

Acquisition et suivi des mesures sur le site AO4 Normandie

Rapport semestriel : Novembre 2020 – Avril 2021



Version 1 du 27/07/2021

Client : Direction Générale de l'Énergie et du Climat du Ministère de la Transition Écologique	@ guillaume.rouviere@developpement-durable.gouv.fr ☎ 01 40 81 20 98	 MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE <i>Liberté Égalité Fraternité</i>
Chargé d'affaires : Christophe Jacolin	@ christophe.jacolin@meteo.fr ☎ +33 5 61 07 86 85	 METEO FRANCE
Chef de projet : Raphaël Legrand	@ raphael.legrand@meteo.fr ☎ +33 5 61 07 86 11	

- page laissée intentionnellement vide -

Documents de référence antérieurs

	Intitulé	Référence	Date	Version
DR1	Projet de parc éolien off-shore au large de Dunkerque	Rapport_final_DGEC_Dunkerque	09/02/2018	V6
DR2	Projet de parc éolien off-shore au large de l'île d'Oléron	Rapport_final_12mois_DGEC_Oleron	04/12/2018	V2

Évolutions successives

Référence	Date	Version	Évolution
DGEC_AO4_Normandie_Rapport-semestriel_novembre2020-avril2021_V1_20210727	27/07/2021	V1	Livraison Rapport intermédiaire (6 mois)

Signatures

	Nom	Service
Rédacteurs	Nicolas Guérin Michel Aidonidis Éric Balcon	DSM/CS/ÉNERGIE DIRO/CM/BREST DIRO/CM/BREST
Relecteurs	Raphaël Legrand Julie Capo Gérard Doligez	DSM/CS/DC DSM/CS/ÉNERGIE DIROP/MAR
Approbateur	Raphaël Legrand	DSM/CS/DC

Table des matières

1	Contexte	1
1.1	Zone d'étude	1
1.2	Descriptif de la solution retenue pour l'acquisition des mesures sur site	4
2	Méthodologie appliquée	5
2.1	Présentation du modèle AROME	6
2.2	Type de données fournies par le LiDAR	8
2.3	Les outils statistiques	9
2.3.1	Affectation d'un code qualité aux séries DD, FF et FXI	9
2.3.1.1	Seuils de référence	9
2.3.1.2	Détermination des seuils adaptés au LiDAR	10
2.3.1.3	Codes qualité	10
2.3.2	Statistiques de contrôle de la mesure	11
3	Analyse des données de vent mesuré par le LiDAR	12
3.1	Suivi des données	12
3.1.1	Disponibilité des données brutes	12
3.1.2	Monitoring des données FF brutes	15
3.1.3	Monitoring des erreurs	15
3.2	Retour sur des cas de données manquantes ou douteuses	16
3.3	Statistiques	17
3.3.1	Contrôle de la mesure du LiDAR	17
3.3.2	Statistiques descriptives du vent mesuré	19
3.3.2.1	Vent moyen horizontal à 100 m du LiDAR	19
3.3.2.2	Distributions	20
3.3.2.3	Variation diurne de la force du vent horizontal (données horaires)	21
3.3.2.4	Variation mensuelle de la force du vent horizontal (données horaires)	22
3.3.2.5	Roses des vents (données horaires)	24
3.3.2.6	Profils verticaux de vent (données horaires)	25
3.3.2.7	Cisaillement du vent (données 10 minutes)	26
3.3.2.8	Analyse des risques de turbulence atmosphérique à 100 m	27
3.3.2.9	Séries horaires FF et FXI à 100 m	29
4	Analyse des données de vent mesuré par l'anémomètre	30
5	Conclusion	32
	Annexes	33

Liste des illustrations

Illustration 1 : Situation géographique de Barfleur (source www.geoportail.gouv.fr)	1
Illustration 2 : Roses des vents annuelle et saisonnières de la station de Gonneville	2
Illustration 3 : Carte marine du large de Barfleur (source portail Data - SHOM)	3
Illustration 4 : Emplacement du LiDAR et de la zone d'étude du futur parc éolien (source OpenStreetMap)	3
Illustration 5 : Photo de la plateforme de mesure	4
Illustration 6 : Photo du LiDAR	5
Illustration 7 : Domaine de calcul du domaine AROME	7
Illustration 8 : Evolution des cumuls mensuels de nombre d'observations utilisées dans AROME par type d'observations	9
Illustration 9 : Localisation des points de mesure les plus proches du LiDAR (source OpenStreetMap)	10
Illustration 10 : Exemple de tableau mensuel de disponibilité des données pour le mois de décembre 2020.	15
Illustration 11 : Monitoring des données 10 minutes de FF sur les 11 niveaux de mesure (à gauche) et comparaison avec le modèle à 100 m (à droite)	17
Illustration 12 : Monitoring des erreurs de forces et de directions	18
Illustration 13 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) du LiDAR avec le modèle	19
Illustration 14 : Diagramme « quantile-quantile » du LiDAR	21
Illustration 15 : Répartitions des écarts de directions du LiDAR en fonction de l'heure (à gauche) et de la direction (à droite)	21
Illustration 16 : Dépassements des seuils de force (à gauche) et de direction (à droite) du vent du LiDAR	22
Illustration 17 : Distributions des vents horaires du LiDAR	24
Illustration 18 : Répartitions horaires des forces du vent du LiDAR	25
Illustration 19 : Répartitions mensuelles des forces du vent du LiDAR ; la largeur des boîtes à moustaches est fonction du nombre de données	26
Illustration 20 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) du LiDAR	28
Illustration 21 : Profils des vents avec quantiles du LiDAR	29
Illustration 22 : Cisaillement des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) du LiDAR	30
Illustration 23 : Exposant du cisaillement de vent du LiDAR	31
Illustration 24 : <i>IT déduite des mesures du LiDAR</i>	32
Illustration 25 : Séries FF et FXI à 100 m du LiDAR	33
Illustration 26 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) de l'anémomètre avec le modèle	34
Illustration 27 : Distribution des vents horaires de l'anémomètre (à gauche) et diagramme « quantile-quantile » (à droite)	35
Illustration 28 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'anémomètre	35
Illustration 29 : ANASYG du dimanche 27 décembre 2020 à 00UTC	38
Illustration 30 : Comparaison des mesures Lidar avec le modèle AROME pour le site de Barfleur les 26 et 27 décembre 2020	40
Illustration 31 : Roses des vents du mois de novembre de la station de Gonneville (50)	41
Illustration 32 : Roses des vents hivernales de la station de Gonneville (50)	42

Illustration 33 : Roses des vents du mois de <i>mars</i> de la station de <i>Gonneville</i> (50)	43
Illustration 34 : Roses des vents du mois d' <i>avril</i> de la station de <i>Gonneville</i> (50)	43
Illustration 35 : Anomalies mensuelles de températures minimales et maximales de <i>novembre</i> 2020 à <i>avril</i> 2021 à la station du <i>Gonneville</i> - Période de référence : 1981 - 2010	44
Illustration 36 : Anomalies mensuelles de précipitations de <i>novembre</i> 2020 à <i>avril</i> 2021 à la station de <i>Gonneville</i> - Période de référence : 1981 - 2010	45
Illustration 37 : Cumuls mensuels de précipitations de <i>novembre</i> 2020 à <i>avril</i> 2021 à la station de <i>Gonneville</i> - Période de référence : 1981 - 2010	46
Illustration 38 : Nombre mensuel de jours de précipitations significatives de <i>novembre</i> 2020 à <i>avril</i> 2021 à la station de <i>Gonneville</i> et normale - Période de référence : 1981 - 2010	46

Liste des tableaux

Tableau 1 : Taux de présence (en %) des données (DD,FF) 10 minutes (en italique) et horaires (en gras) du LiDAR ; en rouge, les taux critiques	14
Tableau 2 : Récapitulatif des problèmes techniques rencontrés sur le LiDAR	16
Tableau 3 : Classes de vitesses par mois. Taux « brut » (en italique) et « reconstitué » (en gras) du LiDAR	19
Tableau 4 : Statistiques 2001-2020 (en gras) et valeurs 2020 à 2021 (en italique) des forces de vent de la station de <i>Gonneville</i> ; surlignages rouge et bleu : excédent et déficit de plus de 5 % par rapport à la normale	23
Tableau 5: Valeurs de l'exposant α en fonction de la nature du terrain (source http://eolienne.f4jr.org/vent)	27

Glossaire

Abréviation	Signification
OLidar	Données d'observation au point Lidar
MLidar	Données modèle au point Lidar
FF	Vent moyenné sur 10 minutes (en m/s et 1/10)
DD	Direction du vent moyenné sur 10 minutes (en °)
FXI	Maximum du vent instantané sur 10 minutes, également nommé rafale (en m/s)

1 Contexte

La Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC) a sollicité Météo-France pour la réalisation d'études de vent dans la zone de l'AO4 Normandie. Le but est d'identifier et de lever les risques susceptibles de se présenter dans la zone retenue comme favorable au développement de l'éolien off-shore.

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

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

1.1 Zone d'étude

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

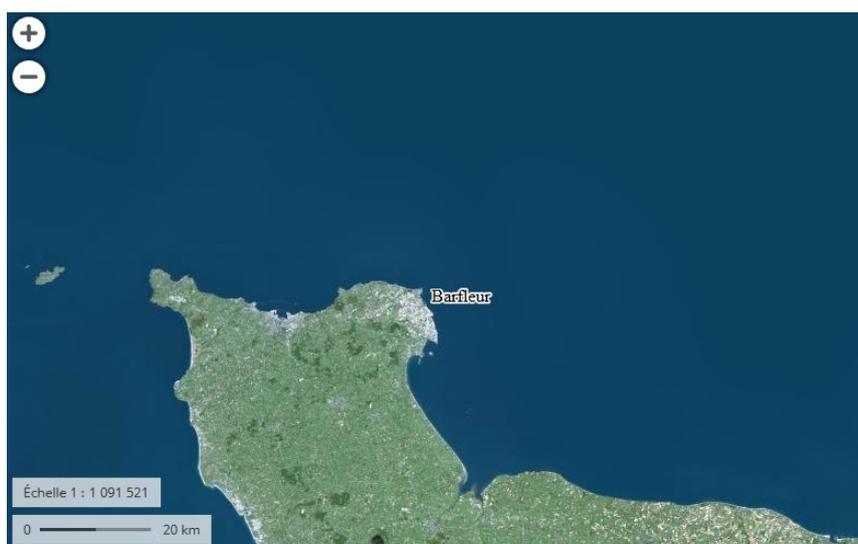


Illustration 1 : Situation géographique de Barfleur (source www.geoportail.gouv.fr)

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

- un rapide flux d'ouest-sud-ouest généré par la circulation de nombreuses dépressions sur l'Atlantique Nord. Les tempêtes hivernales y sont fréquentes ;
- un flux modéré d'est-nord-est se mettant en place lors de l'établissement d'un anticyclone puissant sur les îles britanniques ou la Scandinavie. Cette situation peut être observée en toute saison ;
- l'absence d'impact du continent par effet de brise du fait de la distance importante entre la zone d'étude et les côtes de la Manche.

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

Météo-France dispose de deux stations de mesure, l'une au sémaphore de Barfleur (Gatteville-le-Phare), l'autre à Gonneville. Dans cette étude, nous retiendrons le poste de Gonneville qui est le plus représentatif de la zone d'étude.

Le point de mesure du Gonneville se trouve à 134 mètres d'altitude, sur l'aéroport de Maupertus près de Cherbourg. Cette station nous permet d'avoir une information sur le vent dans le secteur de la zone d'étude (cf. 2 p36).

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

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

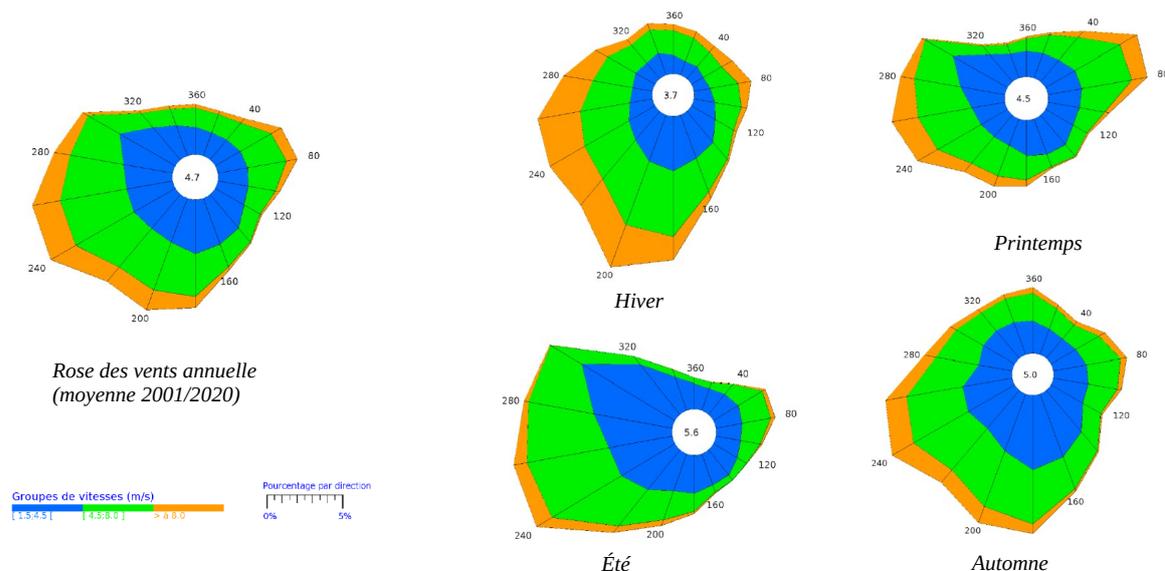


Illustration 2 : Roses des vents annuelle et saisonnières de la station de Gonneville

D'un point de vue de la géographie marine, la zone d'étude se situe au niveau du plateau continental de faible pente vers le large et d'une profondeur variant entre 50 et 100 mètres. Les fonds sont réguliers.

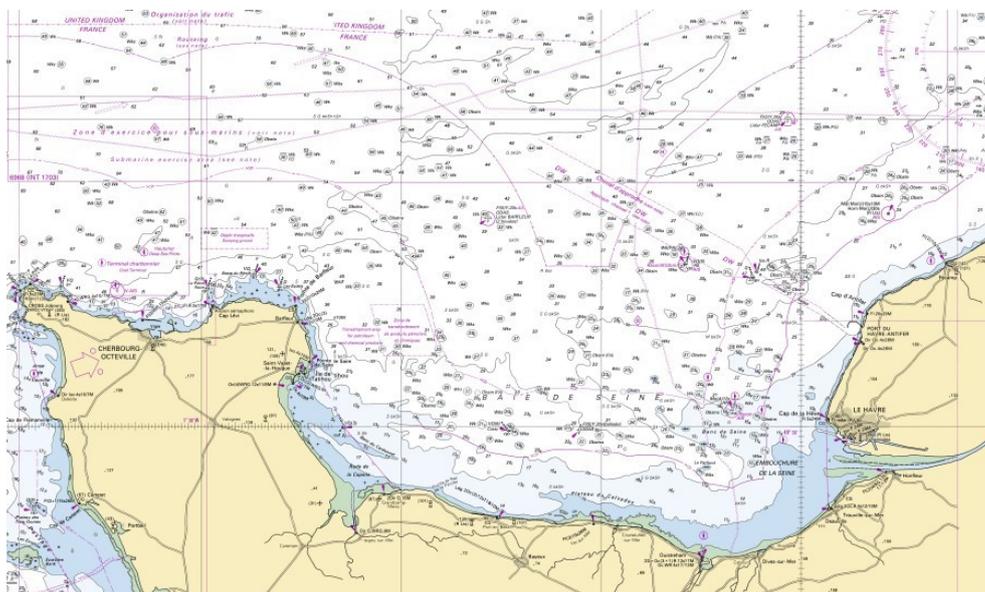


Illustration 3 : Carte marine du large de Barfleur (source portail Data - SHOM)

Afin d'assurer l'acquisition et le suivi des mesures sur site, Météo-France a retenu un prestataire assurant la fourniture de données relatives à l'observation 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 : -0,789696° Lat : 49,839094°. Elle se déroule à compter du 10 novembre 2020 et pour une durée de 12 mois. 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.



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

La solution retenue par Météo-France est une plateforme flottante équipée d'un LiDAR LEOSPHERE intégrant une centrale inertielle et un algorithme de calcul permettant de corriger les mesures de vent en fonction des mouvements du LiDAR.

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



Illustration 5 : Photo de la plateforme de mesure

La mesure de vent est réalisée à l'aide d'un LiDAR de chez LEOSPHERE : Windcube V2 Offshore 8.66 pour bouée, modèle WLS866-4. 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 sont réalisées sur 11 hauteurs différentes, de 40 à 200 mètres. Dans le cadre de l'acquisition et du suivi de la mesure durant cette campagne, les hauteurs considérées sont les suivantes : 40, 50, 60, 80, 100, 120, 140, 150, 160, 180 et 200 m.



Illustration 6 : Photo du LiDAR

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

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 permet de représenter notamment les hauteurs suivantes en terme 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 système régional de prévision numérique du temps AROME, dont le pas de temps est horaire, est exploité en opérationnel à Météo-France depuis décembre 2008. AROME a été développé grâce à d'étroites collaborations, nationales (CNRS) et internationales (CEPMMT, Aladin, Hirlam), afin de tenir compte des dernières avancées en modélisation atmosphérique. Les paramétrisations physiques du modèle sont en majeure partie héritées du modèle de recherche Més0-NH alors que la partie dynamique est une adaptation pour la fine échelle du noyau dynamique du modèle Aladin. L'initialisation du modèle est réalisée par un système d'assimilation de données tridimensionnel 3DVar dérivé du système d'assimilation variationnelle d'Arpège, adapté à la résolution du modèle et alimenté en données fines. Le modèle AROME couvre la France métropolitaine et les pays voisins avec une maille de 1,3 km et 90 niveaux verticaux avec un premier niveau à 5 m au-dessus de la surface. Le domaine géographique couvert est représenté ci-dessous.

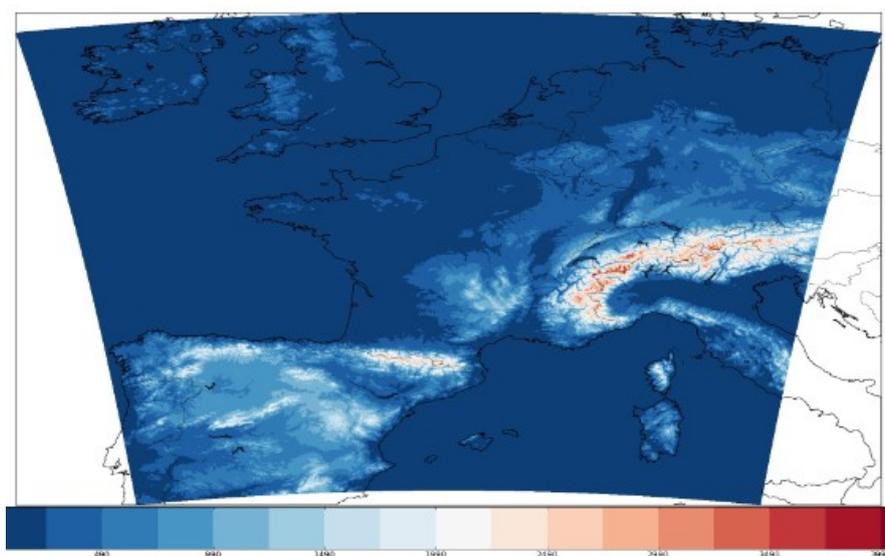


Illustration 7 : Domaine de calcul du domaine AROME

Alimenté via ses bords latéraux par les simulations d'Arpège, AROME produit des prévisions très détaillées, que les prévisionnistes utilisent pour affiner leurs prévisions à petite échelle, notamment en termes d'anticipation et de localisation des phénomènes météorologiques potentiellement dangereux, tels que les fortes pluies méditerranéennes (épisodes Cévenols), les orages violents, le brouillard ou les îlots de chaleur urbains en période de canicule.

Ces prévisions fournissent des informations locales et précises de température, d'humidité, d'état du ciel, répondant aux besoins des citoyens dans leur vie quotidienne.

Une densité d'observations accrue permet de décrire l'état présent de l'atmosphère le plus finement possible. Il est notamment essentiel d'injecter dans le système de prévision des données suffisamment

détaillées sur les précurseurs des phénomènes à prévoir. AROME prend en effet en compte les observations de vent produites par la plupart des radars Doppler météorologiques. AROME intègre également les observations de précipitations fournies par ces mêmes radars. Toutes ces données renseignent sur la position des nuages à l'origine des pluies intenses et des orages ainsi que sur la distribution et l'intensité des précipitations. Enfin AROME intègre des données (issues des stations automatiques au sol, radiosondages, stations GPS, satellites ...) plus nombreuses que le modèle Arpège. La figure suivante illustre l'évolution importante du nombre mensuel d'observations utilisées dans AROME depuis 2009.

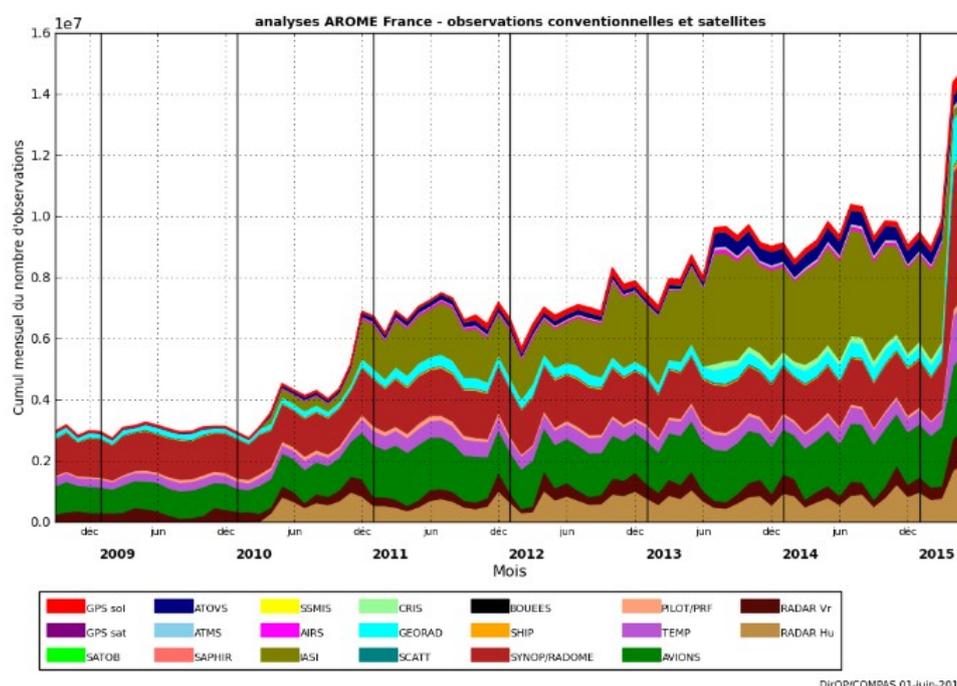


Illustration 8 : Evolution des cumuls mensuels de nombre d'observations utilisées dans AROME par type d'observations

AROME bénéficie d'une base de données orographiques récente et fine, qui contribue à une représentation très réaliste des zones de relief. La nature du sol influence directement les conditions météorologiques locales.

Afin de mieux modéliser ces échanges entre l'atmosphère et les surfaces, chaque maille est caractérisée par un type de surface. Le modèle est alimenté par une base de données mondiale développée par les chercheurs de Météo-France qui détaille environ 250 écosystèmes : lacs, mers et océans, surfaces urbanisées (villes, aéroports) et surfaces naturelles (végétation). Douze classes de végétation sont également définies : sol nu, rochers, neige permanente, arbres à feuilles caduques, forêt de conifères, parcs et jardins ...

Sur mer, AROME utilise un schéma de turbulence spécifique dénommé ECUME (schéma de surface pour l'atmosphère au-dessus des océans) permettant une différenciation des coefficients d'échange turbulents pour le vent, la chaleur et l'humidité en fonction du vent. Cette dépendance de ces coefficients d'échange

turbulents avec le vent permet ainsi une prise en compte de l'augmentation de la rugosité avec la formation des vagues.

Enfin, AROME tient compte des mouvements verticaux violents de petite échelle associés au développement des cumulonimbus, les nuages d'orages. Un modèle à maille plus large, comme Arpège, ne "voit" pas ces mouvements verticaux locaux. Avec sa maille de 1,3 km, AROME est capable de les modéliser ainsi que le cycle de vie des systèmes nuageux qui produisent des précipitations. Il peut alors mieux simuler les phénomènes "convectifs", les systèmes pluvio-orageux.

2.2 Type de données fournies par le LiDAR

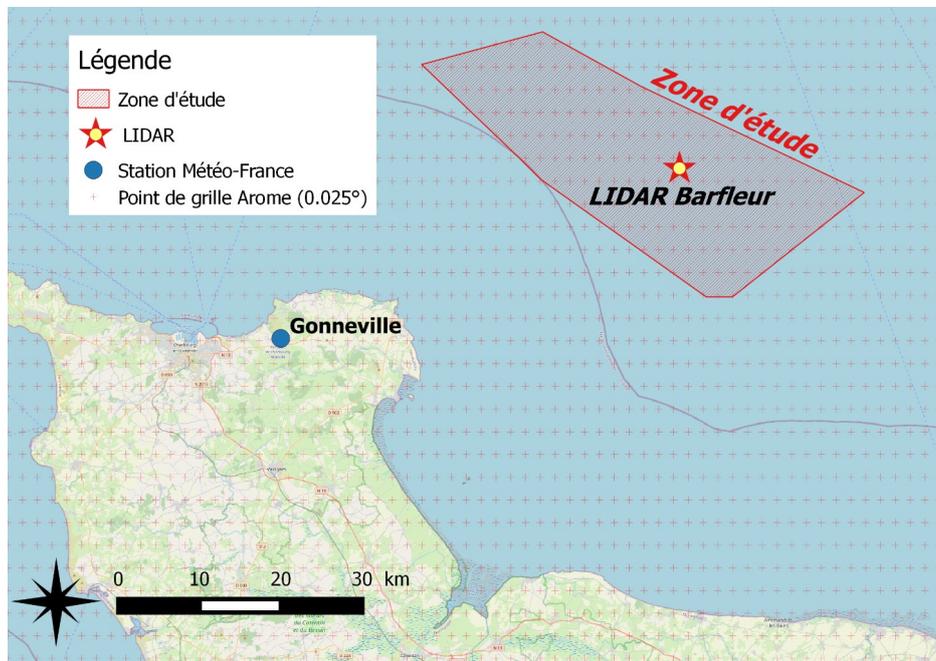


Illustration 9 : Localisation des points de mesure les plus proches du LiDAR (source OpenStreetMap)

Pour chaque hauteur de mesures, en heure UTC, le LiDAR fournit 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 (fichier *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 par la prise en compte du mouvement du LiDAR (fichier *.rtd),

- Données de mouvement du LiDAR (fichier *imu_{N}.csv) : roulis, tangage et élévation. La position en x,y,z du LiDAR est disponible à l'aide du système GPS.

Les autres données présentes dans ces trames sont :

- Nombre de mises en route du balai d'essuie-glace,
- 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 (pour les données reconstituées, fichiers .sta et *lidar_{N}.csv) : Cette valeur est donnée en pourcentage, et indique le taux de données brutes utilisé pour l'élaboration de la donnée reconstituée (moyennée sur 10 minutes). « Pour Météo-France, la donnée reconstituée est dite fiable lorsqu'au moins 30% des données brutes sont présentes pour élaborer la donnée reconstituée ». Les fichiers *.sta et *lidar_{N}.csv présenteront cette valeur permettant de juger directement de la fiabilité de la mesure.

2.3 Les outils statistiques

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

2.3.1.1 Seuils de référence

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

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

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

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

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

2.3.1.2 Détermination des seuils adaptés au LiDAR

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

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

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

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

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

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

2.3.1.3 Codes qualité

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

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

Séries DD, FF :

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

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

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

- '1' : la donnée est validée.
- '2' : la donnée est estimée par interpolation linéaire.
- '21' : la donnée est estimée par une donnée modèle.
- '3' : la donnée est douteuse (car elle s'écarte des seuils fixés).

Météo-France fait le choix lors de la constitution de la série 100 m de conserver la donnée brute dite « douteuse » mais pourra si besoin à l'aide de son modèle procéder à une éventuelle correction.

Série FXI :

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

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

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

Les codes qualités définis plus haut sont fournis dans le fichier « SerieLidarH100_Barfleur_20201101-20210430.csv ».

2.3.2 Statistiques de contrôle de la mesure

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3 Analyse des données de vent mesuré par le LiDAR

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

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

- OLidar : Données d'observation au point Lidar
- MLidar : Données modèle au point Lidar
- FF : Vent moyenné sur 10 minutes (en m/s et 1/10)
- DD : Direction du vent moyenné sur 10 minutes (en °)
- FXI : Maximum du vent instantané sur 10 minutes, également nommé rafale (en m/s)

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

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

3.1 Suivi des données

3.1.1 Disponibilité des données brutes

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

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

3 Analyse des données de vent mesuré par le LiDAR



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 10). 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.

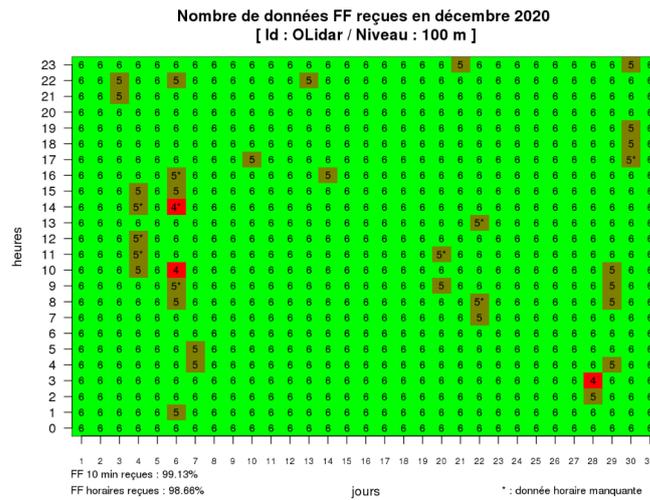


Illustration 10 : Exemple de tableau mensuel de disponibilité des données pour le mois de décembre 2020.

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

La réception des données du LiDAR débute le 10 novembre 2021.

	nov	dec	jan	fév	mar	avr	mai	jun	juil	aoû	sep	oct	Total
	DD&FF	DD&FF	DD&FF	DD&FF	DD&FF	DD&FF	DD&FF	DD&FF	DD&FF	DD&FF	DD&FF	DD&FF	DD&FF
200m	<i>69,47</i>	<i>98,59</i>	<i>97,2</i>	<i>68,95</i>	<i>63,93</i>	<i>94,12</i>							<i>82,26</i>
	69,44	98,25	97,31	69,05	63,71	93,89							82,16
180m	<i>69,75</i>	<i>98,81</i>	<i>97,56</i>	<i>69,1</i>	<i>64,14</i>	<i>95,46</i>							<i>82,69</i>
	69,86	98,39	97,98	69,35	63,98	95,83							82,78
160m	<i>69,77</i>	<i>98,88</i>	<i>97,85</i>	<i>69,12</i>	<i>64,38</i>	<i>96,55</i>							<i>82,98</i>
	69,86	98,52	98,25	69,35	64,25	96,67							83,03
150m	<i>69,77</i>	<i>98,97</i>	<i>97,96</i>	<i>69,15</i>	<i>64,45</i>	<i>96,55</i>							<i>83,03</i>
	69,86	98,52	98,52	69,35	64,25	96,67							83,08
140m	<i>69,77</i>	<i>98,99</i>	<i>98,05</i>	<i>69,15</i>	<i>64,52</i>	<i>96,55</i>							<i>83,06</i>
	69,86	98,52	98,52	69,35	64,25	96,67							83,08
120m	<i>69,77</i>	<i>99,08</i>	<i>98,21</i>	<i>69,22</i>	<i>64,58</i>	<i>96,69</i>							<i>83,15</i>
	69,86	98,66	98,52	69,35	64,38	96,81							83,15
100m	<i>69,77</i>	<i>99,13</i>	<i>98,48</i>	<i>69,25</i>	<i>64,58</i>	<i>97,31</i>							<i>83,31</i>
	69,86	98,66	98,66	69,35	64,38	97,5							83,29
80m	<i>69,77</i>	<i>99,17</i>	<i>98,61</i>	<i>69,3</i>	<i>64,58</i>	<i>98,01</i>							<i>83,46</i>
	69,86	98,79	98,79	69,35	64,38	98,19							83,45
60m	<i>69,65</i>	<i>99,26</i>	<i>98,9</i>	<i>69,35</i>	<i>64,58</i>	<i>98,24</i>							<i>83,55</i>
	69,72	98,92	98,92	69,35	64,38	98,33							83,49
50m	<i>69,35</i>	<i>99,35</i>	<i>99,06</i>	<i>69,39</i>	<i>64,58</i>	<i>98,24</i>							<i>83,55</i>
	69,44	99,06	98,92	69,49	64,38	98,33							83,49
40m	<i>69,24</i>	<i>99,37</i>	<i>99,22</i>	<i>69,42</i>	<i>64,58</i>	<i>98,24</i>							<i>83,57</i>
	69,44	99,06	99,46	69,64	64,38	98,33							83,61
Total	<i>69,64</i>	<i>99,05</i>	<i>98,28</i>	<i>69,22</i>	<i>64,45</i>	<i>96,91</i>							<i>83,15</i>
	69,73	98,67	98,53	69,36	64,25	97,02							83,15

Tableau 1 : Taux de présence (en %) des données (DD,FF) 10 minutes (en italique) et horaires (en gras) du LiDAR ; en rouge, les taux critiques

La durée de la campagne de mesures initialement de 12 mois, devra a minima être prolongée de 18 jours afin de permettre d'atteindre l'objectif fixé d'un taux de disponibilité de 80 % aux niveaux 60, 100 et 160 m.

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 de rapidement vérifier la cohérence des données avec la situation synoptique.

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

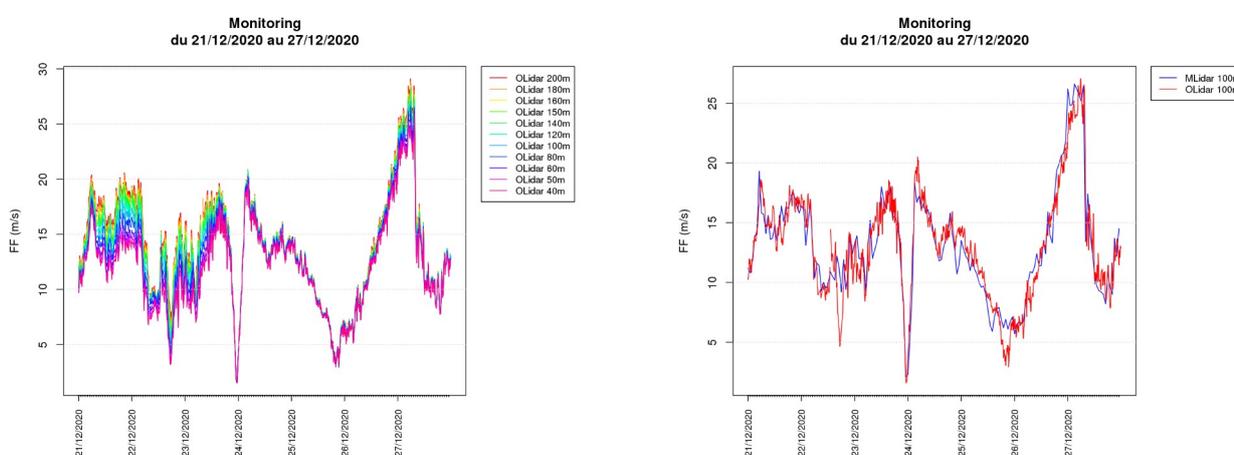


Illustration 11 : Monitoring des données 10 minutes de FF sur les 11 niveaux de mesure (à gauche) et comparaison avec le modèle à 100 m (à droite)

3.1.3 Monitoring des erreurs

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

Nous effectuons un suivi mensuel des moyennes glissantes sur 24 heures, des erreurs sur les forces FF et les directions DD afin de détecter d'éventuelles dérives. Les résultats restent souvent en dessous de 2 m/s et de 20°, et sont donc très inférieurs aux seuils fixés (cf. Illustration 12).

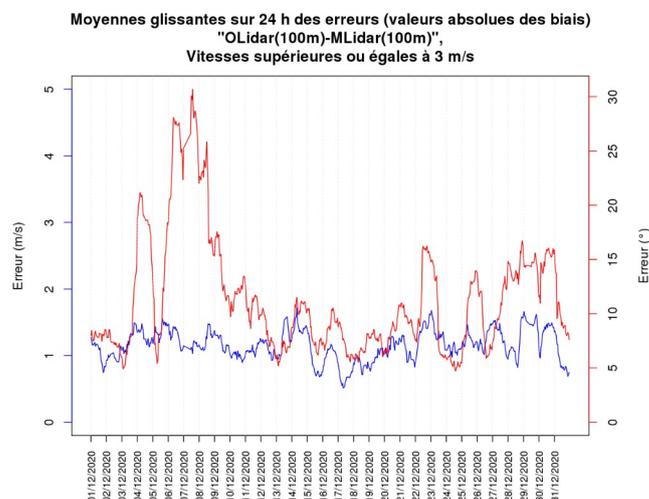


Illustration 12 : Monitoring des erreurs de forces et de directions

3.2 Retour sur des cas de données manquantes ou douteuses

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

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

	Incidents techniques impactant la mesure du LiDAR
Novembre 2020	Réception des données à compter du 10/11.
Décembre 2020	Perte de la réception des données à partir du 28/12, entraînant l'arrêt de la supervision quotidienne. Panne sans conséquence : les données ayant été sauvegardées ont pu être analysées a posteriori.
Janvier 2021	RAS
Février 2021	Panne à partir du 20/02 11h00 : Coupure d'alimentation électrique du LiDAR lié au défaut de la pile à combustible.
Mars 2021	Panne du 01/03 00h au 09/03 06h lié au défaut de la pile à combustible. Manques ponctuels en raison des maintenances sur site, le 10/03 de 00h à 16h, le 12/03 de 16h à 23h, du 14/03 14h au 15/03 18h.
Avril 2021	Le 14/04 de 00h à 11h problème ponctuel de transmission.

Tableau 2 : Récapitulatif des problèmes techniques rencontrés sur le LiDAR

L'analyse d'une situation météorologique qui aurait pu impacter les mesures horaires du LiDAR (la tempête « Bella ») figure dans l'annexe 1.

3.3 Statistiques

3.3.1 Contrôle de la mesure du LiDAR

Nous réalisons la comparaison des mesures horaires du LiDAR avec le point de grille le plus proche du modèle AROME.

Moins de 6 % des valeurs enregistrées par le LiDAR sortent des seuils fixés (cf. Illustration 13). L'essentiel des dépassements de seuil concerne le critère de direction pour des forces inférieures à 10 m/s.

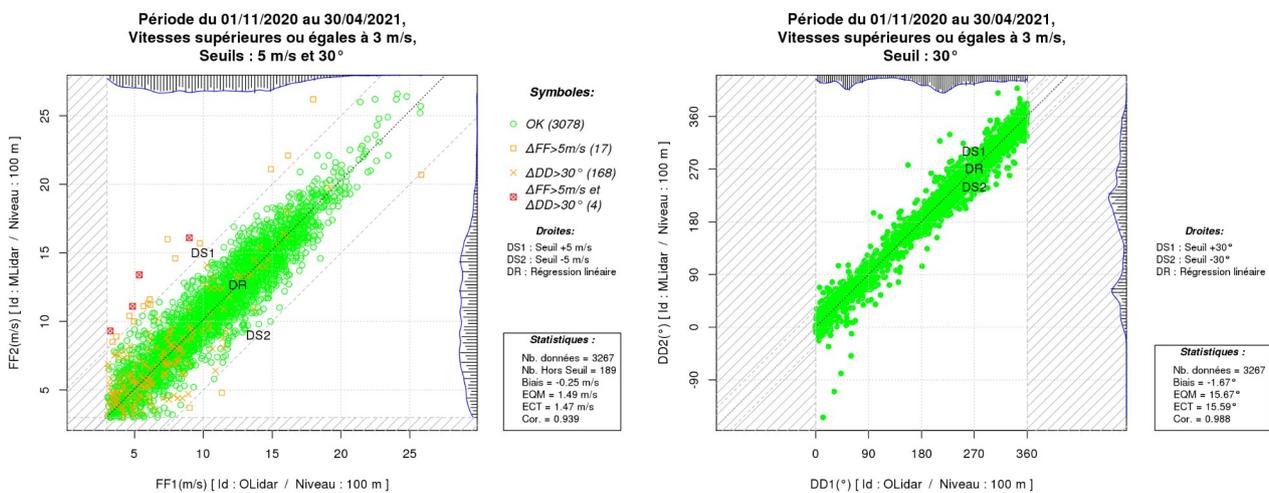


Illustration 13 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) du LiDAR avec le modèle

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

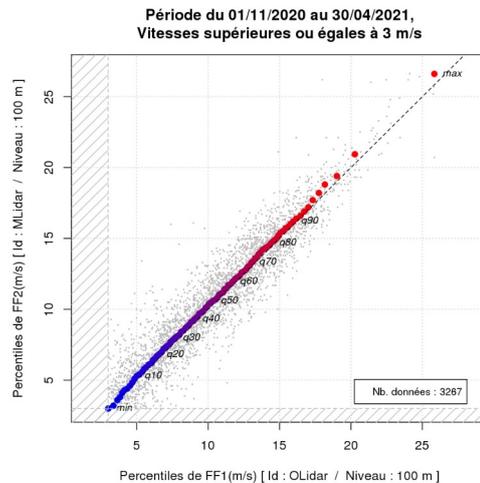


Illustration 14 : Diagramme « quantile-quantile » du LiDAR

Quelle que soit l'heure, l'observation présente un très faible biais non systématique sur les directions, de moins de 4° par rapport au modèle. Suivant la direction considérée, on note un biais légèrement plus marqué (de l'ordre de 2 à 6°) pour les secteurs de dominante est (cf. Illustration 15).

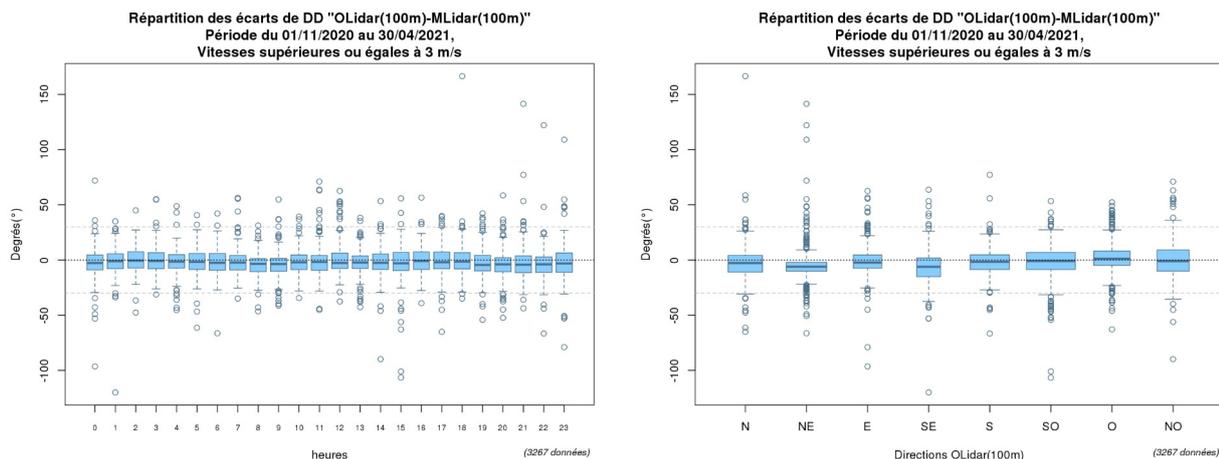


Illustration 15 : Répartitions des écarts de directions du LiDAR en fonction de l'heure (à gauche) et de la direction (à droite)

Les dépassements du seuil de qualité pour la vitesse concernent globalement tous les secteurs de vent mais leur nombre reste très faible. Ils représentent moins de 1,5 % des cas suivant les directions (cf. Illustration 16 à gauche). Pour des vitesses supérieures à 6 m/s, on enregistre des dépassements du seuil de direction dans moins de 9 % des cas (cf. Illustration 16 à droite).

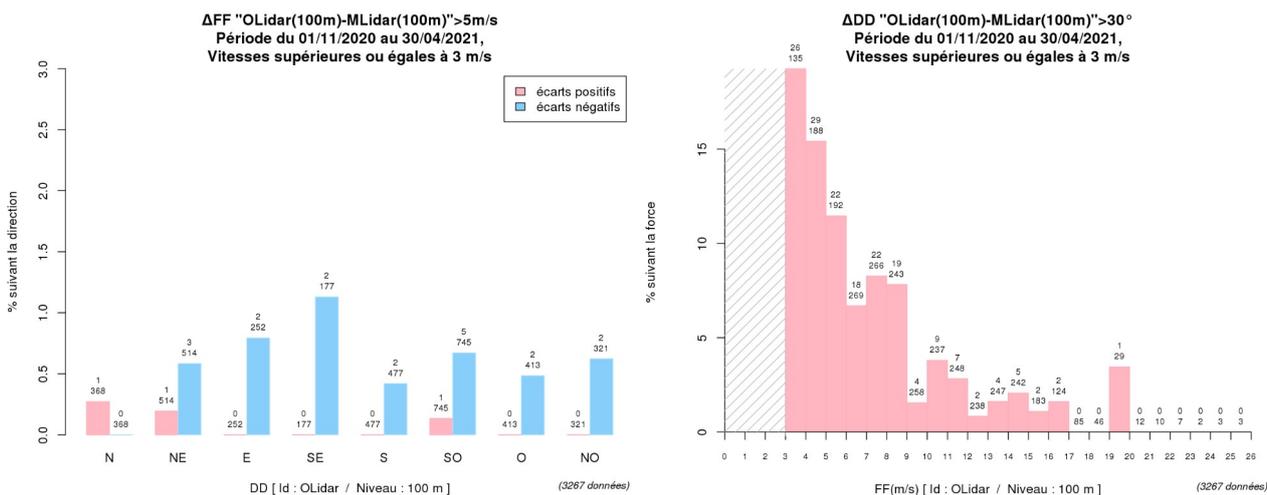


Illustration 16 : Dépassements des seuils de force (à gauche) et de direction (à droite) du vent du LiDAR

3.3.2 Statistiques descriptives du vent mesuré

En préambule, afin de se faire une idée plus précise des conditions météorologiques rencontrées durant les 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 qui suit, le taux « brut » correspond à l'ensemble des données 10 minutes du LiDAR et le taux « reconstitué », aux données horaires de la série reconstituée.

Les premières données du LiDAR sont reçues le 10 novembre. Et de fin février à début mars, les données sont manquantes en raison d'une panne. Ce qui explique pour les trois mois considérés, les différences sur certaines classes de vitesse entre les taux bruts et reconstitués (n'excédant pas 4%).

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

	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
Novembre	3014	5,5%	7,2%	46,7%	28,8%	10,6 %	1,1 %	0,0 %	.
	719	4,6%	7,8%	44,9%	28,7%	12,4 %	1,5 %	0,1 %	.
Décembre	4425	2,2%	6,1%	35,3%	43,5%	11,5%	1,1 %	0,3 %	.
	744	2,0%	6,7%	34,8%	43,5%	11,6%	1,1 %	0,3 %	.
Janvier	4396	3,6%	11,1%	37,3%	29,7%	16,9%	1,4%	.	.
	744	3,4%	11,7%	37,1%	29,3%	17,2%	1,3%	.	.
Février	2792	1,6%	3,0%	18,2%	57,4%	19,8%	.	.	.
	672	3,3%	5,5%	22,3%	54,0%	14,9%	.	.	.
Mars	2883	6,9%	18,8%	37,9%	22,5%	10,5%	3,3%	0,1 %	.
	744	5,8%	16,0%	38,4%	25,8%	11,7%	2,3%	.	.
Avril	4204	20,1%	17,8%	29,8%	23,6%	8,5%	0,2%	.	.
	720	20,0%	18,6%	30,0%	22,5%	8,8%	0,1%	.	.
Total	21714	8,1%	15,7%	31,1%	29,3%	10,3%	1,3%	0,2%	.
	4343	8,0%	16,9%	31,4%	29,0%	9,7%	1,3%	0,2%	.

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

3.3.2.2 Distributions

Les distributions statistiques horaires des observations et du modèle à 100 m sont très proches (cf. Illustration 17). Les quantiles apparaissant ci-dessous dans l'encart ne diffèrent que de 0,2 à 0,4 m/s.

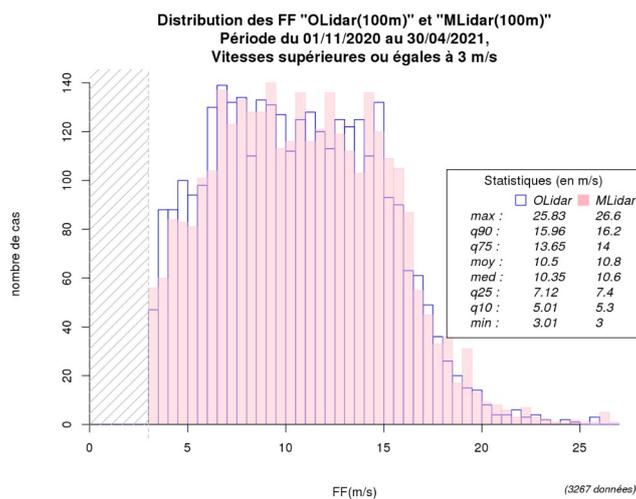


Illustration 17 : Distributions des vents horaires du LiDAR

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 18 un très léger cycle diurne. De la mi-journée à la première partie de nuit (globalement de 12h à 23h UTC), les médianes horaires des observations sont légèrement inférieures à la médiane de la période totale (de 0,2 à 0,8 m/s). De la fin de nuit à la mi-journée, on observe l'effet inverse.

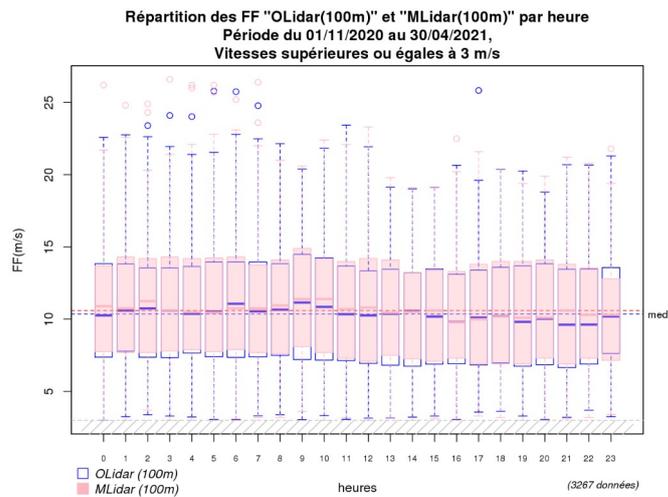


Illustration 18 : Répartitions horaires des forces du vent du LiDAR

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 19) qui s'expliquent en grande partie par la climatologie mais aussi par les manques de données des mois de février et de mars.

Au regard de la période étudiée, le mois novembre a été peu venteux, décembre et janvier ont été conformes à la normale, février a été plutôt agité, enfin, mars et avril ont été assez calmes.

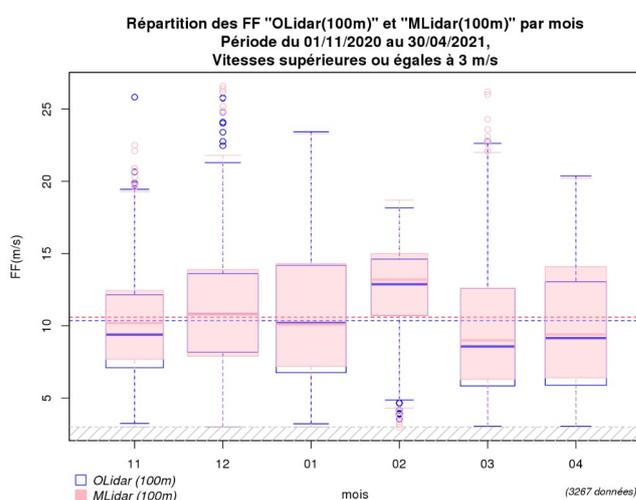


Illustration 19 : Répartitions mensuelles des forces du vent du LiDAR ; la largeur des boîtes à moustaches est fonction du nombre de données

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

3 Analyse des données de vent mesuré par le LiDAR



Au regard de la climatologie, le mois de novembre a enregistré moins de vent modéré à fort que la normale mais un peu plus de vent fort. Les mois d'hiver ont été assez contrastés avec un mois de décembre conforme à la normale, un mois de janvier globalement peu venteux et au contraire, un mois de février plutôt agité. Enfin, le début du printemps a été globalement peu agité avec durant les mois de mars et avril moins de vent modéré à fort que la normale.

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

Tableau 4 : Statistiques 2001-2020 (en gras) et valeurs 2020 à 2021 (en italique) des forces de vent de la station de Gonneville ; surlignages rouge et bleu : excédent et déficit de plus de 5 % par rapport à la normale

Rappel : Une analyse détaillée de la climatologie saisonnière, présentant les différences de vents par secteurs, figure en annexe 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**).

Les roses des vents du LiDAR présentent quelques petites différences (notamment une composante ouest un peu plus marquée pour le modèle) qui s'expliquent en grande partie par les données manquantes début novembre et sur la période de fin février à début mars.

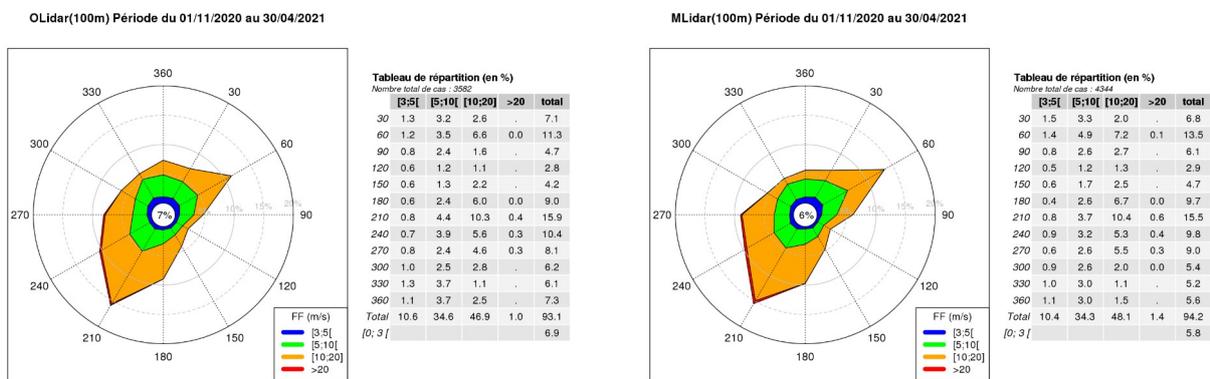


Illustration 20 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) du LiDAR

Le tableau de contingence détaillé, présentant les forces de vents du LiDAR par classes de 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.**

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

Par ailleurs, on constate que durant les six premiers mois de la campagne de mesure, les vitesses des profils moyens observés (profils bleus en pointillés) ont été légèrement inférieures (de l'ordre de 0,5 m/s) à celles des profils du vent moyen issu de la climatologie AROME sur 20 ans (profils verts en pointillés).

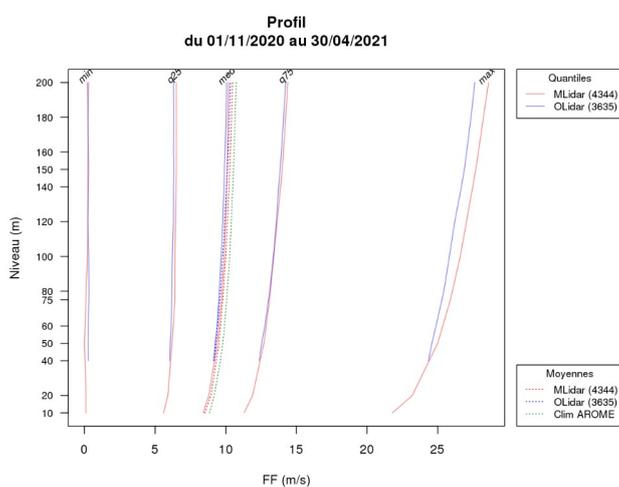


Illustration 21 : Profils des vents avec quantiles du LiDAR

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 d'un peu moins de 1,5 m/s pour les directions de sud à ouest (cf. Illustration 22). Ces directions témoignent du passage des fronts des perturbations océaniques qui créent du cisaillement en altitude. Nous avons décidé de représenter le cisaillement de vent du modèle entre les niveaux disponibles les plus proches, 50 m et 150 m. Sans grande surprise, on constate que les caractéristiques sont comparables avec toutefois un cisaillement légèrement plus faible (autour de 1 m/s) pour les directions de sud à ouest.

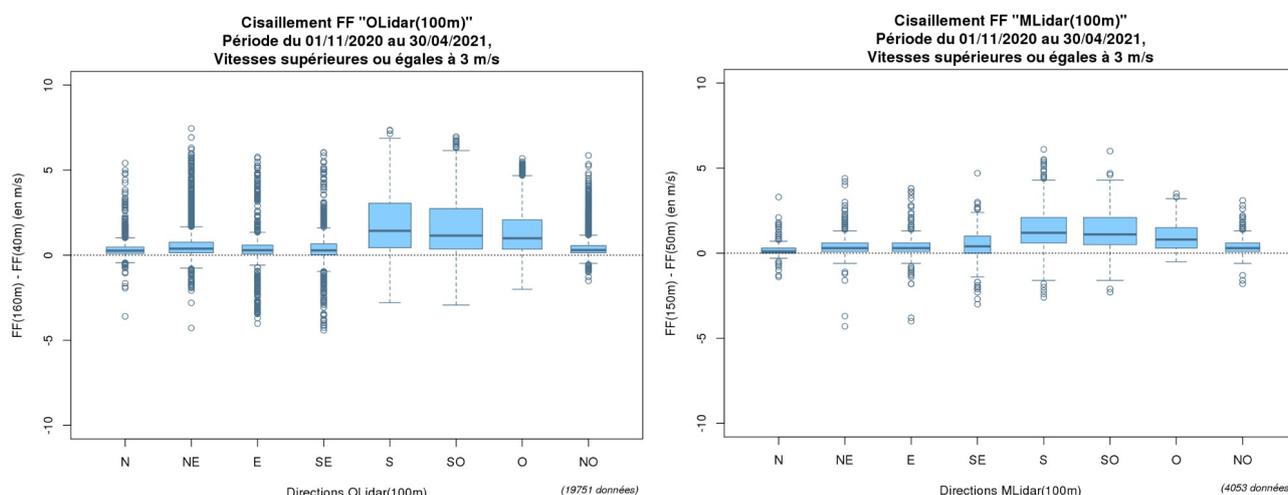


Illustration 22 : Cisaillement des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) du LiDAR

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

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

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

Le coefficient α de cisaillement vertical de vent **dépend notamment de la rugosité du sol**. C'est un nombre sans dimension qui varie selon la nature du terrain. Dans la littérature, des valeurs standards de référence du coefficient α sont proposées (cf. Tableau 5).

3 Analyse des données de vent mesuré 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 5: Valeurs de l'exposant α en fonction de la nature du terrain (source <http://eolienne.f4jr.org/vent>)

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

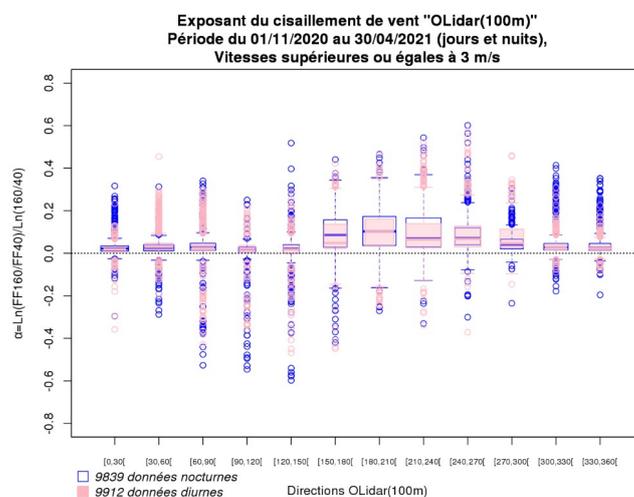


Illustration 23 : Exposant du cisaillement de vent du LiDAR

Nous calculons et représentons sur l'illustration 23 le coefficient α de cisaillement par secteur de 30° pour la couche [40 m - 160 m] en faisant une distinction entre le jour (7h à 18h UTC) et la nuit (19h à 6h UTC). Les valeurs les plus faibles du coefficient α (inférieures à 0,05) correspondent aux situations non perturbées. Pour les vents de secteur sud à sud-ouest, où le coefficient est le plus fort, on constate sur la période d'étude, un léger cycle diurne avec des valeurs en moyenne un peu plus fortes durant la nuit.

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 (IT) est égale au rapport de l'écart type du vent sur 10 minutes sur le vent moyen de ces 10 minutes :

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

Sur la période de 6 mois de mesures, on constate que les vents de secteur nord-ouest à nord-nord-est présentent une IT plus forte que pour les autres directions avec une valeur avoisinant 0,15. Pour le secteur sud-ouest, l'intensité tourne autour de 0,10 (cf. Illustration 24).

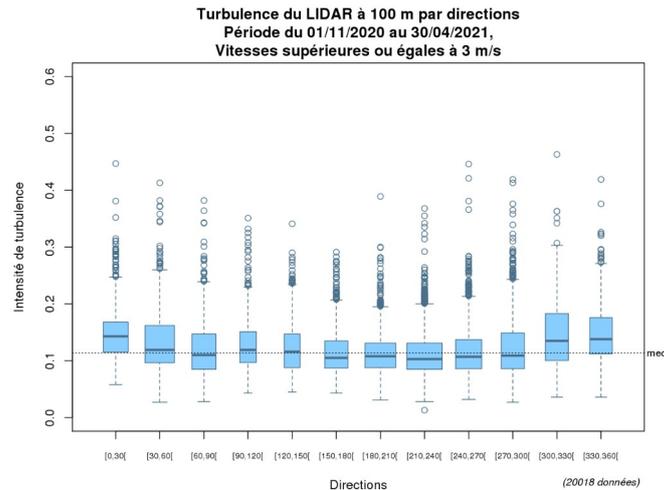


Illustration 24 : IT déduite des mesures du LiDAR

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

3.3.2.9 Séries horaires FF et FXI à 100 m

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

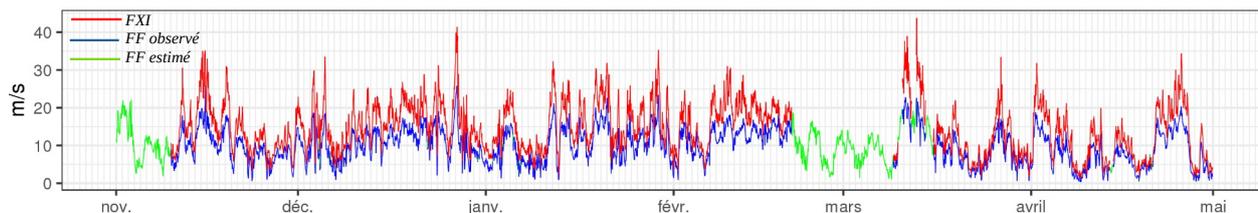


Illustration 25 : Séries FF et FXI à 100 m du LiDAR

Météo-France fournit au travers du fichier « SerieLidarH100_Barflour_20201101-20210430.csv » les séries de données horaires de vent à 100 m comportant le vent moyen (FF et DD) et la vitesse du vent maximal (FXI) pour la période du 01/11/2020 au 30/04/2021. Ces paramètres sont accompagnés des codes qualité QFF, QDD et QFXI (cf. §2.3.1.3 Codes qualité).

4 Analyse des données de vent mesuré par l'anémomètre

Nous effectuons des contrôles semblables à ceux du LiDAR sur la présence et la cohérence des données de vent de surface mesuré par l'anémomètre en considérant les seuils d'erreurs de forces et de directions respectivement de 3 m/s et 30° (cf. §2.3.1.2 p10).

Environ 10 % des valeurs enregistrées par l'anémomètre sort des seuils de force. Ce qui est nettement plus important que pour le LiDAR. Mais ce constat peut s'expliquer par le fait que l'anémomètre ne dispose pas d'un environnement de mesures parfaitement optimal. Par ailleurs, le seuil considéré (3 m/s) est aussi plus strict que celui du LiDAR (5 m/s).

Les dépassements du seuil de direction sont assez nombreux. Mais l'essentiel de ces dépassements correspond à des forces plutôt faibles, inférieures à 7 m/s.

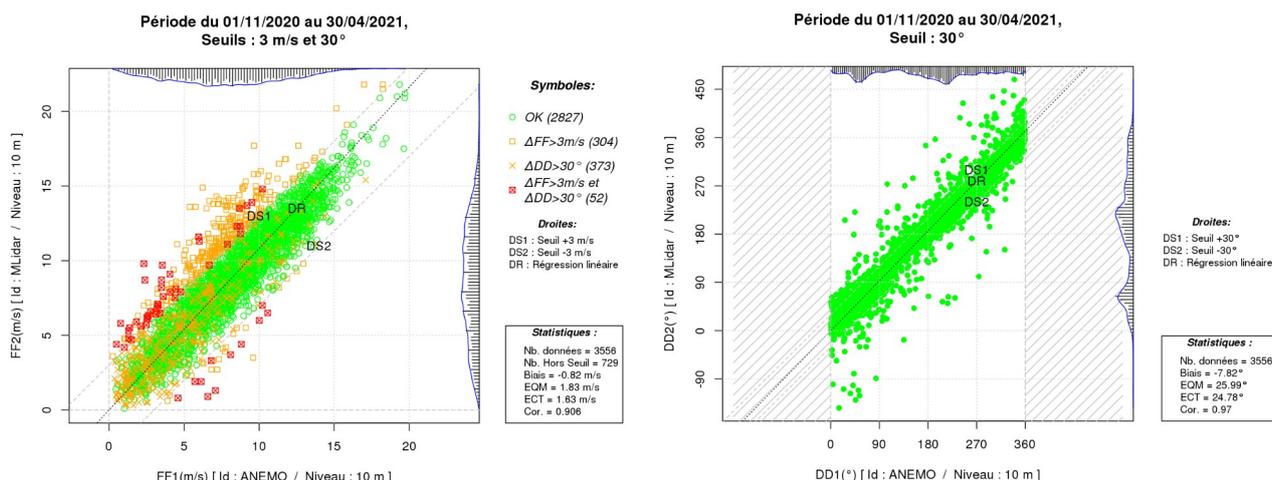


Illustration 26 : Comparaisons des forces (à gauche) et des directions (à droite) de l'anémomètre avec le modèle

4 Analyse des données de vent mesuré par l'anémomètre



Les distributions statistiques horaires des observations et du modèle à 10 m sont assez proches. Les quantiles apparaissant ci-dessous diffèrent de 0,2 à 1,0 m/s. Par ailleurs, le diagramme « quantile-quantile » des forces de vent présente une dissymétrie (visible à partir du quantile 20), indiquant une légère surestimation du modèle par rapport à l'observation. Les résultats de l'anémomètre sont donc corrects mais ne sont pas parfaits.

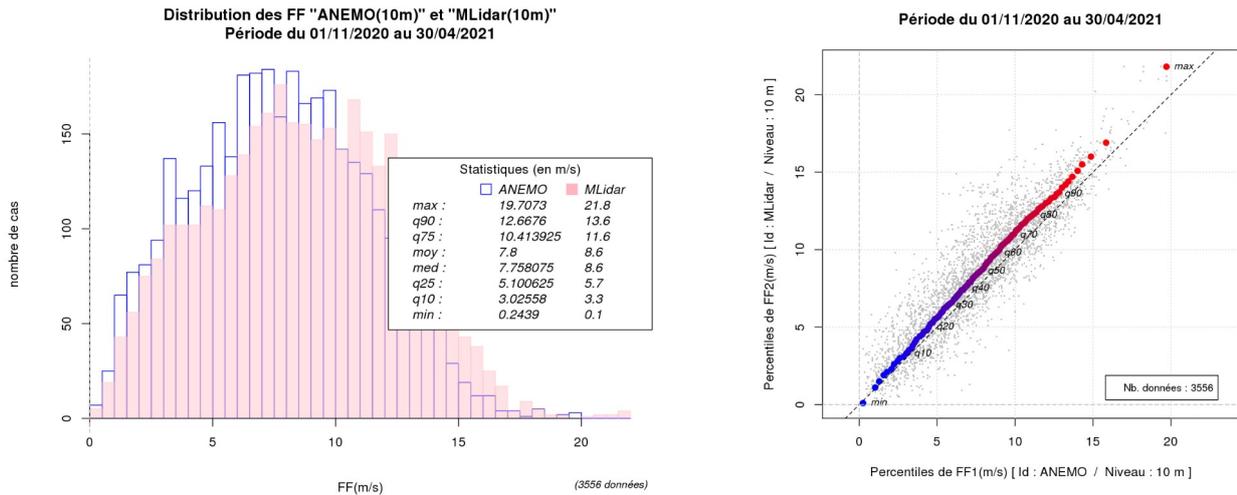


Illustration 27 : Distribution des vents horaires de l'anémomètre (à gauche) et diagramme « quantile-quantile » (à droite)

La rose des vents de l'anémomètre est très comparable à celle du modèle AROME à 10 m. Elle présente toutefois quelques petites différences, notamment plus de vent calme et des composantes ouest et nord-est moins marquées que le modèle.

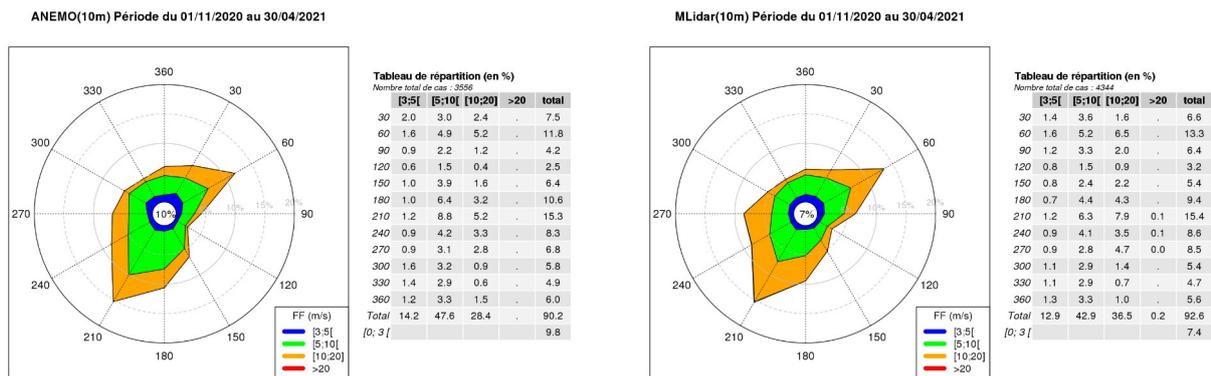


Illustration 28 : Roses des vents observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'anémomètre

5 Conclusion

Au cours des six premiers mois de campagne, nous avons pu établir que les mesures de vent de surface et d'altitude, effectuées sur la zone d'étude au large de Barfleur, étaient parfaitement cohérentes avec les données du modèle AROME.

Le monitoring du LiDAR a permis de contrôler la présence des données sur les 11 niveaux de mesure et plus précisément, de vérifier à l'aide de statistiques descriptives, la cohérence des observations de force et de direction à 100 m.

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

Annexes

Table des annexes

Annexe 1 : Situation du 26 au 27 décembre 2020 (tempête « Bella »).....	34
Annexe 2 : Climatologie du 1er novembre 2020 au 30 avril 2021.....	36
Annexe 3 : Distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	42
Annexe 4 : Répartitions horaires par mois des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	43
Annexe 5 : Tableau de contingence des forces de vent du LiDAR.....	44
Annexe 6 : Roses des vents mensuelles du LiDAR à 100m (données brutes).....	45
Annexe 7 : Profils de vent du LiDAR.....	46
Annexe 8 : Cisaillement du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	47
Annexe 9 : Turbulence du vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	48

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

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

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

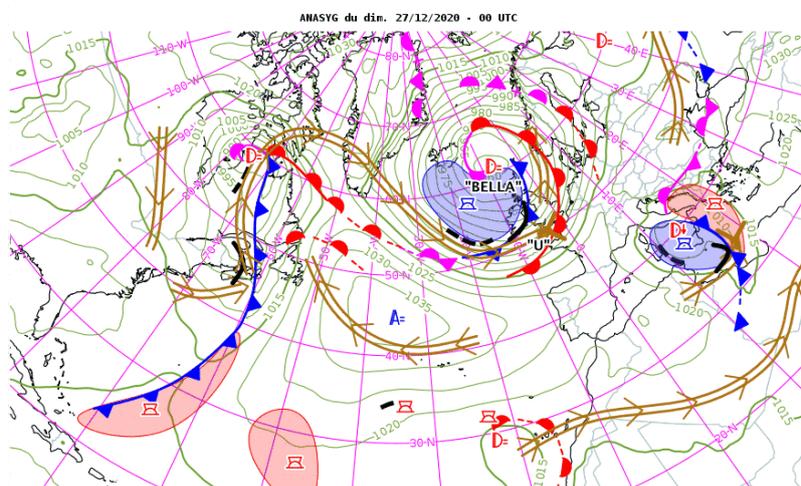


Illustration 29 : ANASYG du dimanche 27 décembre 2020 à 00UTC

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

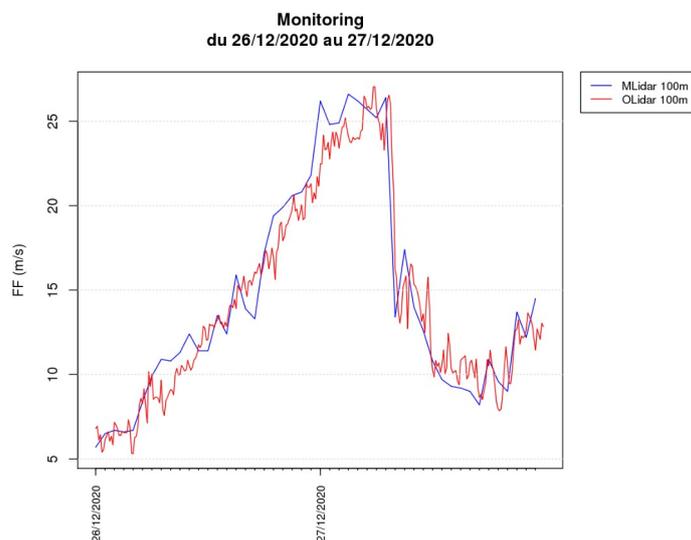


Illustration 30 : Comparaison des mesures Lidar avec le modèle AROME pour le site de Barfleur les 26 et 27 décembre 2020

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

Annexe 2 : Climatologie du 1^{er} novembre 2020 au 30 avril 2021

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

1) Le vent

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

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

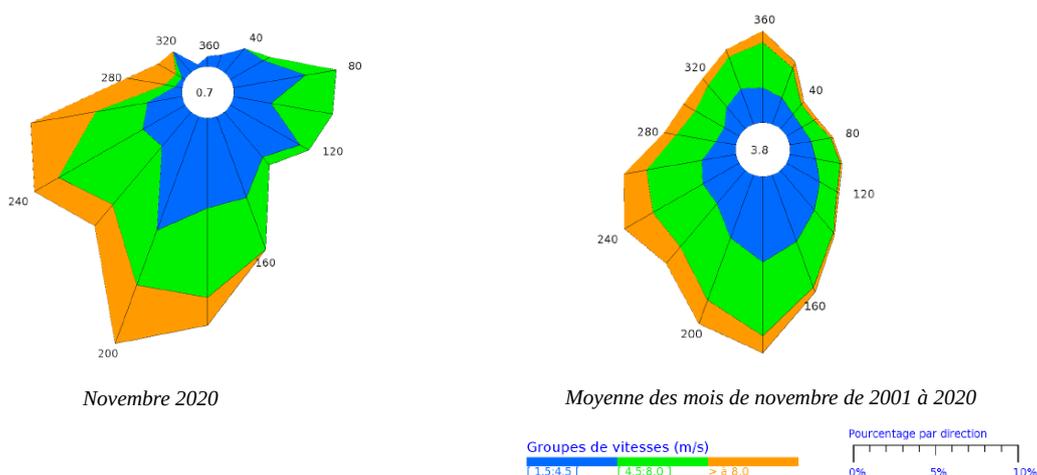


Illustration 31 : Roses des vents du mois de novembre de la station de Gonneville (50)

b) Analyse de l'hiver 2020-2021

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

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

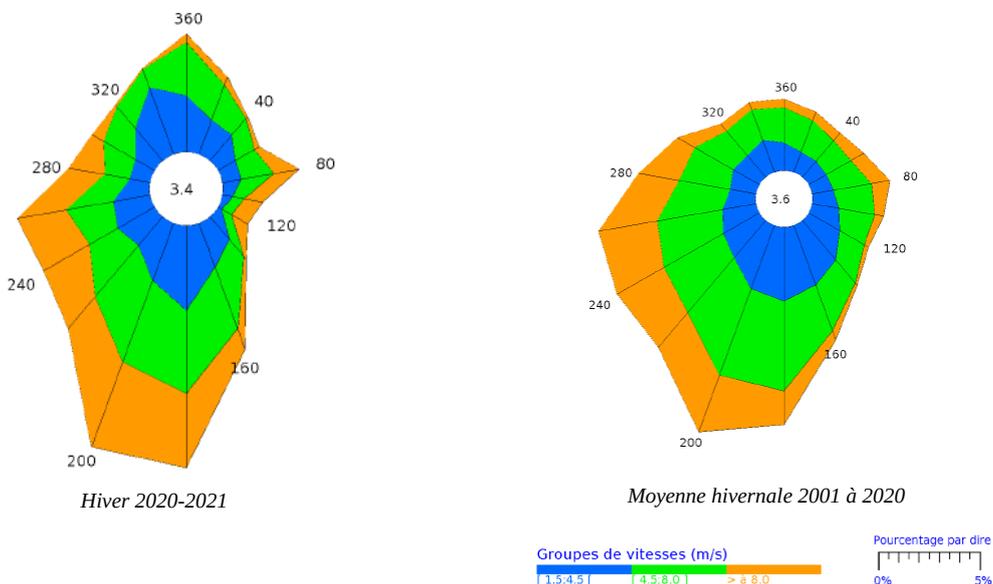


Illustration 32 : Roses des vents hivernales de la station de Gonneville (50)

c) Analyse du début du printemps 2021 (mars et avril)

En mars 2021, la rose de vent est assez similaire à celle enregistrée sur la période 2001-2020 avec néanmoins comme différences notables par rapport à cette normale :

- des vents observés bien plus faibles que d'habitude (+10 % des cas en mars 2021 pour les vents calmes à inférieurs à 4.5 m/s) ;
- une absence totale de vents forts (supérieurs à 8.0 m/s) pour les directions comprises entre les secteurs nord à est ;
- et une disparition des vents de sud-est en mars 2021.

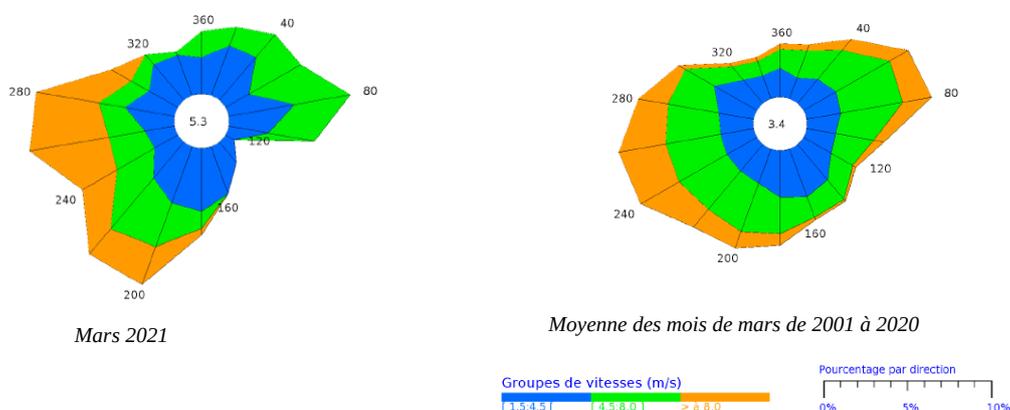


Illustration 33 : Roses des vents du mois de mars de la station de Gonneville (50)

À l'inverse du mois de mars 2021, seuls les vents d'est à nord-est ont soufflé en avril 2021. Si l'intensité globale y a été globalement moins soutenue (57.9 % de vents inférieurs à 4.5 m/s au lieu de 53.6 % habituellement), les vents forts (supérieurs à 8.0 m/s) n'ont été observés que pour cette orientation particulière, dans 10.9 % des cas au lieu des 2.7 % habituels sur la période.

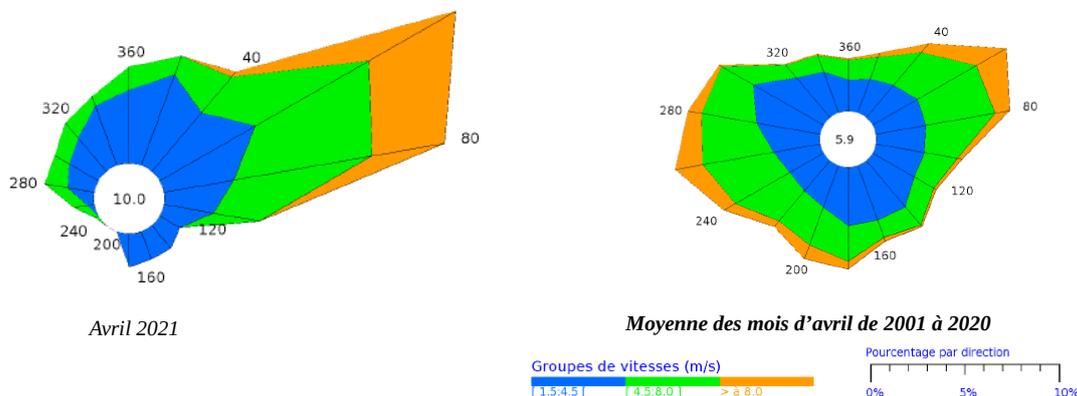


Illustration 34 : Roses des vents du mois d'avril de la station de Gonneville (50)

2) Les températures

En dehors du mois d'avril 2021, les températures sont bien basses pour la période (-1.0°C pour les maximales, près de -2°C pour les minimales) et du mois de janvier normal pour un tel mois de l'année en termes de température, les 4 autres mois du semestre ont été très doux, notamment côté maximales. Novembre a ainsi vu ses températures minimales être plus de 2°C au-dessus des normales, ce qui est considérable pour un site maritime. On notera que la prédominance du flux d'ouest en cette fin d'année explique cette anomalie positive.

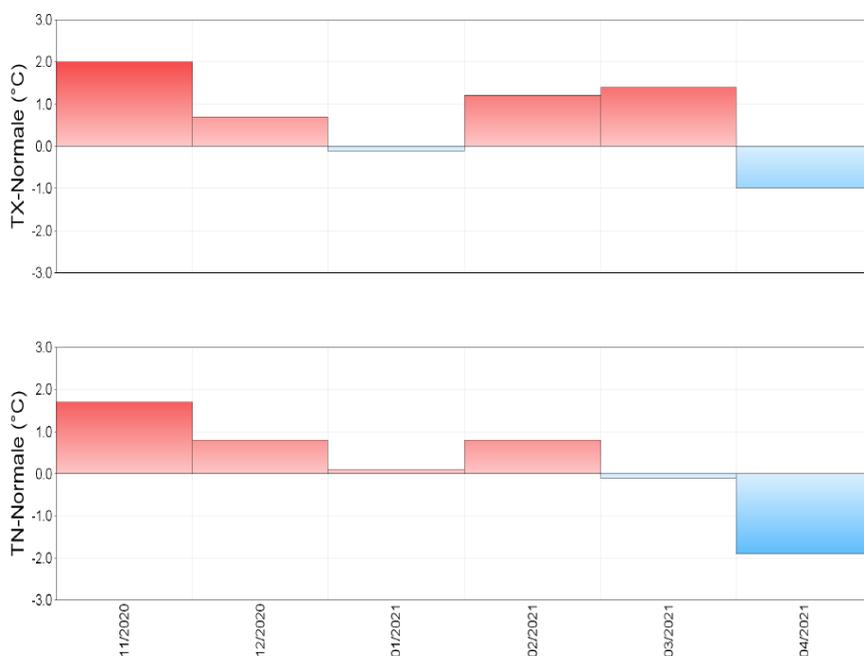


Illustration 35 : Anomalies mensuelles de températures minimales et maximales de novembre 2020 à avril 2021 à la station du Gonneville - Période de référence : 1981 - 2010

3) Les précipitations

La période comprise entre novembre 2020 et avril 2021 a vu une alternance spectaculaire de mois secs à très secs avec des mois très arrosés.

Ainsi, décembre 2020 puis janvier 2021 ont enregistré de fortes précipitations, jusqu'au double des normales aux alentours des 200 mm par mois.

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

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

- novembre 2020 : 24.8 mm le 15, cumul de 37.6 mm du 14 au 15
- décembre 2020 : 40.5 mm le 3, cumul de 83.6 mm du 3 au 5, cumul de 130.3 mm du 3 au 11
- janvier 2021 : 39.3 mm le 5, cumul de 74.9 mm du 3 au 6
- février 2021 : 5.8 mm le 4
- mars 2021 : 11.8 mm le 12
- avril 2021 : 6.6 mm le 10

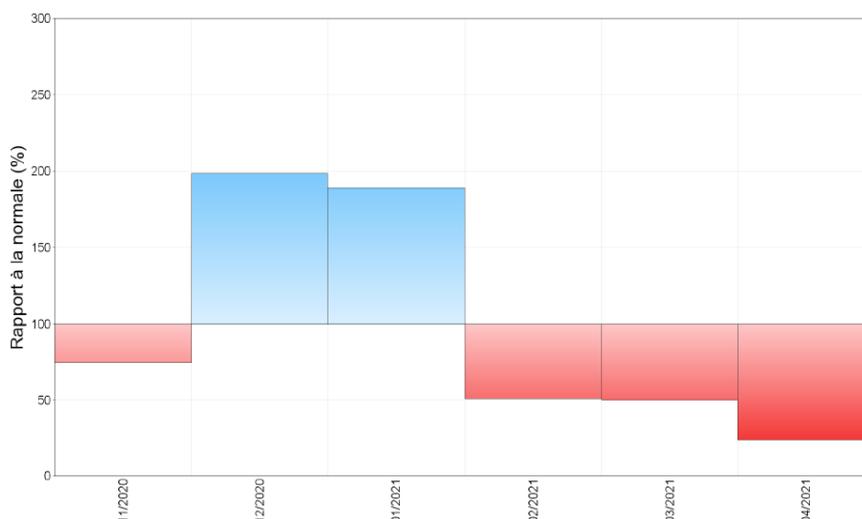


Illustration 36 : Anomalies mensuelles de précipitations de novembre 2020 à avril 2021 à la station de Gonneville - Période de référence : 1981 - 2010

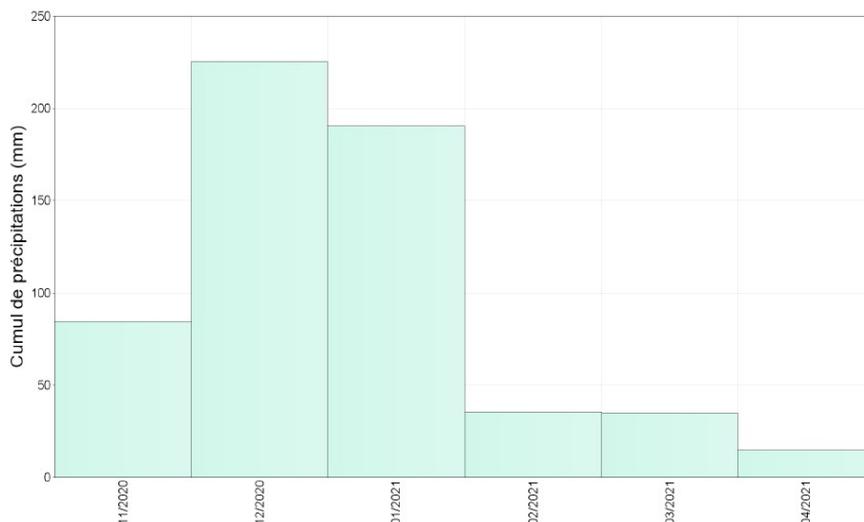


Illustration 37 : Cumuls mensuels de précipitations de novembre 2020 à avril 2021 à la station de Gonneville - Période de référence : 1981 - 2010

Par ailleurs, il est remarquable de noter que les anomalies de pluie sont parfaitement corroborées par les anomalies du nombre de jours de précipitations.

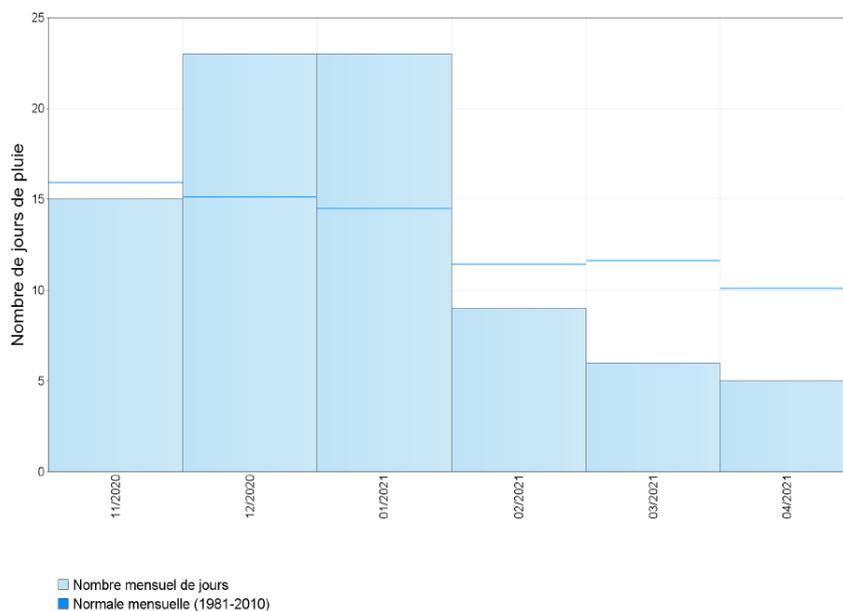
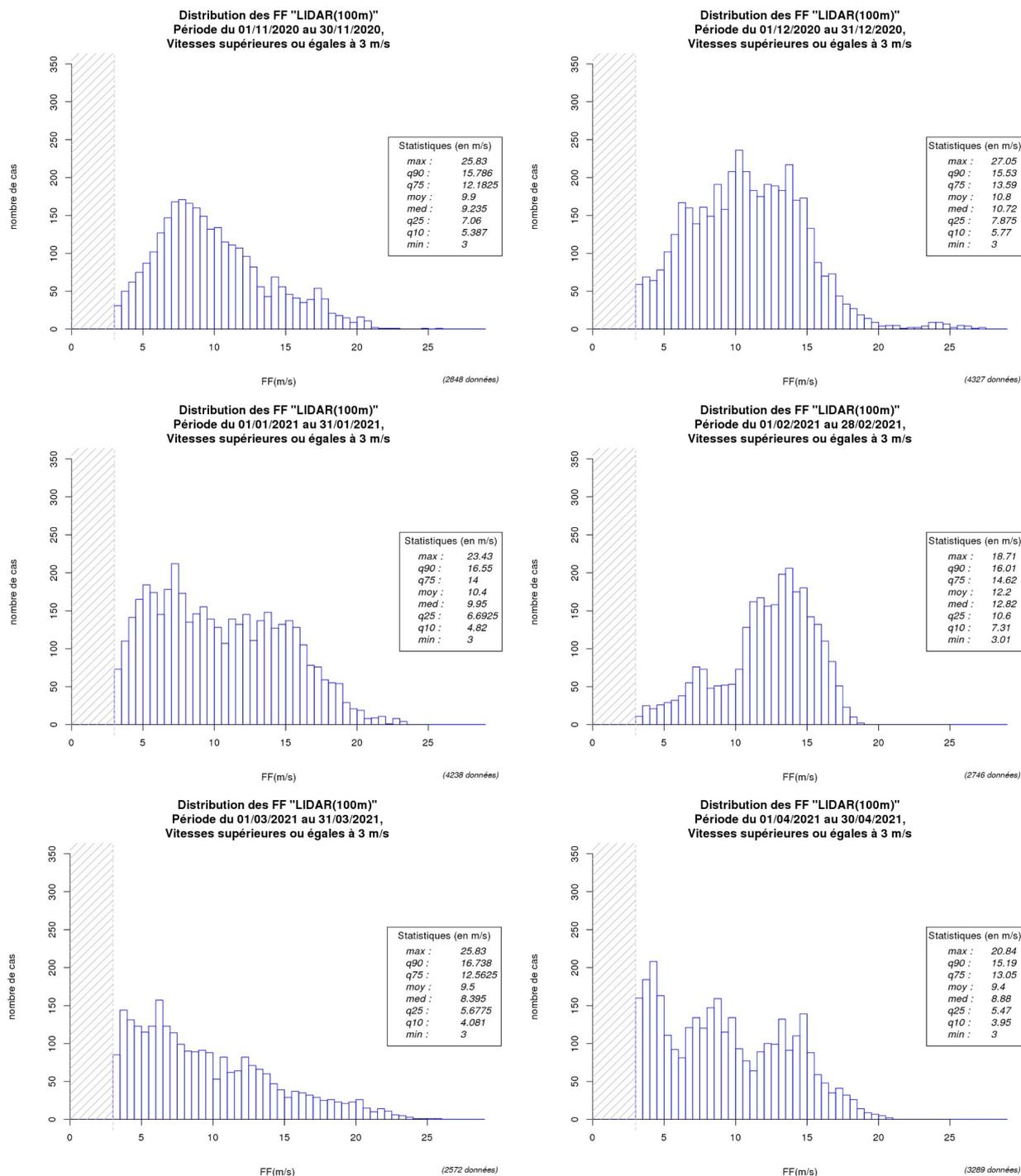
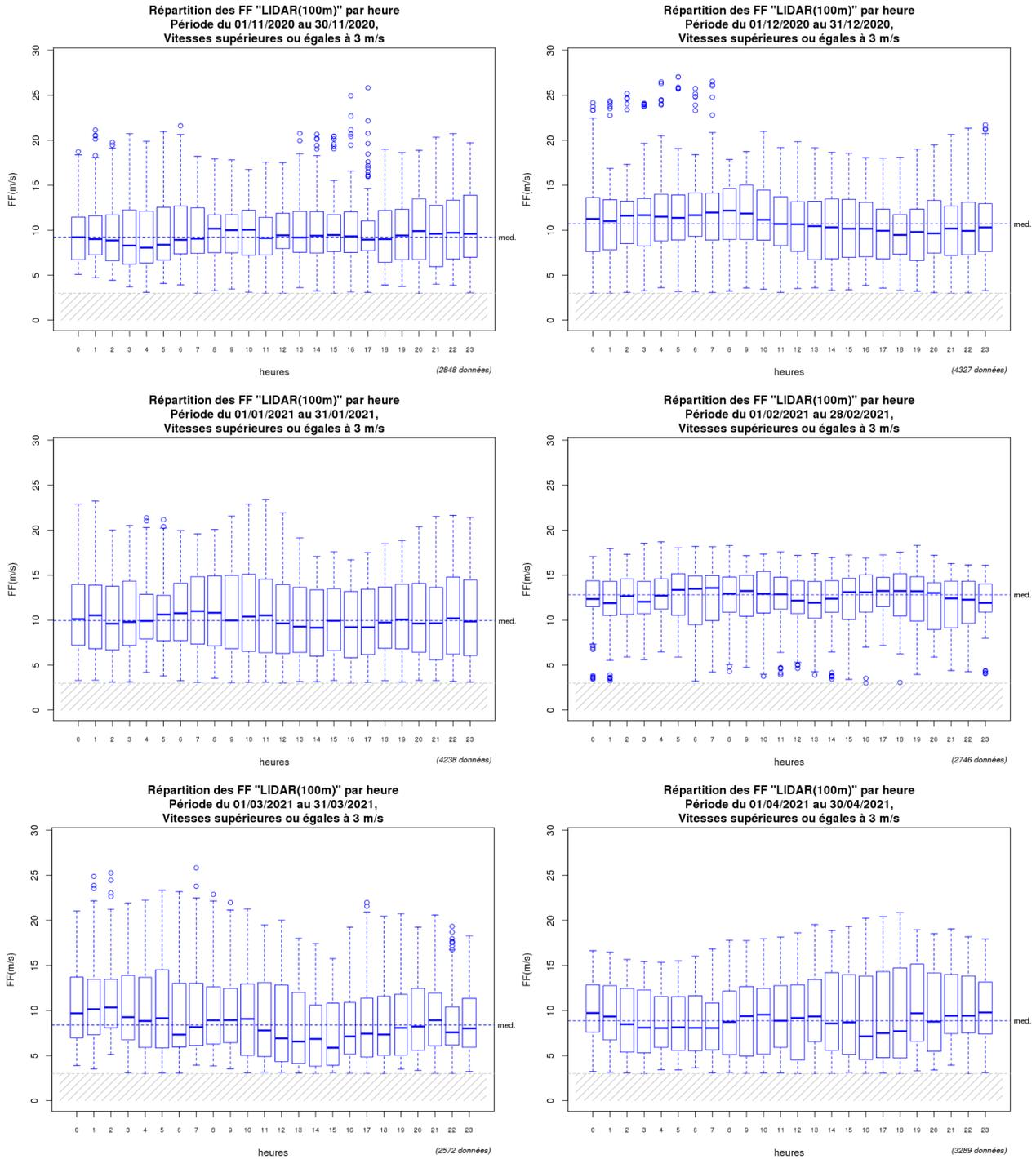


Illustration 38 : Nombre mensuel de jours de précipitations significatives de novembre 2020 à avril 2021 à la station de Gonneville et normale - Période de référence : 1981 - 2010

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)



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

Vitesses en 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[	.	.	.	.	.	.	0,2	.	.	.	.	.	0,2
[25,26[	.	.	.	.	.	.	0,3	0,1	.	.	.	.	0,5
[24,25[	.	.	.	.	.	.	0,8	0	.	.	.	.	0,9
[23,24[	.	.	.	.	.	.	0,7	0,2	0,2	.	.	.	1,2
[22,23[	.	.	.	.	.	.	0,3	0,7	0,5	.	.	.	1,5
[21,22[	.	.	.	.	.	0,2	0,6	0,7	1	.	.	.	2,5
[20,21[	.	0,3	.	.	0	0,7	1,6	1,3	1,1	.	.	0,1	5,2
[19,20[	.	0,7	.	.	0,1	0,6	1,8	2	1,8	.	.	0,4	7,3
[18,19[	.	2,2	0	.	0,7	1	3,9	2,2	3	0,3	0,1	0,3	13,7
[17,18[	0	5,5	0,5	0	1	1,6	5,3	2,7	4,1	2,1	0	0,6	23,6
[16,17[	0,4	5,4	1,4	0,2	1,7	4,7	8,5	3,7	5,2	2	0,4	0,9	34,5
[15,16[	2,3	8,5	2,1	0,1	4,4	6,8	9,1	4,5	5,9	3	0,6	2	49,3
[14,15[	3,1	12,4	2,8	1,9	5,3	9,9	10,5	4,3	6,7	4,5	0,6	3,9	65,9
[13,14[	4	11,5	3,2	2,2	4,3	12,3	13,3	6,6	5,6	3,3	1,9	3,2	71,4
[12,13[	4,3	9,4	2,1	1,3	1,9	9,1	17,1	8,1	5,5	4,4	2	3,7	68,8
[11,12[	5	5,8	2,1	2,6	2,1	7,7	16	10,2	5,8	4,1	2	4,3	67,6
[10,11[	5,8	4,9	1,8	3	0,6	5,9	17,8	9	4,8	3,3	3,9	5,9	66,6
[9,10[	6,3	6	3,6	0,4	1,8	5,3	13,8	8,5	3,7	4,1	6,2	9	68,5
[8,9[	3,6	8,7	4,4	1,4	2,3	7	8,6	9,7	5,3	5,3	6,6	8,1	71,2
[7,8[	6,9	7,4	4,9	5,4	2,6	5,8	7,8	7,8	5,4	6,3	7,8	8	76,2
[6,7[	7,4	6,7	5,5	3,5	4,2	3,2	7,5	7,1	4,6	5,7	7,4	6,8	69,7
[5,6[	7,7	6,1	4,5	1,1	3,2	2,9	5,2	5,3	3,6	5,5	7,3	7	59,3
[4,5[	8,6	6,3	4,4	3,1	3,8	2,3	4,3	3,8	4,4	5,7	6,4	5,3	58,4
[3,4[	5,9	5,8	3,3	2,4	2,6	3,4	3,4	3,5	3,2	3,1	4,8	5,2	46,5
[0,3[	6,4	7,2	8,1	7,4	6,4	4,7	3,6	3,8	4,1	4,6	5,2	8,1	69,6
Total	77,8	120,9	54,6	36,2	48,9	95,2	162,2	105,6	85,7	67,2	63,1	82,6	1000

Nombre de cas : 21714

Analyse de répartition du vent LiDAR Barfleur observé à 100 m sur la période du 1er novembre 2020 au 30 avril 2021 (en pour mille)

Les vents inférieurs à 3 m/s (non comptabilisés dans les statistiques) apparaissent ici en surligné dans le tableau. Ils représentent moins de 7 % des cas.

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

NOVEMBRE 2020 - LIDAR (100m)

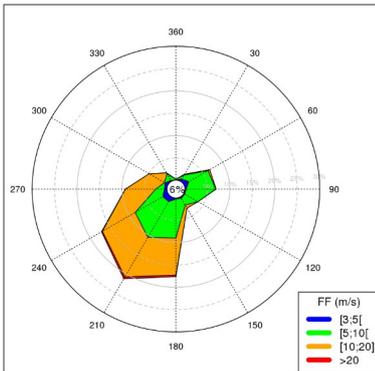


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 3014

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.6	1.0	0.2	.	1.9
60	1.3	4.9	0.4	.	6.7
90	0.3	6.6	0.1	.	6.9
120	0.3	3.4	.	.	3.6
150	0.4	1.8	0.8	.	2.9
180	0.2	8.7	8.3	0.4	17.6
210	1.2	9.3	10.2	0.5	21.2
240	1.4	7.1	8.4	0.2	17.1
270	0.5	2.0	6.7	0.0	9.3
300	0.8	0.2	3.9	.	4.9
330	0.2	1.7	0.2	.	2.2
360	0.1	0.1	.	.	0.2
Total	7.2	46.7	39.4	1.1	94.5
[0; 3[	.	.	.	.	5.5

DÉCEMBRE 2020 - LIDAR (100m)

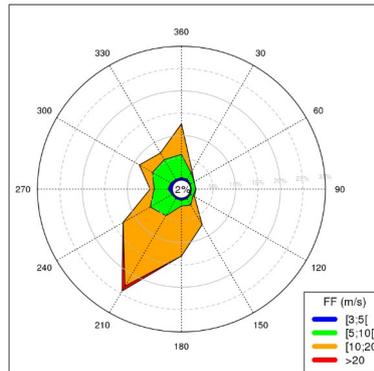


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4425

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.6	1.6	0.5	.	2.7
60	0.3	1.0	.	.	1.3
90	0.2	1.0	0.0	.	1.2
120	0.4	0.6	0.4	.	1.4
150	0.5	1.7	5.1	0.0	7.2
180	0.6	1.2	11.2	.	13.0
210	0.5	4.4	18.2	1.3	24.4
240	0.4	5.6	6.9	0.0	13.0
270	1.0	3.1	0.9	.	4.9
300	0.7	4.7	3.4	.	8.8
330	0.5	5.1	1.7	.	7.3
360	0.6	5.2	6.8	0.0	12.6
Total	6.1	35.3	55.0	1.4	97.8
[0; 3[	.	.	.	.	2.2

JANVIER 2021 - LIDAR (100m)

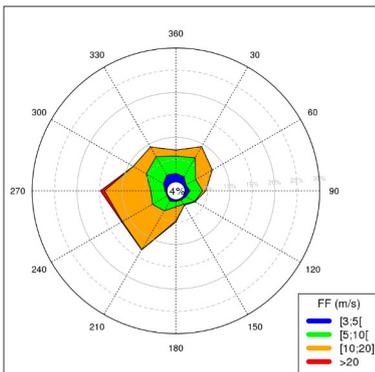


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4398

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	1.6	4.9	2.9	.	9.4
60	0.6	2.5	4.3	.	7.3
90	1.1	2.8	0.7	.	4.6
120	0.6	2.2	0.1	.	2.9
150	0.4	1.1	0.3	.	1.7
180	0.4	1.2	3.2	0.2	5.0
210	0.7	2.5	10.0	0.1	13.3
240	0.2	3.8	7.7	0.2	11.9
270	0.4	3.2	10.3	0.9	14.8
300	1.2	4.4	3.3	.	9.0
330	2.1	4.8	2.5	.	9.3
360	1.9	3.9	1.3	.	7.1
Total	11.1	37.3	46.6	1.4	96.4
[0; 3[	.	.	.	.	3.6

FÉVRIER 2021 - LIDAR (100m)

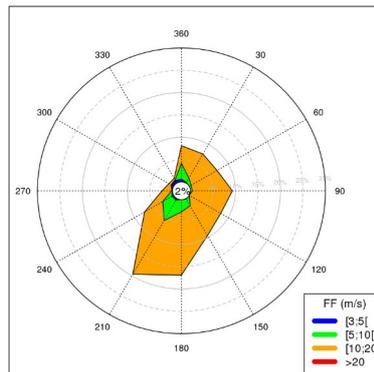


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 2792

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.2	1.1	6.2	.	7.5
60	.	0.5	6.7	.	7.1
90	.	0.4	8.9	.	9.3
120	.	0.0	8.1	.	8.1
150	0.1	1.7	7.7	.	9.6
180	.	2.7	14.1	.	16.9
210	0.4	5.3	13.9	.	19.6
240	0.4	2.4	4.7	.	7.4
270	0.0	0.1	2.1	.	2.3
300	0.5	0.1	0.6	.	1.2
330	0.7	0.1	0.4	.	1.2
360	0.6	3.5	3.9	.	8.1
Total	3.0	18.2	77.2	.	98.4
[0; 3[	.	.	.	.	1.6

MARS 2021 - LIDAR (100m)

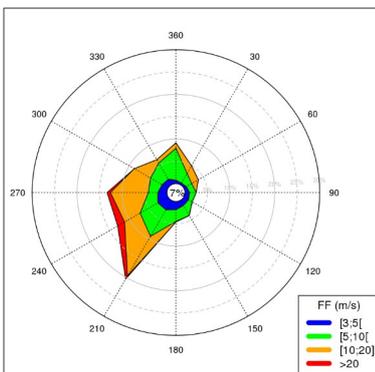


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 2770

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	0.4	2.5	1.9	.	4.9
60	0.7	1.4	1.7	.	3.8
90	1.0	1.4	.	.	2.5
120	1.2	0.9	.	.	2.2
150	1.3	2.6	.	.	3.9
180	1.8	2.6	0.1	.	4.6
210	2.5	6.9	10.2	0.9	20.4
240	2.6	4.5	4.0	1.8	13.0
270	2.0	2.1	8.4	0.8	13.3
300	1.5	3.0	4.2	.	8.7
330	1.4	4.2	0.9	.	6.5
360	0.8	7.1	1.2	.	9.1
Total	17.4	39.3	32.7	3.4	92.9
[0; 3[	.	.	.	.	7.1

AVRIL 2021 - LIDAR (100m)

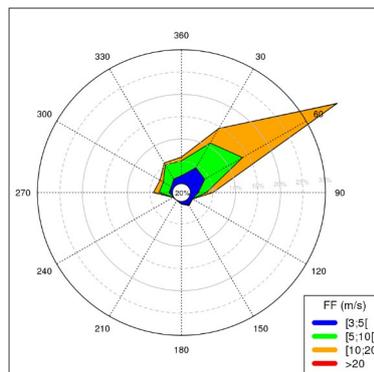
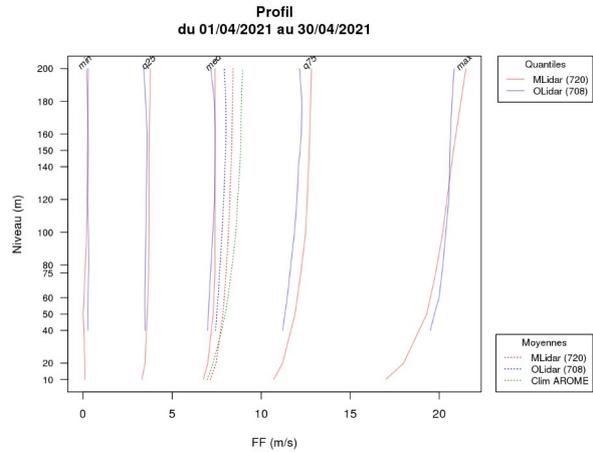
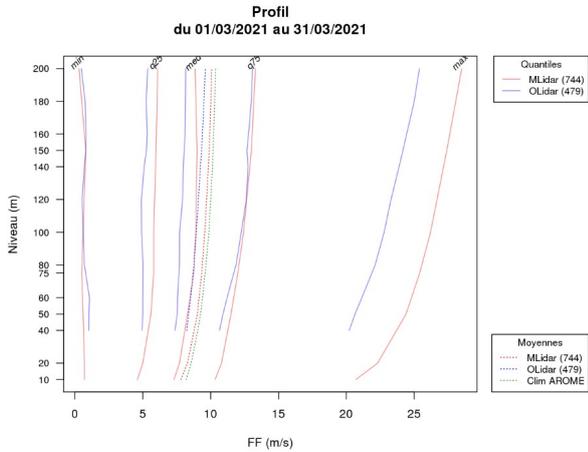
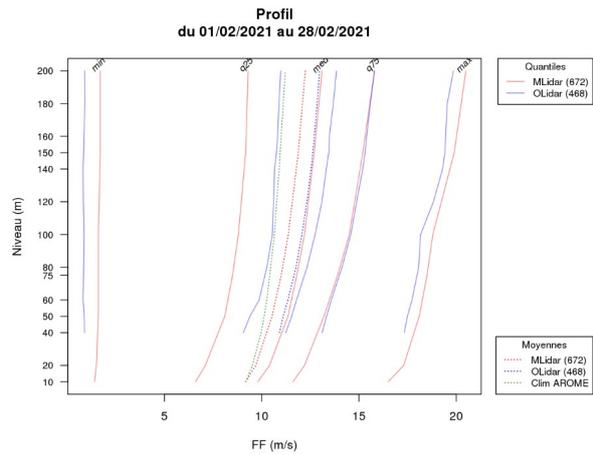
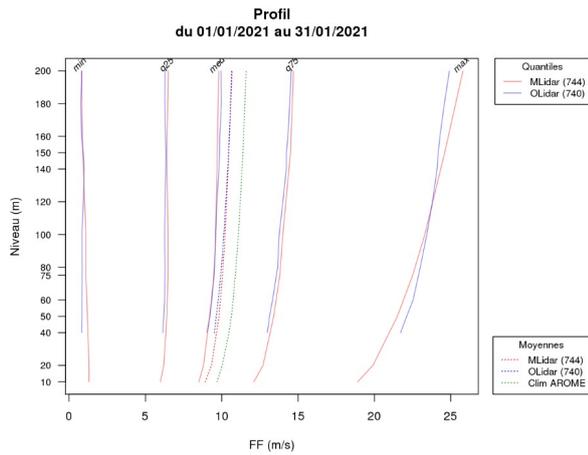
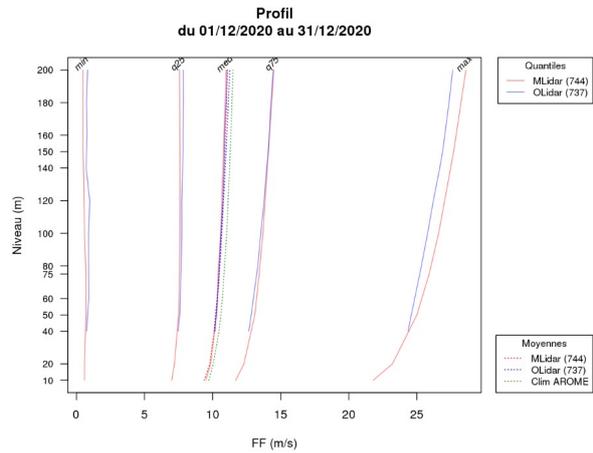
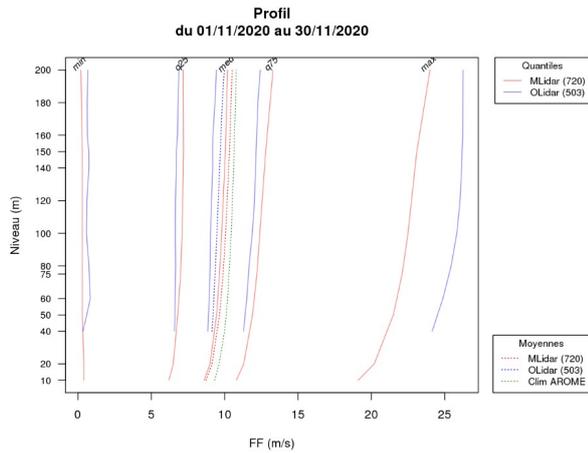


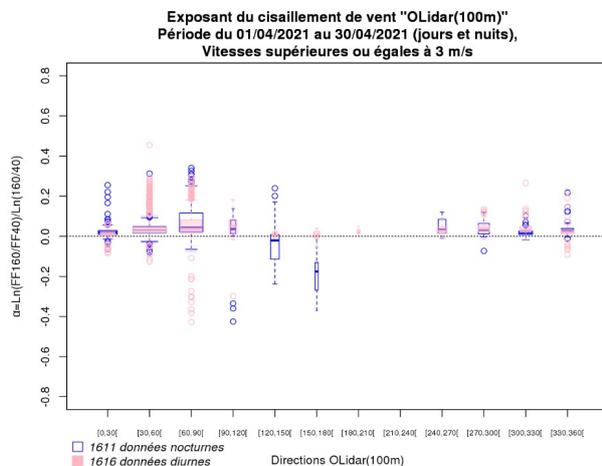
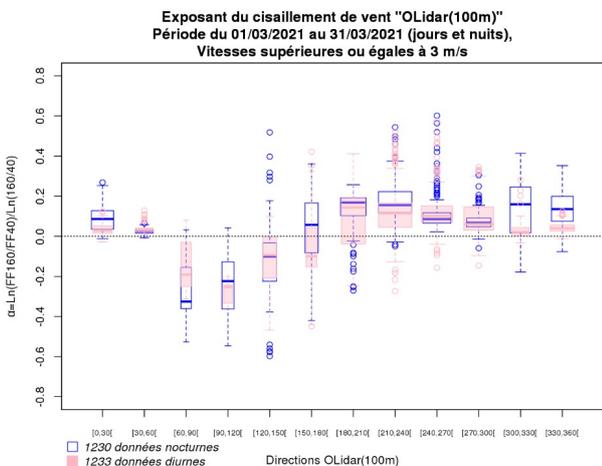
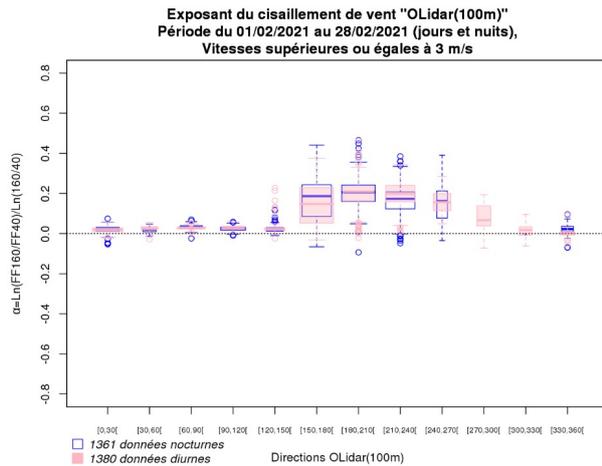
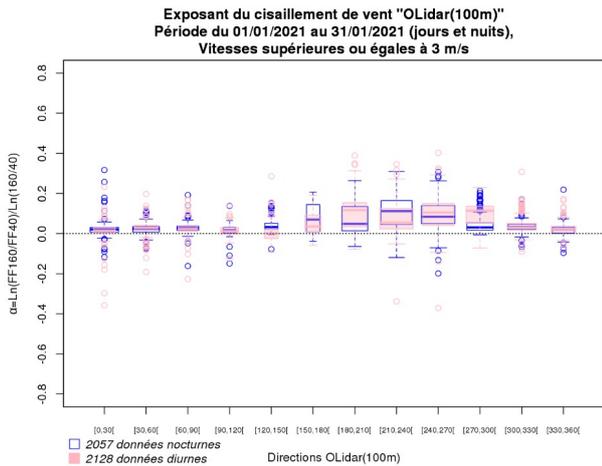
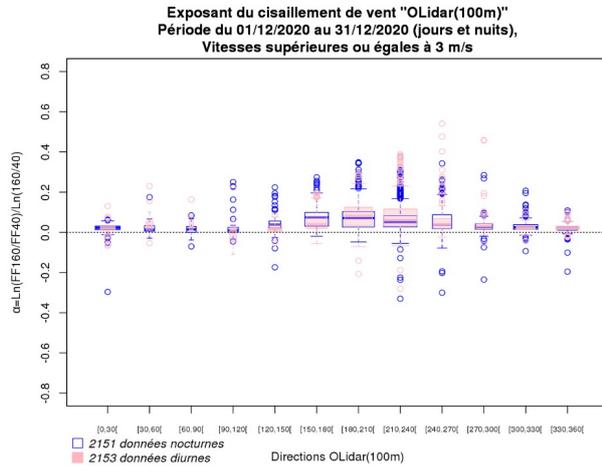
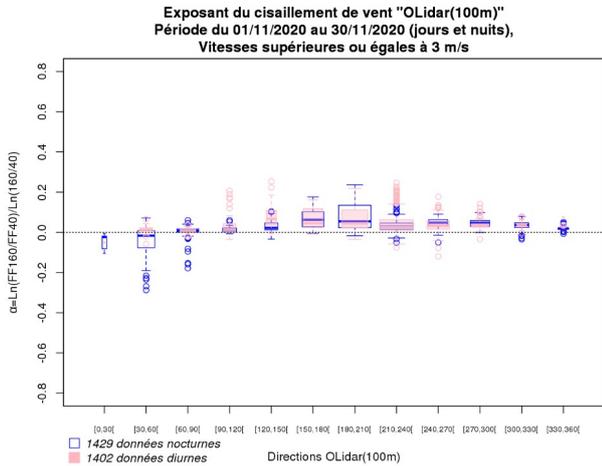
Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4120

	[3;5[	[5;10[	[10;20]	>20	total
30	4.4	6.4	3.8	.	14.6
60	4.0	9.7	24.1	0.2	38.0
90	1.7	1.8	1.5	.	5.0
120	0.8	0.0	.	.	0.8
150	1.2	0.2	.	.	1.4
180	0.6	.	.	.	0.6
210	0.0	.	.	.	0.0
240	0.0	0.1	0.0	.	0.2
270	0.8	2.2	1.3	.	4.2
300	0.6	2.1	0.8	.	3.5
330	1.5	3.7	0.5	.	5.7
360	1.8	3.3	0.8	.	5.9
Total	17.4	29.5	32.8	0.2	79.8
[0; 3[	.	.	.	.	20.2

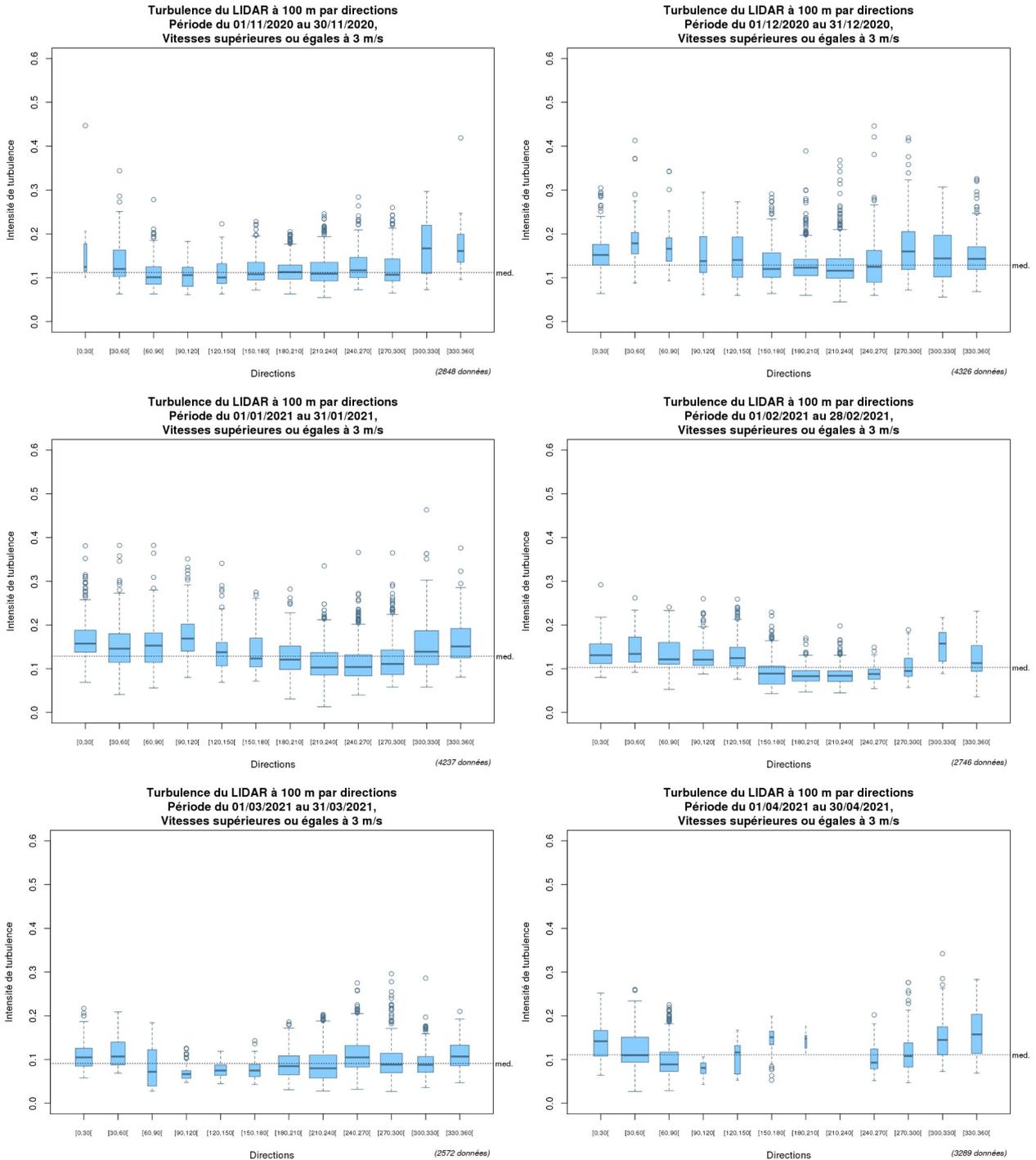
Annexe 7 : Profils de vent du LiDAR



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



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



FIN DE DOCUMENT
