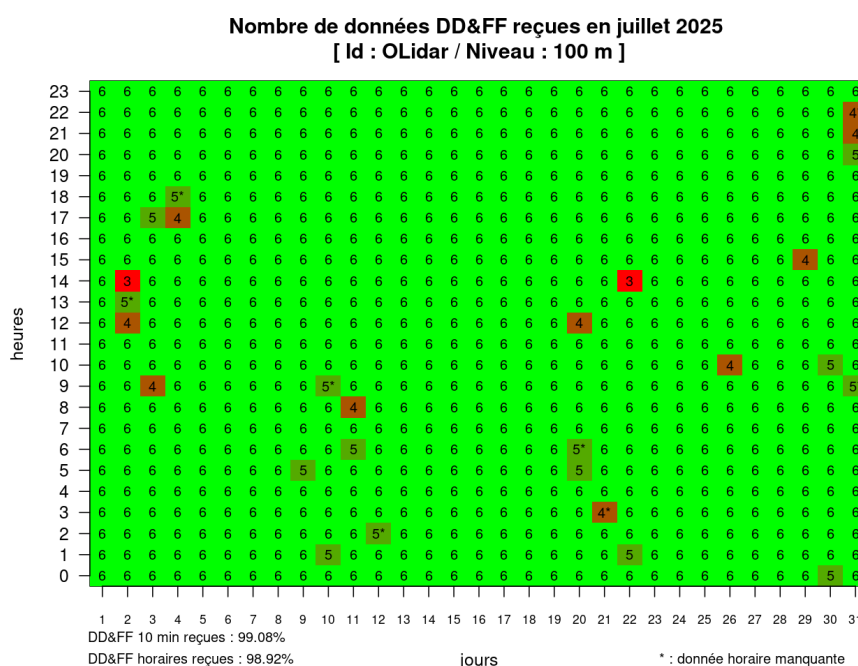


Illustration 6 : exemple de tableau mensuel de disponibilité des données au niveau 100 m pour chacun des 31 jours (abscisses) du mois de juillet 2025 sur chacune des heures de la journée (ordonnées). Chaque case indique le nombre de données 10 min disponibles, 6 étant la meilleure disponibilité.

Le taux de présence des données du LiDAR décroît naturellement avec l'altitude, les nuages bas créant un obstacle à la mesure. Pour ce mois de juillet 2025, la disponibilité des données à 200 m est, par exemple, inférieure de près de 23 points de pourcentage à celle du niveau le plus proche du sol, à savoir 40 m. Cela s'explique par la forte occurrence de phénomènes de très basses couches (brume, brouillard, stratus) durant la période estivale.

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

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

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

	2024	2025					
	déc	janv	fév	mars	avril	mai	juin
250 m	89.70	85.06	88.76	84.87	75.93	75.20	81.18
200 m	96.30	95.52	96.70	93.82	94.75	96.08	92.87
180 m	97.00	96.89	97.82	95.59	96.67	98.21	94.88
160 m	97.67	98.21	98.31	96.03	97.04	98.39	95.76
150 m	98.01	98.61	98.39	96.26	97.25	98.70	96.16
140 m	98.54	98.88	98.49	96.39	97.29	98.90	96.41
120 m	98.90	98.97	98.56	96.53	97.34	99.04	96.46
100 m	98.97	99.04	98.56	96.53	97.34	99.10	96.60
80 m	99.10	99.10	98.59	96.51	97.34	99.13	96.67
60 m	99.19	99.10	98.59	96.28	97.34	99.13	96.67
50 m	99.19	99.10	98.59	96.24	97.34	99.13	96.67
40 m	99.19	99.10	98.59	96.17	97.34	99.13	96.67
Moyenne globale KPI tous niveaux	97.65	97.30	97.50	95.11	95.24	96.68	94.75
Moyenne KPI (60, 100 & 160 m)	98.61	98.78	98.49	96.28	97.24	98.87	96.34
Nb de jours	31	31	28	31	30	31	30

	2025							
	juil	août	sept	oct	nov	Moyenne sur 365 j	Nb Mois	Nb mois KPI ≥ 80%
250 m	76.46	77.49	77.36	85.48	83.84	81.75	.	.
200 m	96.21	90.57	92.82	97.76	94.44	94.82	.	.
180 m	97.51	91.35	94.95	98.5	97.36	96.39	.	.
160 m	97.89	91.67	95.58	98.88	98.31	96.97	.	.
150 m	98.03	91.76	96.09	98.95	98.66	97.23	.	.
140 m	98.32	91.98	96.57	99.08	98.84	97.47	.	.
120 m	98.90	92.36	96.76	99.19	99.07	97.67	.	.
100 m	99.06	92.79	96.76	99.24	99.05	97.75	.	.
80 m	99.08	92.88	96.71	99.26	98.96	97.77	.	.
60 m	99.08	92.97	95.72	99.17	98.70	97.66	.	.
50 m	99.08	92.97	95.46	99.08	98.19	97.59	.	.
40 m	99.08	92.97	95.21	98.97	97.66	97.51	.	.
Moyenne globale KPI tous niveaux	96.56	90.98	94.17	97.8	96.93	95.88	.	.
Moyenne KPI (60, 100 & 160 m)	98.68	92.47	96.02	99.1	98.69	97.46	12	12
Nb de jours	31	31	30	31	30	365	.	.

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 critères KPI.

Cette campagne de mesure n'a pas rencontré de problème technique majeur au niveau de la chaîne laser du LiDAR embarqué sur la bouée.

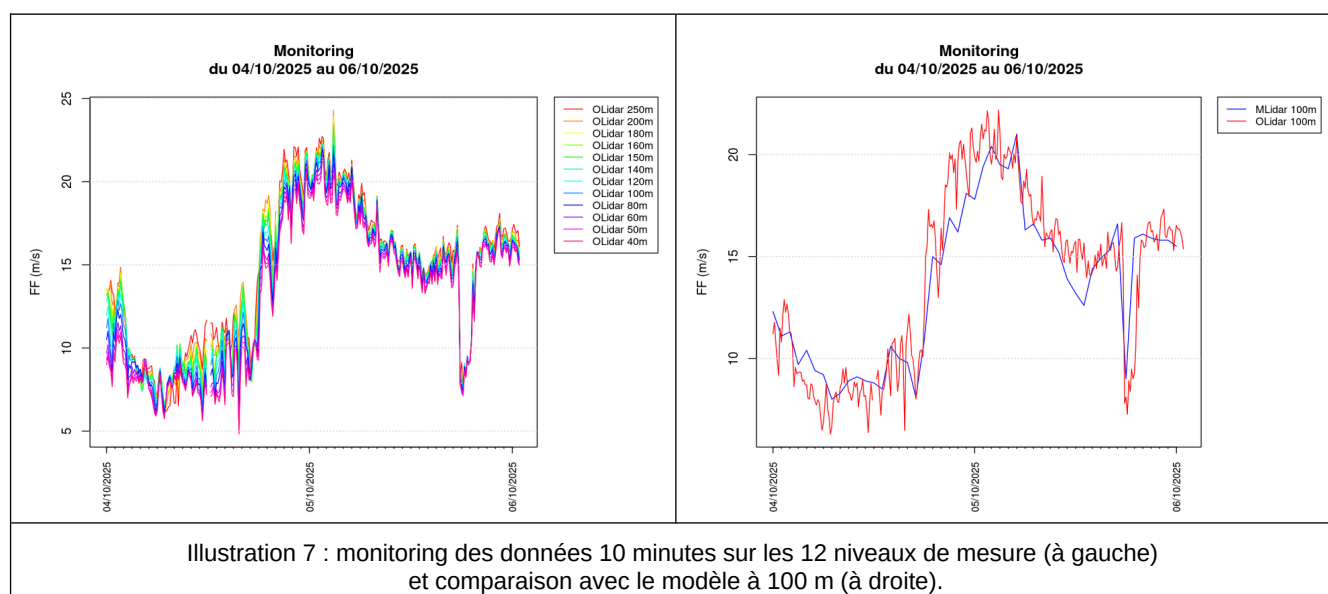
L'ensemble des mois de la campagne de mesure ont bien été validés en raison du fort taux de disponibilité des données. En effet, durant cette campagne, les critères KPI sont bien atteints pour les 3 niveaux 60, 100 et 160 m avec une disponibilité moyenne globale KPI pour ces trois niveaux de 97,46 %.

Comme indiqué précédemment, on peut noter que le taux de présence des données du LiDAR décroît avec l'altitude, le LiDAR ayant plus de difficultés à atteindre les couches supérieures, notamment lors d'un fort taux d'humidité et tout particulièrement en présence de nuages très bas. La disponibilité des données à 250 m sur l'ensemble de la campagne est, par exemple, inférieure de 15,76 points de pourcentage à celle du niveau le plus proche du sol, à savoir 40 m.

3.1.2 Monitoring des données FF

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 de l'illustration 7 présentent les relevés du vent moyen du LiDAR des 4 et 5 octobre 2025. Ils montrent le passage de la tempête Amy. On notera une très bonne corrélation entre l'observation LiDAR du vent à 100 m et le modèle aussi bien dans la chronologie que l'intensité des phénomènes. Une légère dévente a pu être observée le 5 octobre en début de soirée. Elle est due à un bref passage du vent au secteur nord dans la vallée du Rhône et a été parfaitement prévue par le modèle AROME. Les légères variations entre l'observation et le modèle sont essentiellement dues à la résolution spatiale du modèle, ainsi qu'à sa résolution temporelle limitée à 1 heure alors que les observations sont faites toutes les dix minutes.



3.1.3 Monitoring des écarts

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

Nous effectuons un suivi mensuel des moyennes glissantes sur 24 heures, des écarts sur les forces FF et les directions DD entre les données du LiDAR à 100 m et les données du modèle AROME, afin de détecter d'éventuelles dérives. Les écarts restent dans la plupart des cas en dessous de 2 m/s et de 20°, et sont donc très inférieurs aux seuils fixés à la section 2.2.1.2. L'exemple de monitoring pour le mois de décembre 2024 figure dans l'illustration 8 et montre de très bons résultats avec des écarts généralement très inférieurs aux seuils fixés. L'écart gravite autour de 1 à 2 m/s principalement et n'excède pas 3 m/s concernant les forces (en dehors de la journée de lancement de la campagne), et demeure généralement en deçà des 30° concernant les directions. Le pic d'écart en direction du 31 décembre, à première vue important, ne remet pas en question la bonne qualité des données du LiDAR et est lié à une situation météorologique particulière (cf. détails dans le rapport annuel L4.RA-1an_GLE).

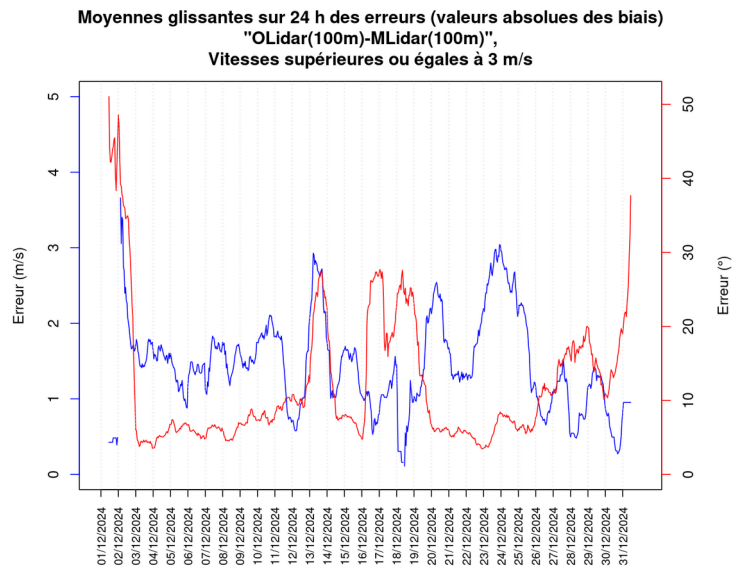


Illustration 8 : monitoring des erreurs de forces (courbe bleue) et de directions (courbe rouge) pour le mois de décembre 2024

3.2 Retour sur des cas de données manquantes ou douteuses

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

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

	Incidents techniques impactant la mesure du LiDAR ⁴
Décembre 2024	RAS
Janvier 2025	RAS
Février 2025	RAS
Mars 2025	La disponibilité variable les 13 et 14 s'explique par la présence d'un oiseau qui s'était posé sur le pare-soleil du LiDAR.
Avril 2025	RAS – Maintenance préventive le 08/04/2025.
Mai 2025	RAS
Juin 2025	RAS – Maintenance préventive et corrective le 13/06/2025
Juillet 2025	RAS
Août 2025	Panne électrique du 7 à 02 UTC au 8 à 14 UTC entraînant l'absence des données.
Septembre 2025	RAS – Maintenance préventive et corrective le 15/09/2025.
Octobre 2025	RAS
Novembre 2025	Baisse de la disponibilité (hors niveaux 100 m et 120 m) le 7 de 14 UTC à 22 UTC (orage le 6 et nuit suivante).

En dehors de très rares manques de données, liés à des maintenances, à la présence d'un oiseau en mars, à une panne électrique en août et au passage d'un orage en novembre, la réception de celles-ci s'est très bien déroulée au cours de toute la période.

⁴ En plus de ces incidents, des trous de données peuvent être présents occasionnellement. Ils sont liés à des redémarrages internes ponctuels du LiDAR, Vaisala garantissant une haute disponibilité de son LiDAR, mais pas de 100 %.

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 les données du modèle AROME au point de grille le plus proche.

6,6 % des valeurs enregistrées par le LiDAR sortent des seuils fixés, à savoir un écart de force de vent supérieur à 5 m/s ou un écart en direction supérieur à 30° (cf. Illustration 9) :

- L'essentiel des dépassements de seuil concerne le critère de direction (*croix orange sur le graphique de gauche*) pour des forces de vent faible, qui s'explique par le fait que le flux dans ces situations n'est pas clairement établi, le vent prenant un caractère « variable ». Les écarts en direction se font d'autant plus rares que la force du vent considérée est importante (quasiment aucun cas pour des vents de plus de 15 m/s) ;
- Les dépassements de seuil pour le critère de force du vent (*carrés orange et croix rouges sur le graphique de gauche*) sont quant à eux marginaux (seulement 1,43 % des mesures).

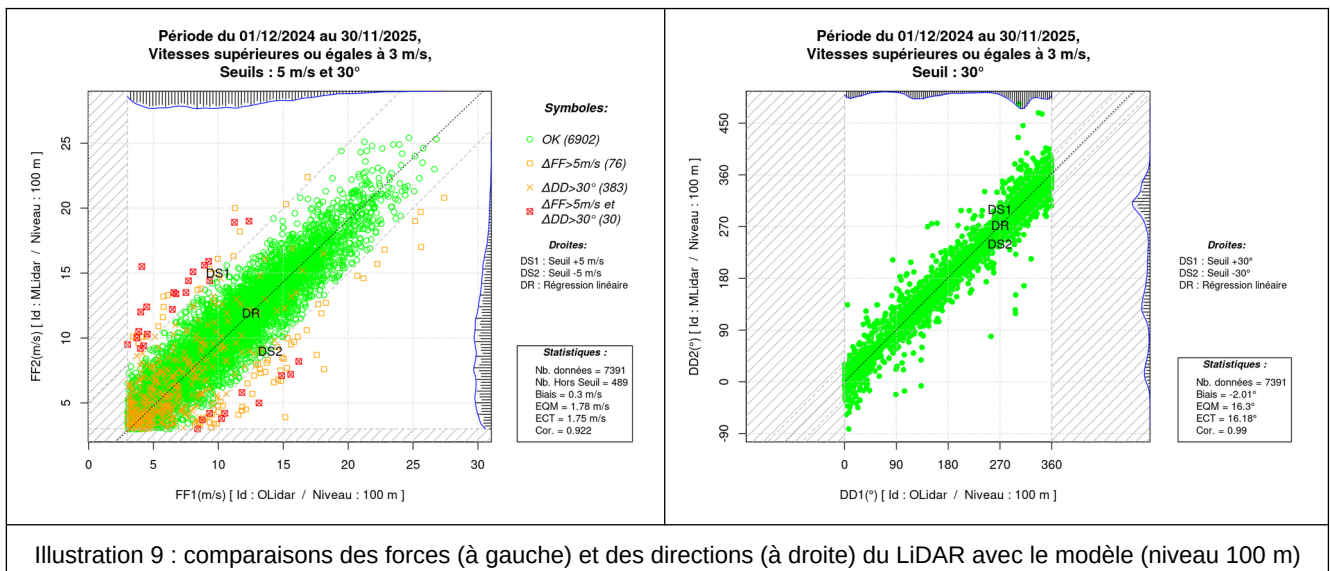


Illustration 9 : comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) du LiDAR avec le modèle (niveau 100 m)

Le diagramme « quantile-quantile » des forces de vent du LiDAR et du modèle AROME (cf. Illustration 10) présente des points très proches de la diagonale jusqu'au quantile 70, seuil au-delà duquel ils s'éloignent en penchant du côté de l'observation. Cela correspond à une légère sous-estimation des vents les plus forts au niveau 100 m par le modèle AROME dans cette zone géographique.

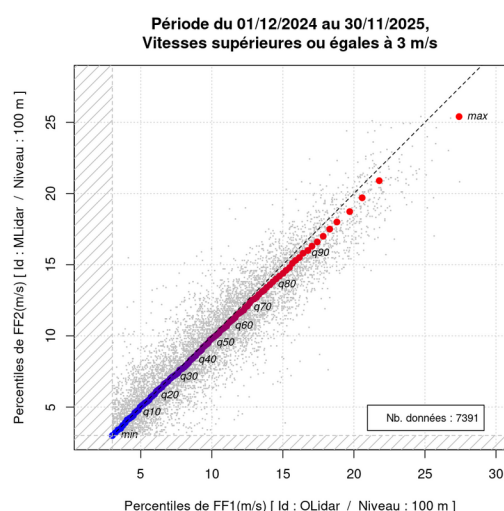


Illustration 10 : diagramme "quantile-quantile"

Quelle que soit l'heure, l'observation présente un très faible écart par rapport aux directions du modèle, de moins de 4° en moyenne. Suivant la direction considérée, on note un biais légèrement plus marqué pour le secteur est, de l'ordre de 6° (cf. Illustration 11) ; secteur de vent qui reste d'ailleurs peu fréquent dans la zone (4 % des cas seulement).

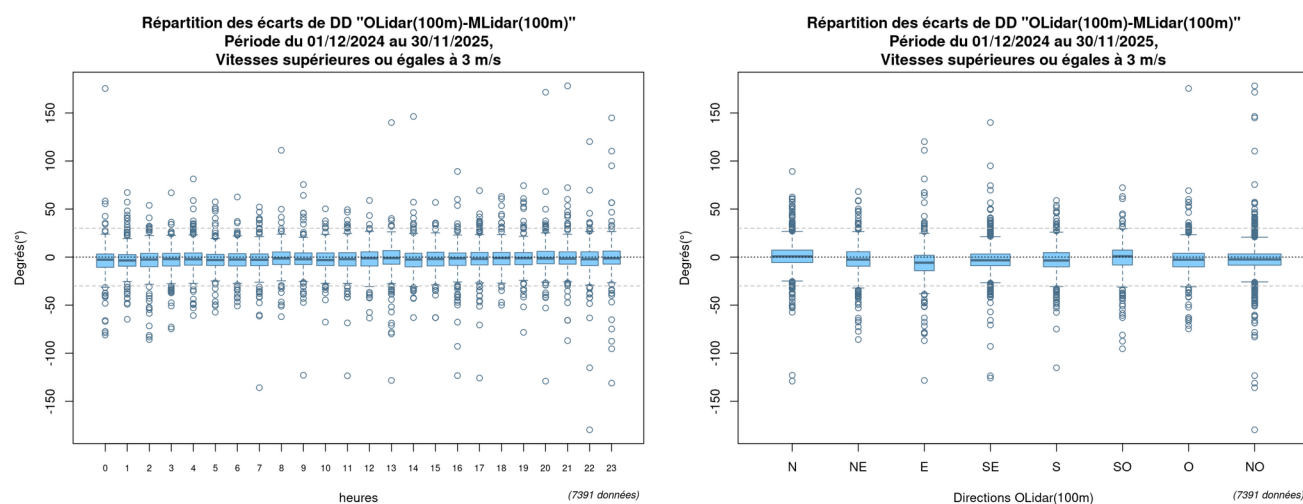


Illustration 11 : répartitions des écarts de directions du LiDAR en fonction de l'heure (à gauche) et de la direction (à droite)

D'une manière générale, quel que soit le secteur, les dépassements du seuil pour la force du vent (écart supérieur à 5 m/s entre le LiDAR et le modèle), restent très rares : ils représentent tout au plus 2,5 % des cas pour le secteur NE (cf. Illustration 12 à gauche).

Les dépassements du seuil de direction (écart supérieur à 30° entre le LiDAR et le modèle) pour des vents supérieurs ou égaux à 10 m/s, représentent moins de 1,3 % des cas (cf. Illustration 12 à droite). On note que plus le flux est établi avec des vitesses de vent importantes, moins les écarts 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.

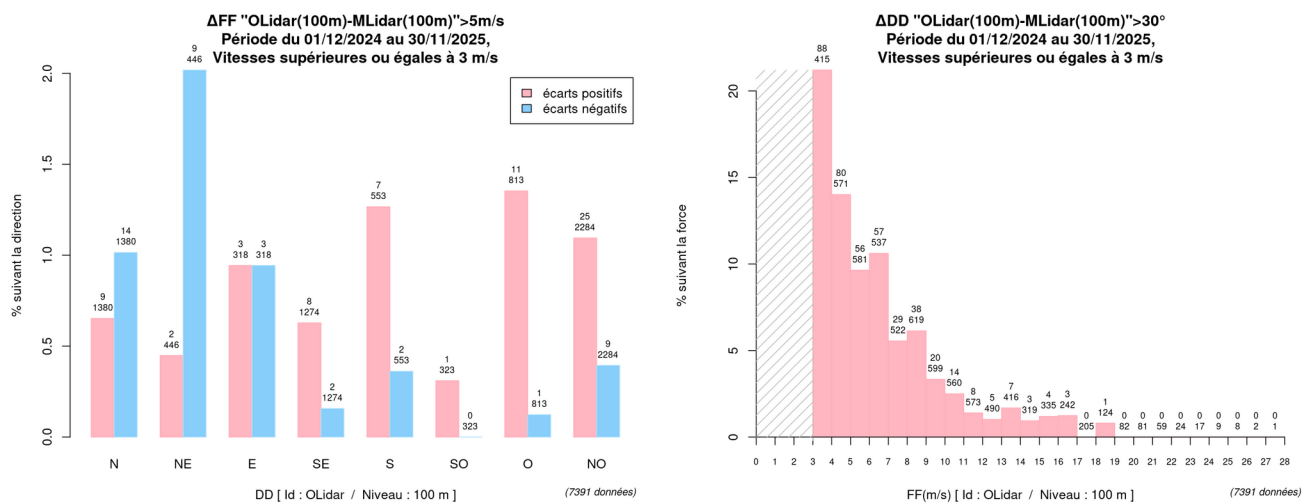


Illustration 12 : dépassements des seuils de force (à gauche) et de direction (à droite) du vent du LiDAR

Au-dessus de chaque histogramme de cette illustration sont indiqués deux nombres : le nombre de cas franchissant le seuil (de force à gauche ou de direction à droite) pour le paramètre indiqué en abscisse (secteur de direction à gauche et force de vent à droite), puis en dessous le nombre total de mesures pour ce même paramètre.

3.3.2 Statistiques descriptives du vent mesuré

En préambule, afin de mieux comprendre les conditions météorologiques rencontrées durant la campagne de mesure, une description détaillée de la climatologie saisonnière figure en Annexe 3.

3.3.2.1 Vent moyen horizontal à 100 m du LiDAR

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

Sur l'ensemble de la campagne, le Tableau 2 permet de constater que les forces de vent mesurées par le LiDAR se distribuent de manière très similaire, que l'on regarde les données mesurées toutes les 10 minutes ou seulement les données horaires (cf. ligne total Tableau 2 — dans ce tableau, le taux « brut » correspond à l'ensemble des données 10 minutes du LiDAR, et le taux « reconstitué » aux données horaires). En effet, quelle que soit la classe de vitesse ou le mois considéré, ces taux ne diffèrent pas de plus de 2,4 points de pourcentage, et sont même généralement proches de zéro.

Année	Mois	Nombre de cas	Classes de force de vent en m/s							
			0 à 3	3 à 5	5 à 10	10 à 15	15 à 20	20 à 25	25 à 30	30 à 35
2024	12	4418	13.4%	13.2%	21.2%	22%	18.5%	10.6%	1.2%	.
		744	13.4%	13.3%	21.2%	21.5%	18.1%	11.2%	1.2%	.
2025	1	4421	6.4%	8.9%	35.2%	36.4%	10.9%	2.2%	.	.
		744	6.6%	9.1%	34.8%	35.8%	11.7%	2%	.	.
	2	3974	10.6%	14%	41.6%	26.3%	7.6%	0%	.	.
		672	10.6%	14.7%	41.5%	25.3%	7.7%	0.1%	.	.
	3	4309	4.6%	9.5%	27.1%	35.1%	19.2%	4.5%	0.2%	.
		744	4.2%	10.3%	27.7%	34.9%	18%	4.6%	0.3%	.
	4	4207	14%	13.6%	35.5%	26.5%	9.5%	1%	.	.
		720	13.2%	14.6%	35.6%	26.1%	9.6%	1%	.	.
	5	4424	8.4%	15.5%	37%	29.4%	9.7%	.	.	.
		744	8.1%	16.1%	36.7%	28.2%	10.9%	.	.	.
	6	4207	18%	21.7%	41.9%	16.4%	2%	.	.	.
		720	17.5%	21.8%	43.1%	15.6%	2.1%	.	.	.
	7	4422	9.3%	10%	33.1%	29.8%	17.2%	0.7%	.	.
		744	9.1%	9.3%	33.1%	30.5%	17.3%	0.7%	.	.
	8	4142	13.5%	16.4%	34.2%	29.1%	6.6%	0.1%	.	.
		744	13.8%	18.8%	33.3%	27.6%	6.5%	.	.	.
	9	4180	9.3%	19.7%	45.6%	21.9%	3.5%	.	.	.
		720	9.4%	19.3%	45.7%	22.4%	3.2%	.	.	.
	10	4430	15.5%	14.6%	33.3%	24.4%	10.6%	1.4%	0%	.
		744	15.3%	15.1%	33.6%	24.1%	10.3%	1.6%	.	.
	11	4279	6.3%	9.2%	24.3%	35.2%	19.9%	5.1%	.	.
		720	6.8%	8.9%	24.6%	34%	20.8%	4.9%	.	.
Total		51413	10.7%	13.8%	34%	27.8%	11.4%	2.2%	0.1%	.
		8760	10.7%	14.3%	34.1%	27.2%	11.4%	2.2%	0.1%	.

Tableau 2 : 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 de FF et du modèle à 100 m sont proches (voir Illustration 13). Les quantiles apparaissant dans l'encart de l'illustration 13 sont assez similaires jusqu'au q75, et s'éloignent légèrement au-delà jusqu'à 2 m/s de plus pour le vent max observé, laissant apparaître une faiblesse du modèle qui sous-estime les vents les plus forts dans ce secteur géographique.

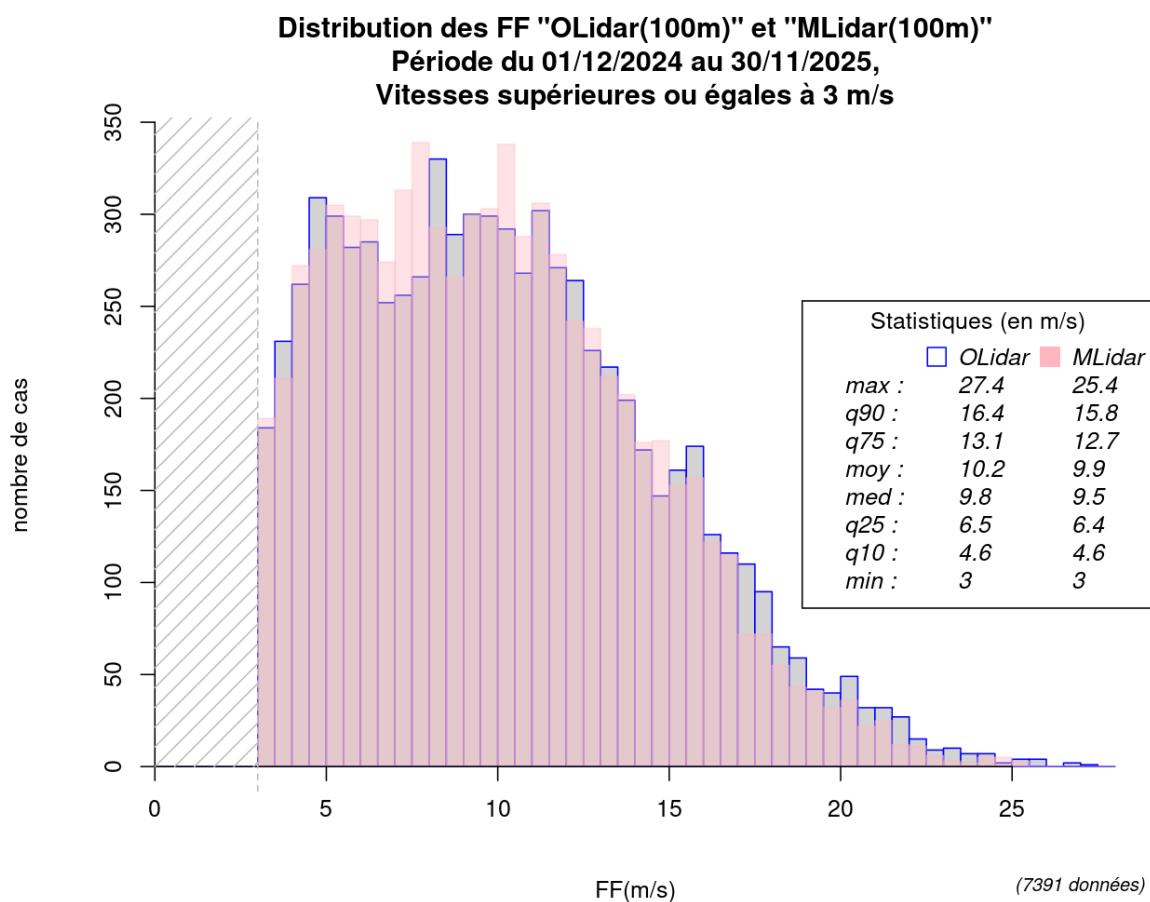


Illustration 13 : distributions des vents horaires du LiDAR

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

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

L'illustration 14 met en évidence un léger cycle diurne. À partir de 10 h et jusqu'à 17 h UTC, les médianes horaires des observations et du modèle sont légèrement inférieures à la médiane de la période totale. En soirée et durant la nuit, on observe l'effet inverse. Le fait que le modèle minimise légèrement les vents les plus forts dans ce secteur géographique se vérifie pour toutes les heures en dehors de 03 h UTC.

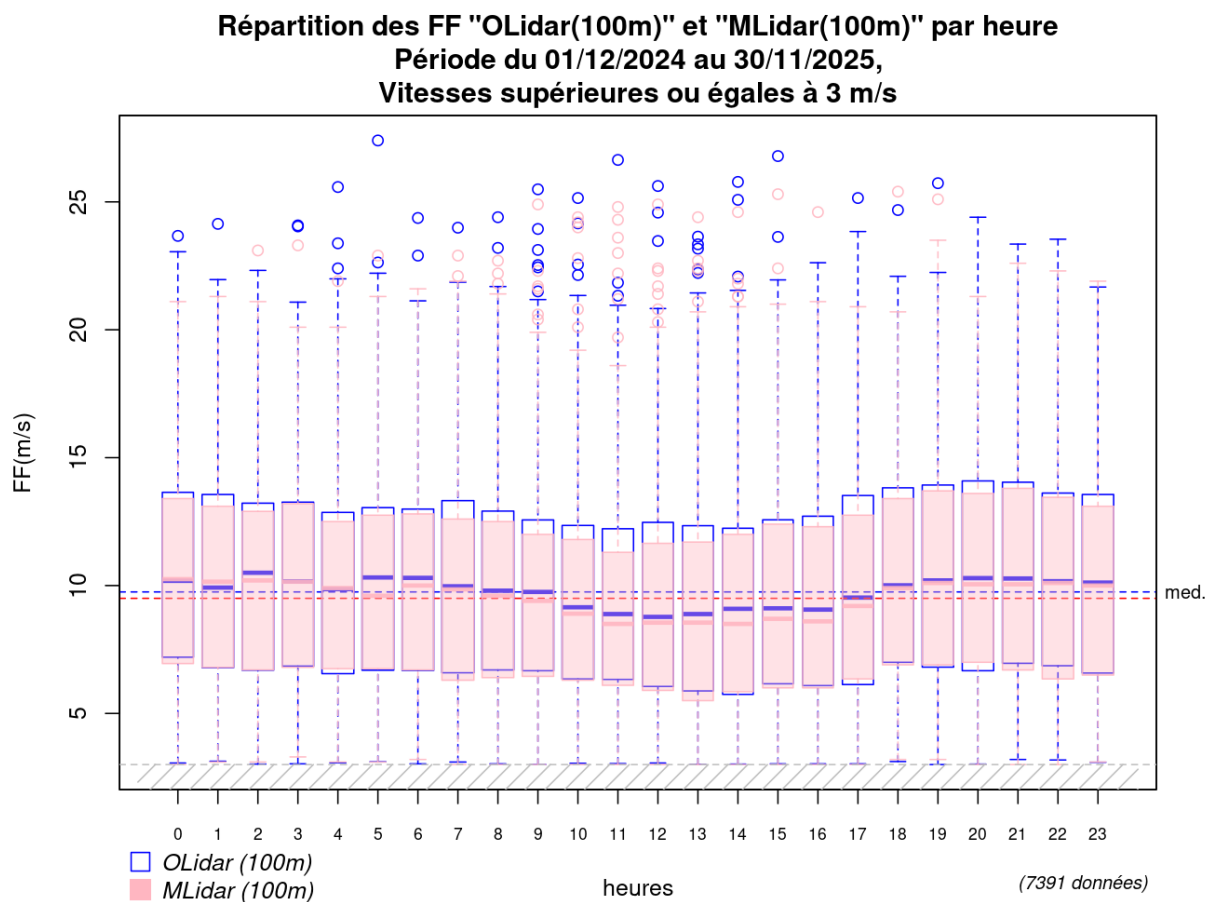


Illustration 14 : répartitions horaires des forces du vent du LiDAR

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

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

Des disparités sur les répartitions mensuelles de force de vent existent (cf. Illustration 15).

Il est intéressant de noter que les boîtes à moustaches issues des données du modèle sont très proches de celles mesurées par le LiDAR, attestant une nouvelle fois une bonne adéquation.

Les vents les plus forts apparaissent en décembre 2024, mars et novembre 2025, pour lesquels les médianes mensuelles sont bien au-dessus de la médiane des forces de vent sur l'ensemble de la campagne. Les mois de janvier et février sont proches de la médiane annuelle, ce qui correspond à des conditions plutôt déventées pour des mois hivernaux, et s'explique par de grandes périodes anticycloniques ou à faible gradient de pression.

Le mois le moins venteux est celui de juin qui a connu également des anticyclones durables ainsi que des périodes de marais barométriques (faible gradient de pression).

Précisons que la ligne pointillée dans cette illustration montre la médiane des forces de vent sur l'ensemble des 12 mois de la campagne, mais ne doit pas être confondue avec une normale climatologique. Par conséquent, l'illustration 15 doit être mise en regard avec le Tableau 3 pour ne pas commettre d'erreur d'interprétation.

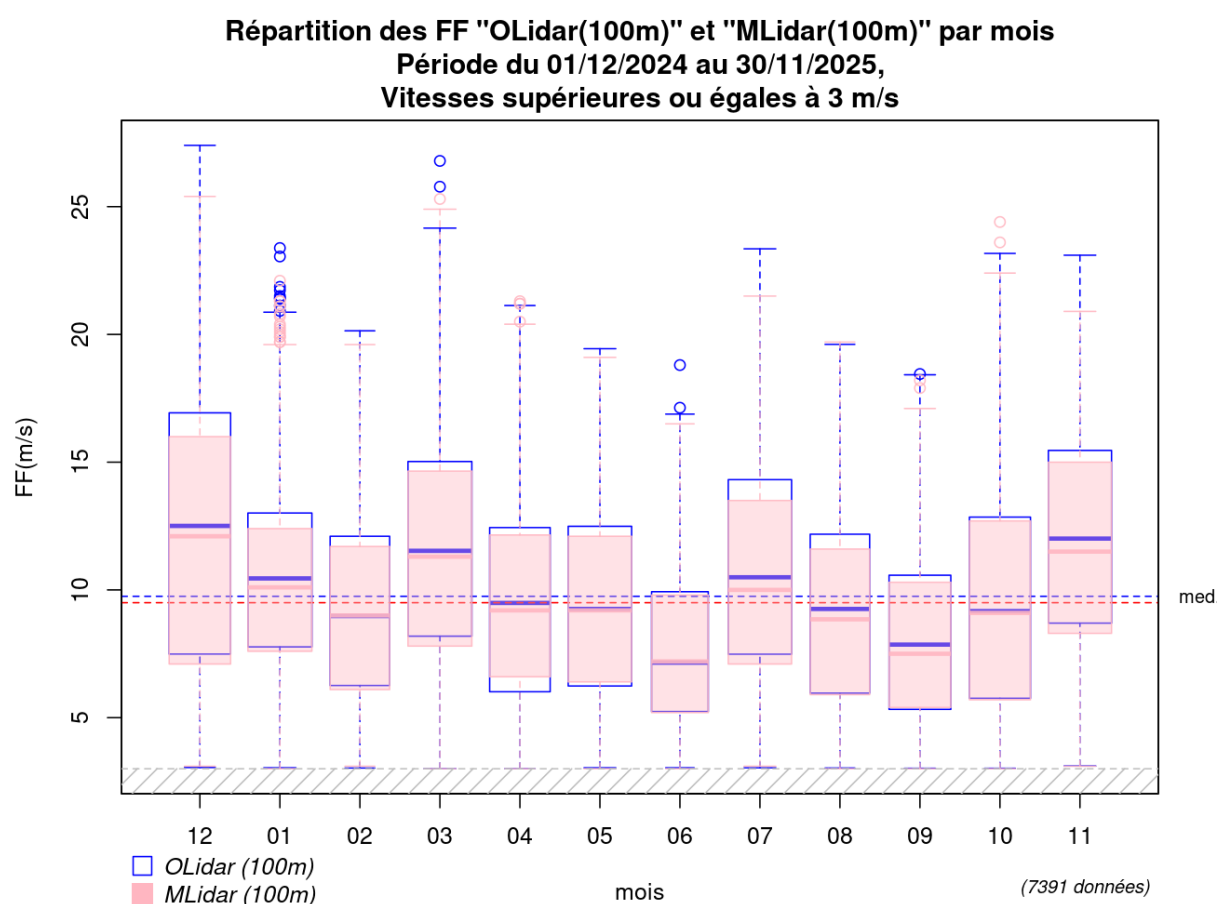


Illustration 15 : répartitions mensuelles des forces du vent du LiDAR et du modèle au niveau 100 m.
 La largeur des boîtes à moustaches est fonction du nombre de données.

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

Au regard de la climatologie (statistiques 2001-2020) :

- Seul le mois de novembre se rapproche des normales.
- Le mois de mars 2025, majoritairement dépressionnaire, a connu une hausse de 6,7 points de pourcentage dans la tranche [4,5 ; 8.0[m/s, et demeure le seul mois de la campagne ayant un pourcentage des vents supérieurs à 8 m/s au-dessus des normales.
- Le reste de l'année a été particulièrement déventé au profit de la tranche [1,5 ; 4,5[m/s.

	2024	2025											
Vitesses en m/s	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Moyenne annuelle
> 8	5,0	6,0	5,8	4,9	4,1	2,4	1,0	0,8	1,2	1,8	5,9	7,1	3,8
	1,7	1,3	3,4	7,4	1,3	0,1	0,0	0,3	0,1	0,0	2,2	6,7	2,0
[4.5, 8.0[	35,4	37,5	36,5	34,4	35,1	34,2	32,2	34,5	32,1	29,5	34,6	38,6	34,5
	36,0	36,6	22,9	41,1	31,2	30,2	22,1	33,5	21,9	22,9	29,8	41,2	30,8
[1.5, 4.5[	50,7	48,0	49,7	53,2	54,3	56,8	59,1	58,1	58,6	59,7	52,0	47,2	54,0
	54,3	54,4	61,9	49,1	60,7	64,9	70,6	62,6	67,9	71,0	60,8	46,2	60,4
[0, 1.5[	8,9	8,5	8,0	7,5	6,5	6,6	7,7	6,6	8,1	9,0	7,5	7,1	7,7
	8,0	7,7	11,8	2,4	6,8	4,8	7,3	3,6	10,1	6,1	7,2	5,9	6,8

Tableau 3 : fréquences (en %) des forces de vent de la station de Sète sur la période 2001-2020 (en gras)
et pour la période du 1^{er} déc. 2024 au 30 nov. 2025 (en italique)
Surlignages : excédent (en rouge) et déficit (en bleu) de plus de 5 points de pourcentage par rapport à la normale

Rappel : une analyse détaillée de la climatologie saisonnière, présentant les différences de vents par secteurs, figure en Annexe 3.

3.3.2.5 Roses des vents (données horaires)

Pour une meilleure lisibilité, nous faisons le choix de représenter dans l'illustration 16 les roses des vents à 100 m en seulement 4 classes de vents. À noter que la rose des vents observés (à gauche) est réalisée ici à partir de toutes les données **horaires** disponibles (**données inférieures à 3 m/s comprises**).

La rose des vents issue des données modélisées par le modèle AROME (à droite) coïncide étroitement avec la rose des vents obtenue à partir des données observées par le LiDAR (à gauche). Le secteur 330° est légèrement sur-estimé par le modèle (+2,6 points de pourcentage) et à l'inverse, le secteur 300° légèrement sous-estimé (-2,3 points de pourcentage).

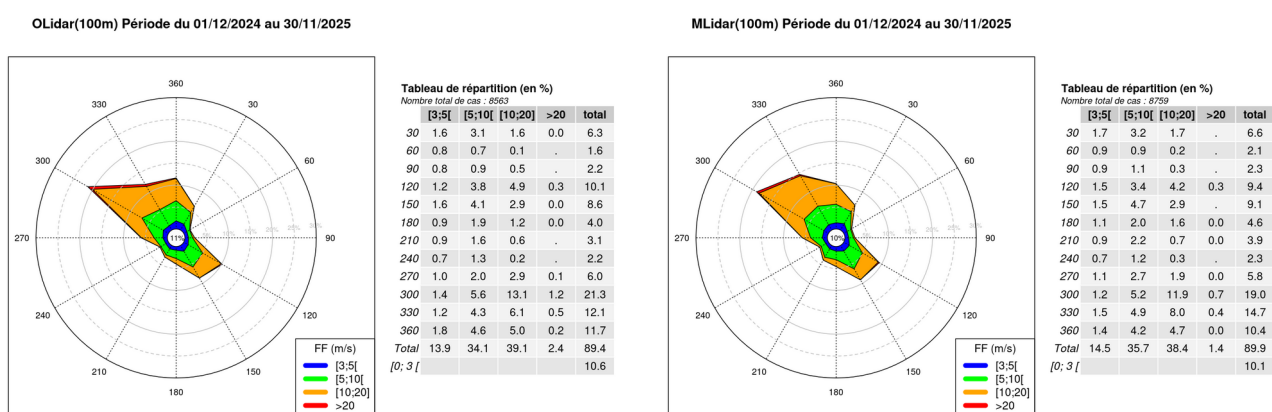


Illustration 16 : roses des vents à 100 m, observés (à gauche) et modélisés (à droite)

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 6.

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

3.3.2.6 Profils verticaux de vent (données horaires)

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

On constate que durant la période de la campagne de mesure, les profils horaires observés sur la couche allant de 40 m à 250 m sont cohérents avec les profils modélisés. Les premiers quartiles sont quasi identiques. La médiane et le troisième quartile observés sont légèrement supérieurs par rapport aux profils modélisés avec une différence inférieure à 1 m/s.

Par ailleurs, de 40 m à 200 m, les vitesses du profil moyen observé (profil bleu en pointillés) sont légèrement inférieures à celles issues de la climatologie AROME sur 20 ans (profil vert en pointillés), et supérieures à celles du profil moyen modélisé (profil rouge en pointillés).

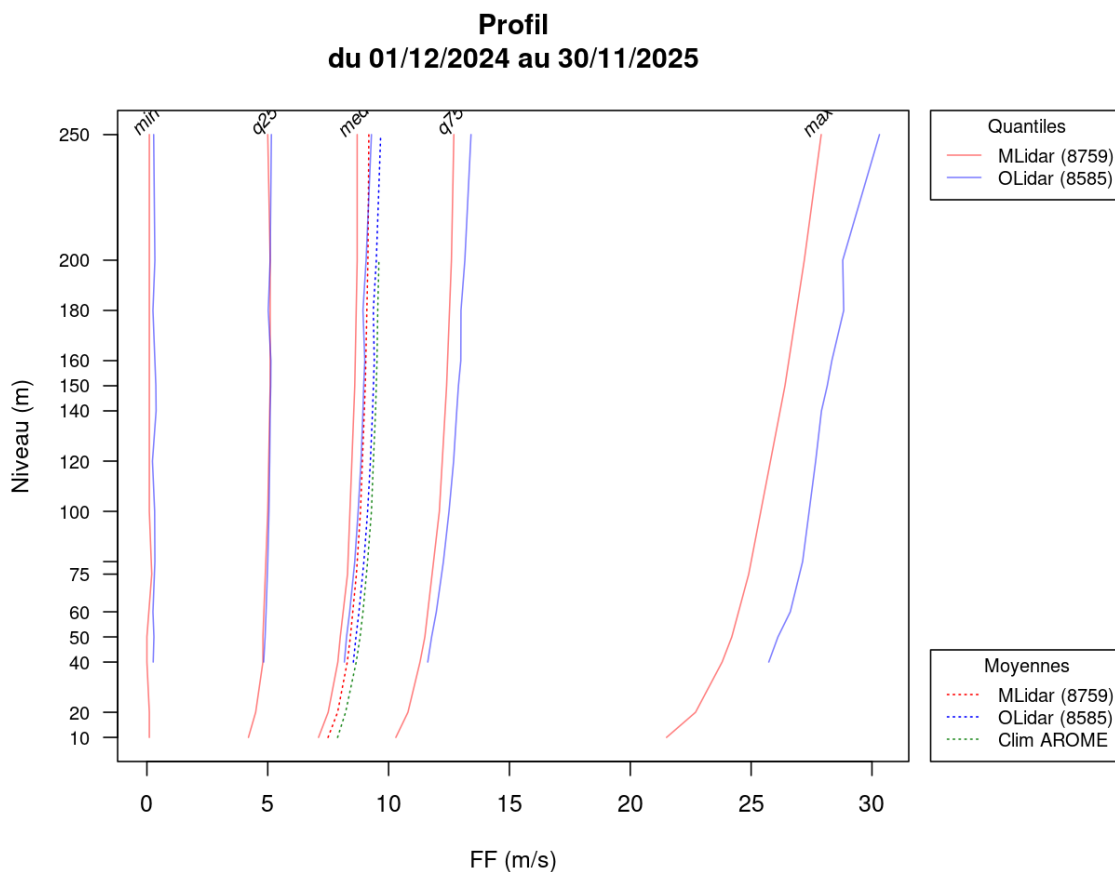


Illustration 17 : profils des vents avec quantiles du LiDAR

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

3.3.2.7 Cisaillement du vent (données 10 minutes)

Entre les niveaux 40 m et 160 m, on observe un cisaillement de vent du LiDAR de 1 m/s pour les vents de secteur sud (cf. Illustration 18). Pour les autres secteurs, les médianes sont inférieures à 1 m/s, avec des valeurs proches de 0,9 m/s pour les secteurs sud-est et ouest. Nous avons décidé de représenter le cisaillement de vent du modèle entre les niveaux disponibles les plus proches, 50 m et 150 m. Les caractéristiques sont comparables avec toutefois un cisaillement légèrement plus faible (au maximum autour de 0,7 m/s pour les médianes) pour les directions de sud et sud-est.

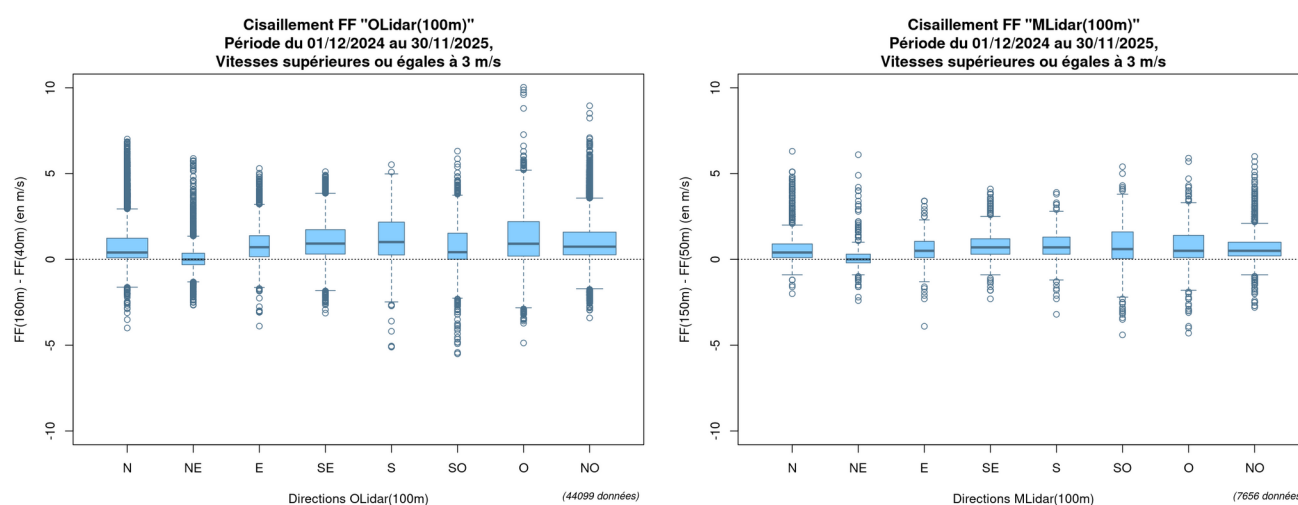


Illustration 18 : cisaillement des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite).

La largeur des boîtes à moustaches est proportionnelle au nombre de données.

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

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

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

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

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

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

Pour les vents de secteur sud à sud-ouest, où le coefficient α au q75 est le plus fort, on constate un cycle diurne qu'il faut relativiser en raison de la faible occurrence de vents provenant de ce secteur (cf. Illustration 16). Il en existe également un pour les secteurs nord-ouest à nord-est qui peut s'expliquer par un effet de brise.

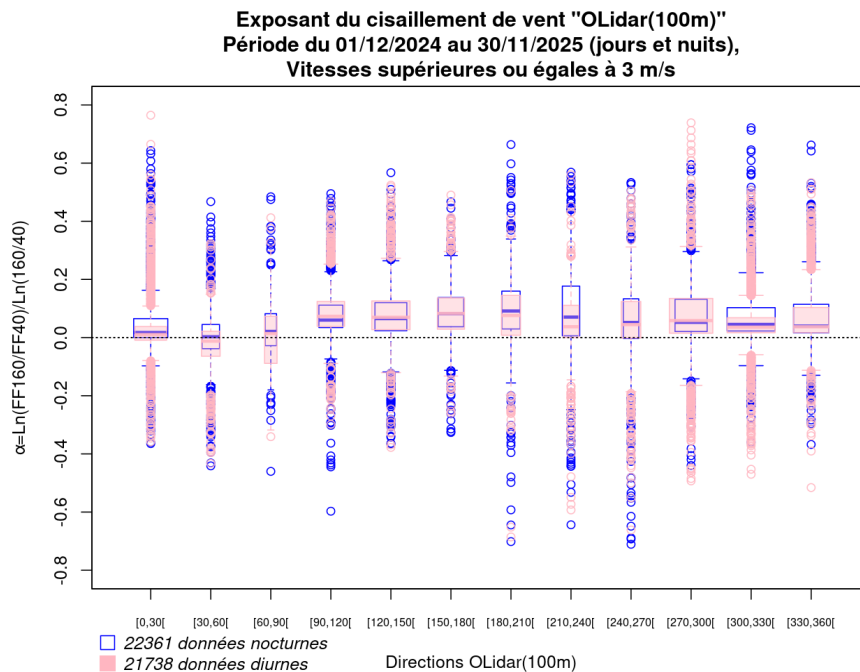


Illustration 19 : exposant du cisaillement de vent du LiDAR.

La largeur des boîtes à moustaches est proportionnelle au nombre de données.

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

3.3.2.8 Analyse des risques de turbulence atmosphérique à 100 m

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

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

Sur la période de la campagne de mesures, on constate que les vents de secteur nord à nord-ouest présentent une intensité de turbulence légèrement plus forte que pour les autres directions (cf. Illustration 20), essentiellement dû au mistral et à la tramontane qui soufflent souvent avec de fortes rafales.

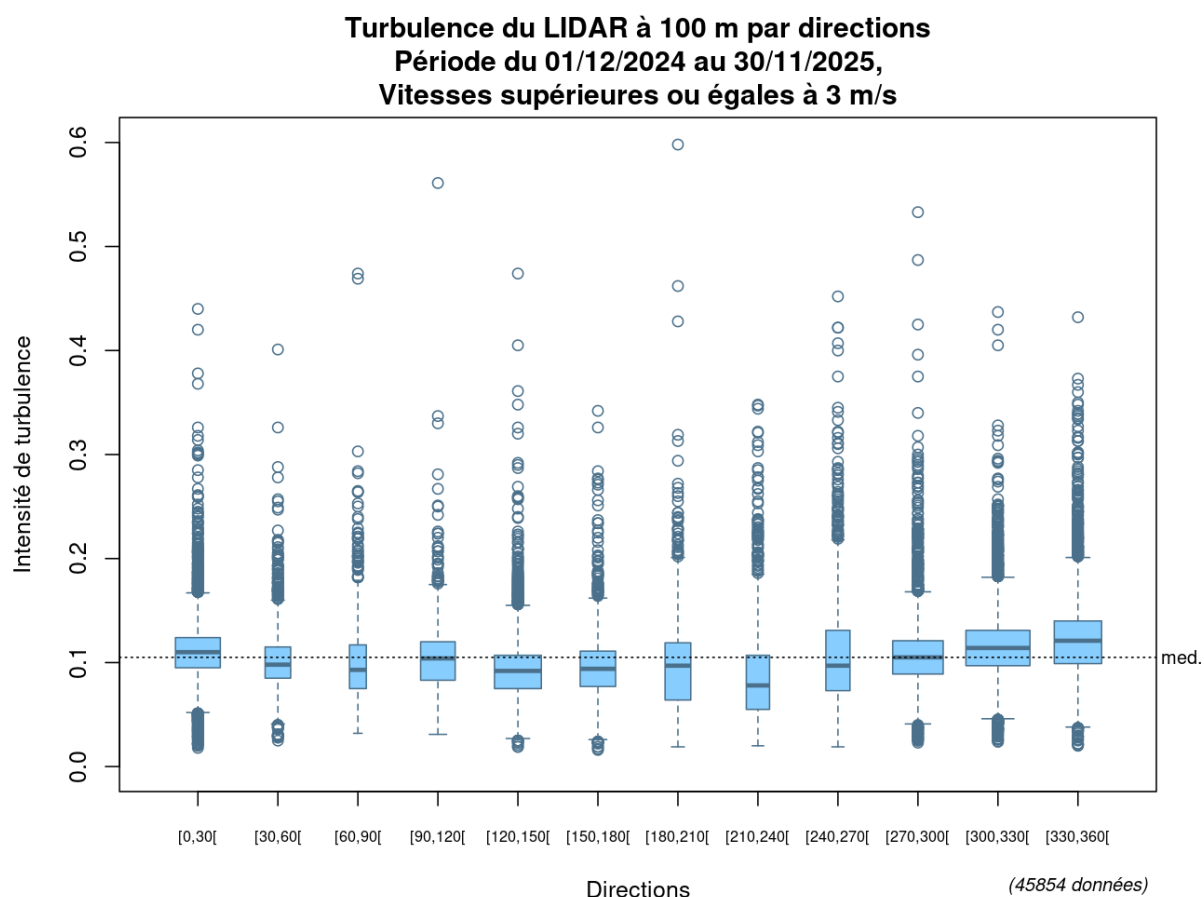


Illustration 20 : intensité de la turbulence mesurée par le LiDAR

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

3.3.2.9 Séries horaires FF et FXI à 100 m

Météo-France fournit les séries de données horaires de vent à 40 m, 100 m et 200 m comportant le vent moyen (FF et DD) et la vitesse du vent maximal (FXI) pour la période du 1/12/2024 au 30/11/2025. Ces paramètres sont accompagnés des codes qualité QFF, QDD et QFXI (cf. § 2.2.1.3 Codes qualité).

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

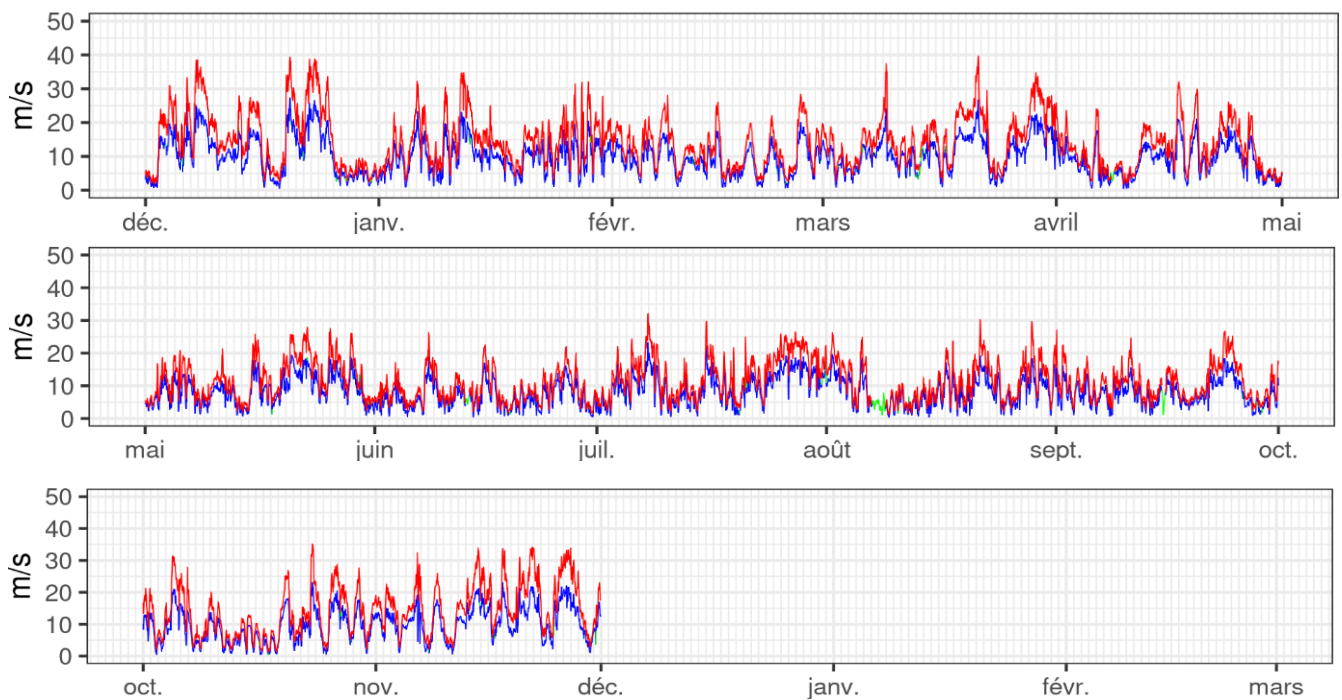


Illustration 21 : séries FF (mesuré en bleu, estimé en vert) et FXI (en rouge) à 100 m du LiDAR en m/s.
Le tableau p. 17 donne les raisons des principaux manques de données.

4 Analyse des données du vent mesuré par l'anémomètre

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

L'anémomètre étant installé sur la bouée à une hauteur de 4 m au-dessus de la mer, nous avons extrapolé les vitesses du vent à 10 m à l'aide de la formule logarithmique classique suivante (voir par exemple OMM, 2024) :

$$FF_{10m} = FF_{4m} \times \frac{\ln(10/0,0002)}{\ln(4/0,0002)} \quad 5$$

D'après l'illustration 22, environ 19 % des valeurs enregistrées par l'anémomètre dépassent le seuil de force ou de direction. La plupart des dépassements du seuil de force sont dus à des forces modélisées inférieures à celles relevées par l'anémomètre.

Les dépassements du seuil de direction (*croix orange et carrés rouges*) sont assez nombreux (13,7 %). Près de la moitié de ces dépassements (6,0 % des valeurs enregistrées) correspondent à des forces faibles inférieures à 3 m/s. Pour des vitesses supérieures à 10 m/s, on enregistre des dépassements du seuil de direction (écart supérieur à 30° entre l'anémomètre et le modèle) dans seulement 2 % des cas.

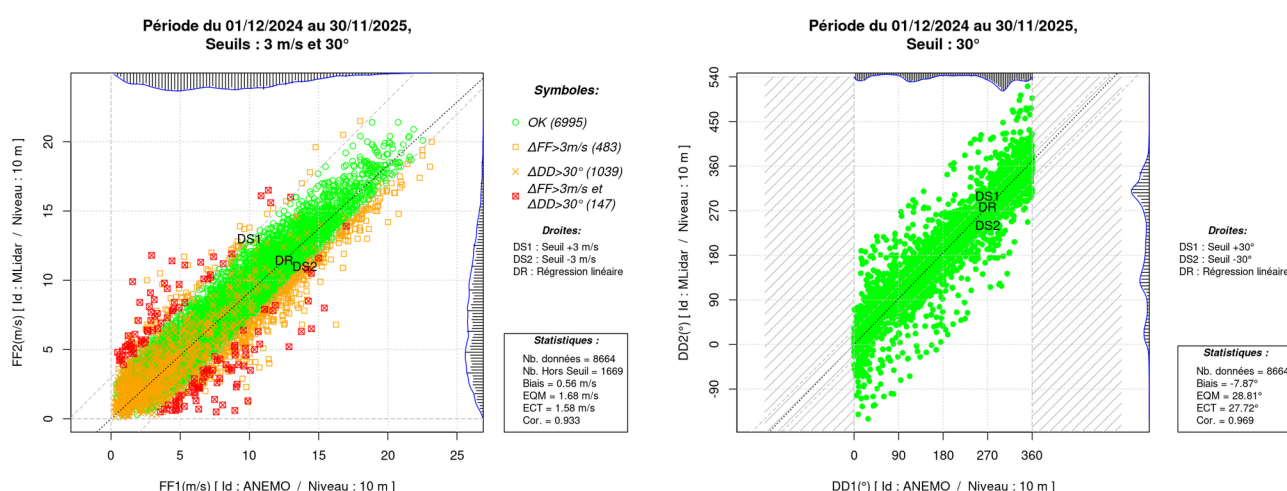


Illustration 22 : comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) de l'anémomètre avec le modèle

Les distributions statistiques horaires des observations et du modèle à 10 m sont assez proches (graphique de gauche de l'illustration 23). Les quantiles apparaissant ci-dessous sont proches et ne diffèrent que de 0,1 m/s au premier décile à 1,0 m/s au Q90. Le modèle présente davantage de cas pour des forces comprises entre 2 et 8 m/s, et moins dans l'ensemble pour les vents inférieurs à 2 m/s et supérieurs à 8 m/s. Le diagramme « quantile-quantile » des forces de vent de l'anémomètre (graphique de droite de l'illustration 23) présente des points

5 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.

qui se décalent progressivement par rapport à la première bissectrice après le premier quartile en penchant du côté des données observées. Les résultats de l'anémomètre restent globalement corrects, compte tenu de la difficulté de l'extrapolation de la mesure à 10 m.

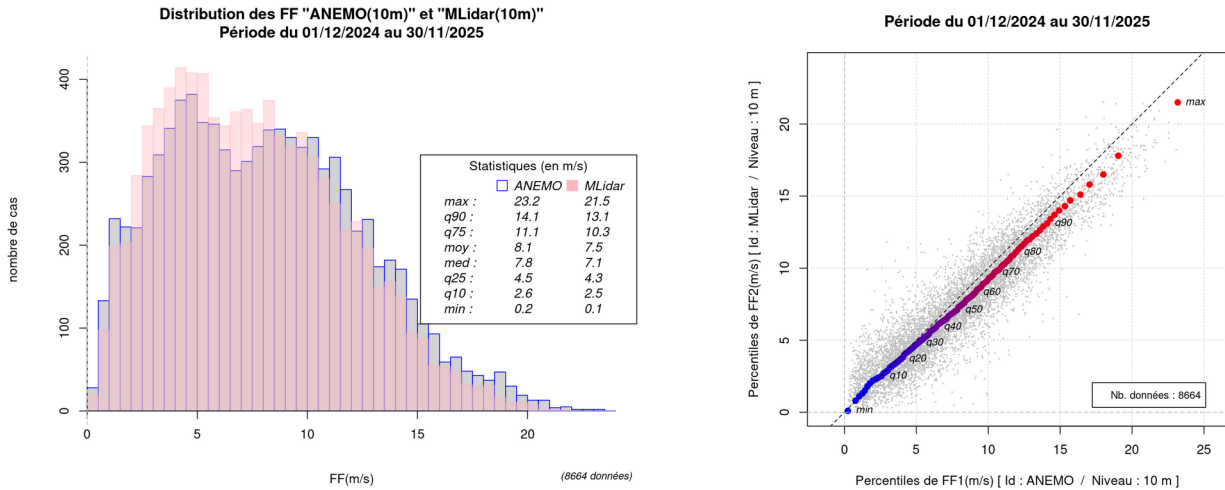


Illustration 23 : distribution des vents horaires de l'anémomètre (à gauche) et diagramme « quantile-quantile » (à droite).

La rose des vents de l'anémomètre présente de nombreuses ressemblances avec celle du modèle AROME à 10 m avec des dominances de flux de nord-ouest et de sud-est. On note toutefois une légère différence avec une composante nord-ouest davantage axée au secteur 300° en observation de l'anémomètre et celle de sud-est au secteur 120°.

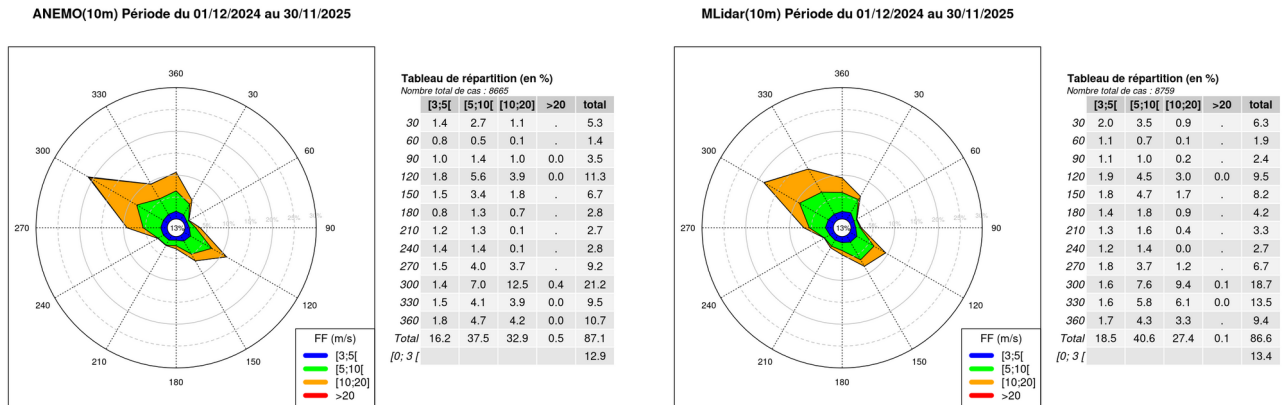


Illustration 24 : roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'anémomètre.

5 Conclusion

Au cours de la campagne, ont été assurés un monitoring continu de la disponibilité des données LiDAR, ainsi qu'un contrôle entre les valeurs mesurées et les données fournies par le modèle météorologique AROME.

Le monitoring du LiDAR a permis de contrôler la présence des données sur les 12 niveaux de mesure et plus précisément de vérifier la cohérence des observations de force et de direction à 100 m avec la modélisation AROME. La vérification s'est également 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, des séries complètes du vent horaire à 40 m, 100 m et 200 m ont pu être reproduites.

La campagne réalisée sur la zone Golfe du Lion Est (GLE) entre le 1^{er} décembre 2024 et le 30 novembre 2025 s'est déroulée sans incident notable, avec un excellent taux de disponibilité des données et une très bonne qualité de mesure, eu égard aux statistiques analysées.

6 Bibliographie

Chatel, V., Dalphinnet, A., Merle, R., Mezdoor, A., Rouchy, N., Roulle, O., Joly B., Pouponneau B. et Legrand R. : Projet de parc éolien off-shore, Note technique Lots 1, 2 et 3, V2 , 2025.

Organisation météorologique mondiale, 2024 : *Mesure de variables météorologiques*. In : *Guide des instruments et des méthodes d'observation*. T. I. OMM-No. 8. url : <https://library.wmo.int/idurl/4/68713>.

Annexes

Table des annexes

Annexe 1 : situation du dimanche 9 mars 2025 (coup de vent à fort coup de vent de secteur sud-est).....	37
Annexe 2 : situation des 4 et 5 octobre 2025 (coup de vent de nord-ouest).....	38
Annexe 3 : climatologie du 1 ^{er} décembre 2024 au 30 novembre 2025.....	39
Annexe 4 : distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100 m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	43
Annexe 5 : répartitions horaires par mois des forces de vent du LiDAR à 100 m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	45
Annexe 6 : tableau de contingence des forces de vent du LiDAR (en %).....	47
Annexe 7 : roses des vents mensuelles du LiDAR à 100 m (données brutes).....	48
Annexe 8 : profils de vent du LiDAR.....	50
Annexe 9 : cisaillement du vent du LiDAR à 100 m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	52
Annexe 10 : turbulence du vent du LiDAR à 100 m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	54

Annexe 1 : situation du dimanche 9 mars 2025 (coup de vent à fort coup de vent de secteur sud-est)

La tempête *Jana* se positionne au large du Portugal à partir du 7 mars en se creusant sur place et génère sur le golfe du Lion un flux de secteur sud-est modéré. Le front froid associé à la tempête traverse le golfe du Lion du sud vers le nord le 9 mars. Il est fortement pluvieux et orageux. À l'avant de ce front actif, les vents de sud-est se renforcent assez fort dans la matinée, puis fort au passage du front à localement très fort au nord du golfe. À l'arrière, les vents chutent en milieu de journée faible à modéré.

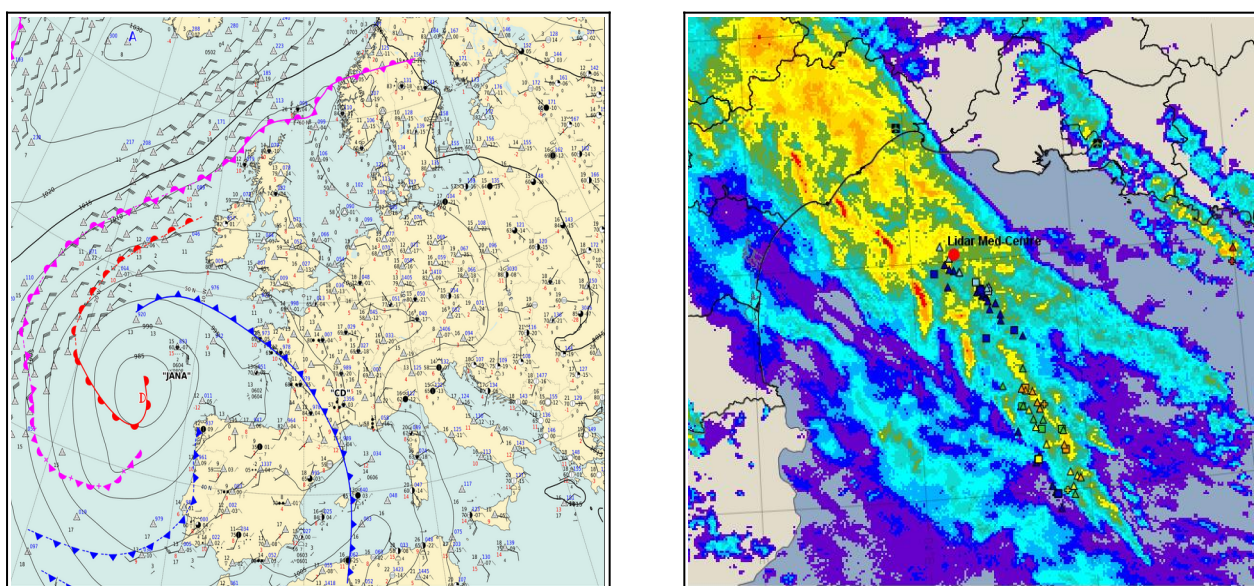


Illustration 25 : analyse du dimanche 9 mars 2025 à 12 UTC (à gauche) et image radar/foudre à 10h20 UTC (à droite)

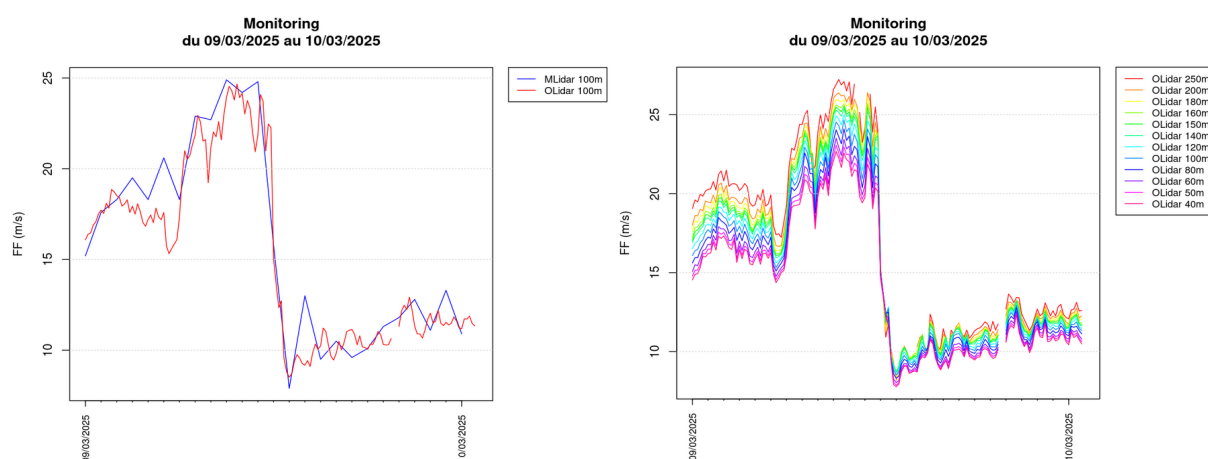


Illustration 26 : à gauche, comparaison des mesures du LiDAR à 100 m avec le modèle AROME le 9 mars 2025, à droite, visualisation des vents mesurés par le LiDAR à différentes hauteurs entre 40 et 250 m.

On observe une très bonne corrélation entre les valeurs enregistrées par le LiDAR et celles issues de la modélisation AROME. La contiguïté des courbes dans la phase de décélération du flux traduit une excellente concordance des données, que ce soit en termes d'intensité des vents ou de synchronisation temporelle. 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 : situation des 4 et 5 octobre 2025 (coup de vent de nord-ouest)

Le samedi 4 octobre 2025, la perturbation associée à la tempête *Amy*, centrée au nord des îles britanniques, traverse la France par l'ouest et creuse la dépression *Barbara* sur le golfe de Gênes.

Le flux modéré en provenance du nord-ouest au niveau du golfe du Lion se renforce assez fort à fort au cours de l'après-midi, avec un maximum d'intensité en milieu de nuit. Le lendemain, la dépression s'évacue vers l'est, le flux s'atténue, devenant modéré à assez fort.

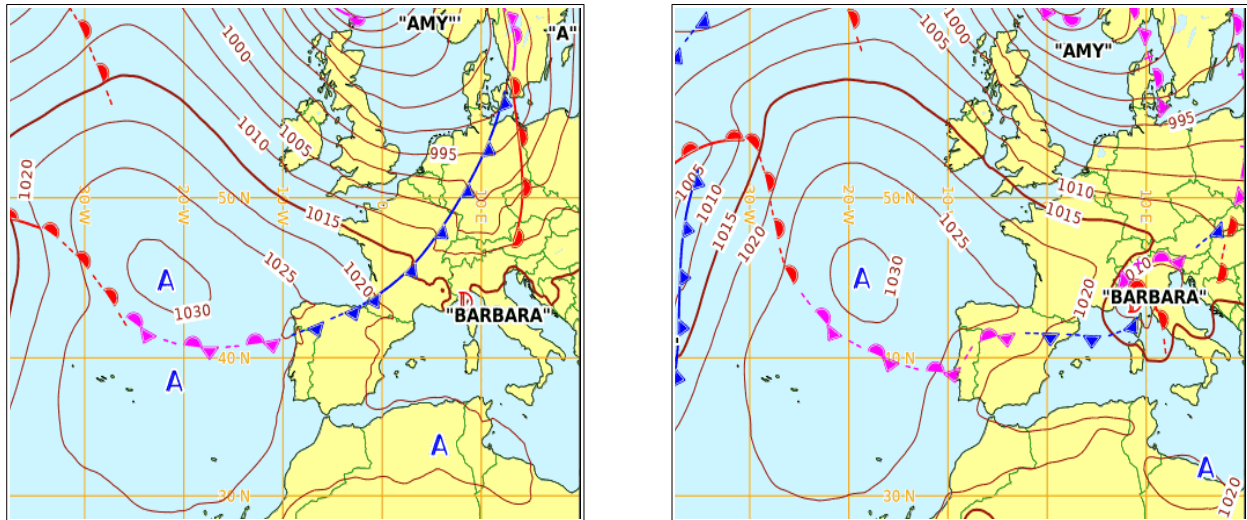


Illustration 27 : champ de pression niveau mer du 04/10/25 à 12 UTC (à gauche) et du 5/10/2025 à 00 UTC à droite.

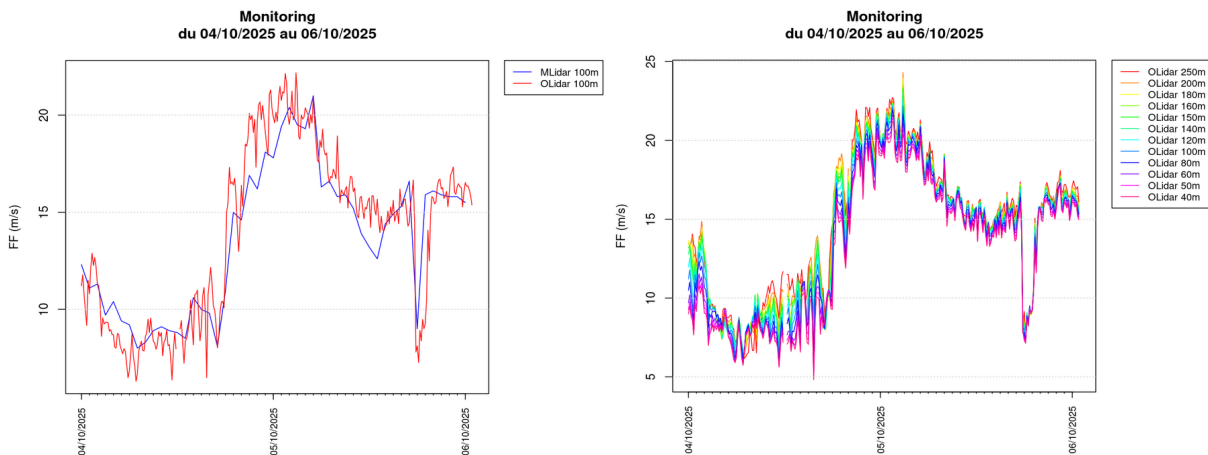


Illustration 28 : à gauche, comparaison des mesures du LiDAR à 100 m avec le modèle AROME les 4 et 5 octobre 2025, à droite, visualisation des vents mesurés par le LiDAR à différentes hauteurs entre 40 et 250 m.

Les valeurs observées par le LiDAR et celles issues de la modélisation AROME démontrent une très bonne corrélation. Une légère déviate a pu être observée le 5 octobre en début de soirée. Elle est due à un bref passage du vent au secteur nord dans la vallée du Rhône et a été parfaitement prévue par le modèle AROME.

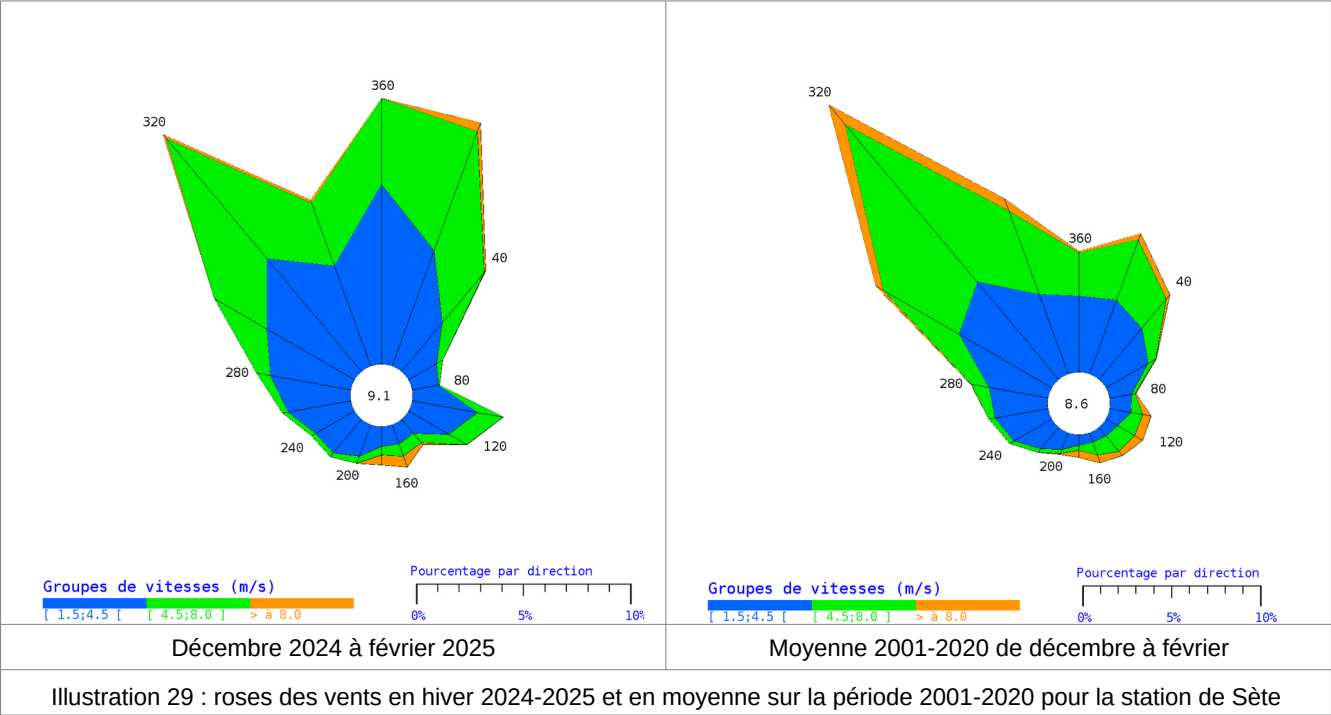
Annexe 3 : climatologie du 1^{er} décembre 2024 au 30 novembre 2025

La station météorologique de référence pour qualifier la climatologie du vent à 10 mètres correspondant à celle de la « bouée Golfe du Lion est » est située à Sète (34). La période sur laquelle portent les statistiques s'étend de 2001 à 2020.

1 - Analyse de l'hiver 2024-2025 (mois de décembre 2024 à février 2025)

Les roses de vent observé pendant l'hiver 2024-2025 et celles des périodes hivernales 2001-2020 se démarquent essentiellement par une baisse des cas de vent de secteur nord-ouest (300° à 340°), 30,1 % en 2025 contre 41,9 % sur 20 ans, en particulier les vents modérés (compris entre 4.5 et 8.0 m/s) avec 13,2 % contre 21,3 % et les plus forts (> 8.0 m/s) avec 0,4 % contre 2,7 %.

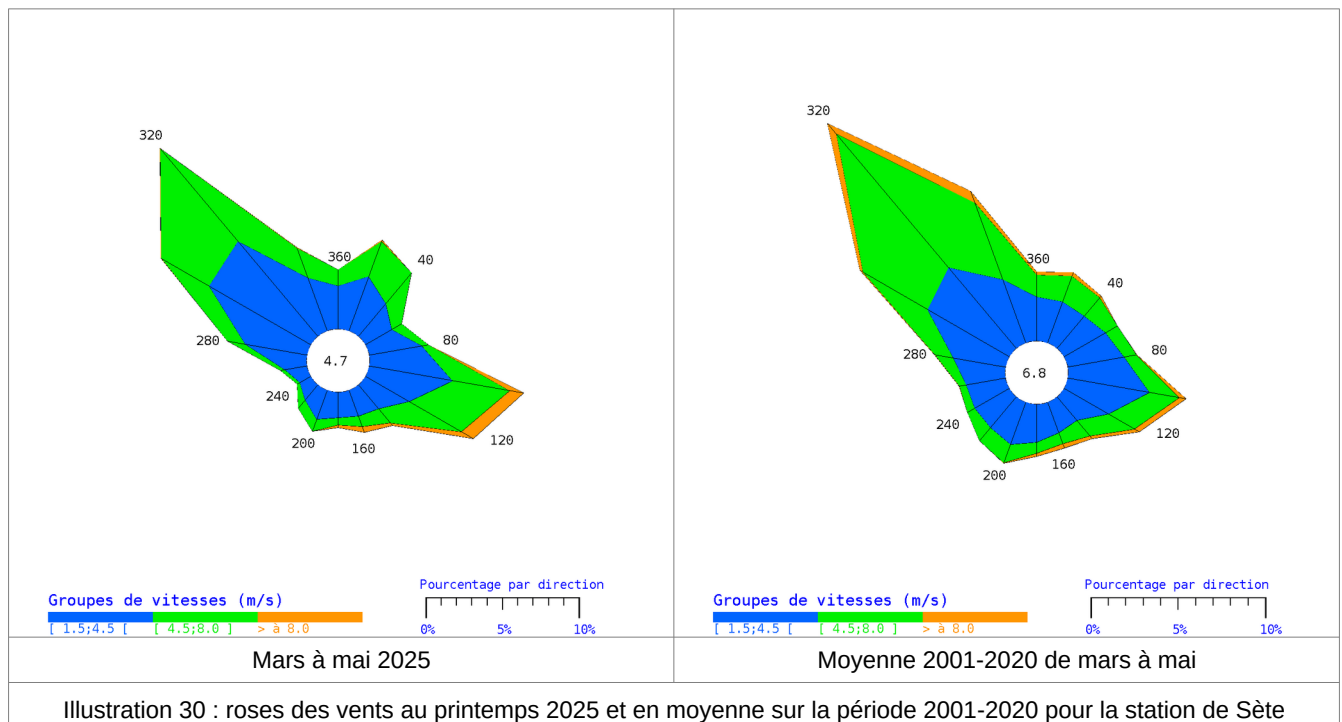
Le large flux de nord à nord-est (360° à 40°) devient dominant (30,6 % en 2025 contre 21,4 % sur 20 ans) avec un doublement des vents inférieurs à 4,5 m/s pour la direction 360° avec 8,4 % contre 4,2 %. On note également une légère augmentation du flux d'est-sud-est avec 4,3 % contre 2,4 %.



2 - Analyse du printemps 2025 (mois de mars à mai 2025)

Les roses de vent observé au printemps 2025 et celles des périodes printanières 2001-2020 sont assez similaires. Les vents dominants proviennent toujours d'un large secteur nord-ouest (300°/340°) et d'est-sud-est (080°/140°), avec un transfert des vents forts (> 8.0 m/s) de nord-ouest quasi inexistant en 2025 au profit des vents forts d'est-sud-est (2,1 % en 2025 contre 0,9 % sur 20 ans).

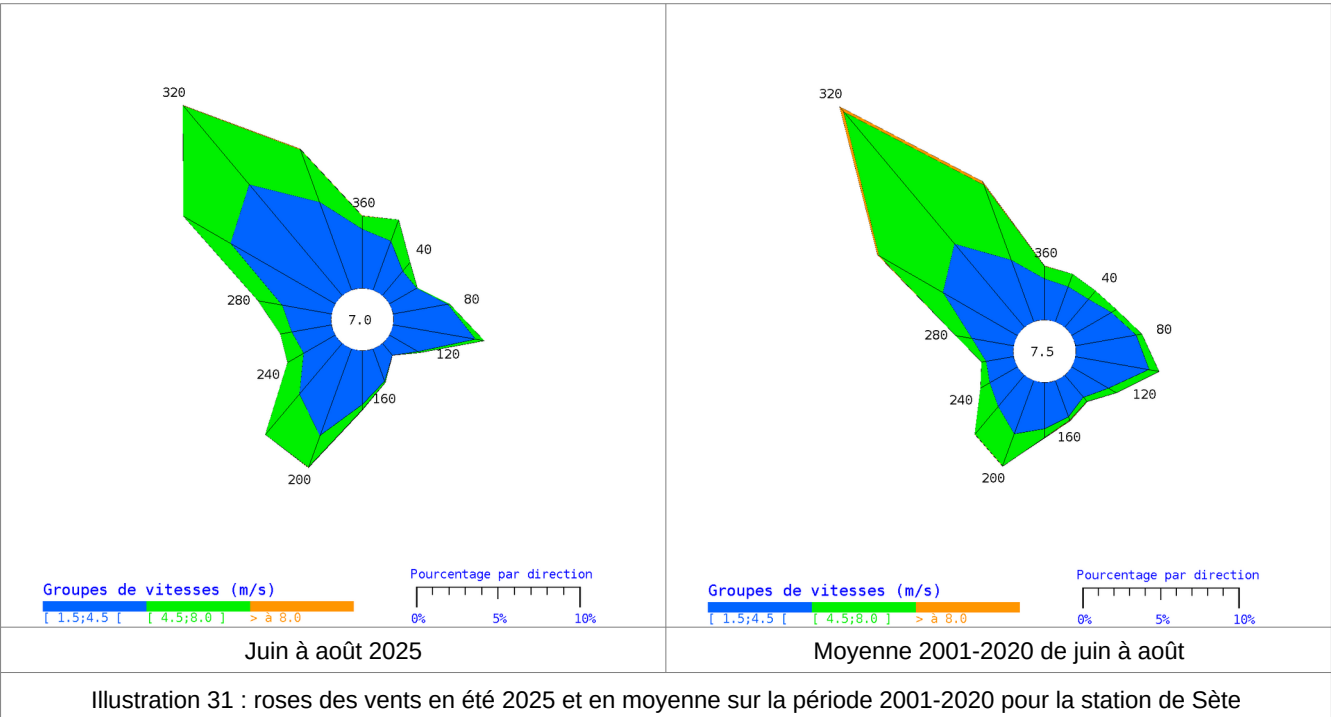
On remarque également une légère diminution des vents de sud-sud-ouest (7,2 % en 2025 contre 10,0 % sur 20 ans) en faveur du nord-est (11,7 % contre 8,2 %).



3 - Analyse de l'été 2025 (mois de juin à août 2025)

L'été 2025 est conforme aux moyennes de la période 2001-2020 dans les grandes lignes avec une majorité de vents de secteur nord-ouest, à peine plus nombreux qu'en général, avec 3,3 % des cas totaux en plus, mais dans des proportions différentes. En effet, la tramontane a soufflé moins fort en 2025 qu'habituellement avec des vents faibles (1,5 à 4,5 m/s) et modérés (4,5 à 8 m/s) respectivement à 22,2 % et 13,0 % contre 16,7 % et 20,8 % entre 2001 et 2020.

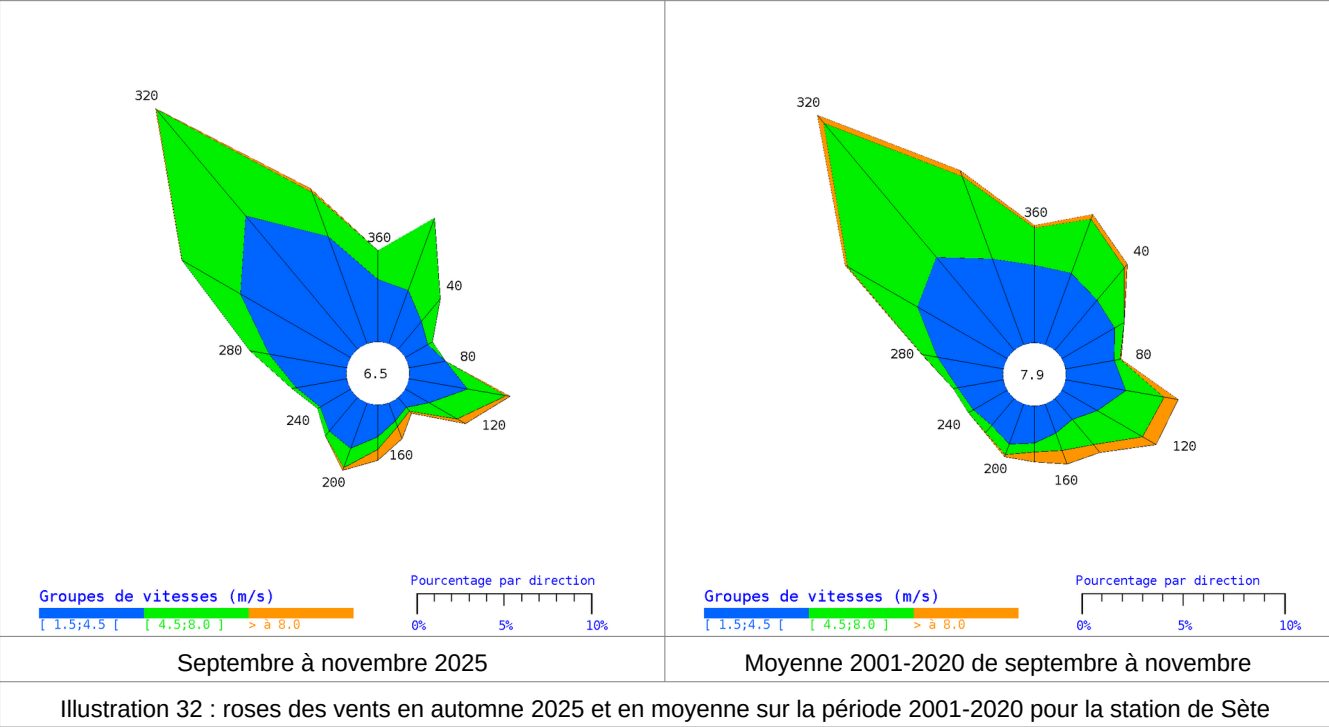
En raison de températures plus élevées qu'en moyenne lors de cette saison estivale, les phénomènes de brise de mer de sud-sud-ouest (200°/220°) sont plus nombreux 18,6 % contre 14,3 %, au détriment des vents d'est-sud-est 12,4 % contre 15,2 %.



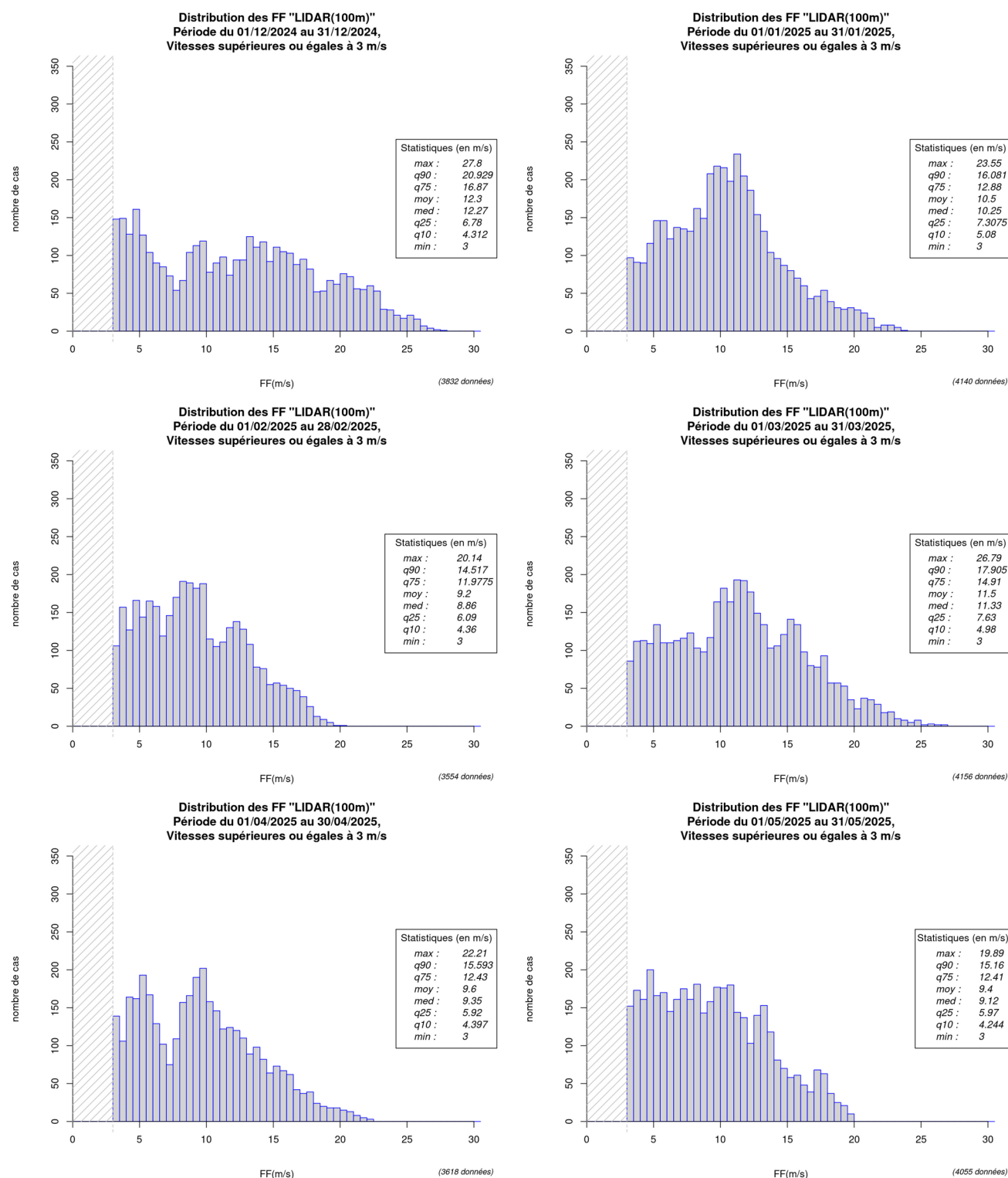
4 - Analyse de l'automne 2025 (septembre à novembre 2025)

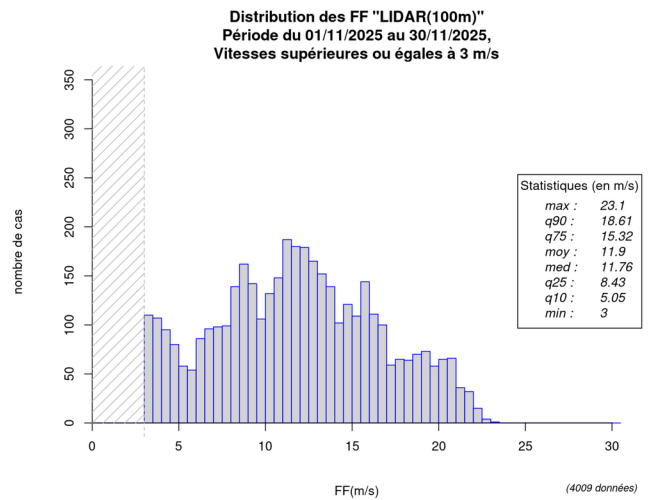
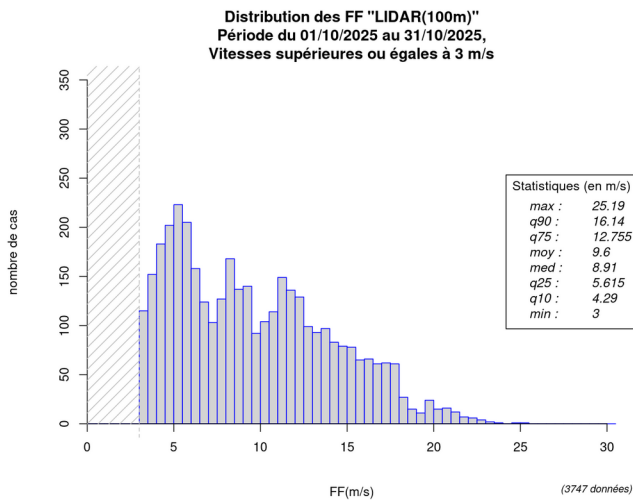
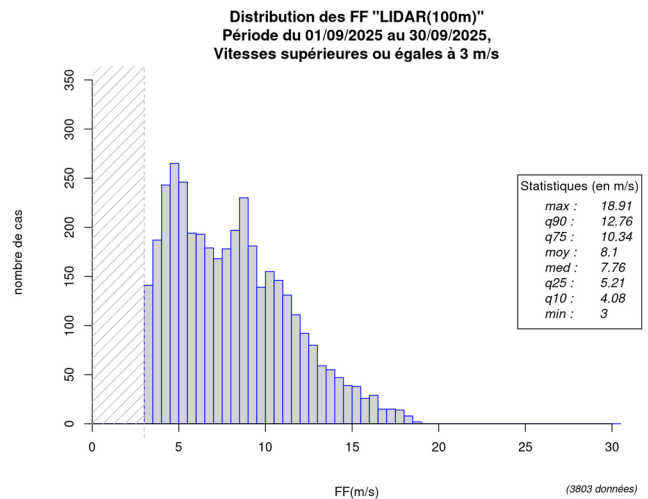
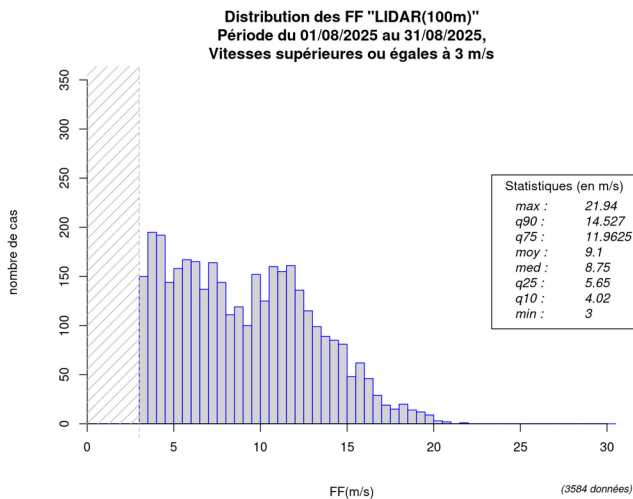
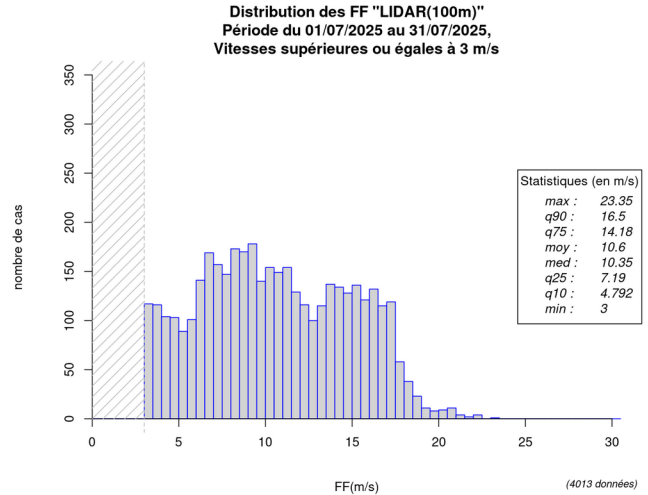
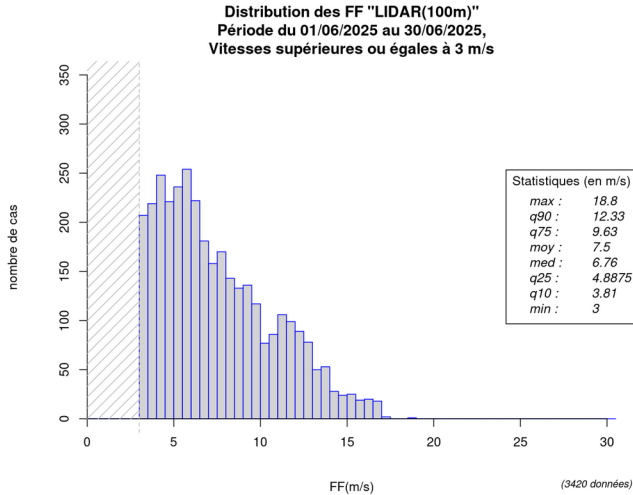
Au cours de cet automne météorologique, à l'instar de l'été 2025, on retrouve davantage de cas de sud-sud-ouest (7,0 % en 2025 contre 5,0 % sur 2001-2020) et pour la dominance des vents de nord-ouest, une répartition des vents faibles est plus importante qu'en moyenne (7,0 % en 2025 contre 5,0 % sur 2001-2020).

On note une légère diminution du nombre de mesure sur l'axe 40° à 60° avec 5,6 % contre 9,1 % ainsi qu'au 140° avec 1,2 % au lieu de 3,5 %.



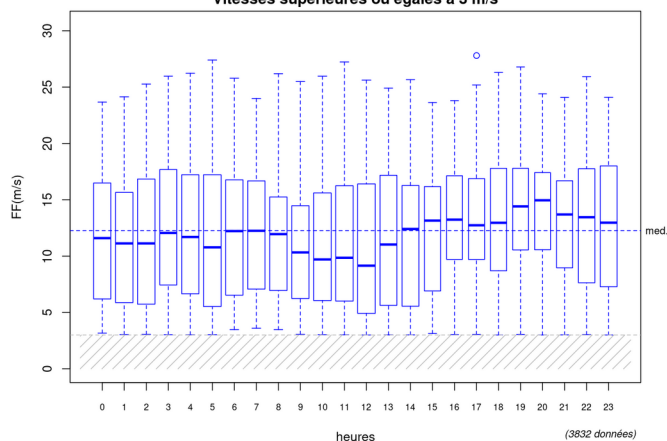
Annexe 4 : distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100 m (données brutes seuillées à 3 m/s)



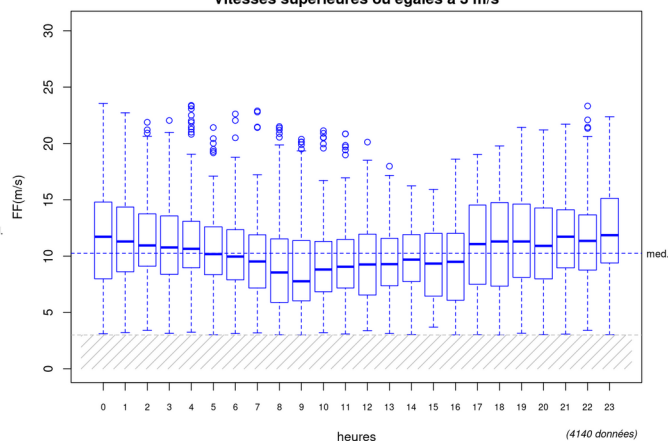


Annexe 5 : répartitions horaires par mois des forces de vent du LiDAR à 100 m (données brutes seuillées à 3 m/s)

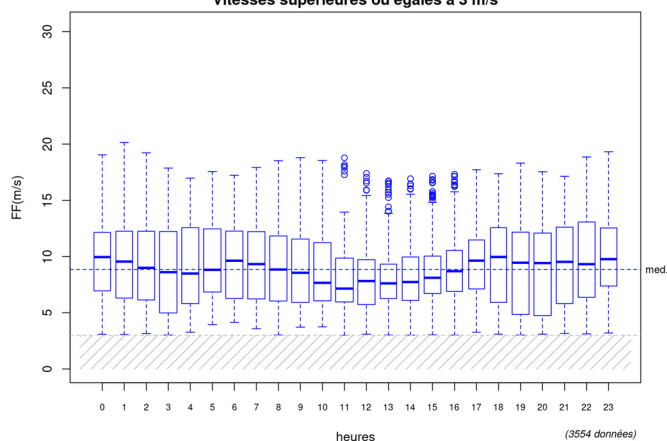
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/12/2024 au 31/12/2024,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



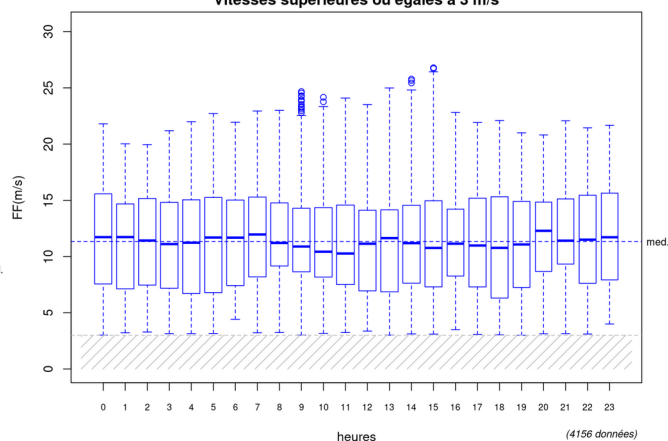
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/01/2025 au 31/01/2025,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



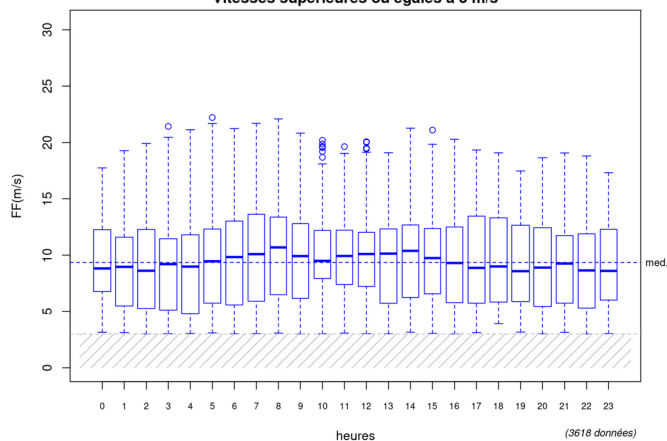
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/02/2025 au 28/02/2025,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



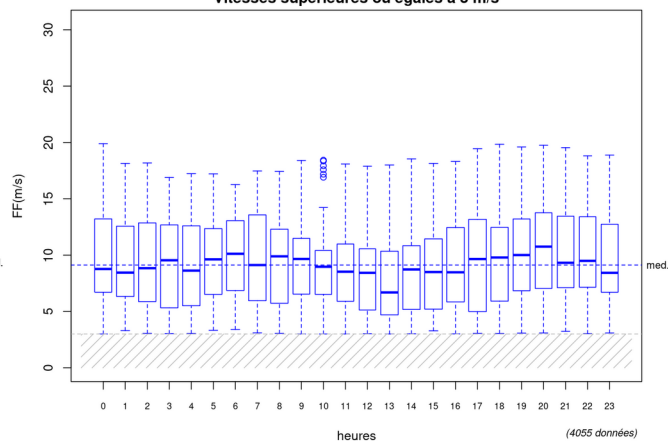
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/03/2025 au 31/03/2025,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s

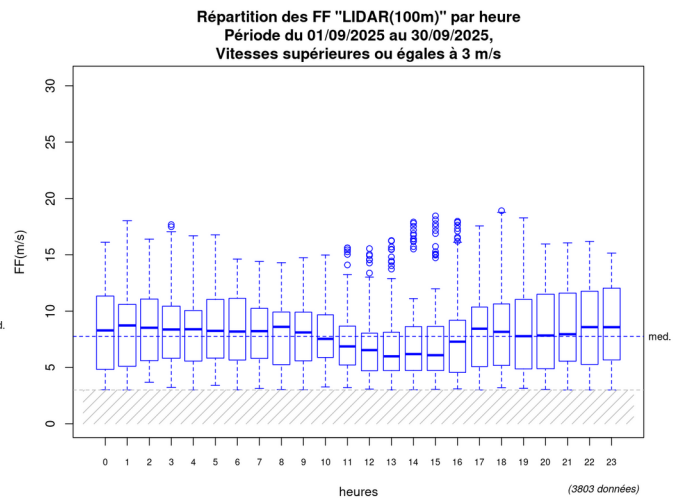
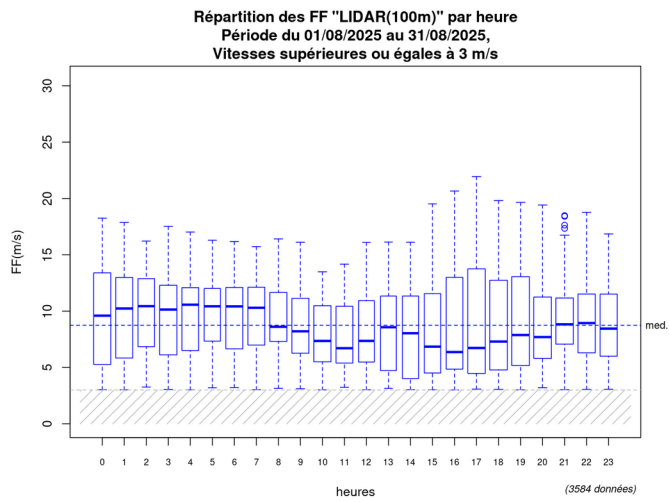


Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/04/2025 au 30/04/2025,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/05/2025 au 31/05/2025,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s





Annexe 6 : tableau de contingence des forces de vent du LiDAR (en ‰)

Force par classe (m/s)	Directions en degrés												Total
	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	
[34,35[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[33,34[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[32,33[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[31,32[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[30,31[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[29,30[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[28,29[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
[27,28[	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.1	.	.	0.1
[26,27[	.	.	.	0.1	.	.	.	.	.	0.2	0.1	.	0.3
[25,26[	.	.	.	0.1	.	.	.	.	.	0.6	0.1	.	0.8
[24,25[	.	.	.	0.3	.	.	.	.	0.0	0.5	0.2	.	1.0
[23,24[	.	.	.	0.3	.	0.0	.	.	0.0	0.8	0.4	0.1	1.7
[22,23[	.	.	.	0.3	0.0	0.0	0.0	.	0.1	2.2	0.9	0.3	3.9
[21,22[	0.0	.	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	.	0.4	2.8	1.5	0.5	5.9
[20,21[	0.1	.	0.0	1.0	0.0	0.2	0.0	.	0.7	4.2	2.2	0.8	9.3
[19,20[	0.1	.	0.0	1.1	0.1	0.3	0.1	0.0	0.8	4.2	2.5	1.6	10.8
[18,19[	0.0	.	0.1	1.1	0.3	0.6	0.1	0.0	0.9	6.1	3.0	1.4	13.6
[17,18[	0.1	.	0.4	1.9	1.1	1.8	0.1	.	1.6	10.1	4.2	2.4	23.5
[16,17[	0.1	0.0	0.4	2.9	1.5	1.3	0.2	0.0	1.7	12.4	6.2	2.5	29.2
[15,16[	0.5	0.0	0.3	4.8	2.8	1.2	0.3	.	3.0	13.8	6.7	3.3	36.6
[14,15[	0.8	0.0	0.2	3.5	2.8	1.0	0.4	.	3.4	15.9	6.5	4.3	38.9
[13,14[	2.3	0.1	0.3	5.4	3.1	1.8	0.7	0.0	3.5	17.8	6.6	6.9	48.5
[12,13[	3.1	0.1	0.7	8.0	5.4	1.4	0.7	0.2	4.2	16.4	8.2	9.5	57.7
[11,12[	4.6	0.2	1.1	10.0	6.2	1.9	1.1	0.7	4.5	18.1	9.1	9.9	67.3
[10,11[	5.2	0.4	0.8	10.1	5.4	2.1	1.9	1.0	3.6	18.1	7.8	8.8	65.3
[9,10[	6.8	0.7	1.1	12.0	8.0	2.1	1.7	1.6	3.6	14.6	9.4	9.4	71.1
[8,9[	5.6	1.2	1.2	8.1	8.2	2.7	2.1	2.1	4.6	13.5	9.3	11.4	69.9
[7,8[	4.6	1.1	1.4	5.0	7.4	3.8	3.5	2.5	3.1	10.8	9.3	9.3	61.8
[6,7[	5.3	1.5	2.0	6.3	8.6	4.9	4.5	2.8	4.2	9.6	7.9	7.1	64.6
[5,6[	9.2	2.9	3.8	7.3	8.4	5.4	4.0	4.5	5.2	7.6	6.4	8.1	72.9
[4,5[	9.3	4.6	3.8	7.6	8.0	4.2	4.2	4.2	5.1	7.2	5.3	9.7	73.2
[3,4[	6.2	4.1	4.3	5.0	7.0	4.3	5.6	3.6	4.2	5.8	6.2	8.0	64.4
[0,3[	8.8	7.9	7.7	8.3	8.2	8.3	10.4	7.3	7.9	10.9	10.6	11.3	107.5
Total	72.7	24.8	29.7	111.1	92.5	49.4	41.6	30.6	66.1	224.3	130.6	126.5	1000.0

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

AOÛT 2025 - LIDAR (100m)

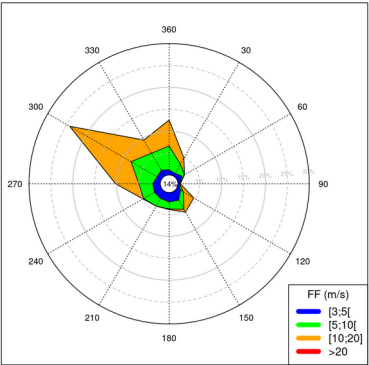


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 694

	[3;5[	[5;10[	[10;20[	>20	total
30	0.7	2.4	1.6	.	4.8
60	1.4	0.6	.	.	2.0
90	0.3	0.1	0.1	.	0.6
120	1.0	0.7	2.7	.	4.5
150	2.3	2.4	0.7	.	5.5
180	2.2	1.6	0.1	.	3.9
210	1.9	2.0	.	.	3.9
240	1.9	2.9	0.1	.	4.9
270	1.7	3.2	5.3	.	10.2
300	1.2	6.9	16.1	.	24.2
330	1.6	4.5	3.5	.	9.5
360	1.2	5.5	5.9	.	12.5
Total	17.3	32.9	36.3	.	86.5
[0; 3[	.	.	.	.	13.5

SEPTEMBRE 2025 - LIDAR (100m)

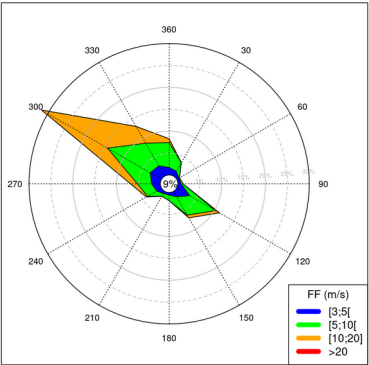
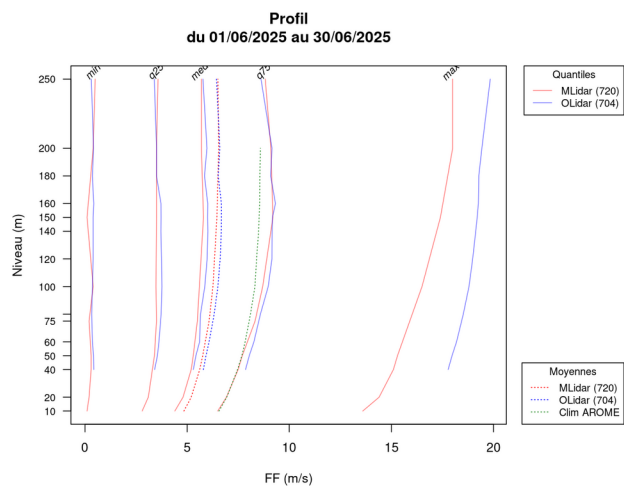


Tableau de répartition (en %)

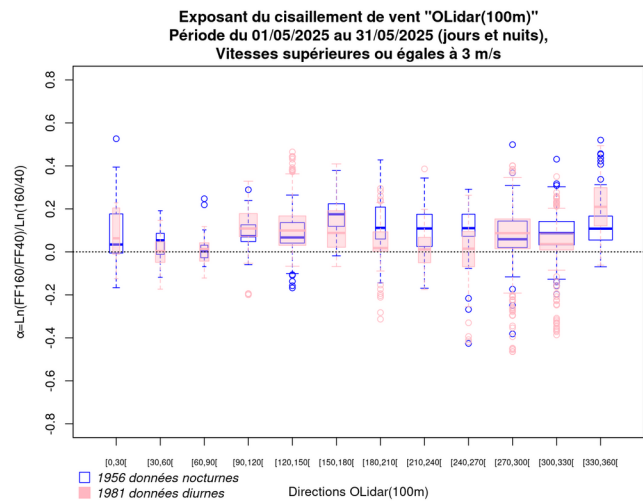
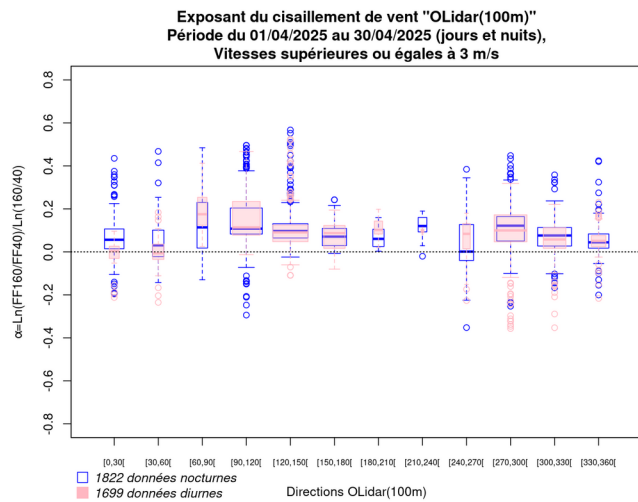
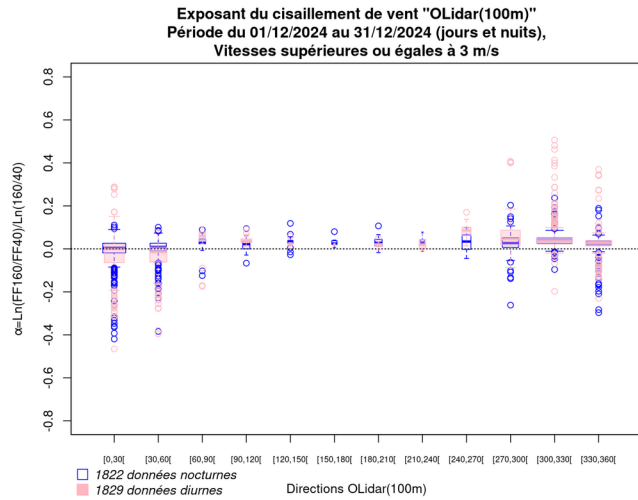
Nombre total de cas : 702

	[3;5[	[5;10[	[10;20[	>20	total
30	1.3	2.3	.	.	3.6
60	0.6	0.1	.	.	0.7
90	0.7	0.4	.	.	1.1
120	3.4	6.8	1.0	.	11.3
150	1.4	4.8	0.7	.	7.0
180	0.6	1.3	.	.	1.9
210	0.6	0.7	.	.	1.3
240	1.3	2.4	0.3	.	4.0
270	2.0	3.3	1.6	.	6.8
300	3.0	11.3	17.4	.	31.6
330	2.7	6.0	4.4	.	13.1
360	1.7	5.7	0.9	.	8.3
Total	19.2	45.2	26.2	.	90.6
[0; 3[	.	.	.	.	9.4

Annexe 8 : profils de vent du LiDAR

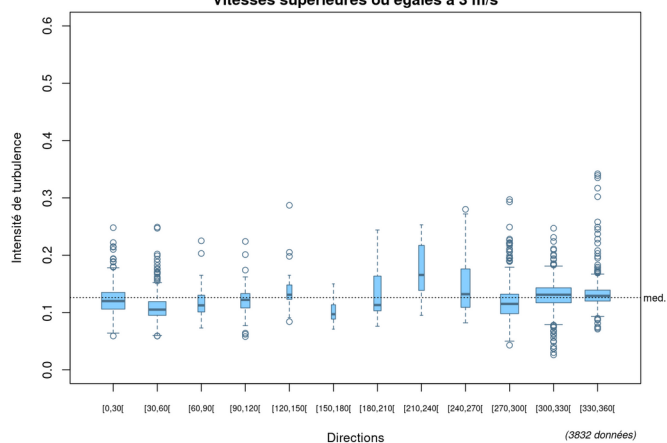


Annexe 9 : cisaillement du vent du LiDAR à 100 m (données brutes seuillées à 3 m/s)

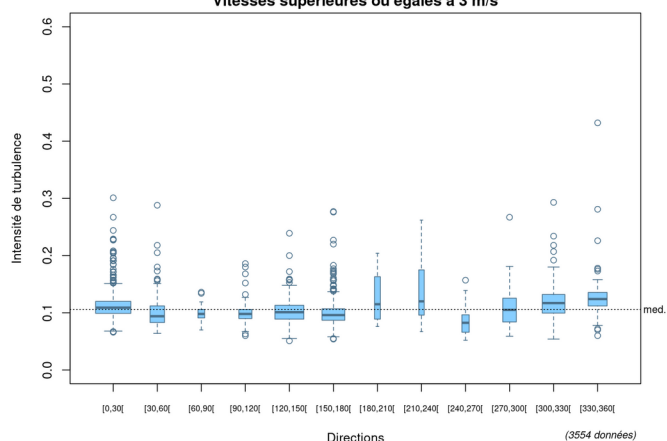


Annexe 10 : turbulence du vent du LiDAR à 100 m (données brutes seuillées à 3 m/s)

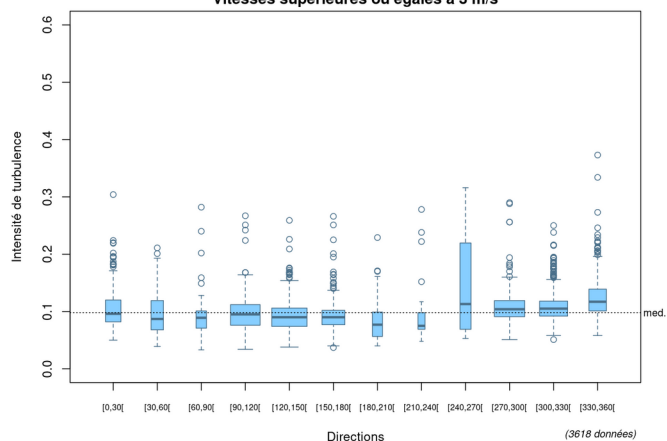
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/12/2024 au 31/12/2024,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



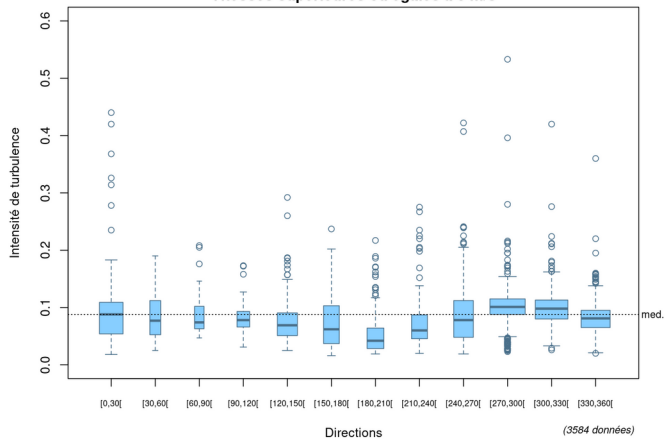
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/02/2025 au 28/02/2025,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



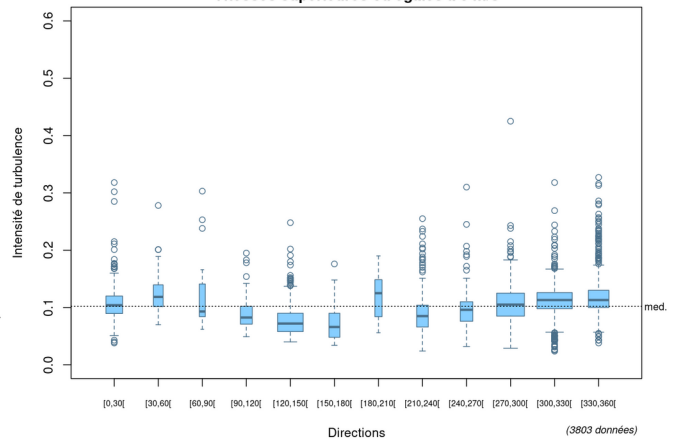
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/04/2025 au 30/04/2025,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



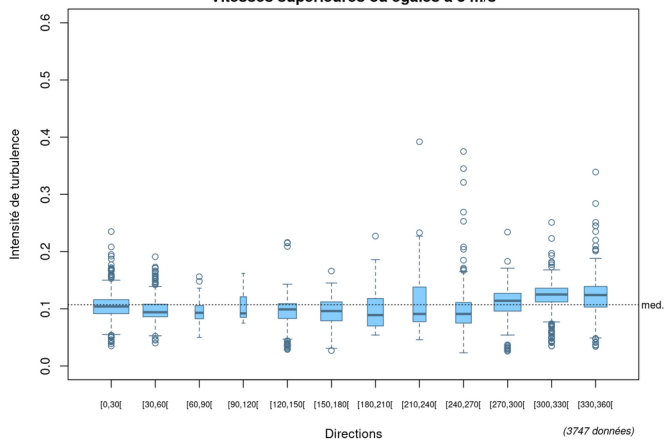
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/08/2025 au 31/08/2025,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



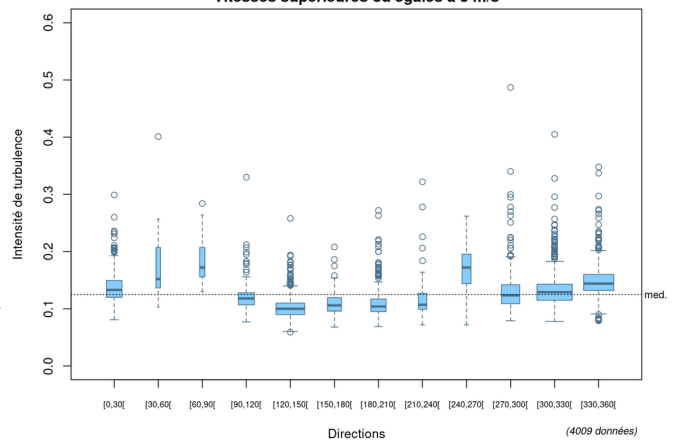
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/09/2025 au 30/09/2025,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/10/2025 au 31/10/2025,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/11/2025 au 30/11/2025,
Vitesses supérieures ou égales à 3 m/s



FIN DE DOCUMENT
