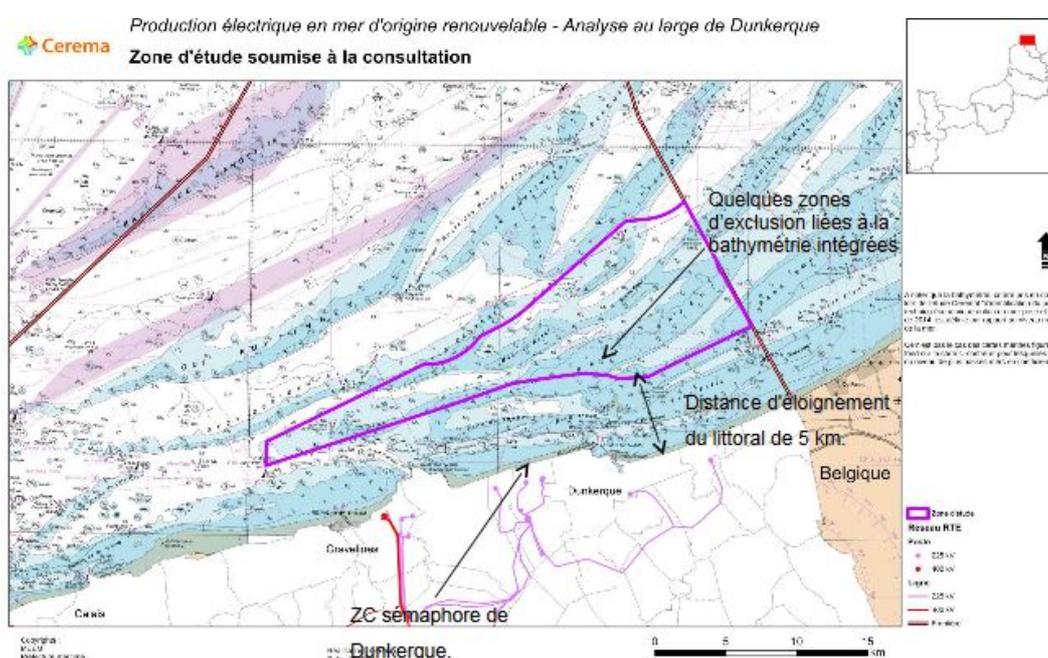


Projet de parc éolien off-shore au large de Dunkerque

Acquisition et suivi des mesures sur site durant un an



<p>Pour la Direction Générale Énergie Air et Climat du Ministère de la Transition écologique et solidaire</p>	<p>Sous-direction du système électrique et des énergies renouvelables, Bureau des énergies renouvelables.</p>	 <p>LIBERTÉ • ÉGALITÉ • FRATERNITÉ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE</p> <p>MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Correspondant commercial : Météo-France, D2C, Toulouse</p>	<p>Christophe.jacolin@meteo.fr + 33 5 61 07 86 85</p>	
<p>Correspondant technique : Météo-France, DIR Nord, Villeneuve d'Ascq</p>	<p>julien.perfettini@meteo.fr + 33 3 20 67 66 31</p>	

- page laissée intentionnellement vide -

Évolutions successives

Référence	Date	Version
Acquisition et suivi des mesures sur site durant un an	15/06/2017	V1
Acquisition et suivi des mesures sur site durant un an	18/07/2017	V2
Acquisition et suivi des mesures sur site durant un an	13/09/2017	V3
Acquisition et suivi des mesures sur site durant un an	19/09/2017	V4
Acquisition et suivi des mesures sur site durant un an	25/01/2018	V5

Signatures

	Nom	Service
Rédacteur(s)	Nicolas GUERIN	DIRN/EC
	Gérard DOLIGEZ	DIRN/CM Boulogne-sur-Mer
Relecteur(s)	Nicolas GUERIN	DIRN/EC
	Gérard DOLIGEZ	DIRN/CM Boulogne-sur-Mer
	Béatrice POUPONNEAU	DSM/EC/ECGC
Approbateur(s)	Julien PERFETTINI	DIRN/EC/D

Table des matières

1	Contexte.....	5
1.1	Zone d'étude.....	5
1.2	Descriptif de la solution retenue pour l'acquisition des mesures sur site.....	8
2	Méthodologie appliquée.....	9
2.1	Présentation du modèle AROME.....	10
2.2	Type de données.....	12
2.2.1	Données fournies par le LiDAR.....	12
2.2.2	Données anémométriques de la plateforme.....	13
2.2.3	Données climatologiques d'EDF Gravelines.....	13
2.2.4	Données climatologiques de la station de Dunkerque.....	14
2.2.5	Données climatologiques de la station de Calais-Marck.....	15
3	Analyse des données de vent mesuré par le LiDAR.....	16
3.1	Suivi des données.....	16
3.1.1	Disponibilité des données brutes.....	16
3.1.2	Monitoring des données FF brutes.....	18
3.1.3	Affectation d'un code qualité aux séries DD,FF et FXI.....	19
3.1.4	Monitoring des erreurs.....	20
3.2	Retour sur des cas de données manquantes ou douteuses.....	21
3.3	Statistiques de contrôle de la mesure.....	22
3.3.1	Comparaison des mesures horaires avec le modèle AROME.....	23
3.3.2	Statistiques du vent mesuré.....	31
	ANNEXES.....	41
	ANNEXE 1 : Climatologie de l'année 2017.....	42
	ANNEXE 2 : Retour sur la situation des 24 et 25 janvier 2017.....	47
	ANNEXE 3 : Retour sur la situation des 3 et 4 avril 2017.....	48
	ANNEXE 4 : Retour sur la situation du 25 mai 2017.....	49
	ANNEXE 5 : Retour sur la situation des 6 et 7 juillet 2017.....	50
	ANNEXE 6 : Retour sur la nuit du 18 au 19 juillet 2017.....	52
	ANNEXE 7 : Retour sur la situation des 19 et 20 septembre 2017.....	54
	ANNEXE 8 : Analyse de corrélation (en pour mille) du vent LiDAR observé à 100 m (du 1 ^{er} décembre 2016 au 30 novembre 2017).....	56
	ANNEXE 9 : Distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	57
	ANNEXE 10 : Répartitions horaires par mois des forces de vent du LiDAR à 100 m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	59
	ANNEXE 11 : Roses des vents mensuelles du LiDAR à 100 m (données brutes).....	61
	ANNEXE 12 : Cisaillement du vent du LiDAR à 100 m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	63
	ANNEXE 13 : Turbulence du vent du LiDAR à 100 m (données brutes seuillées à 3 m/s).....	65

1 Contexte

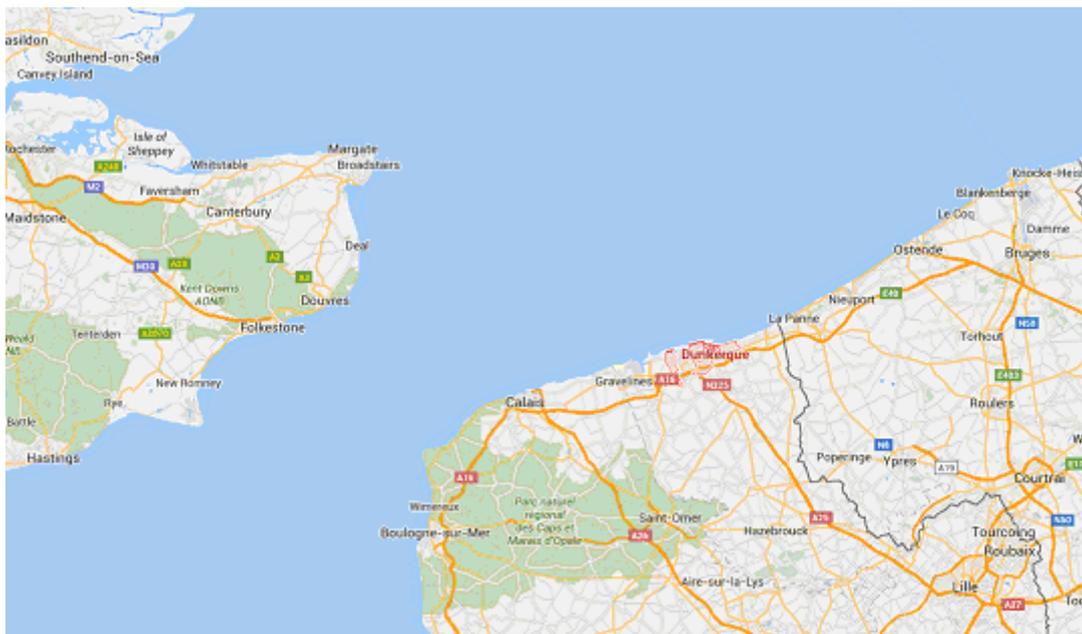
La Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC) a sollicité Météo-France pour la réalisation d'études de vent dans la zone d'implantations d'éoliennes en mer au large de Dunkerque. Le but étant d'identifier les risques susceptibles de se présenter dans les zones retenues comme propices au développement de l'éolien off-shore.

Ces études s'inscrivent dans le cadre du lancement du troisième 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.

1.1 Zone d'étude

Le futur parc éolien se situe au large de la ville de Dunkerque, ville située sur la partie nord de la côte d'Opale, qui s'étend de la frontière nord de la France à la baie de Somme, à cheval entre la Manche et la Mer du Nord.



Position géographique de Dunkerque (source Google Maps)

La zone au large de Dunkerque subit :

- régulièrement le passage de dépressions liées à celle d'Islande qui provoque l'accélération des vents de sud-ouest,
- l'influence de hautes pressions continentales qui génèrent souvent les vents de nord-est réguliers, frais et parfois forts.

La géographie physique de la zone et l'influence régulière de la dépression d'Islande et de l'anticyclone de Sibérie concourent à rendre cette zone particulièrement ventée. Le détroit du Pas-de-Calais constitue un goulot d'étranglement qui influence les directions dominantes du vent et constitue un obstacle pour les grandes houles de l'Atlantique. Météo-France dispose d'une station de mesure via le sémaphore de Dunkerque qui est positionnée à une altitude de 11 mètres à l'avant du port de Dunkerque et face à la mer. Cette station est représentative du vent au nord du détroit du Pas-de-Calais. La classe de performance du vent est de 3 sur une échelle de 5 (qualité décroissante de 1 à 5). La présence de bâtiments à distance du capteur peut altérer la mesure du vent dans le secteur sud-ouest.

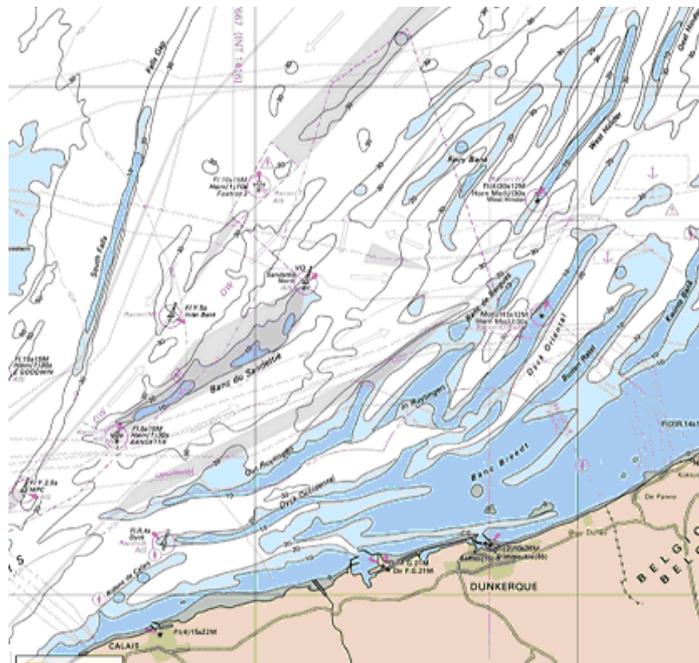


Position de la station de Dunkerque (source Google Earth)

Du rapport du Lot 1 (*Analyse du risque décennal des forces de vent et des hauteurs de vagues sur la zone de Dunkerque*) produit par le bureau d'études de Rennes, nous présentons la conclusion suivante sur le vent à Dunkerque :

- la région de Dunkerque connaît très peu de périodes de vent calme,
- l'allure générale des roses de printemps et d'été sont proches,
- l'allure générale des roses d'hiver et d'automne sont proches,
- les vents de nord-est sont plus fréquents au printemps,
- les vents de sud-ouest sont plus fréquents en été,
- les épisodes de vents forts sont majoritairement associés à des vents de sud-ouest.

D'un point de vue de la géographie marine, la zone d'étude se situe par des fonds de faibles profondeurs très souvent inférieures à 20 mètres. Ils se caractérisent par la présence de nombreux bancs de sable, parallèles à la côte, qui évoluent lentement et par la présence de petites dunes de sable qui naissent et se déplacent plus librement.

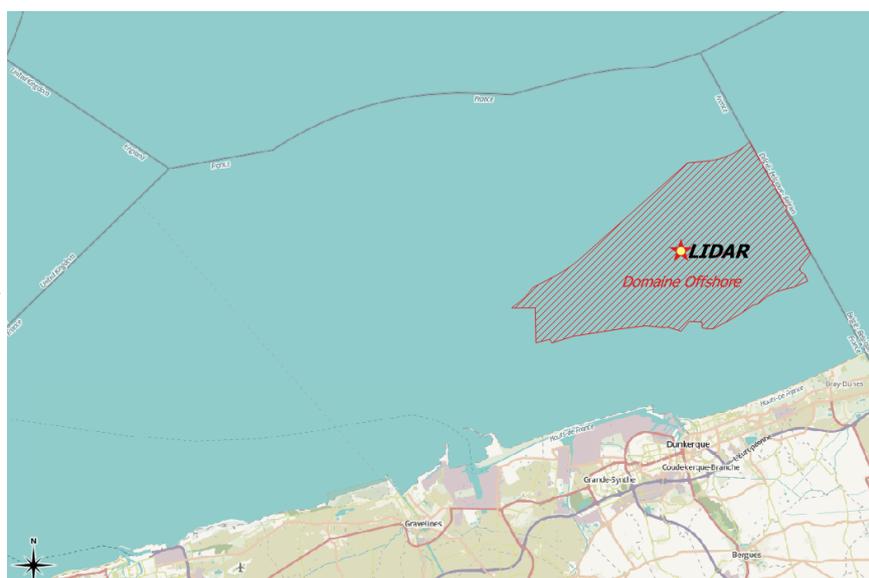


Carte marine du large de Dunkerque (source SHOM date des relevés inconnue)

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 : 2.37° Lat : 51,15° et devait théoriquement se dérouler du 1^{er} janvier 2017 au 31 décembre 2017.

La campagne effective s'est déroulée du 24 novembre 2016 au 23 novembre 2017.

Carte positionnant le LiDAR et le 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 Windcube V2 Offshore intégrant une centrale inertielle et un algorithme de calcul permettant de corriger les mesures de vent en fonction des mouvements du LiDAR.

La plateforme de diamètre conséquent (12 m) dispose d'un tirant d'eau de 1 m, d'une hauteur totale de 4 m pèse 70 tonnes.

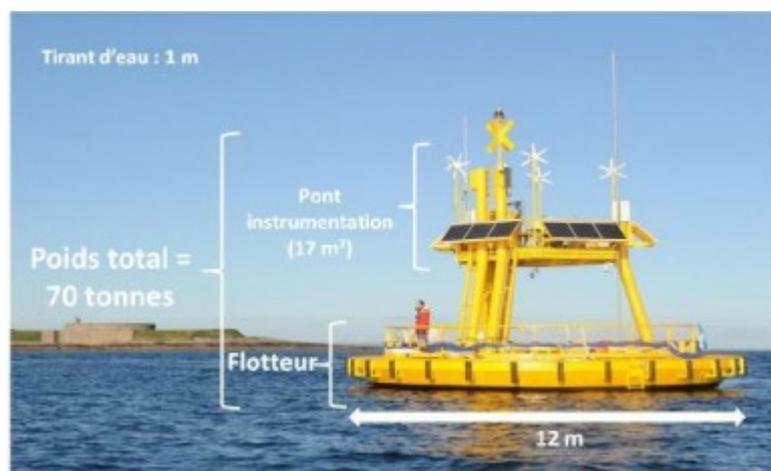


Photo de la plateforme de mesure

La mesure de vent est réalisée sur M³EA 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 peuvent être réalisées sur 10 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, 60, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180 et 200 m.

Ce LiDAR réalise également des mesures de température, de pression atmosphérique et d'humidité relative, à l'aide d'une sonde COMET T7310.



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 réalisera 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 fournies au regard de données fournies par des sites voisins ou par le modèle météorologique AROME de Météo-France.

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

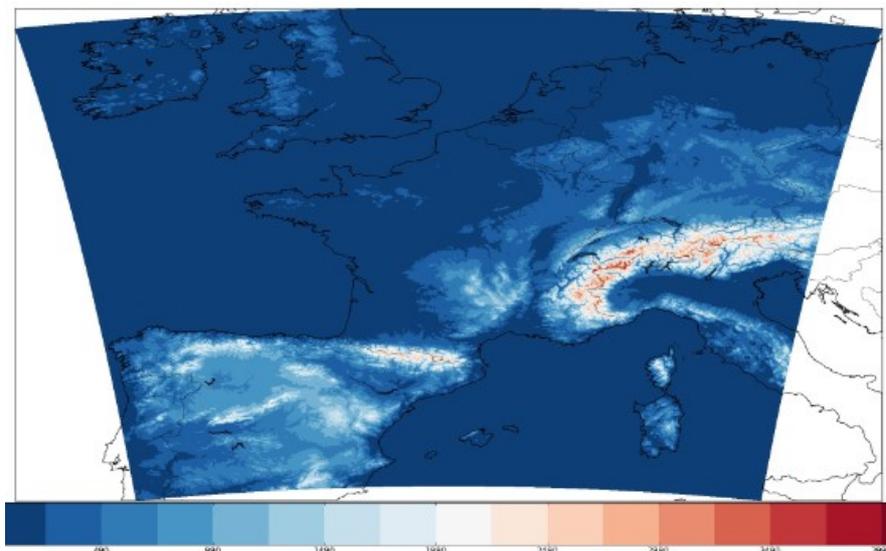
Afin de pouvoir valider les données fournies par le LiDAR, Météo-France s'appuiera sur son modèle météorologique à maille fine AROME qui dispose des hauteurs suivantes en terme de données de vent moyen assimilées : 10, 20, 50, 75, 100, 150 et 200 m. Ces données assimilées, disponibles au pas de temps horaire, sont la meilleure représentativité 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 utilisées (données LiDAR, données anémométriques de la plateforme, données climatologiques d'EDF Gravelines et de la station de Dunkerque) et enfin une présentation des outils statistiques sera effectuée.

2.1 Présentation du modèle AROME

Le système régional de prévision numérique du temps AROME 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 Méso-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.



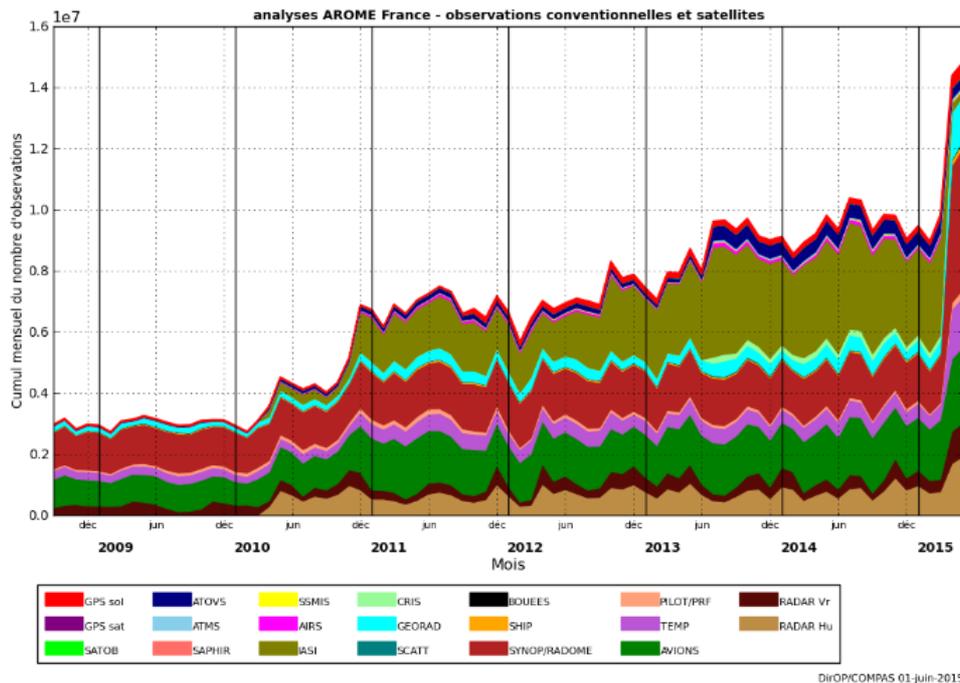
Domaine de calcul du domaine AROME

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.

Accroître la résolution du modèle suppose une densité d'observations accrue permettant 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.



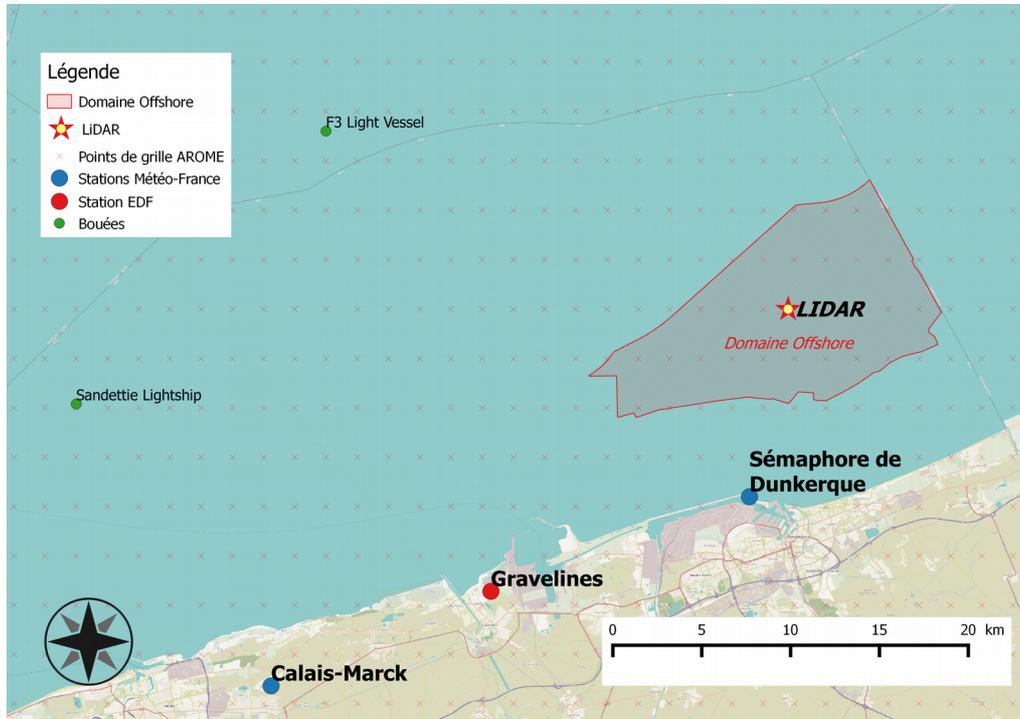
*Evolution des cumuls mensuels de nombre d'observations utilisées dans AROME
par type d'observations*

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 ...

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



Localisation des points de mesure les plus proches du LiDAR (Source OpenStreetMap)

2.2.1 Données fournies par le LiDAR

Pour chaque hauteur de mesures, le LiDAR fournit 2 types de données :

Les données reconstituées

- 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,
- Données moyennées sur 10 minutes non corrigées (fichier .stdsta) et corrigées (fichier .sta) du mouvement du LiDAR.

Les données brutes (1 seconde)

- Données brutes non corrigées (fichier .stdrtd) et corrigées (fichier .rtd) du mouvement du LiDAR,
- Données de mouvement du LiDAR (fichier .rtd) : roulis, tangage, lacet. La position en x,y,z du LiDAR est disponible à l'aide du système GPS.

Les données sont horodatées et au format ASCII. Les principales données présentes dans ces trames sont :

- Horodatage : date, heure, minute, seconde,
- Pour chaque altitude programmée, et pour chacun des faisceaux laser (pour les données brutes : .rtd et .stdrtd), les caractéristiques des données de vent : vitesses horizontales et verticales, directions,
- Température extérieure et température intérieure du LiDAR, pression atmosphérique, humidité relative,
- Nombre de mises en route du lai 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 .stdsta) : 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'elle valide qu'au moins 30% des données brutes sont présentes pour élaborer la donnée reconstituée ». Les fichiers .sta et .stdsta présenteront directement cette valeur permettant de juger directement de la fiabilité de la mesure,
- Position du LiDAR, dans les données brutes (fichiers .rtd et .stdrtd) : angles Alpha, Beta et Gamma relatifs au tangage, roulis et cap du Lidar.

2.2.2 Données anémométriques de la plateforme

Le prestataire a installé un anémomètre ultrasonique à 10 m de hauteur sur la plateforme à compter du 31 mars. Suite à un problème technique celui-ci a dû être remplacé. Nous ne disposons des mesures en continu que depuis le 15 mai et pour une courte période. Celles-ci sont présentées au paragraphe 3.3.1.d).

2.2.3 Données climatologiques d'EDF Gravelines

La station d'EDF Gravelines se trouve sur le site de la centrale nucléaire de Gravelines. Tous les ans, cette station fait l'objet d'une visite de conformité de la part des équipes de Météo-France. Il s'agit d'une station automatique « Campbell Scientific » de type « CR1000 » fournissant des données d'observations au réseau SEMENCE d'EDF (données assimilées par le modèle AROME). Outre les mesures des paramètres météorologiques classiques (températures, humidité, précipitations...), cette station permet de disposer d'une mesure de vent proche du LiDAR et à une hauteur de 80 m, grâce à un capteur ultrasonique.



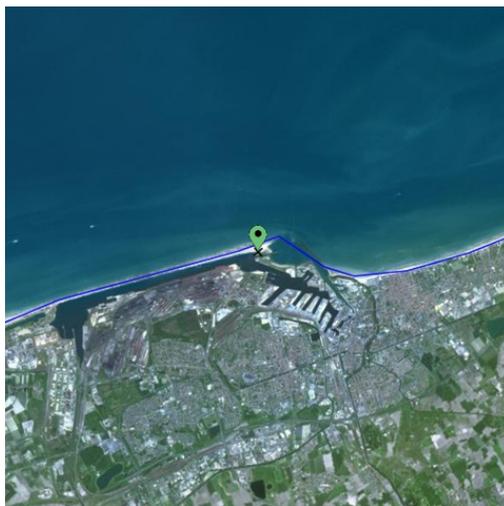
Lat : 51°00',45 Nord ; Lon : 2°07',97 Est ; Alt : 3 m

2.2.4 Données climatologiques de la station de Dunkerque

La station météorologique est située sur le terrain du sémaphore de la marine nationale. Il s'agit d'une station automatique de type « Opale » dotée d'un capteur de vent « Alizia 312 ».

Même si l'on dispose de quelques données antérieures à la seconde guerre mondiale, la série débute véritablement en février 1946, avec un léger déplacement du parc en novembre 1966. Elle fait actuellement partie du réseau Radome de Météo-France, et à ce titre mesure automatiquement toutes les heures les paramètres « standards » tels que Pression, Vent, Température, Humidité, précipitations... Les sémaphoristes peuvent rajouter toutes les 3 heures leurs observations visuelles telles que l'état de la mer, la visibilité vers la mer, la nébulosité, le temps présent...

Le mat vent se trouve déporté dans un terrain situé au sud-est du parc principal, et son environnement comporte quelques masques, notamment des hangars dans son sud-ouest qui lui confère une classification médiocre (classe 3).



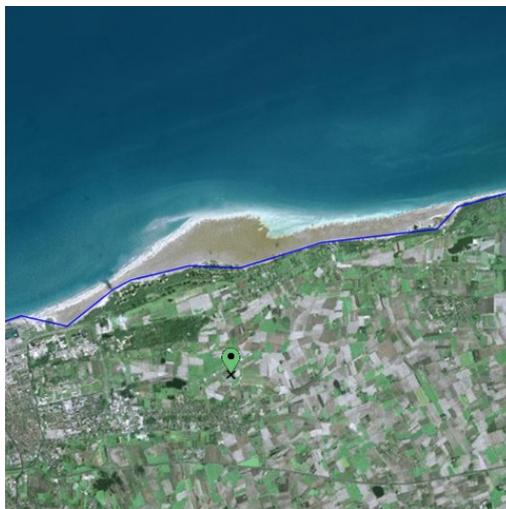
Lat : 51°03',35 Nord Lon : 2°20',37 Est ; Alt : 11 m

2.2.5 Données climatologiques de la station de Calais-Marck

La station de Calais-Marck est située sur l'aérodrome de Calais. Il s'agit d'une station automatique de type « Opale » dotée d'un capteur de vent « Alizia 312 »

Cette station est relativement récente, puisqu'elle ne dispose de données que depuis 1991. Elle appartient au réseau Radome de Météo-France et mesure donc les mêmes paramètres que la station de Dunkerque.

Malgré la présence d'un hangar au sud-sud-ouest, la classification du vent reste correcte (classe 2).



Lat : 50°57',59 Nord ; Lon : 1°57',37 Est ; Alt : 2 m

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**).

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

- *Oldent* : Données d'observation au point '*Ident*'
 - *MIdent* : Données modèle au point '*Ident*'
 - ➔ *Ident* = {Grav (station de Gravelines), Dunk (sémaphore de Dunkerque), Cal (station de Calais) }
 - 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)
- Il a été décidé de ne travailler qu'avec la partie entière de FXI.

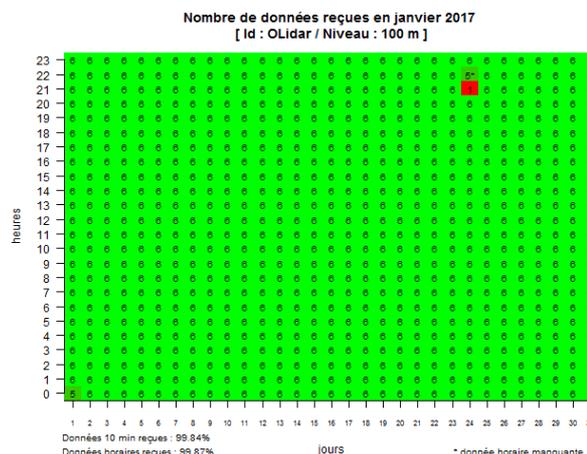
A noter que le paramètre *DXI* (direction du vent instantané) n'est pas traité. C'est un paramètre non mesuré par le LiDAR et non disponible via le modèle AROME de Météo-France.

3.1 Suivi des données

Météo-France a choisi de présenter les résultats par saisons météorologiques et ainsi considérer la période d'étude du 1^{er} décembre 2016 au 30 novembre 2017. Pour rappel, la série horaire fournie sera basée sur la campagne de mesures du 24 novembre 2016 au 23 novembre 2017.

3.1.1 Disponibilité des données brutes

Nous ne surveillons que les 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 des données 10 minutes disponibles par heure. 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.



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.

Durant la campagne de mesures, de nombreuses interruptions dans la fourniture des données se sont produites du fait essentiellement de pannes électriques. Le détail de ces anomalies figure au paragraphe 3.2.

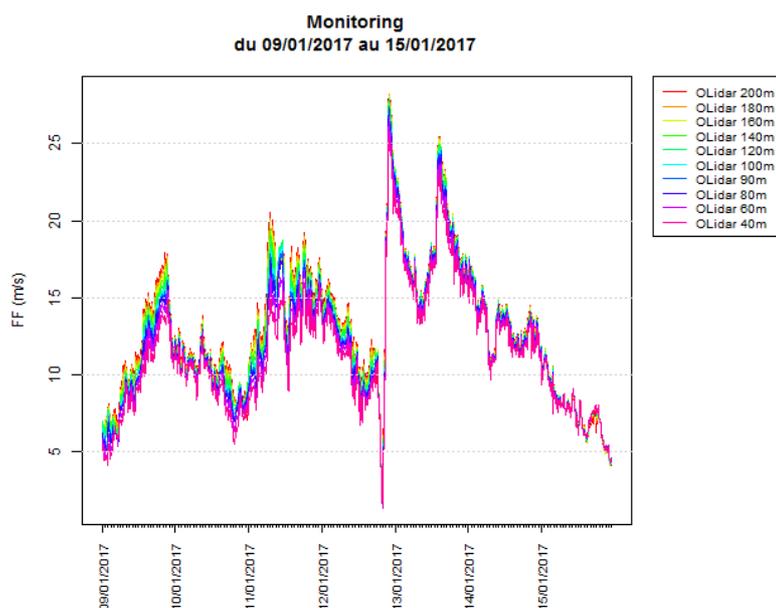
	déc	jan	fév	mar	avr	Mai		jui	juil	aoû	sep	oct	nov	Total annuel	
	DD&FF	DD&FF	DD&FF	DD&FF	DD&FF	DD	FF	DD&FF	DD&FF	DD&FF	DD&FF	DD&FF	DD&FF	DD	FF
200m	88,28	95,16	97,37	58,20	97,38	52,89	71,33	77,52	78,49	38,24	62,85	76,90	73,12	74,48	76,05
	88,04	95,16	97,92	58,87	97,08	52,82	71,91	77,22	78,23	38,17	62,50	76,75	73,06	74,43	76,05
180m	91,38	97,07	98,81	59,36	98,24	54,28	74,82	81,06	82,35	40,37	66,32	80,94	74,14	76,82	78,56
	91,53	97,18	98,96	59,81	98,19	54,30	74,73	80,69	81,72	40,46	66,53	81,32	74,17	76,86	78,60
160m	94,09	97,85	99,73	60,30	98,73	55,62	77,89	83,50	84,48	41,17	67,96	82,64	74,61	78,18	80,07
	94,09	97,72	99,70	60,35	98,75	55,51	77,82	83,89	84,01	41,13	68,19	82,53	74,72	78,17	80,07
140m	95,52	98,16	99,88	61,16	98,87	55,71	79,01	85,07	85,35	41,35	68,24	83,94	74,72	78,80	80,77
	95,16	98,25	99,70	61,16	98,89	55,51	78,90	85,28	85,35	41,26	68,19	84,14	74,86	78,78	80,76
120m	96,95	99,13	99,98	61,29	99,42	55,85	79,82	85,51	85,48	41,53	68,24	85,13	74,88	79,25	81,29
	96,77	99,19	100	61,29	99,58	55,78	79,70	85,56	85,35	41,53	68,19	85,08	75,00	79,25	81,28
100m	97,16	99,87	99,98	61,29	99,86	55,85	80,11	85,65	85,57	41,53	68,24	85,30	75,12	79,42	81,48
	96,91	99,87	100	61,29	99,86	55,78	79,97	85,69	85,48	41,53	68,19	85,35	75,28	79,41	81,46
90m	97,20	100	99,98	61,29	99,95	55,85	80,04	85,67	85,60	41,53	68,24	85,30	75,28	79,46	81,52
	97,04	100	100	61,29	99,86	55,78	79,97	85,69	85,48	41,53	68,19	85,35	75,56	79,45	81,51
80m	97,36	100	99,98	61,29	99,98	55,85	80,04	85,65	85,60	41,53	68,24	85,22	75,21	79,46	81,52
	97,18	100	100	61,29	99,86	55,78	80,11	85,83	85,48	41,53	68,19	85,08	75,42	79,44	81,51
60m	97,49	100	99,98	61,29	100	55,85	79,95	85,60	85,60	41,53	68,24	85,19	75,19	79,47	81,51
	97,31	100	100	61,29	100	55,78	80,11	85,69	85,48	41,53	68,19	85,08	75,28	79,44	81,51
40m	97,49	100	99,98	61,29	100	55,85	80,65	85,72	85,60	41,62	68,24	85,28	75,42	79,51	81,62
	97,31	100	100	61,29	100	55,78	80,65	85,83	85,48	41,67	68,19	85,08	75,56	79,49	81,60
Total mensuel	95,29	98,72	99,57	60,68	99,24	55,36	78,37	84,10	84,41	41,04	67,48	83,58	74,77	78,49	80,44
	95,13	98,74	99,63	60,79	99,21	55,28	78,39	84,14	84,21	41,03	67,46	83,58	74,89	78,47	80,44

Taux de présence (en %) des données (DD, FF) 10 minutes (en italique) et horaires (en gras)

3.1.2 Monitoring des données FF brutes

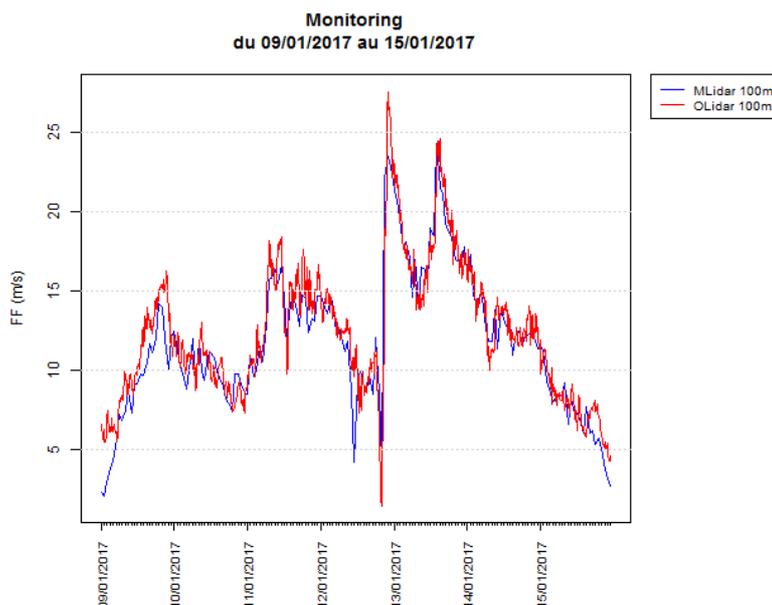
Un suivi de l'ensemble des données du LiDAR et du modèle est effectué au fil de l'eau grâce à la production de graphiques de monitoring. Ils permettent en amont de rapidement vérifier la cohérence des données avec la situation synoptique.

a) Données 10 minutes du LiDAR sur les 10 niveaux :



(à noter ici le pic correspondant au passage de la tempête 'Egon' dans la nuit du 12 au 13 janvier 2017)

b) Données 10 minutes du LiDAR et horaires du Modèle sur un niveau (ici à 100 m) :



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

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 à 3 m/s (à la fois pour les données modèle et les données d'observation).

a) 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 quotidienne de valeurs 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 quotidienne soit qualifiée de douteuse, il faut au moins 10 observations quotidiennes arrivées à temps dans le cycle d'assimilation du modèle où :

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

b) 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 déterminons le quantile correspondant à une erreur (valeur absolue de la différence) de 3 m/s entre l'observation et le modèle à 10 m. **A noter que nous gardons la même condition sur l'erreur de direction.**

La station de Dunkerque est la station la plus proche du LiDAR, effectuant des mesures de vent à 10 m. Son environnement (hangars au sud-ouest engendrant une forte rugosité) n'est toutefois pas optimal pour effectuer une mesure de qualité. La classification du site est de type '3', ce qui correspond à une mesure de vent plutôt médiocre.

Le poste de Calais-Marck effectue également des mesures de vent à 10 m. Il est plus éloigné de notre zone d'étude mais dispose d'un meilleur environnement (classification de type '2'). Sur cette station, une erreur de 3 m/s entre l'observation et le modèle correspond au percentile 0,99. Sur le LiDAR à 100 m, si l'on considère le même percentile, on obtient une erreur de 4 m/s.

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

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

c) Codes qualité

Dans un premier temps, 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. Pour des périodes plus importantes, on affectera les données du modèle. On donnera par la suite aux nouvelles valeurs, le code qualité '2'.

Pour une donnée dite douteuse (cf définition plus haut), 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.
- '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 :

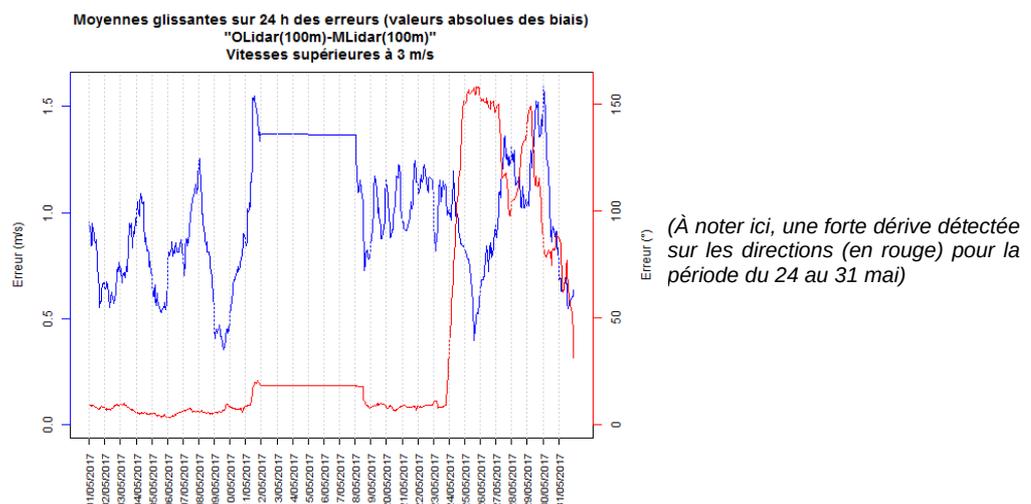
La série FXI horaire à 100 m sera déterminée à partir du maximum des 6 données FXI 10 min. En cas de manque, les données FXI ne seront pas estimées. La série disposera du code qualité suivant :

- '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 quelques données 10 min sont absentes).

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.

3.1.4 Monitoring des erreurs

Nous effectuons un suivi mensuel des moyennes glissantes sur 24 heures, des erreurs sur les forces et les directions afin de déceler d'éventuelles dérives. Les résultats restent souvent en dessous de 2 m/s et de 15°, et sont donc très inférieurs aux seuils fixés.



3.2 Retour sur des cas de données manquantes ou douteuses

Le LiDAR fournit naturellement moins de données d'observations plus le niveau augmente (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	
Déc	Quelques données manquantes
Jan	Néant
Fév	Néant
Mar	De fortes conditions météorologiques ont induit un défaut d'alimentation électrique du LiDAR du 19 au 30 mars 2017. La réparation a été réalisée dès que les conditions météorologiques ont permis de réaliser une intervention sur la bouée en toute sécurité.
Avr	Néant
Mai	La rupture d'un élément du groupe électrogène a induit un défaut d'alimentation électrique du LiDAR du 12 au 17 mai 2017. Un défaut de fonctionnement de la centrale inertielle du LiDAR a été détecté du 24/05 à 07:24 au 31/05 à 16:25. Ce défaut a principalement impacté les mesures de direction de vent.
Jun	Un défaut sur le convertisseur/chargeur a induit un défaut d'alimentation électrique du LiDAR à partir du 25 juin.
Jul	Le défaut sur le convertisseur/chargeur constaté fin juin a été corrigé le 5 juillet.
Août	Un nouveau défaut sur le convertisseur/chargeur a causé l'arrêt de la fourniture en 230 VAC de la bouée, et donc l'alimentation du LiDAR. Cet élément a été remplacé par un modèle neuf le 22/08.
Sep	A partir du 8 septembre, un défaut sur le convertisseur 230VAC/24VDC du LiDAR a rendu ce dernier inopérant. Ce convertisseur a été remplacé le 17 septembre. La durée d'indisponibilité des mesures est liée principalement aux conditions météorologiques défavorables qui n'ont pas permis d'intervenir rapidement sur site pour corriger le problème.
Oct	Du 21 au 25 octobre, un défaut sur la commande de démarrage du groupe électrogène a induit un arrêt de fonctionnement du LiDAR. La durée d'indisponibilité des mesures est liée principalement aux conditions météorologiques défavorables qui n'ont pas permis d'intervenir rapidement sur site pour corriger le problème.
Nov	Le 24 novembre 2017, la bouée M ³ EA a subi une avarie majeure ayant eu pour conséquence l'arrêt des mesures LiDAR, et le retour de la bouée au port de Dunkerque

Tableau récapitulatif des problèmes techniques rencontrés

- Les analyses des situations météorologiques ayant pu impacter les mesures horaires du LiDAR figurent dans les annexes 2 à 7.

3.3 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.

➔ Les 3 scores définis ci-dessus vérifient l'équation suivante : $ECT^2 = EQM^2 - Biais^2$

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

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

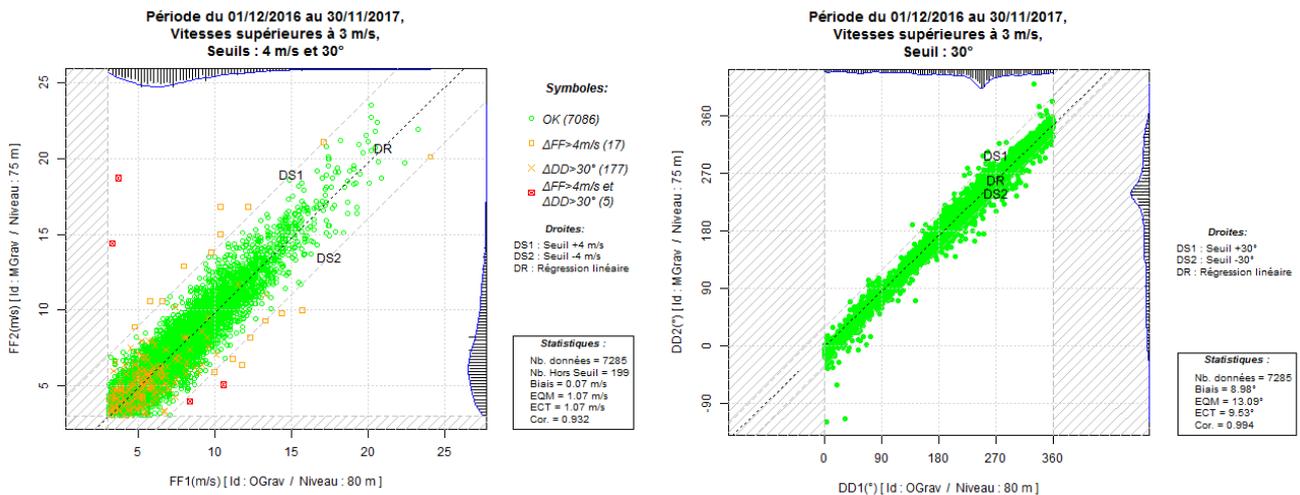
- Plus il est proche de 1, meilleure est la corrélation.

3.3.1 Comparaison des mesures horaires avec le modèle AROME

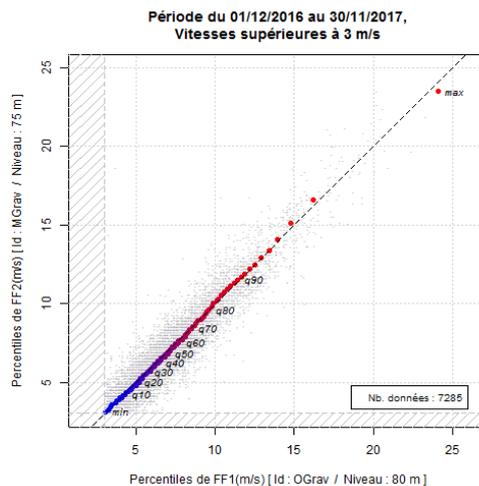
a) Comparaison mesures EDF Gravelines / modèle AROME

L'observation de Gravelines est précieuse, car c'est la seule observation d'altitude disponible dans le secteur du LiDAR. Elle permet donc d'établir un lien avec le LiDAR et le modèle. Les observations à 80 m sont comparées avec les données disponibles du modèle à 75 m.

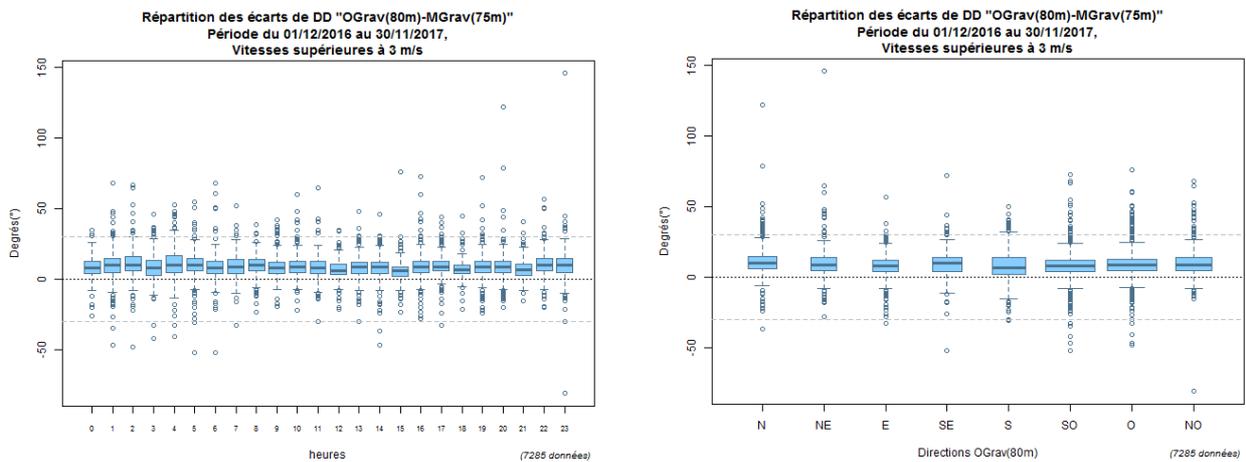
On note une très bonne corrélation entre l'observation (OGrav) et le modèle (MGrav).



La représentation des forces sous forme de diagramme « quantile-quantile » montre des points parfaitement alignés sur la première bissectrice. Ce qui confirme la pertinence de l'ajustement de la distribution des données du poste de Gravelines par rapport au modèle.



On constate toutefois que quelles que soient l'heure et la direction, l'observation présente un biais systématique d'un peu moins de 10° par rapport au modèle. Ce biais nous a été confirmé par le service de maintenance de Météo-France qui assure la validation et la conformité du capteur.

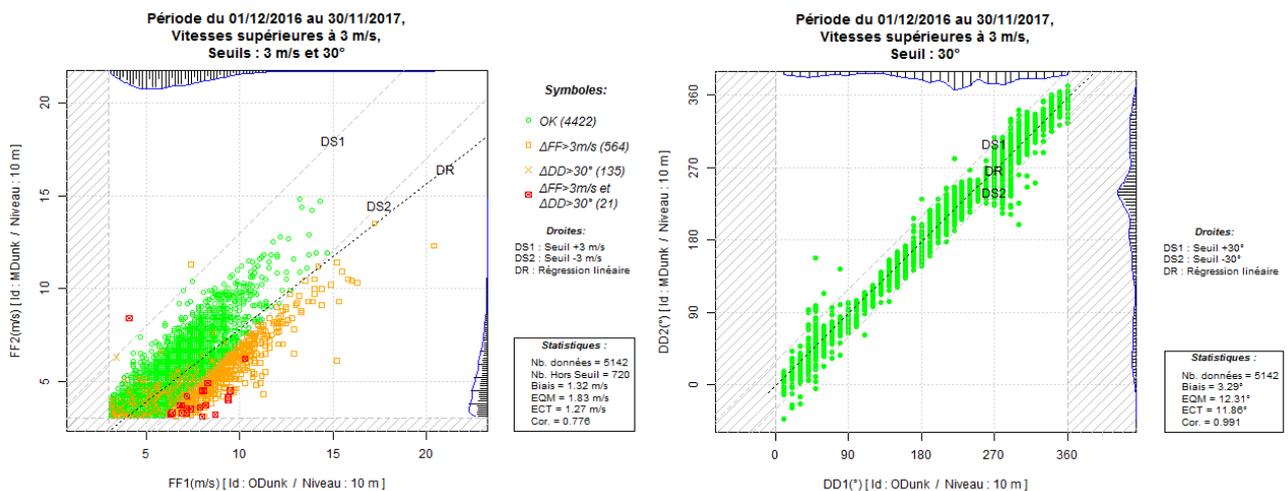


A noter que dans le cadre du monitoring effectué sur les séries de données à Météo-France, un biais constaté inférieur à 10°, ne justifie pas de mettre une station en liste noire, car il n'impacte pas la chaîne de prévision.

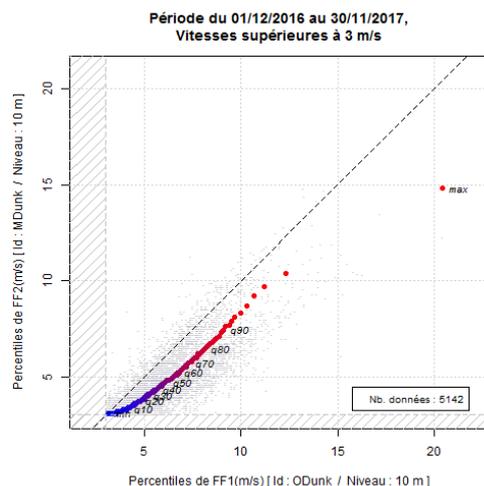
b) Comparaison station Météo-France Dunkerque / modèle AROME

La comparaison des observations à 10 m de la station du sémaphore de Dunkerque avec les données du modèle s'avère assez délicate. A cette hauteur, le relief et la rugosité du terrain ont une influence directe sur la mesure de vent. Ces caractéristiques sont moins bien intégrées par le modèle. Et de ce fait, les résultats de la comparaison se révèlent assez décevants.

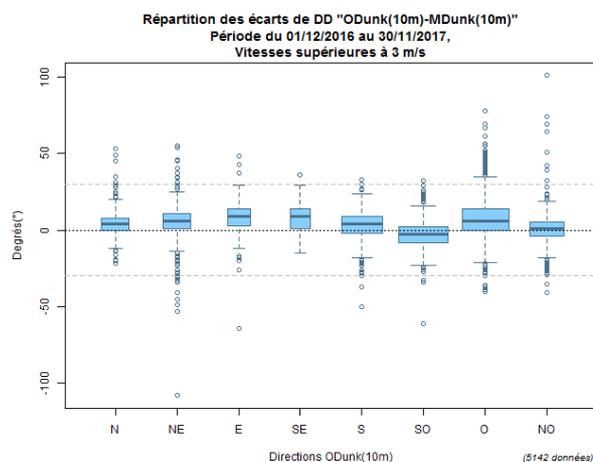
Le modèle sous-estime assez nettement la force du vent, en moyenne d'environ 1 m/s.



Le diagramme « quantile-quantile » des forces de vent confirme la dissymétrie entre les deux distributions.

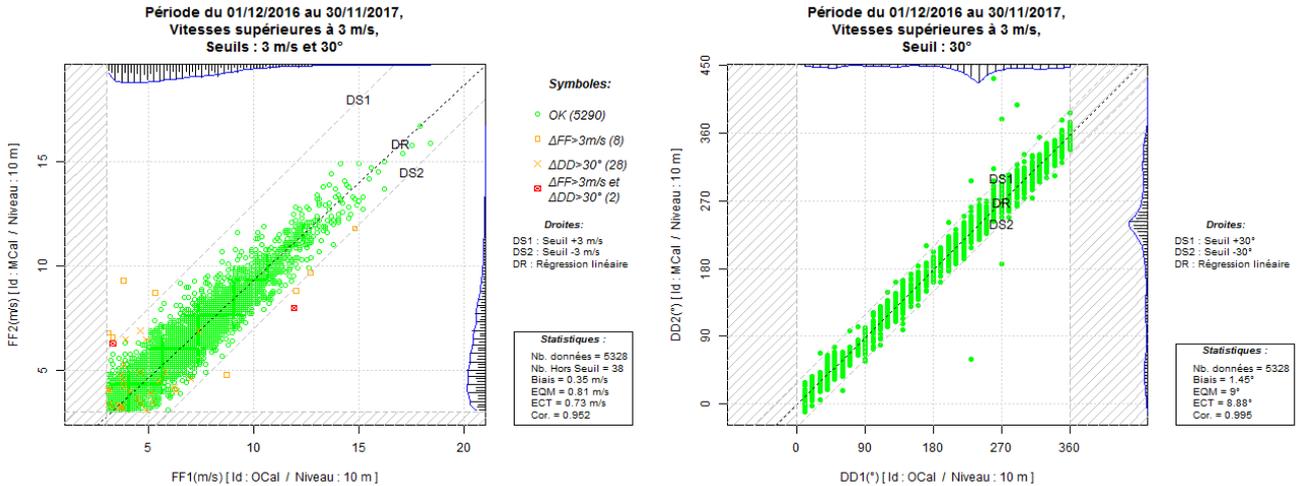


Par ailleurs, on constate que l'observation présente un biais assez constant d'environ 5°, sauf pour les directions de sud-ouest où le biais est de -5° et de nord-ouest où le biais est nul.

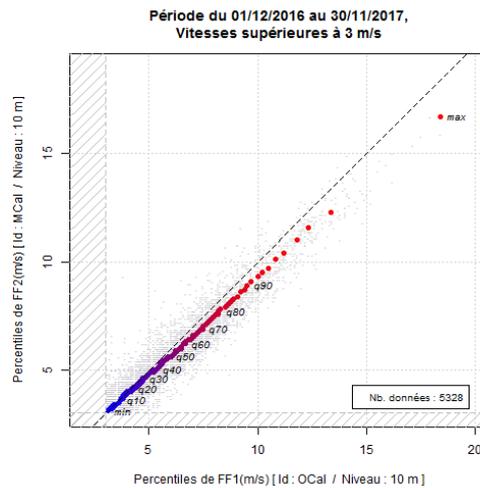


c) Comparaison station Météo-France Calais-Marck / modèle AROME

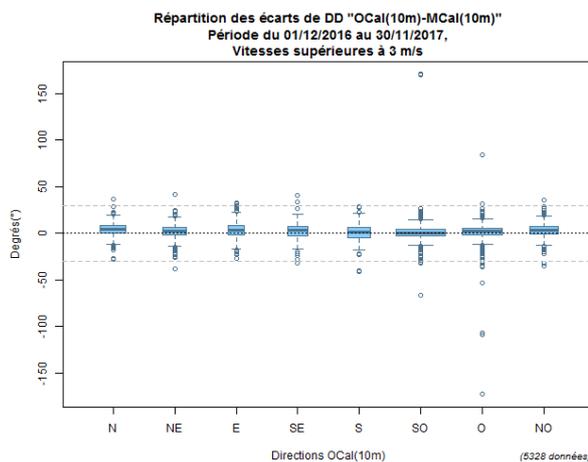
Les mesures du vent à 10 m à la station de Calais-Marck sont bien corrélées avec le modèle.



Le diagramme « quantile-quantile » des forces de vent présente une légère dissymétrie (visible à partir de q50). Elle reste néanmoins nettement moins marquée que pour Dunkerque.

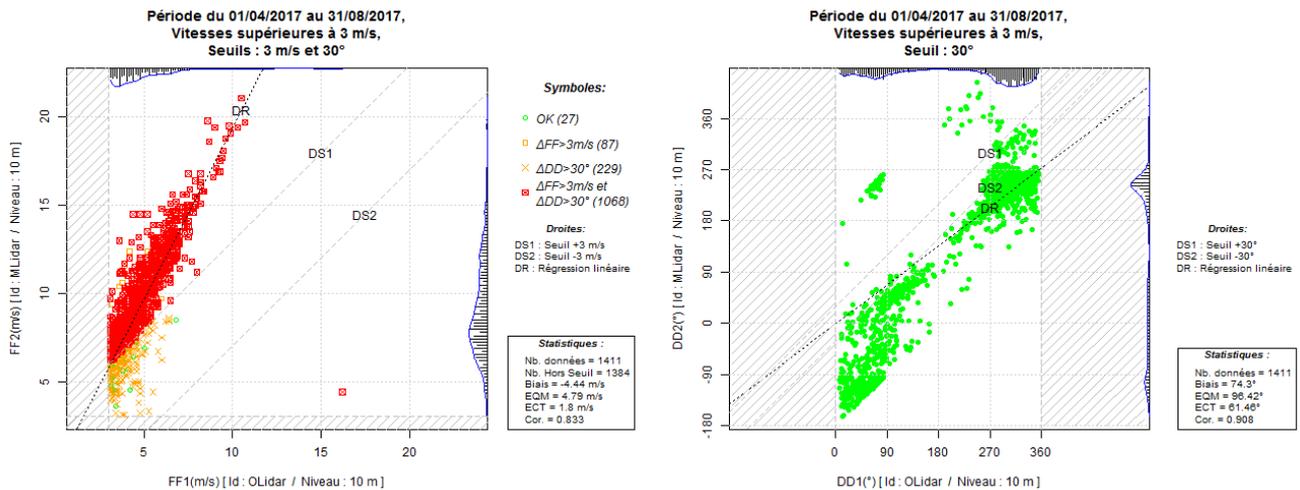


A noter que l'on constate aussi un léger biais inférieur à 5° sur la majorité des directions.

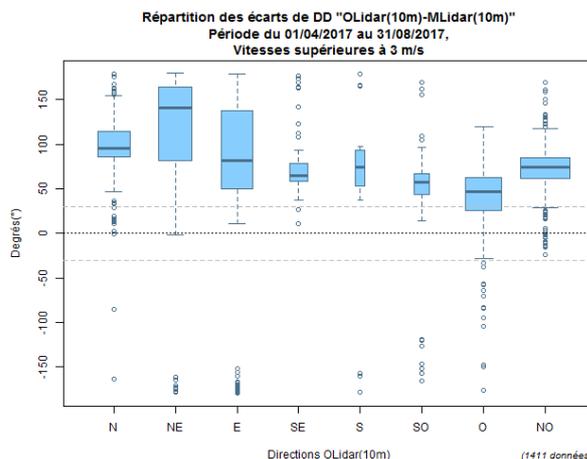
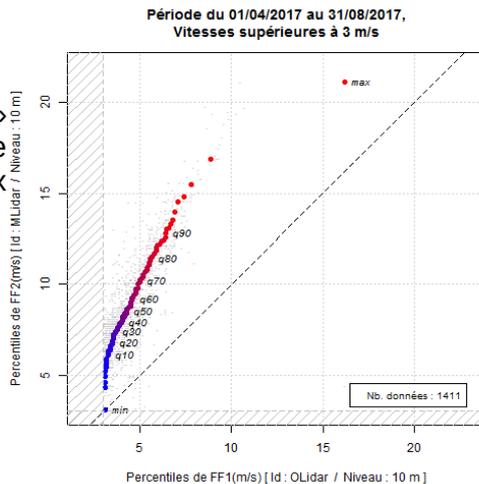


d) Comparaison mesure plateforme 12 m / modèle AROME

Les données ont été intégrées à partir du 15 mai. L'analyse de cette série n'a pu avoir lieu que tardivement. Or, il s'avère que les résultats de la comparaison avec le modèle sont très décevants. Il semblerait que l'anémomètre n'ait pas été correctement étalonné. Les vitesses présentent un biais systématique d'environ -4,5 m/s et les directions d'environ 75°.

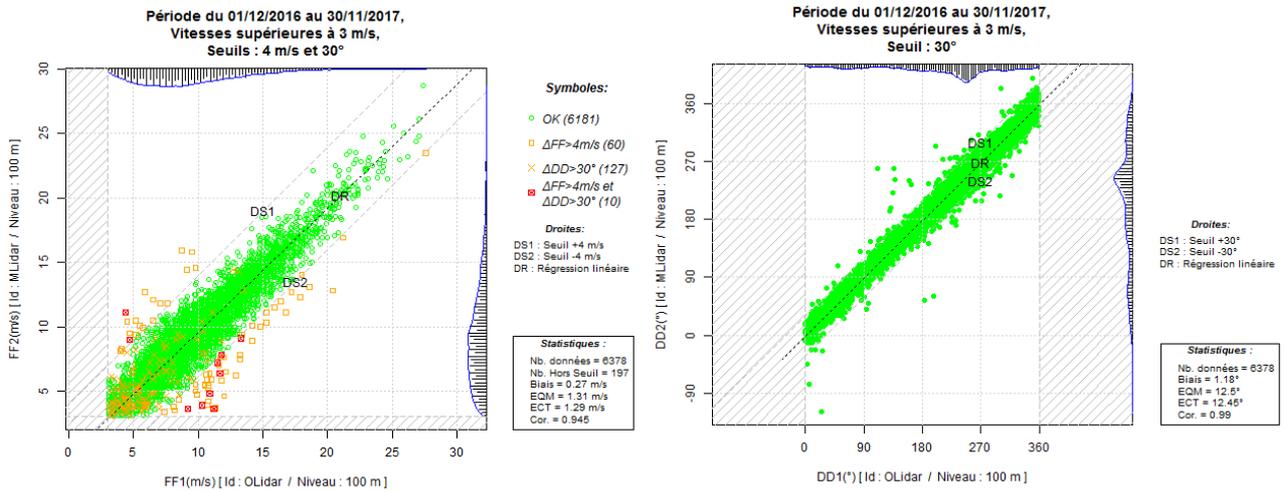


Le diagramme « quantile-quantile » des forces de vent confirme une forte dissymétrie entre les deux distributions.

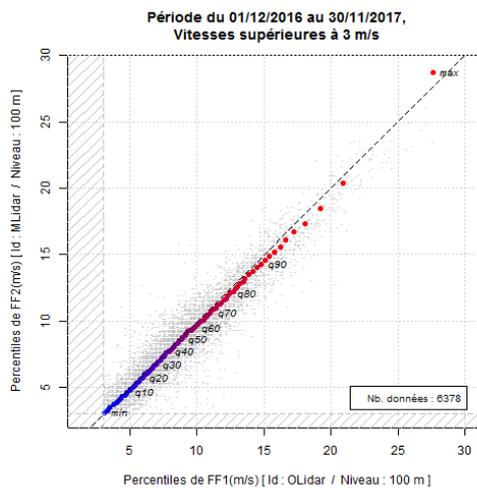


e) Comparaison mesures LiDAR / modèle AROME

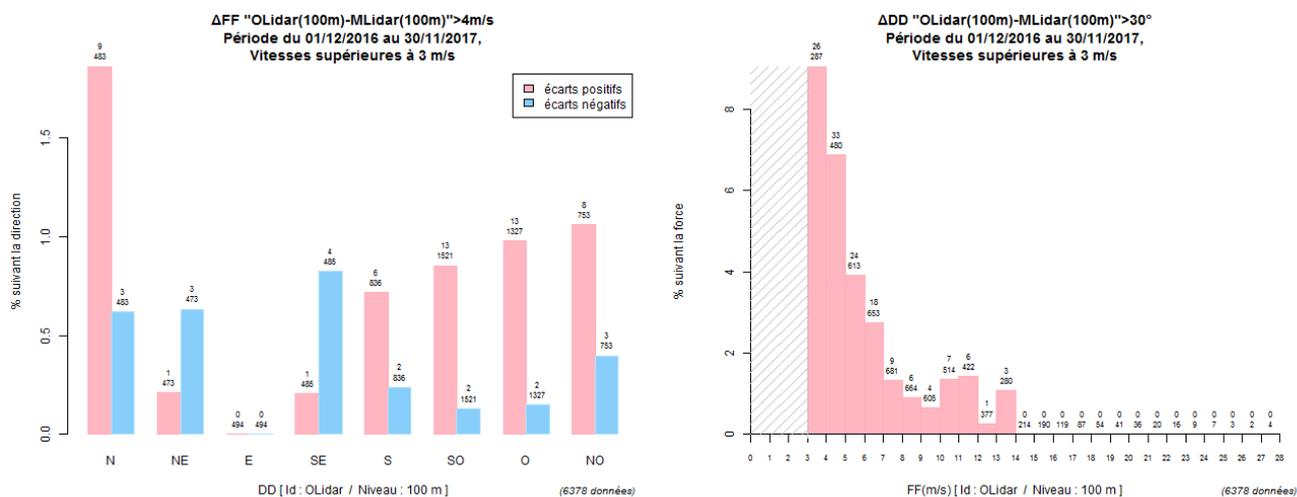
Seulement 3 % des valeurs enregistrées par le LiDAR sort des seuils fixés. L'essentiel des dépassements de seuil concerne le critère de direction pour des forces inférieures à 10 m/s.



Comme pour Gravelines, le diagramme « quantile-quantile » des forces de vent du LiDAR présente des points parfaitement alignés sur la première bissectrice.



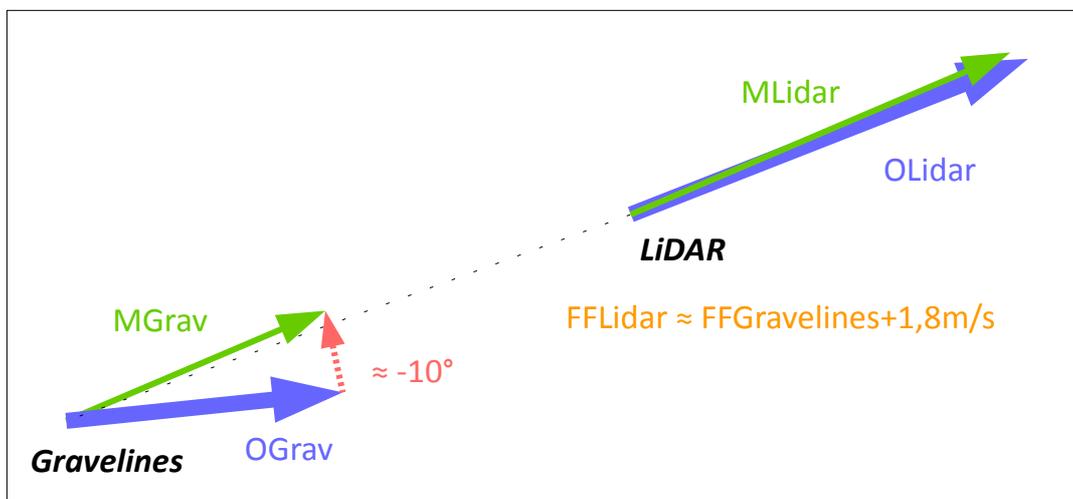
Les dépassements du seuil de vitesse concernent principalement les vents de secteur ouest dominant. Ils représentent moins de 2 % des cas suivant les directions. Pour des vitesses supérieures à 5 m/s, on enregistre des dépassements du seuil de direction dans moins de 4 % des cas.



f) Synthèse

	OGrav-Mgrav (Resp. 80m et 75m) Nb. = 7285 Nb. hors seuil = 199				MLidar-MGrav (Niveaux 75m) Nb.= 7754 Nb. hors seuil = 803				OLidar-OGrav (Niveaux 80m) Nb.= 36509 Nb. hors seuil= 7224				OLidar-MLidar (Niveaux 100m) Nb.= 6378 Nb. hors seuil= 197			
	Biais	EQM	ECT	Cor	Biais	EQM	ECT	Cor	Biais	EQM	ECT	Cor	Biais	EQM	ECT	Cor
DD	8,98°	13,09°	9,53°	0,994	0,83°	13,04°	13,01°	0,989	-6,64°	16,76°	15,38°	0,984	1,18°	12,5°	12,45°	0,990
FF	0,07 m/s	1,07 m/s	1,07 m/s	0,932	1,60 m/s	2,24 m/s	1,56 m/s	0,911	1,81 m/s	2,64 m/s	1,93 m/s	0,867	0,27 m/s	1,31 m/s	1,29 m/s	0,945

La girouette du capteur de Gravelines présente un biais avéré d'un peu moins de 10° (en rouge dans le tableau). L'anémomètre de Gravelines nous fournit toutefois une information importante en terme de climatologie (en orange). A 80 m, la vitesse mesurée au LiDAR est plus forte que celle de Gravelines, d'environ 1,8 m/s. Ce biais est confirmé à 75 m par le modèle. Cette constatation rend parfaitement compte du fait que, sur mer, la rugosité est plus faible que sur terre et donc que le vent est plus fort. Les faibles biais (en vert dans le tableau) témoignent du **bon calage du modèle** en vitesse pour Gravelines, **en vitesse et en direction pour le LiDAR** et enfin des directions identiques prises par le modèle sur les deux sites.



Scénario médian

3.3.2 Statistiques du vent mesuré

➔ En préambule, afin de se faire une idée plus précise des conditions météorologiques rencontrées, une description détaillée de la climatologie des quatre saisons de l'année 2017 figure en annexe 1.

a) Vent moyen horizontal à 100 m

	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
Décembre	4337	5,1 %	15,2 %	52,3 %	19,9 %	7,2 %	0,3 %	.
	743	5,0 %	14,7 %	52,0 %	21,1 %	7,1 %	0,1 %	.
Janvier	4458	9,4 %	14,4 %	44,8 %	25,2 %	5,1 %	1,0 %	0,2 %
	744	9,3 %	14,8 %	44,1 %	25,9 %	4,7 %	1,1 %	0,1 %
Février	4031	3,0 %	7,1 %	35,6 %	38,4 %	10,3 %	4,7 %	0,8 %
	672	2,8 %	6,8 %	36,8 %	37,2 %	10,6 %	5,1 %	0,7 %
Mars	2736	5,4 %	9,7 %	44,8 %	24,0 %	12,8 %	3,3 %	.
	744	3,9 %	7,9 %	37,0 %	33,5 %	15,5 %	2,3 %	.
Avril	4314	9,9 %	16,8 %	53,8 %	19,4 %	0,1 %	.	.
	720	9,2 %	17,4 %	54,2 %	19,2 %	0,1 %	.	.
Mai	2493	3,7 %	13,2 %	52,8 %	29,5 %	0,8 %	.	.
	744	3,8 %	15,3 %	51,2 %	28,6 %	1,1 %	.	.
Juin	3700	5,9 %	10,6 %	39,8 %	27,5 %	13,0 %	2,6 %	0,3 %
	720	7,9 %	12,1 %	42,4 %	23,3 %	11,7 %	2,1 %	0,4 %
Juillet	3820	4,6 %	8,7 %	53,9 %	27,3 %	5,4 %	0,1 %	.
	744	6,2 %	10,8 %	52,2 %	26,1 %	4,8 %	.	.
Août	1854	16,4 %	19,5 %	39,3 %	17,5 %	7,2 %	0,1 %	.
	744	13,0 %	21,4 %	44,2 %	16,5 %	4,8 %	.	.
Septembre	2948	3,3 %	22,9 %	57,8 %	13,2 %	2,7 %	.	.
	720	3,8 %	20,3 %	50,7 %	16,5 %	7,5 %	1,1 %	0,1 %
Octobre	3808	2,0 %	8,6 %	35,1 %	44,0 %	8,7 %	1,5 %	.
	744	1,3 %	7,8 %	34,1 %	45,0 %	10,5 %	1,2 %	.
Novembre	3245	5,2 %	13,0 %	47,1 %	23,4 %	10,3 %	1,0 %	.
	720	5,0 %	11,5 %	41,7 %	30,6 %	10,4 %	0,8 %	.
Total annuel	41744	5,9 %	13,0 %	46,4 %	26,3 %	6,9 %	1,3 %	0,1 %
	8759	6,0 %	13,4 %	45,1 %	26,9 %	7,4 %	1,1 %	0,1 %

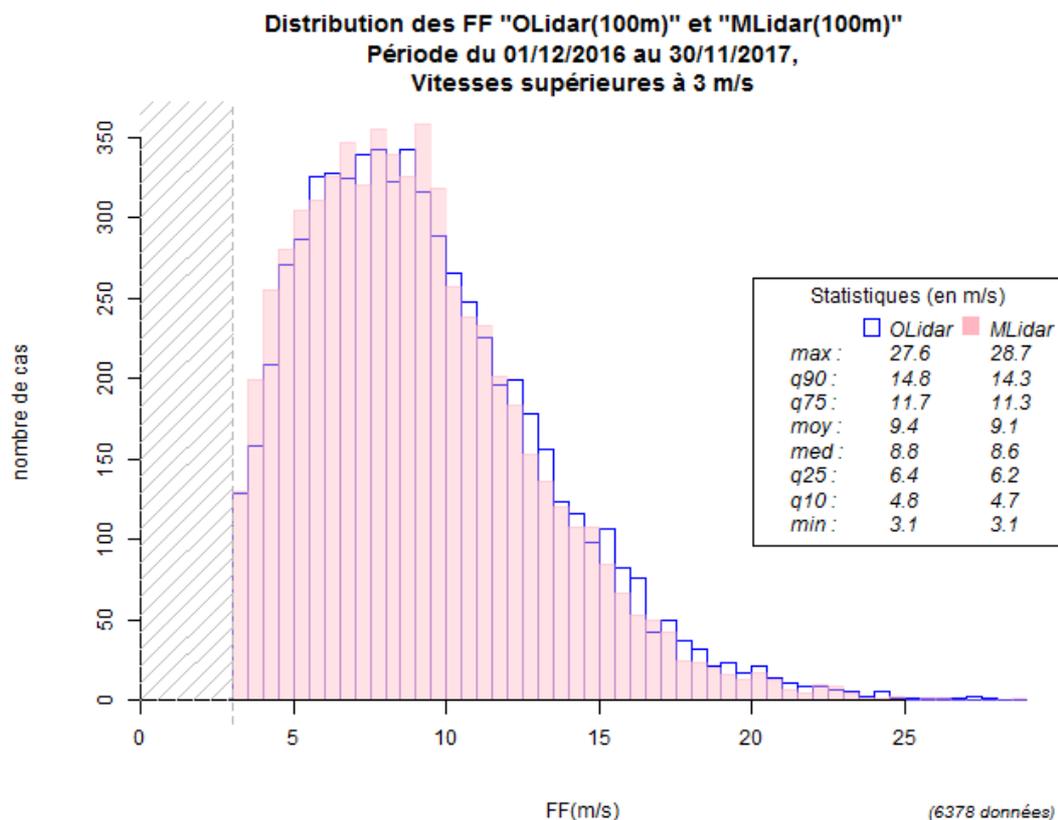
Classes de vitesses par mois. Taux « brut » (en italique) et « reconstitué » (en gras).

Le taux « brut » correspond à l'ensemble des données 10 minutes du LiDAR et le taux « reconstitué », aux données horaires de la série reconstituée.

On constate que pour une classe donnée, ils ne diffèrent généralement que de 1 à 2 %. A noter toutefois qu'en mars et septembre, en raison d'un manque de données assez important, les taux bruts et reconstitués s'écartent sensiblement pour les classes de 5 à 10 m/s et de 10 à 15 m/s.

b) Distribution

Les distributions statistiques horaires des observations et du modèle à 100 m sont très proches. Excepté sur la valeur maximale, on remarque que les données d'observation sont légèrement supérieures aux données du modèle. Les écarts restent toutefois très faibles : les quantiles apparaissant ci-dessous ne diffèrent que de 0,1 à 0,5 m/s.

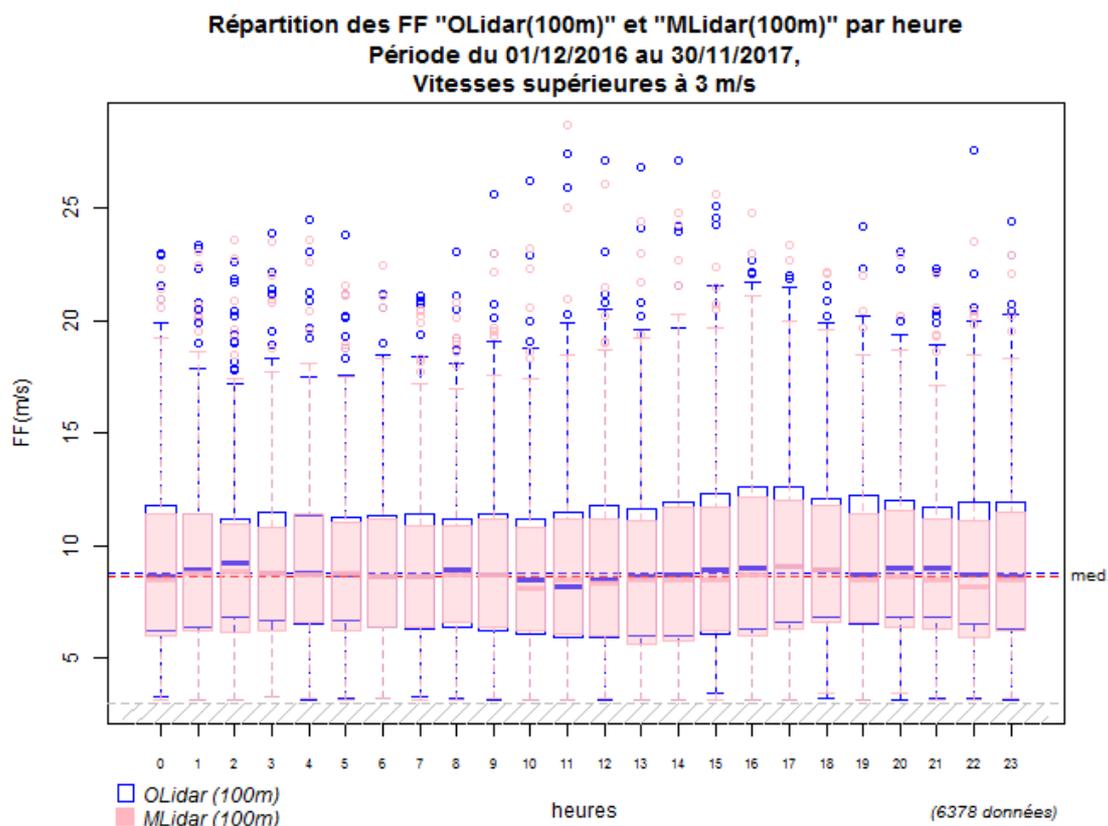


➔ Les distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100 m figurent en annexe 9.

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

On constate qu'en journée (de 10h à 12h UTC), les médianes horaires des observations et des données du modèle sont très légèrement inférieures aux médianes de la période totale (d'environ 0,5 m/s).

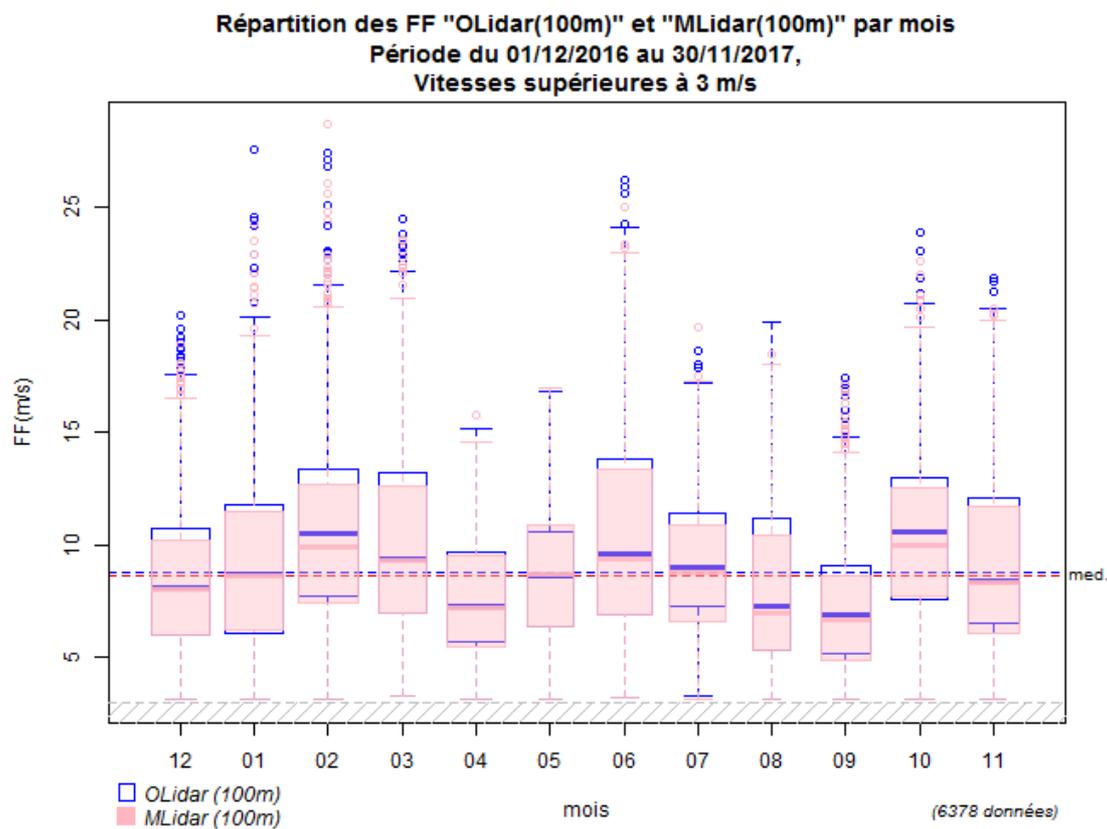
Dans l'ensemble, les boîtes à moustaches des observations sont légèrement plus hautes que celles du modèle, ce qui témoigne d'une plus grande dispersion.



→ Les répartitions horaires, par mois, des forces de vent du LiDAR à 100 m figurent en annexe 10.

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

On observe quelques disparités sur les répartitions mensuelles qui s'expliquent par la climatologie. Au regard de la période, les mois de février, juin et octobre ont été des mois plutôt venteux tandis que les mois d'avril et septembre ont été des mois assez calmes.



e) Rose de vent (données horaires)

Pour une meilleure lisibilité, nous faisons le choix de représenter les roses des vents à 100 m en seulement 4 classes de vents.

A 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 présentent de légères différences, notamment un secteur nord-est un peu plus marqué pour le modèle.

Elles restent toutefois très semblables et sans grande surprise, le vent de secteur sud-ouest prédomine, à hauteur de 20 %.

OLidar(100m) Période du 01/12/2016 00h au 30/11/2017 23h

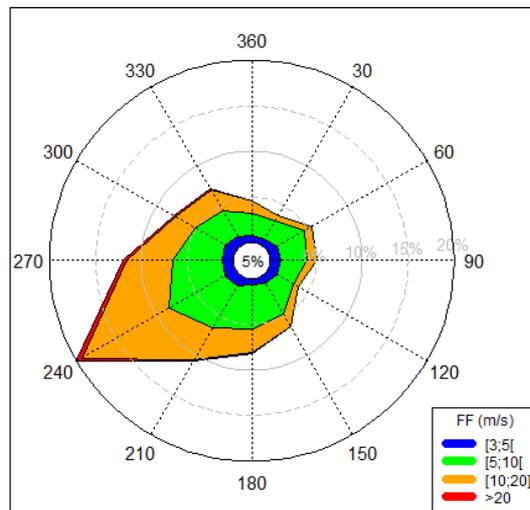


Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 6955

	[3;5[	[5;10[	[10;20[	>20	total
30	0.7	2.4	0.7	.	3.7
60	1.2	3.4	1.0	.	5.5
90	1.1	2.9	1.0	.	5.1
120	1.1	2.1	0.6	.	3.8
150	0.9	3.9	1.6	.	6.4
180	0.6	4.9	2.6	0.0	8.1
210	1.2	5.3	4.1	0.0	10.6
240	1.4	7.1	10.9	0.7	20.1
270	1.2	5.3	5.1	0.3	11.9
300	1.3	3.8	2.5	0.1	7.7
330	1.0	3.4	2.5	0.1	7.1
360	0.8	2.4	1.3	.	4.5
Total	12.4	47.0	33.8	1.4	94.6
[0; 3[					5.4

MLidar(100m) Période du 01/12/2016 00h au 30/11/2017 23h

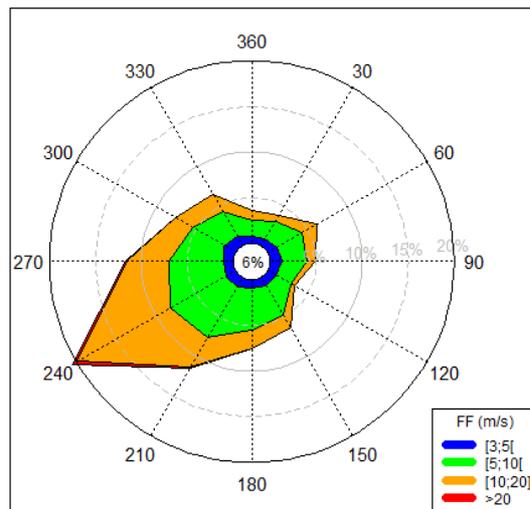


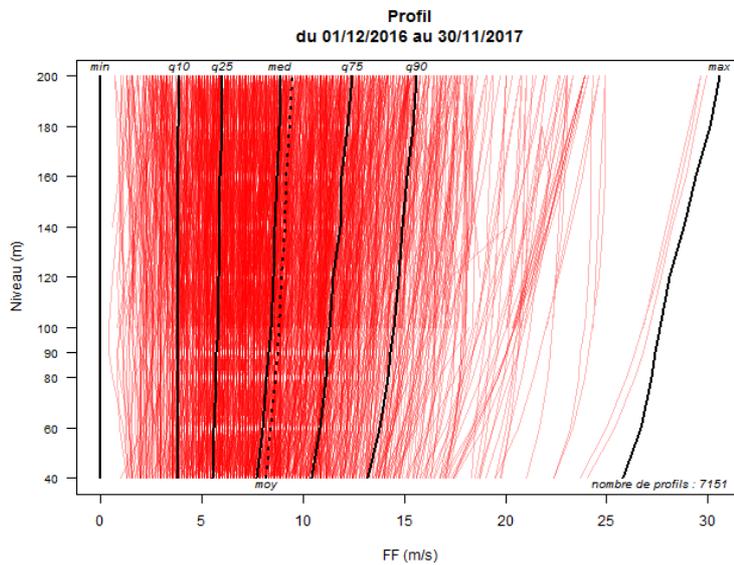
Tableau de répartition (en %)

Nombre total de cas : 8750

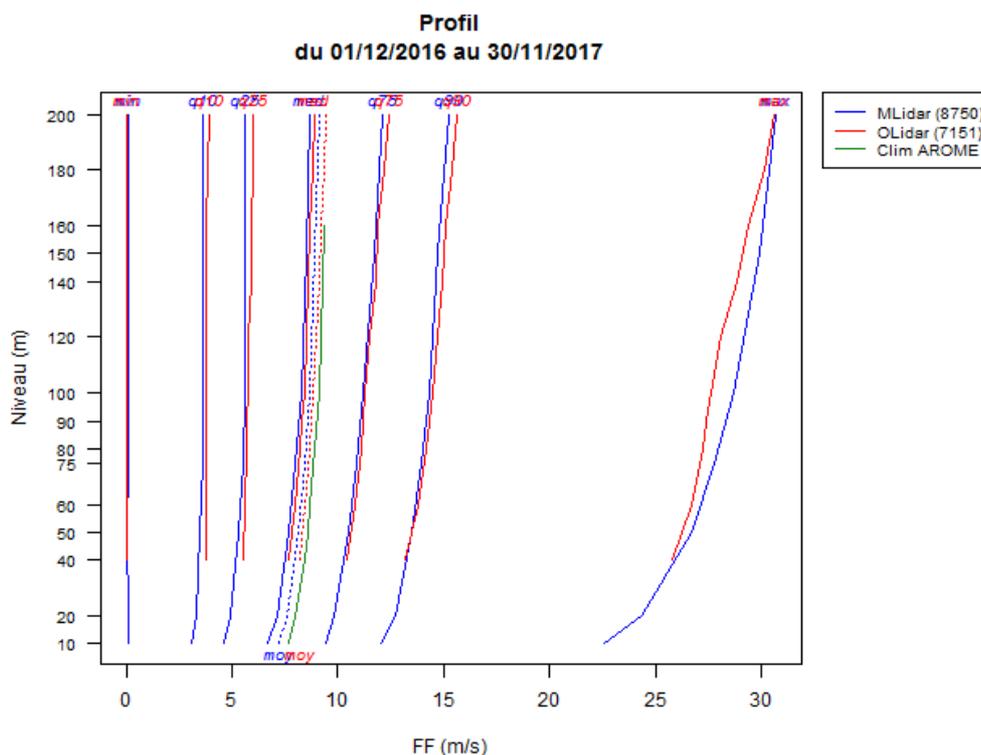
	[3;5[	[5;10[	[10;20[	>20	total
30	0.9	2.3	0.8	.	3.9
60	1.1	3.2	1.9	.	6.2
90	1.3	2.6	1.0	.	5.0
120	1.0	1.9	0.4	.	3.3
150	1.1	3.8	1.5	.	6.4
180	0.9	4.6	2.1	.	7.6
210	1.3	6.3	3.8	0.1	11.4
240	1.3	6.9	11.6	0.7	20.5
270	1.1	5.9	4.7	0.2	11.8
300	1.5	3.9	2.3	0.0	7.6
330	1.2	3.0	2.3	0.1	6.6
360	0.8	1.7	1.0	0.0	3.6
Total	13.5	46.0	33.3	1.0	93.8
[0; 3[					6.2

- Un 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 8.
- Les roses des vents mensuelles élaborées à partir de toutes les données brutes 10 minutes figurent en annexe 11.

f) Profil vertical de vent (données horaires)

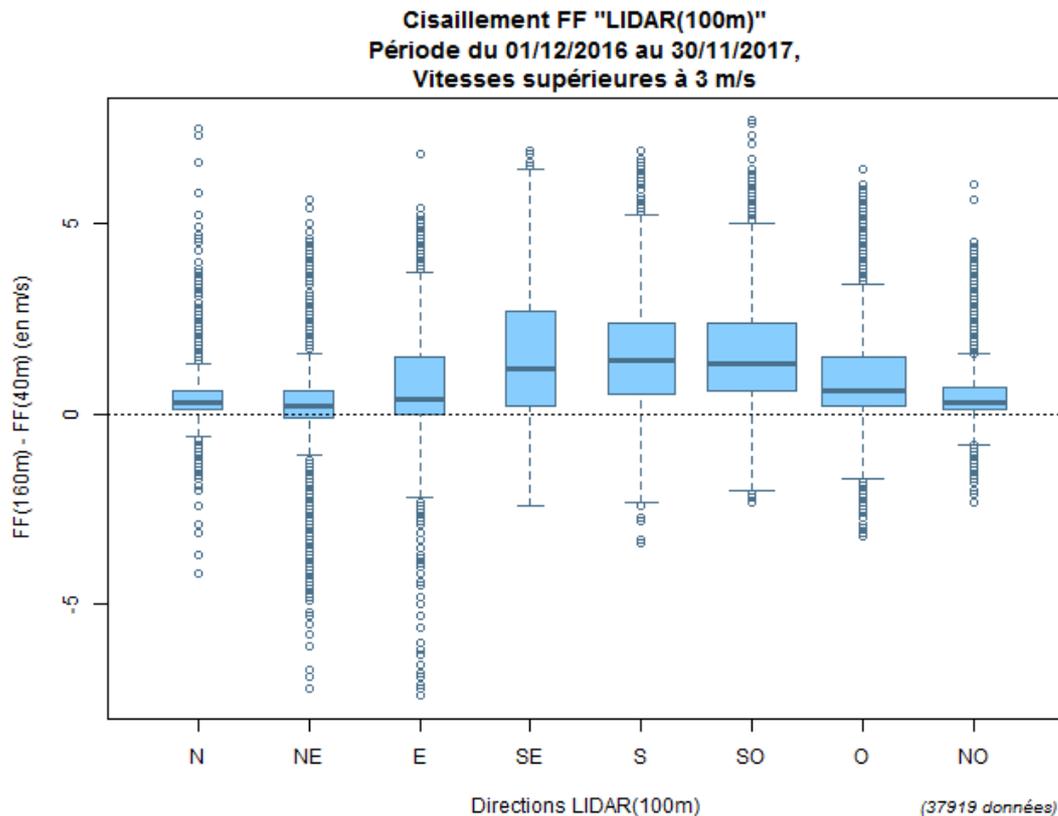


Comme pour les roses des vents, nous avons ici fait le choix de considérer toutes les données horaires du LiDAR. Les profils horaires observés sur la couche allant de 40 m à 200 m sont parfaitement cohérents avec les profils modèle (quantiles très proches). Par ailleurs, on constate que sur les douze mois de mesures, les vitesses du profil moyen observé (profil rouge en pointillés) sont légèrement inférieures à celles du profil du vent moyen issu de la climatologie AROME sur 15 ans (profil en vert).



g) Cisaillement du vent (données 10 minutes)

Entre les niveaux 40 m et 160 m, on constate un cisaillement de vent assez net d'environ 2 m/s pour les directions de sud à sud-ouest. A l'emplacement du LiDAR, cette observation correspond à des situations de vent « de terre ». En passant au-dessus de la ville de Dunkerque, le vent rencontre des obstacles qui créent du cisaillement au niveau des couches supérieures.



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 FF_1 est la force du vent en m/s au niveau 1 (niveau bas), FF_2 la force du vent en m/s au niveau 2 (niveau haut), Z_1 l'altitude en m au niveau 1 (niveau bas), Z_2 l'altitude en m au niveau 2 (niveau haut).

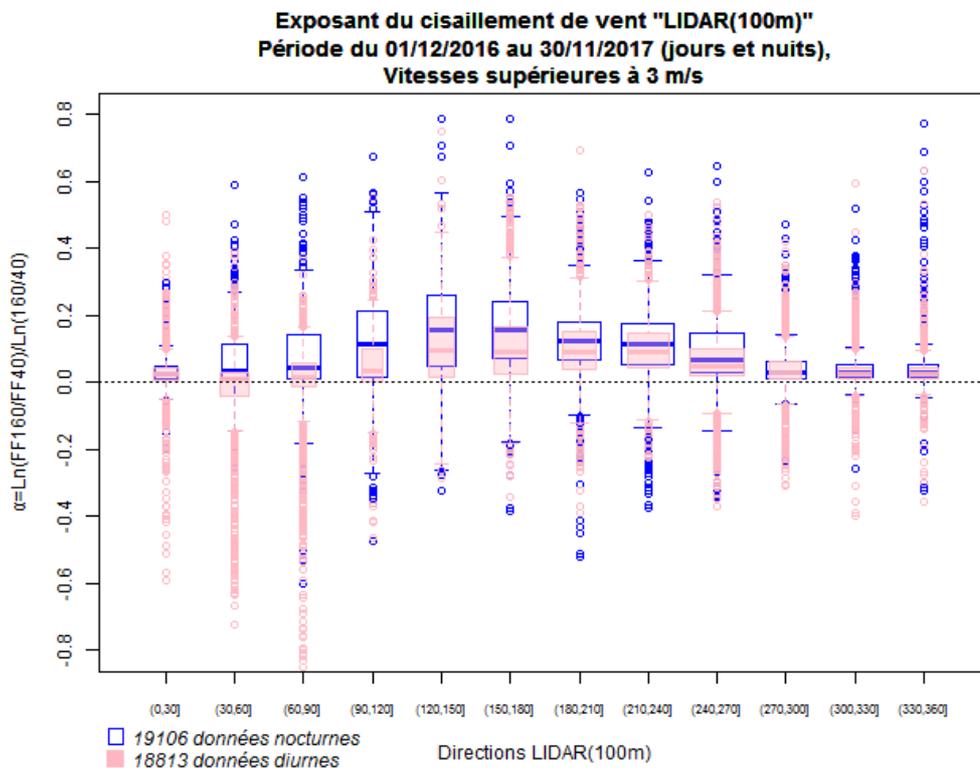
Le coefficient α de cisaillement vertical de vent **dépend de la rugosité du sol**. C'est un nombre sans dimension qui varie selon la nature du terrain. Dans la littérature, des valeurs standards du coefficient α sont proposées (voir tableau sur la page suivante) mais sans que soit précisée la couche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

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 cycliques sur les pales des éoliennes sont moins fortes.

Nous calculons le coefficient α de cisaillement par secteur de 30° pour la couche [40 m - 100 m] en faisant une distinction entre le jour (7h à 18h UTC) et la nuit (19h à 6h UTC). Les valeurs les plus faibles de l'indicateur α (inférieures à 0,05) correspondent aux situations où le vent vient de la mer. On constate par ailleurs, qu'en journée, quelle que soit la direction, α est sensiblement plus faible que durant la nuit. **Ces phénomènes ont déjà été mis en évidence sur les données issues du modèle, dans le rapport « Analyse des risques de turbulence atmosphérique (Lot 3) ».**



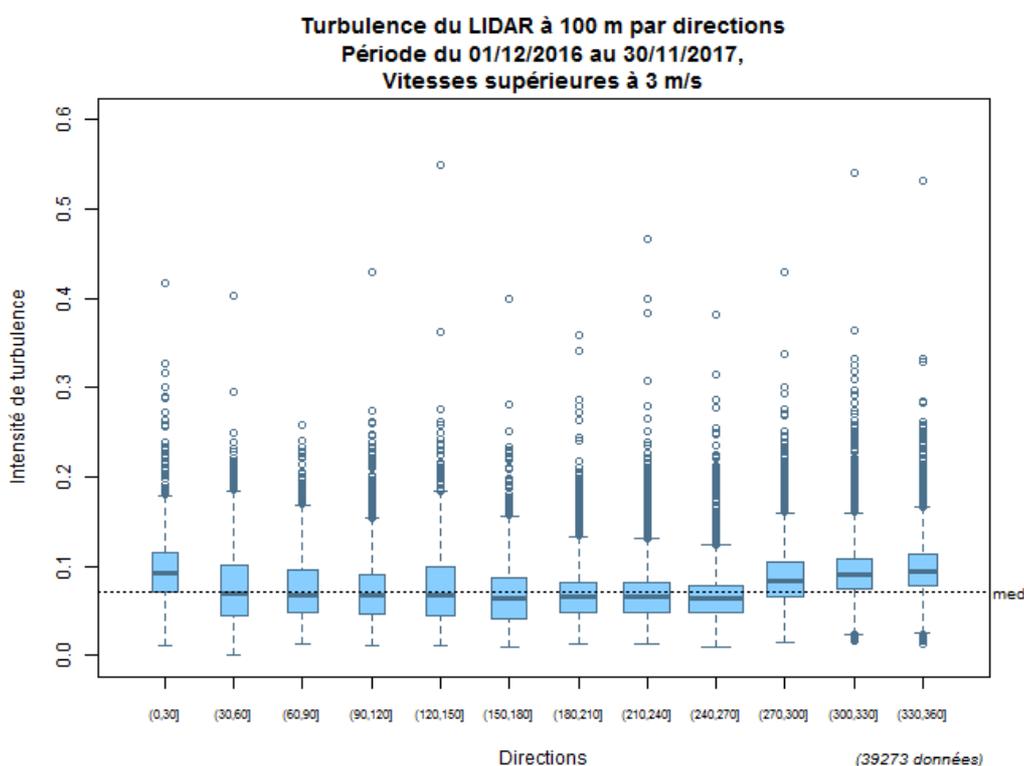
→ Les figures de l'exposant du cisaillement sur les périodes mensuelles se trouvent en annexe 12.

h) 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 :

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

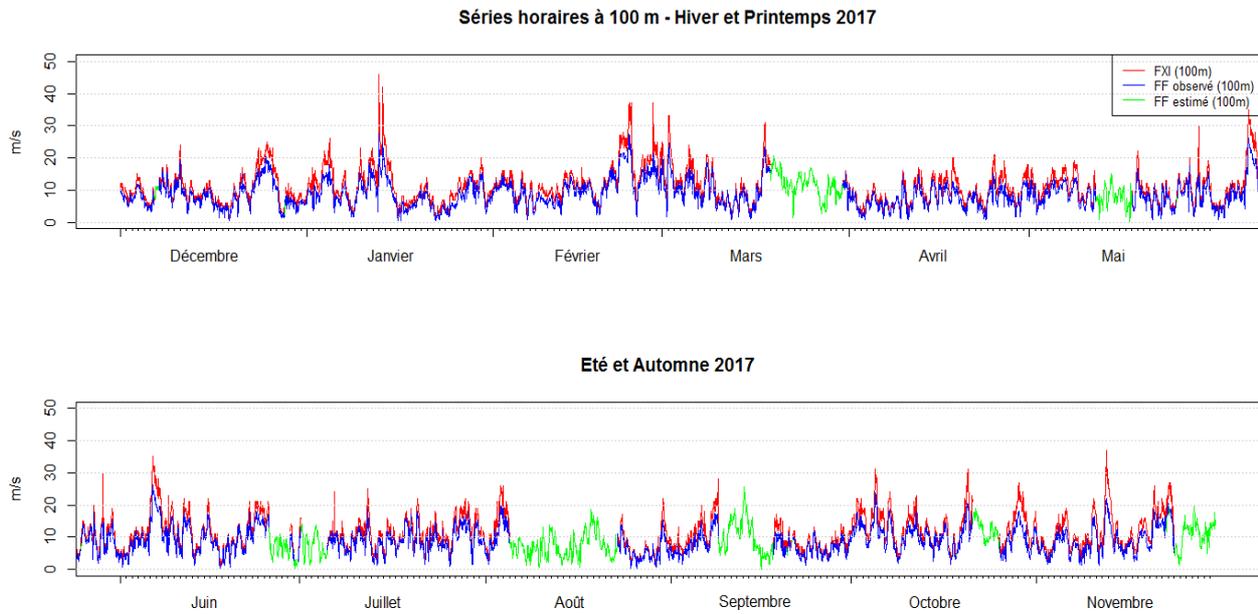
On constate qu'à 100 m le vent de secteur nord-ouest à nord-nord-est présente une plus forte turbulence. Cette observation est globalement vérifiée pour chaque mois de la campagne de mesures.



➔ Les boîtes à moustaches mensuelles suivant les directions, de l'intensité de turbulence du vent du LiDAR à 100 m figurent en annexe 13.

i) Séries horaires FF et FXI à 100 m

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



Les graphiques ci-dessus permettent de visualiser rapidement la série horaire de vent moyen et de vent max pour la période 01/12/2016-30/11/2017 (« année météorologique »).

Le « pic » de janvier correspond au passage de la tempête 'Egon', le 12 janvier à 23h. Le LiDAR enregistre alors la plus forte rafale de vent : 46 m/s. Le vent moyen observé est alors de 24,4 m/s. Dans ces conditions, un écart de plus de 20 m/s entre la vitesse du vent moyen et la vitesse du vent maximal instantané à 100 m est fort possible. Nous ne pouvons toutefois pas l'affirmer ici avec certitude car nous rappelons que la série FXI horaire ne fait pas l'objet d'une comparaison avec le modèle.

Météo-France fournit donc au travers du fichier « SerieLidarH100.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 24/11/2016-23/11/2017.

Ces paramètres sont accompagnés des codes qualité QFF, QDD et QFXI (cf page 20, § 3.1.3.c).

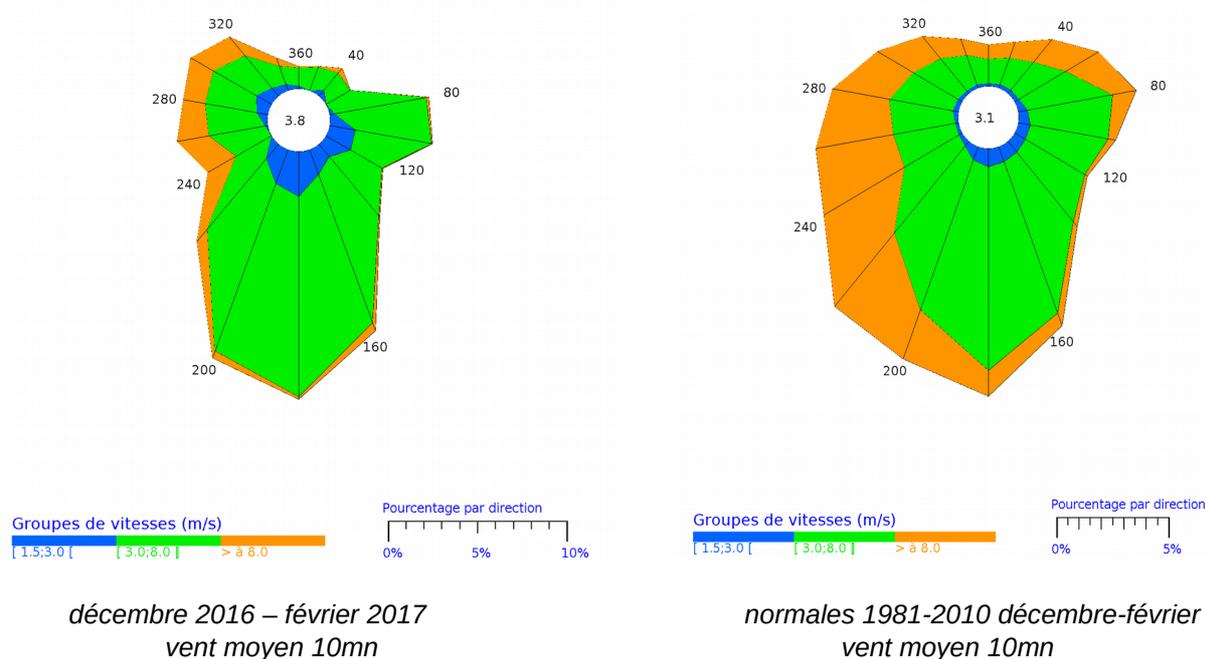
ANNEXES

ANNEXE 1 : Climatologie de l'année 2017

Nous prendrons comme station de référence le sémaphore de Dunkerque, station disposant d'un historique ancien, et donc de données de normales (calculées sur la période 1981-2010), chose dont nous ne disposons pas pour les points de mesure en mer comme la bouée Sandettié.

1) Le vent :

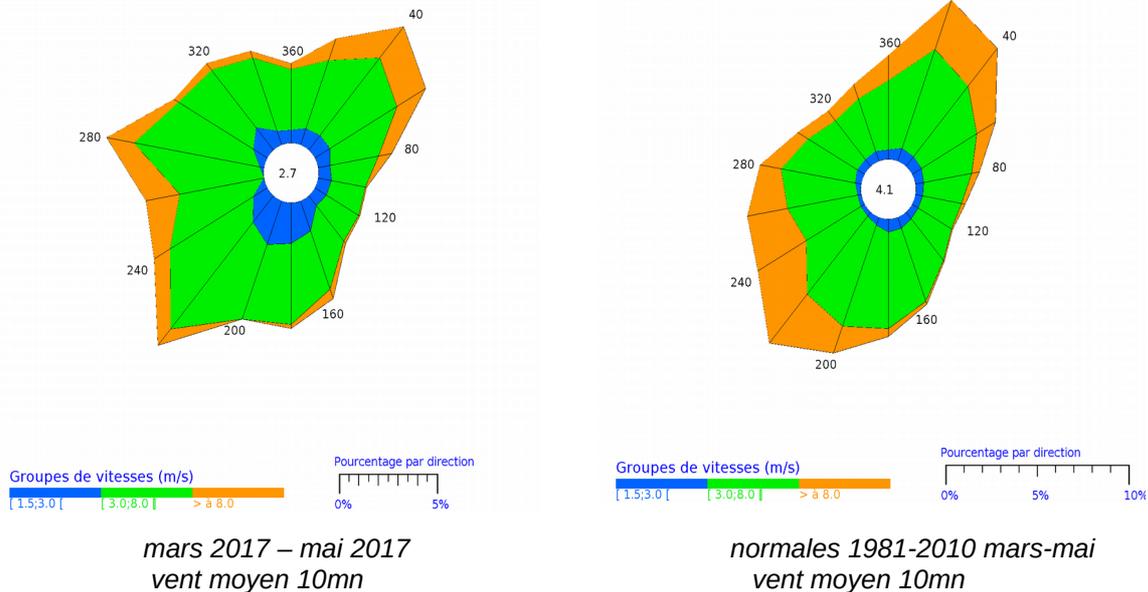
a) l'hiver météorologique (décembre-février) :



Au niveau de la force, on voit tout de suite que l'hiver dernier a présenté peu de vent intense : 11 % de vent > 8m/s (que nous qualifieront ici de forts) pour une normale de 28,5 %
Les vents que nous qualifierons ici de moyen (entre 3 et 8 m/s) ont été majoritaires à 70,8 %, légèrement plus que de normal (62,2%)
Et les vents que nous qualifierons ici de faible (entre 1,5 et 3 m/s) plus de 2 fois plus nombreux avec 14,4 % (par rapport à 6,2%)

Au niveau de la direction, le secteur Sud (140°-220°) reste bien prépondérant : 49,4 % pour une normale de 42,9 %; mais les vents forts (>8 m/s) de ce secteur sont largement déficitaires (1,9 % pour une normale de 8,5%)
Relativement peu de vents forts également dans l'W (240°-300°) avec 6,4 % pour une normale de 12,1%.

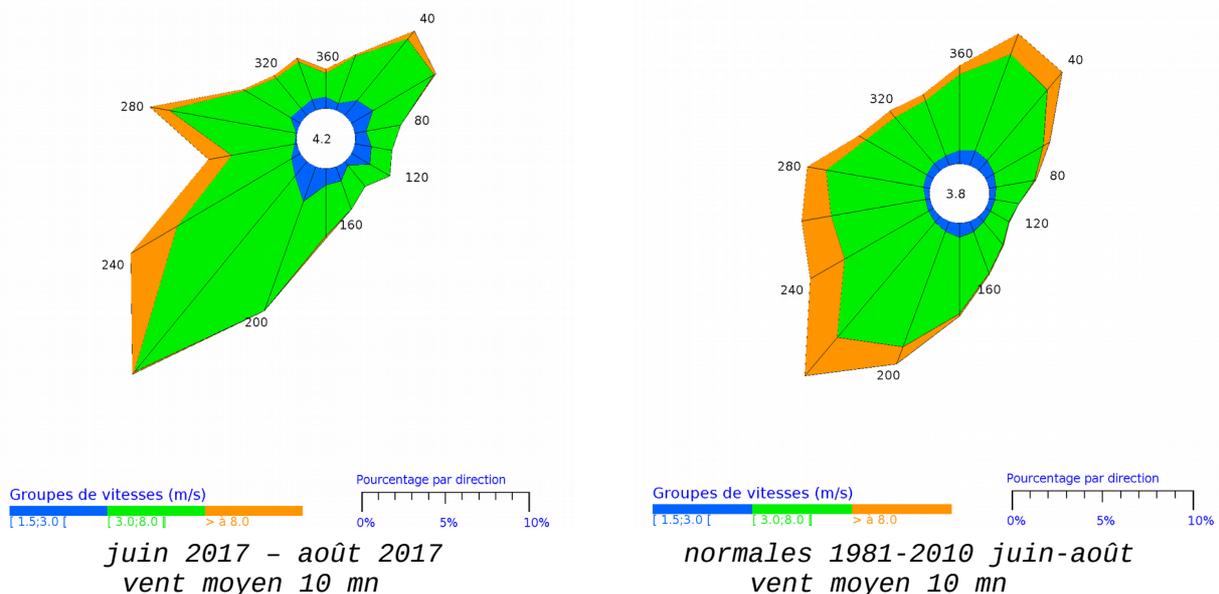
b) le printemps météorologique (mars-mai) :



Le printemps présente également peu de vents forts : 12,8 % (normale de 22,1%). Cela est compensé par des vents faibles 2 fois plus nombreux : 16,8 % (normale de 8,2%), la part des vents moyens étant conforme avec 67,7 % (normale de 65,6%).

Les secteurs SW (180°-260°) et NE sont dominants avec respectivement 33,8 % et 26,8 %, même si très légèrement moins que d'habitude (normales respectives de 34,8 % et 30,3%) ; mais le NW (280°-340°) a soufflé plus souvent avec 23,7 % (normale 17,5%).

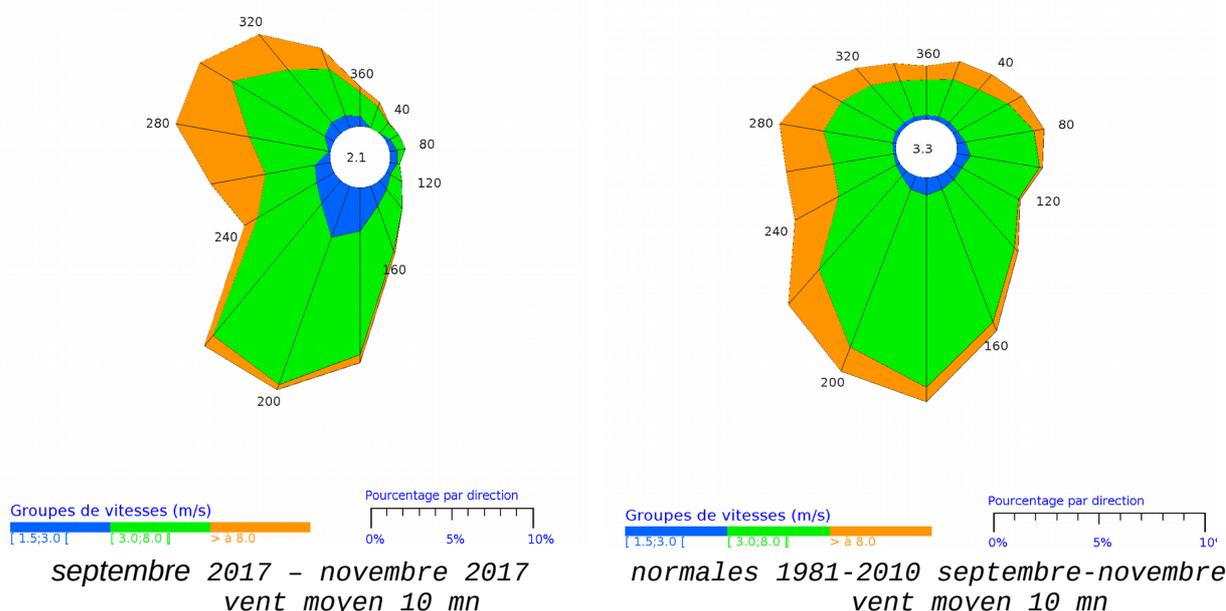
c) l'été météorologique (juin-août) :



De la même manière, l'été a connu moins de vents forts qu'à l'accoutumée avec 7,9 % (pour une normale de 13,8%), plus de vents faibles avec 14,8 % (pour une normale de 9,4%), et une proportion de vents moyens normale (73%)

Le secteur SW est largement prédominant avec 55,3 %, et même plus qu'à l'habitude (normale de 47,2%) ; le secteur NE a quant à lui été un peu moins présent avec 20,9 % (normale de 27,2%).

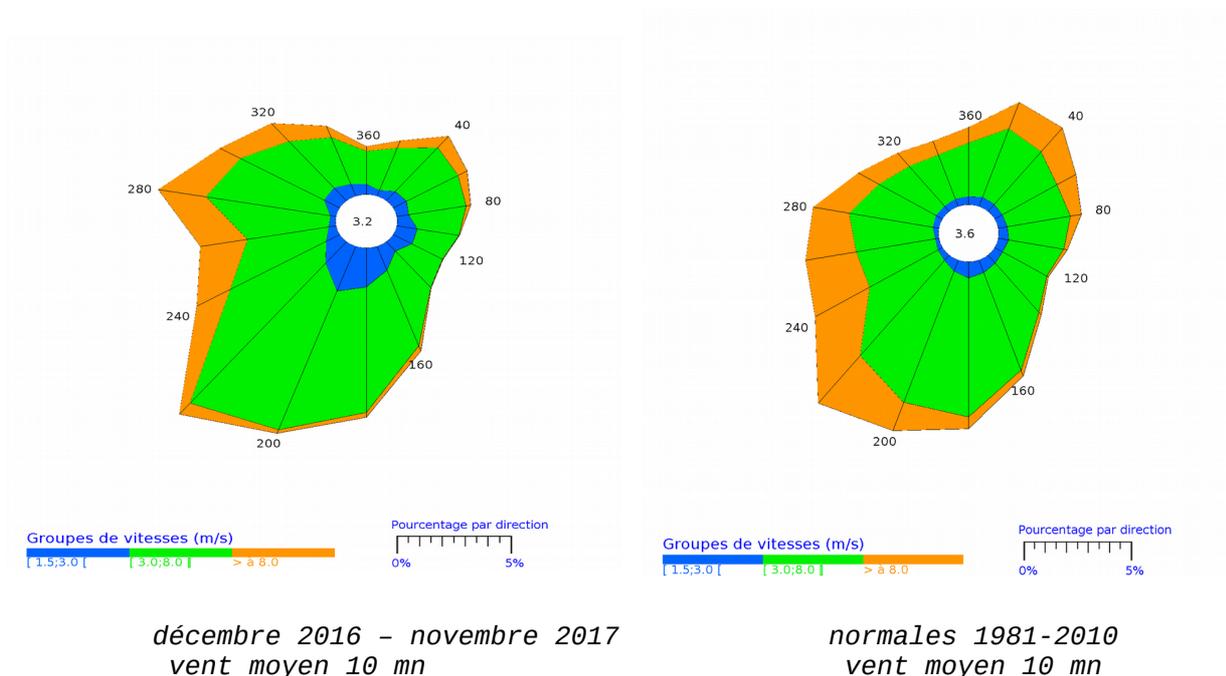
d) l'automne météorologique (septembre-novembre) :



Concernant l'automne, on retrouve une proportion de vents forts quasi-normale avec 18 % (normale de 19,4%), beaucoup plus de vents faibles avec 16,6 % (normale de 6,9%), et une part de vents moyens plus faible avec 63,3 % (normale de 70,4%).

Le secteur SW est de nouveau majoritaire avec 50,6 %, et ce au-delà de la normale (41,3%) ; le secteur NE est beaucoup moins présent avec 6,8 % (pour une normale de 17,3%) au contraire du NW qui est lui beaucoup plus présent avec 32,2 % (pour une normale de 17,4%), notamment pour les vents forts avec 11,1 % (pour une normale de 5,7%)

e) synthèse « annuelle » (décembre 2016 – novembre 2017) :



Au niveau intensité, l'« année » a globalement été moins ventée avec 12,4 % de vents forts - soit supérieur à 8 m/S - pour une normale de 20,9 %, et 15,7 % de vents faibles – soit entre 1,5 et 3 m/S – pour une normale de 7,7 %.

Au niveau direction, le secteur SW est prépondérant avec 43,3 % des observations, ce qui est légèrement supérieur à la normale de 39,7%; le secteur NE est par contre moins important qu'à l'habitude avec 16,6 % contre 23 % pour la normale ; le NW est quant à lui plus représenté avec 22,8 % des cas contre une normale de 17,5 %.

f) Les « tempêtes » :

Pour sélectionner ces épisodes, nous regardons les rafales maximales quotidiennes, et retenons celles supérieures à 95 km/h :

- 12/01 : 107 km/h dans le 320 (tempête Egon)
- 13/01 : 97 km/h dans le 320
- 23/02 : 108 km/h dans le 260 (tempête Thomas)
- 02/03 : 101 km/h dans le 280
- 06/06 : 98 km/h dans le 240
- 06/07 : 99 km/h dans le 180

Cela est globalement conforme aux statistiques pour l'hiver et le début de printemps, périodes auxquelles des dépressions parfois très creuses circulent en anche puis Mer du Nord ; pour l'été, à noter donc 2 épisodes assez marqués pour la saison ; rien à signaler pour l'automne ce qui est plutôt conforme à la normale (même si certaines années des tempêtes peuvent se produire dès la fin octobre).

3) autres paramètres :

a) la visibilité :

Les sémaphoristes ont observé du brouillard 7 jours en décembre, 6 jours en janvier, 4 en mars, 4 en avril et 2 en juillet.

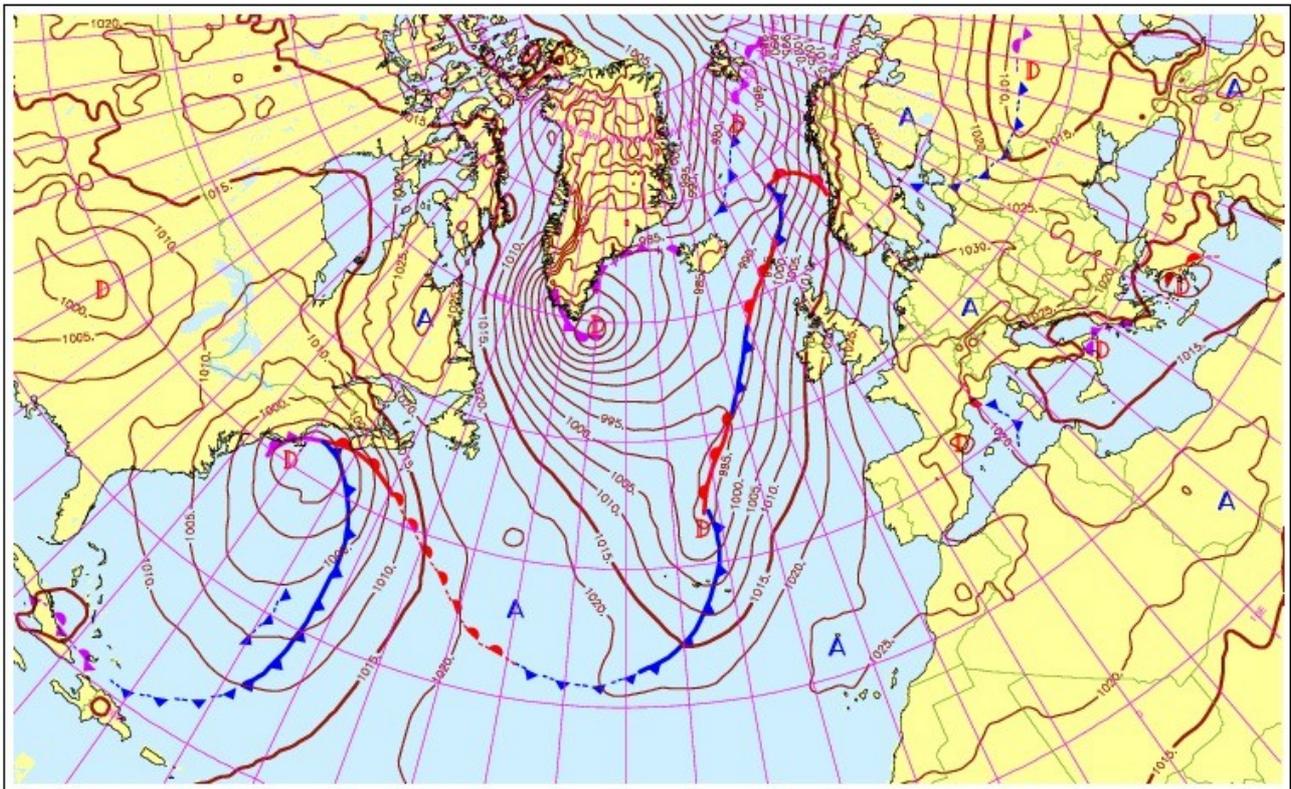
A noter qu'en mer, ces phénomènes de basses couches peuvent être plus tenace en raison d'une température de mer froide en hiver et en début de printemps. L'été, ces observations sont plus rares et plutôt liées aux phénomènes de brise de mer.

b) la pluviométrie :

L'année a été déficitaire en quantité de précipitation : tout a débuté avec un hiver (déc 2016-fév 2017) très sec avec un déficit de 35 % par rapport à la normale ; le printemps l'a été ensuite encore plus avec 5 % en moins par rapport aux précipitations attendues ; s'est enchaîné un été toujours légèrement déficitaire de 10 %; et pour finir un automne conforme à la normale.

ANNEXE 2 : Retour sur la situation des 24 et 25 janvier 2017

Une zone de hautes pressions s'étend du proche Atlantique à l'Allemagne correspondant à une situation hivernale de blocage anticyclonique froid (cf carte), celui-ci générant en mer du Nord un vent synoptique faible et une mer belle à peu agitée.



PREISO du MERCREDI 25/01/2017
Réseau : 00 UTC Echéance : 00 H

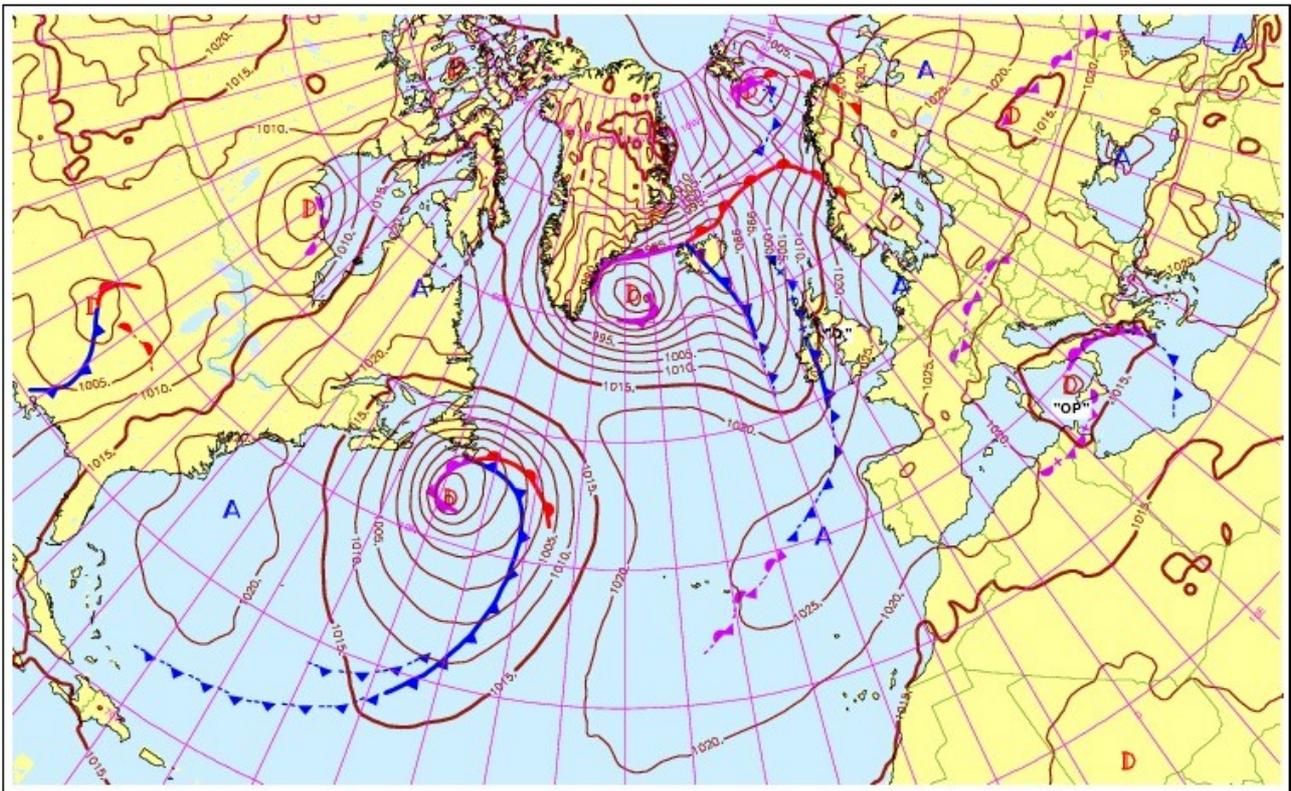
POUR MERCREDI 25/01/2017
à 00 UTC

En regardant plus précisément les enregistrements à la bouée Sandettie :

- en journée du 24/01/17, le vent est d'ouest 3 Beaufort, faiblissant à 2B en fin d'après-midi, la température est de l'ordre de 5°C, avec une humidité variant entre 80 et 89 % et une visibilité de l'ordre de 2 Milles Nautiques, et la pression est comprise entre 1028 et 1029 Hpa,
- en première partie de nuit, soit le 24/01/17 de 17h à 23 h UTC, la pression s'élève entre 1029 et 1030 Hpa, et le vent tourne Sud à Sud-Est avec une intensité variant entre 2 à 3B ; la température baisse de 5,2 à 1,8°C, ceci engendrant une croissance du taux d'humidité de 89 à 99 % et faisant descendre la visibilité en dessous des 2 MN,
- en seconde partie de nuit, soit le 25/01/17 de 0h à 7h UTC, la pression reste stable ou en légère hausse et le vent se maintient S à SE 2 à 3B ; la température continue de descendre et devient négative à partir de 3h UTC, et en parallèle, la visibilité continue de chuter jusque 50 m,
- en journée du 25/01/17, la pression après s'être maintenue autour de 1030 Hpa commence à redescendre, le vent reste orienté S à SE avec une force de 3B, et la température légèrement négative entre 0 et -1°C dans un air toujours saturé ; la visibilité stagne autour de 50 m le matin, puis remonte jusque 1MN durant l'après-midi.

ANNEXE 3 : Retour sur la situation des 3 et 4 avril 2017

Une zone de hautes pressions s'étend des Açores vers le sud de la Scandinavie (cf carte), celle-ci générant des vents variables faible en mer du nord, avec effets de brise possible vers les côtes.



PREISO du LUNDI 03/04/2017
Réseau : 12 UTC Echéance : 00 H

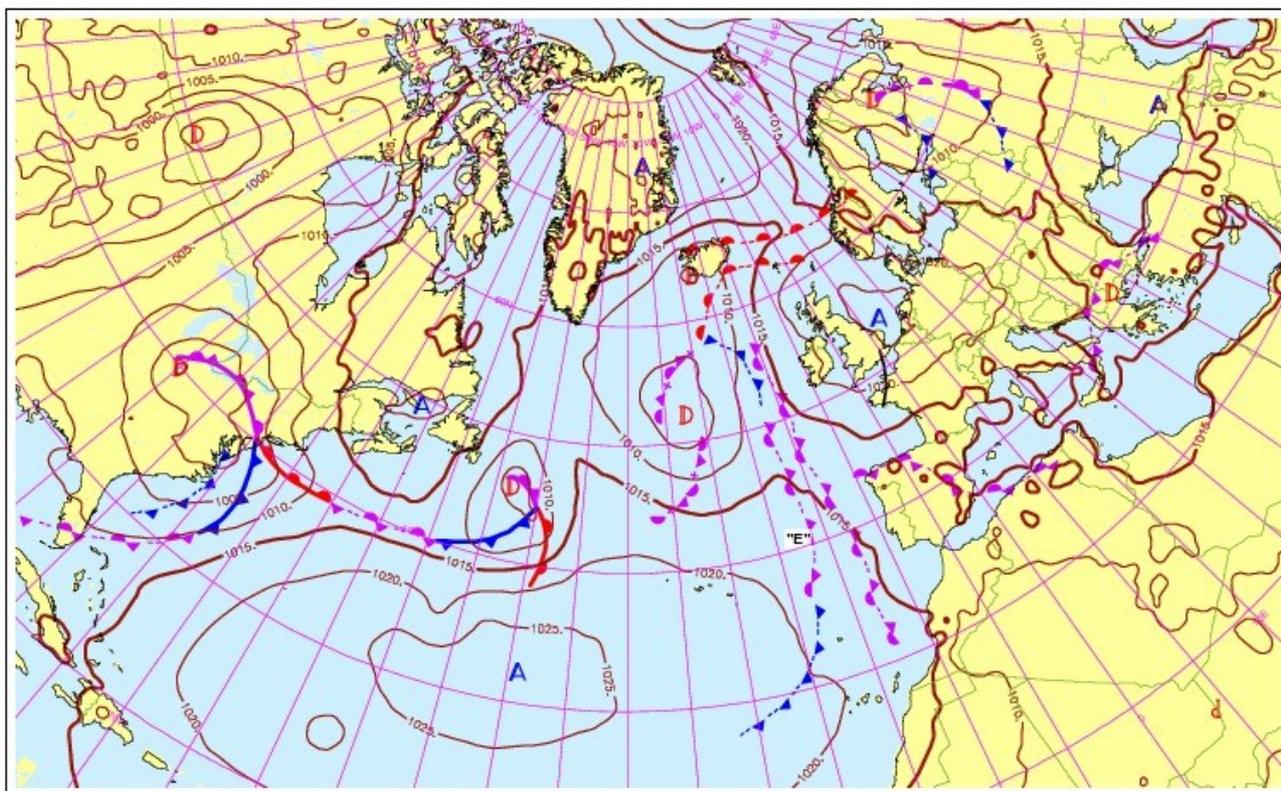
POUR LUNDI 03/04/2017
à 12 UTC

En regardant plus précisément les enregistrements au sémaphore de Dunkerque et ceux de la bouée Sandettie :

- en journée du 3/04/17, la pression reste relativement constante entre 1025 et 1028 Hpa,
- à Dunkerque, le vent d'E à SE 1 à 3 m/s le matin tourne en milieu de journée au secteur NE, puis au NW à 15 h UTC en se renforçant légèrement 2 à 4 m/s (à Sandettie, le vent tourne lui au SW après très une brève incartade au N) ; parallèlement la visibilité chute à 500m et la température perd 1 °C (puis 1,5° supplémentaire l'heure suivante) ; tout cela laissant penser à la mise en place d'une légère brise de mer.
- au sémaphore, le vent reste ensuite de secteur NW faible jusqu'en soirée, puis tombe complètement avant de s'orienter au SW très faible en première partie de nuit, et en seconde partie de nuit il reste au secteur SW et se renforce progressivement jusque 3 à 4 m/s (à la bouée, le vent reste de SW 1 à 2m/s en soirée, puis se renforce 5 à 7m/s en première partie de nuit, puis 7 à 8m/s en seconde partie de nuit).
- au niveau de l'humidité, elle oscille pour Dunkerque entre 80 et 96 %, alors qu'à Sandettie elle reste saturée à 100 % (excepté une brève baisse à 77 % à l'observation de 15h UTC).

ANNEXE 4 : Retour sur la situation du 25 mai 2017

Un Anticyclone 1025 hPa de la Grande-Bretagne au nord de la France se décale lentement vers le nord-est, pour atteindre la mer du Nord en début de nuit, cela générant un flux de secteur Nord-est faible à modéré.



PREISO du JEUDI 25/05/2017
Réseau : 12 UTC Echéance : 00 H

POUR JEUDI 25/05/2017
à 12 UTC

En regardant plus précisément les enregistrements de la bouée Sandettie :

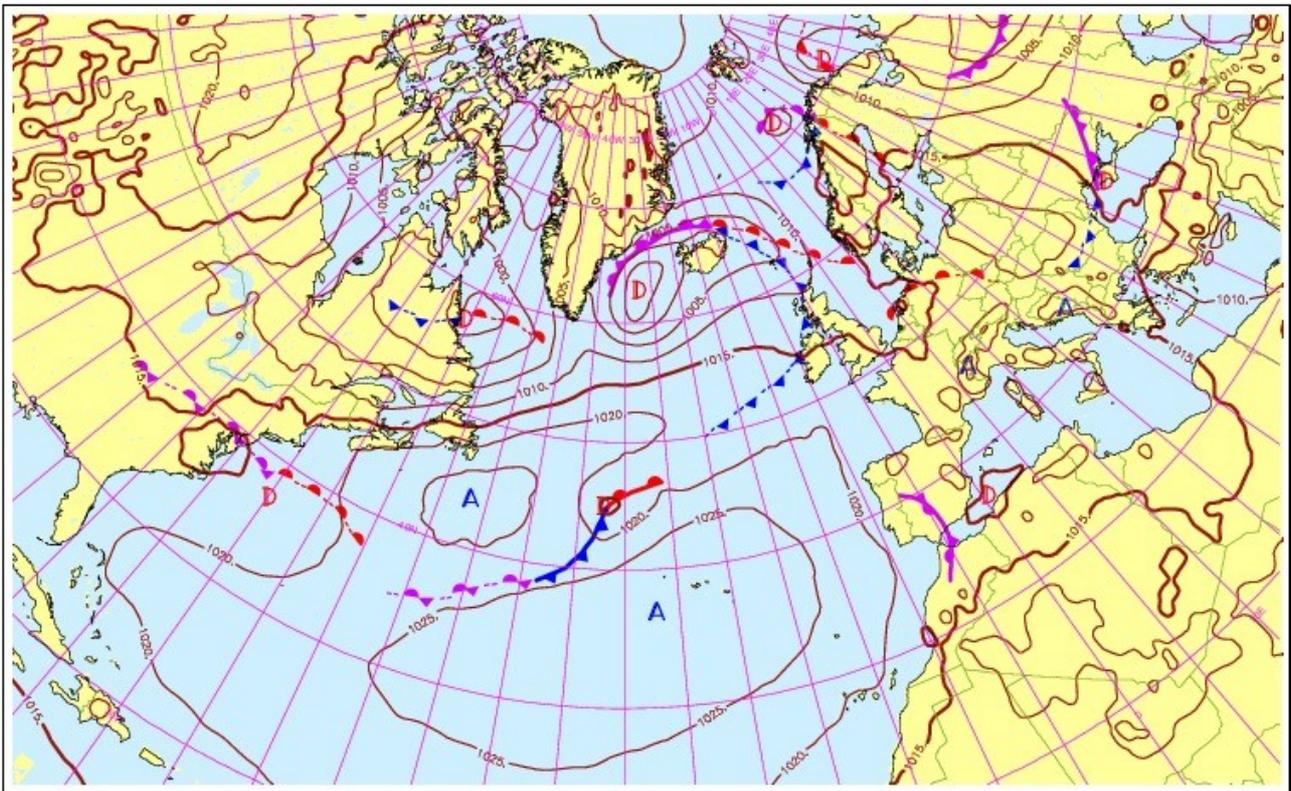
- en journée du 25/05/17, la pression reste relativement constante entre 1023 et 1026 Hpa et la température de l'air aux alentours de 13°C.

- le vent de secteur Nord-est s'installe en début de matinée à une vingtaine de km/h en vent moyen, puis évolue peu en cours de journée avant de se renforcer en soirée

- au niveau de l'humidité, elle reste très importante jusqu'en milieu de journée (supérieure à 95 % jusque 10h UTC) puis s'assèche quelque peu (inférieure à 90 % à compter de 13h UTC), d'où une visibilité en mer qui passe de moyenne à bonne.

ANNEXE 5 : Retour sur la situation des 6 et 7 juillet 2017

Une Dépression relative (1013 hPa) à laquelle est reliée un pseudo-front orageux concerne le sud de la Mer du Nord en fin de nuit, puis se décale vers l'est en journée.



PREISO du VENDREDI 07/07/2017
Réseau : 00 UTC Echéance : 00 H

POUR VENDREDI 07/07/2017
à 00 UTC

En regardant plus précisément les enregistrements au sémaphore de Dunkerque et ceux de la bouée Sandettie :

Le 6, à Dunkerque,, tout au long de la journée le vent est de secteur E à SE 5 à 6 m/s ; du côté des températures, voisines de 18°C en fin de nuit elles montent progressivement pour atteindre 31°C à 17h UTC ; le vent prend alors une composante S et un orage éclate entraînant à 18h UTC des rafales à 100 km/h et une température qui rechute aux alentours de 22°C. La pression quant à elle diminue en journée de 1017 Hpa à 1012 Hpa, puis se stabilise plus ou moins autour de cette valeur la nuit

A la bouée, le vent est globalement E 6 à 8 m/s toute la journée, avant de tourner S à 18h UTC, puis SW à l'observation suivante ; on observe à 19h UTC une chute brutale et temporaire de pression à 991 Hpa, marqueur très certainement du phénomène orageux.

Le 7, à Dunkerque, en fin de nuit le vent est de SSW autour de 4 m/s, puis il tourne en matinée à l'W en se renforçant 6 m/s ; l'après-midi, il tourne encore en prenant une composante NW mais faiblit autour de 4 m/s, puis en soirée revient au SW 4 à 5 m/s

Les températures sont élevées avec déjà 20 °C en fin de nuit, 22°C en fin de matinée et après-midi, puis ponctuellement 25°C en soirée quand le flux repasse au SW, avant de baisser au cours de la nuit suivante.

Au niveau de l'humidité, d'abord aux alentours de 85 %, elle oscille ensuite la journée entre 70 et 80 %, jusqu'à la rotation en soirée au SW qui fait alors nettement et rapidement assécher la masse d'air jusque 15 %.

Quant à la pression, en première partie de journée du 7/07/17, elle remonte pour passer de 1013 à 1018 Hpa, puis se stabilise vers 1017 Hpa à partir de 14h UTC..

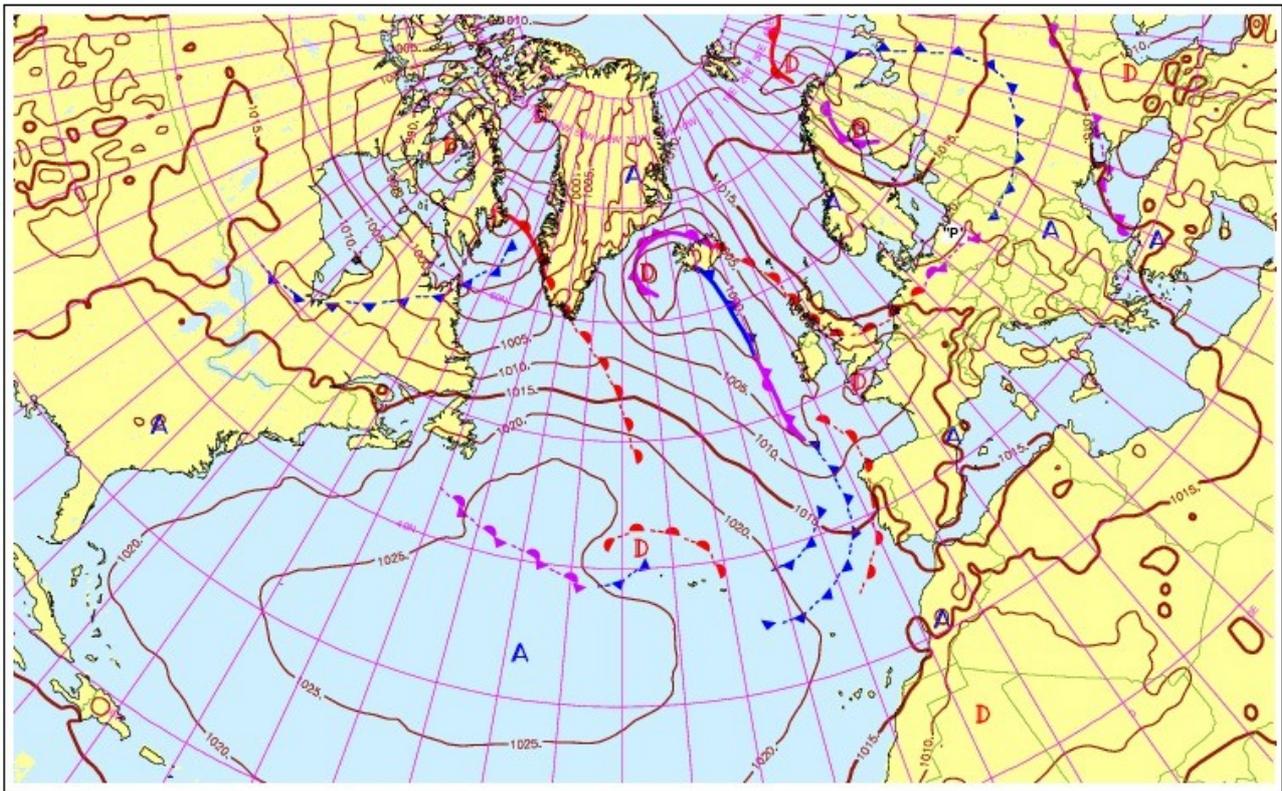
A la bouée, en fin de nuit il est également SSW mais aux alentours de 8 à 10 m/s, puis tourne également W en matinée mais en faiblissant jusque 4 m/s ; l'après-midi il revient SSW, puis se renforce de nouveau en soirée pour retrouver des valeurs de 8 à 10 m/s.

Les biais assez importants en force et direction (respectivement plus de 2 m/s et de 15°) qui apparaissent en journée du 6 sont certainement à relier à l'activité orageuse très marquée de la soirée (au niveau électrique, à peu près 2200 impacts de foudre enregistrés dans un rayon de 20 km autour de Dunkerque entre 16h45 et 18h15 UTC).

Le manque du 7 à 14h peut peut-être être relié au phénomène de brise de mer qui semble s'être mis en place ce jour-là (vent tournant à l'W, puis au NW à la côte, avant de reprendre un flux de SW en début d'après-midi à la Sandettie, puis en fin d'après-midi à la côte).

ANNEXE 6 : Retour sur la nuit du 18 au 19 juillet 2017

Une dépression relative 1005 Hpa est centrée sur le sud Cornouailles ; une perturbation orageuse associée aborde la Manche.



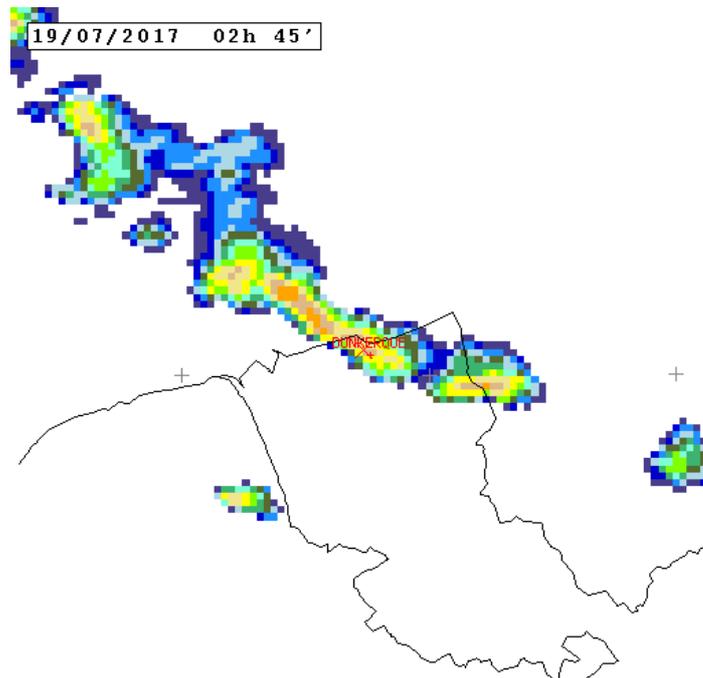
PREISO du MERCREDI 19/07/2017
Réseau : 00 UTC Echéance : 00 H

POUR MERCREDI 19/07/2017
à 00 UTC

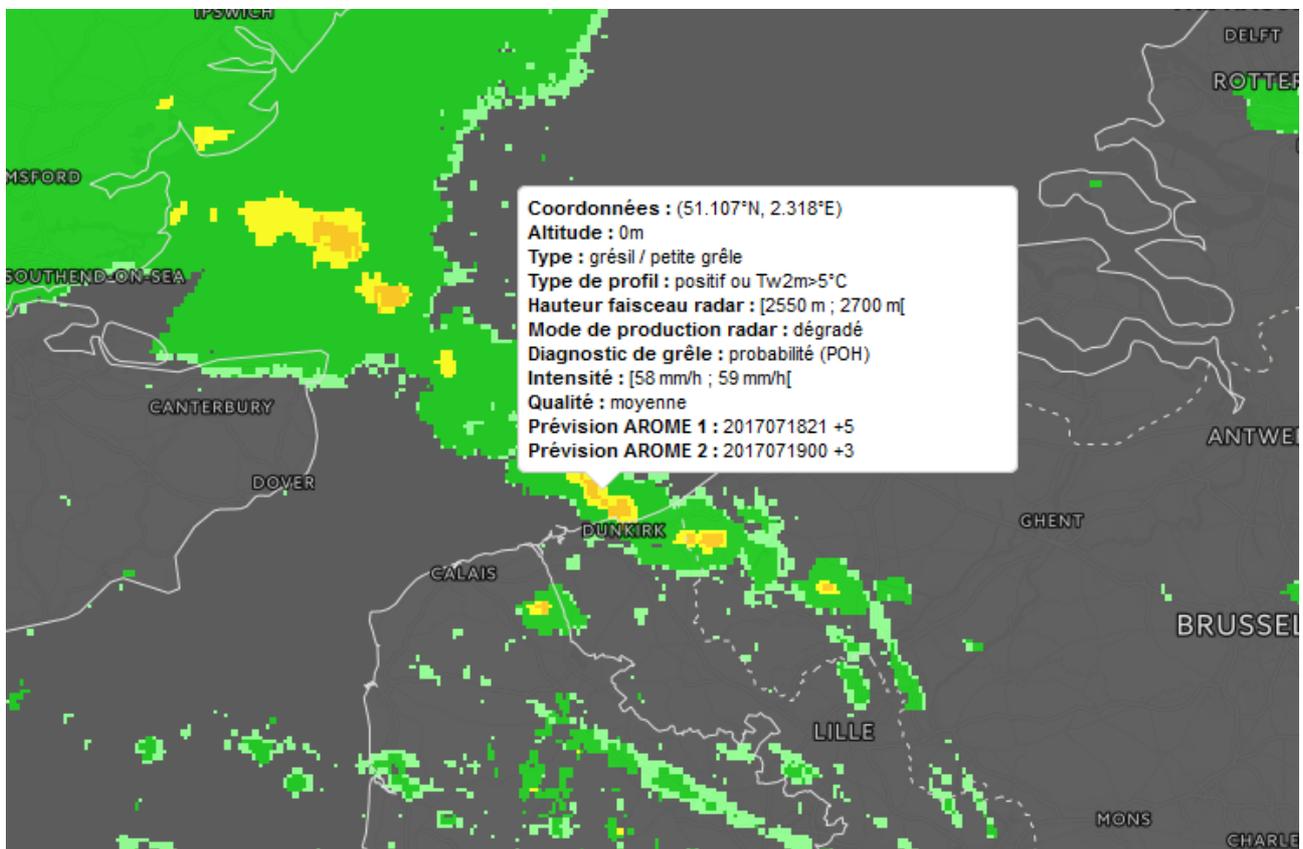
En regardant plus précisément les enregistrements de la bouée Sandettie et du sémaphore de Dunkerque :

- En milieu de nuit du 18 au 19 juillet, le vent moyen est d'ENE, fraîchissant légèrement de 20 à 30 km/h sur le littoral, et de 30 à 40 km/h en mer, la pression étant en baisse autour de 1010 Hpa.

- A 3h UTC, les températures sont chaudes avec 21,1 °C enregistré sur Dunkerque ; le vent s'est renforcé avec des rafales de l'ordre de 40 km/h et on enregistre 0,4 mm de précipitations : ceci est lié au passage très récent et rapide d'une ligne orageuse que l'on peut voir sur l'image réflectivité du radar d'Abbeville en page suivante :

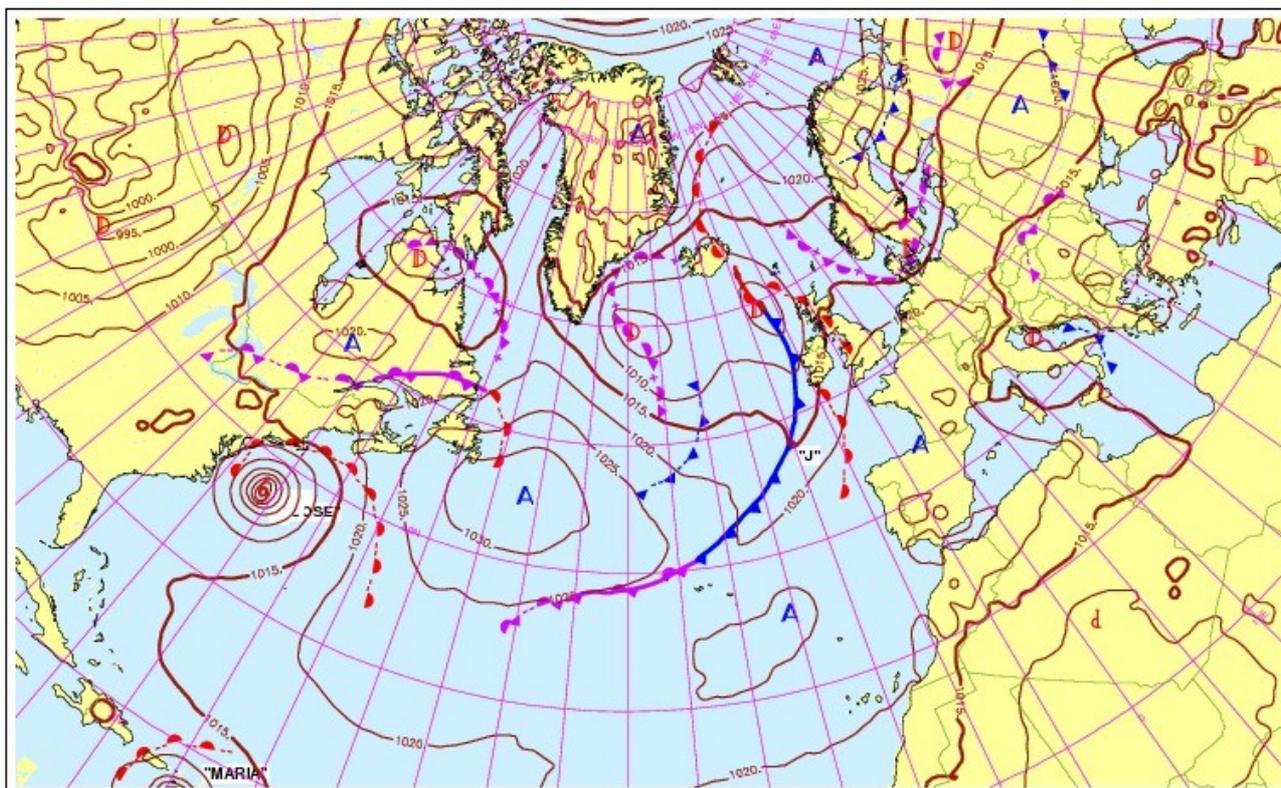


En consultant l'outil de fusion de données HYDRE (intégrant les lames d'eau radar, les images satellites, les observations et les prévisions du modèle Arome), on diagnostique que cette ligne de grain a donné très probablement par endroit du grésil et/ou de la grêle sur son passage.



ANNEXE 7 : Retour sur la situation des 19 et 20 septembre 2017

Le 19, la dépression qui était sur les Pays-Bas, se comble rapidement sur place, et une dorsale atlantique se développe sur le Golfe de Gascogne, puis se décale vers la France, avec un anticyclone qui se développe la nuit suivante pour atteindre 1025 hPa sur le golfe de Gascogne ; celui-ci se décale au cours de la journée du 20 vers le sud de l'Allemagne.



PREISO du MERCREDI 20/09/2017
Réseau : 00 UTC Echéance : 00 H

POUR MERCREDI 20/09/2017
à 00 UTC

En regardant plus précisément les enregistrements au sémaphore de Dunkerque et ceux de la bouée Sandettie :

Le 19, à Dunkerque, depuis la nuit et tout au long de la journée, le vent est de secteur NW 5 à 6 m/s ; en début de nuit du 19 au 20 il faiblit 2 à 3 m/s et tourne au secteur S ; du côté des températures, elles restent voisines de 14 à 15°C, avant de baisser légèrement avec la nuit ; la pression quant à elle augmente progressivement pour atteindre 1022 hPa en début de nuit du 19 au 20. Et la visibilité est bonne.

A la bouée, le vent est lui aussi de secteur NW 6 à 8 m/s toute la journée, avant de tourner au secteur W en soirée en mollissant 5 à 6 m/s. La mer, peu agitée en début de journée, devient belle en cours d'après-midi.

Le 20, à Dunkerque, le vent reste globalement toute la fin de nuit et la journée au secteur S entre 2 et 4 m/s, temporairement 5 m/s l'après-midi ; les températures, après avoir baissé autour

de 11°C en fin de nuit, remontent jusque 16°C dans l'après-midi. Quant à la pression, elle diminue progressivement et légèrement jusque 1019 HPA en soirée. La visibilité est toujours bonne. A la bouée, en fin de nuit et toute la matinée, le vent est de secteur W 6 à 7 m/s ; l'après-midi, il tourne SW, et se renforce de 8 à 10 m/s. La mer reste belle.

Les biais importants en direction ainsi que les manques constatés pendant ces 2 jours ne peuvent a priori pas être reliés avec les conditions météorologiques. Nous suspectons un défaut ponctuel sur la mesure de la direction provenant du LiDAR.

ANNEXE 8 : Analyse de corrélation (en pour mille) du vent LiDAR observé à 100 m (du 1^{er} décembre 2016 au 30 novembre 2017)

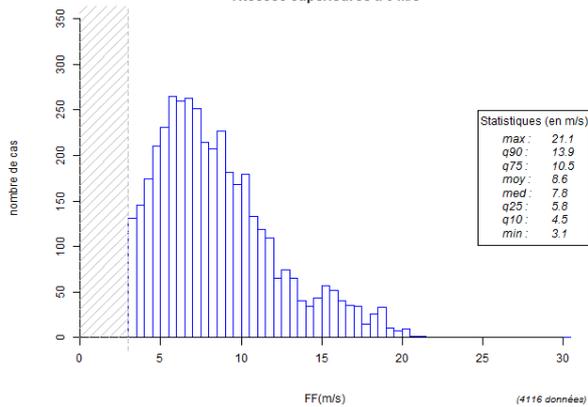
Vitesses en m/s	Directions en degrés												Total
	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	
>=27	.	.	.	.	.	.	.	0.2	0.0	0.0	0.0	.	0.3
[26;27[	.	.	.	.	.	.	.	0.3	0.1	0.0	0.1	.	0.6
[25;26[	.	.	.	.	.	.	.	0.2	0.2	0.0	0.0	.	0.5
[24;25[	.	.	.	.	.	.	.	0.5	0.2	0.1	0.1	.	0.9
[23;24[	.	.	.	.	.	.	0.0	0.6	0.5	0.1	0.1	.	1.3
[22;23[	.	.	.	.	.	0.0	0.1	0.7	0.6	0.3	0.2	.	2.0
[21;22[	.	.	.	.	.	0.1	0.1	2.1	0.6	0.3	0.4	0.0	3.6
[20;21[	.	.	.	.	.	0.1	0.1	3.9	0.9	0.1	0.3	0.0	5.4
[19;20[	.	.	.	.	.	0.2	0.4	3.5	1.2	0.2	0.5	0.0	6.0
[18;19[	.	.	.	.	0.0	0.3	0.6	5.0	1.3	0.3	0.7	0.1	8.3
[17;18[	.	.	.	.	0.0	0.7	0.7	6.5	1.7	0.9	0.8	0.0	11.4
[16;17[	.	0.1	.	.	0.0	0.6	1.5	10.0	3.1	1.2	0.8	0.2	17.7
[15;16[	.	0.7	0.1	.	0.3	1.3	3.7	13.9	4.7	1.5	1.0	0.9	28.1
[14;15[	0.0	0.3	0.3	0.2	1.1	1.6	3.8	14.1	6.2	2.3	1.7	1.4	33.1
[13;14[	0.9	0.9	1.2	0.3	2.0	3.0	5.2	13.0	8.0	3.2	2.7	2.3	42.7
[12;13[	1.7	1.6	1.4	1.2	2.3	4.0	6.9	14.1	7.0	3.3	4.9	2.6	50.9
[11;12[	2.4	2.7	3.2	2.0	3.4	6.4	8.3	14.3	8.7	4.6	5.7	2.7	64.4
[10;11[	1.9	3.2	4.0	1.8	5.8	8.6	9.6	14.2	10.8	6.1	5.7	4.6	76.3
[9;10[	3.4	4.7	5.2	2.2	8.0	8.8	10.4	16.8	11.2	7.2	5.8	3.6	87.4
[8;9[	3.6	5.8	5.8	4.4	7.8	8.0	10.2	17.0	12.2	9.2	7.8	4.0	95.8
[7;8[	5.2	6.2	5.8	4.6	7.0	10.6	12.8	16.0	10.6	8.7	8.4	5.6	101.5
[6;7[	5.2	9.2	5.9	5.1	8.0	11.2	10.1	11.3	10.7	7.1	6.4	4.2	94.4
[5;6[	5.7	7.9	6.8	5.3	8.4	9.7	8.9	9.0	8.1	6.9	5.5	5.3	87.4
[4;5[	4.8	6.8	7.0	5.7	5.3	4.1	8.0	8.0	6.3	7.0	4.1	5.7	72.8
[3;4[	2.2	3.9	4.8	5.9	4.2	2.7	3.3	4.8	6.0	6.4	5.0	3.0	52.1
<3	4.6	4.8	4.8	4.6	4.1	3.4	3.8	5.5	5.4	5.6	4.8	3.6	55.0
total	41.5	58.8	56.3	43.3	68.0	85.5	108.6	205.5	126.3	82.7	73.6	49.9	1000.0

Nombre de cas : 41744

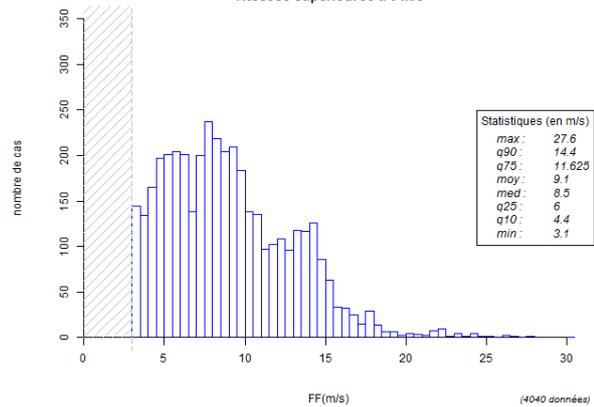
Les vents inférieurs à 3 m/s (non comptabilisés dans les statistiques) apparaissent ici dans les cases grisées du tableau. Ils représentent moins de 6 % des cas.

ANNEXE 9 : Distributions mensuelles des forces de vent du LiDAR à 100m (données brutes seuillées à 3 m/s)

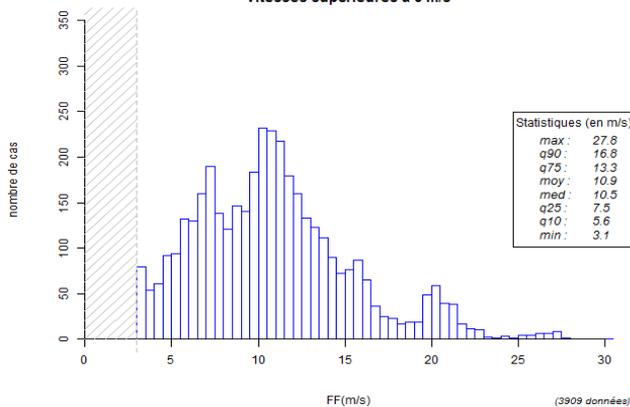
Distribution des FF "LiDAR(100m)"
Période du 01/12/2016 au 31/12/2016,
Vitesses supérieures à 3 m/s



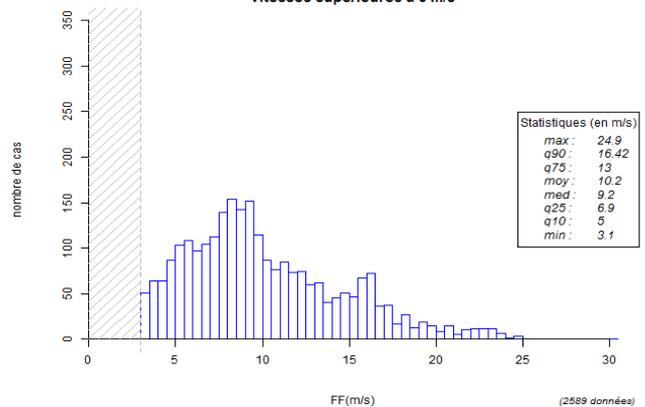
Distribution des FF "LiDAR(100m)"
Période du 01/01/2017 au 31/01/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



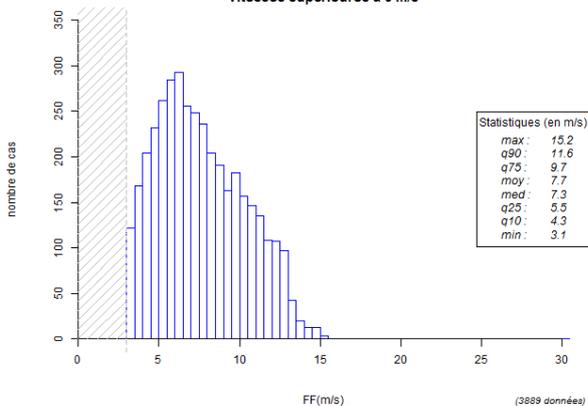
Distribution des FF "LiDAR(100m)"
Période du 01/02/2017 au 28/02/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



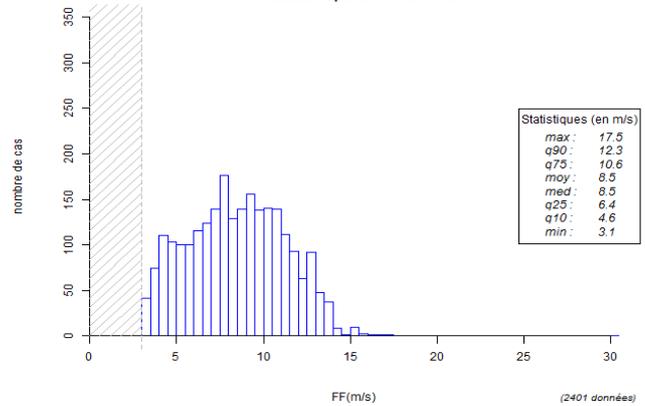
Distribution des FF "LiDAR(100m)"
Période du 01/03/2017 au 31/03/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s

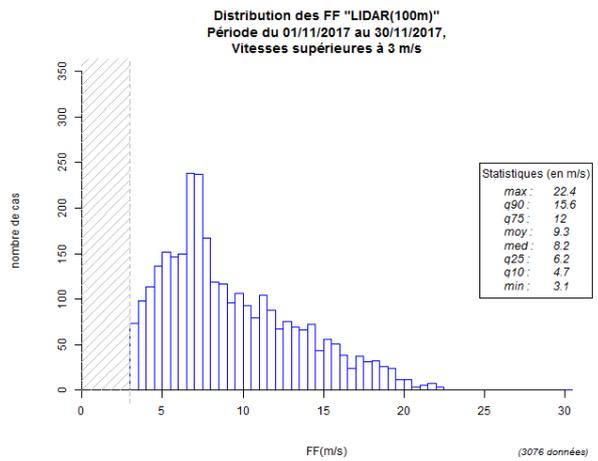
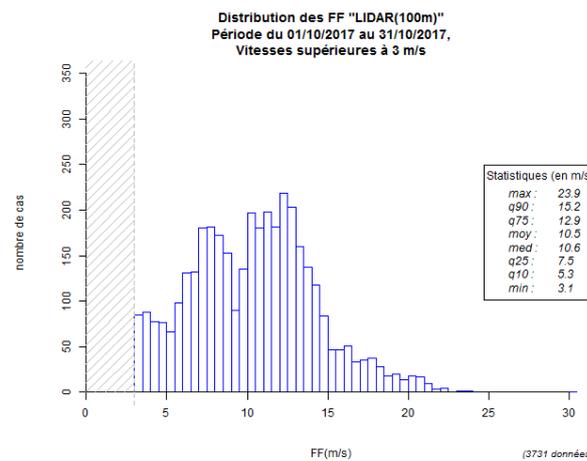
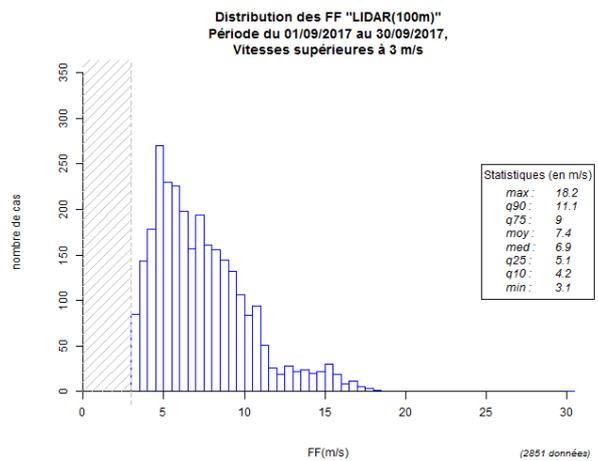
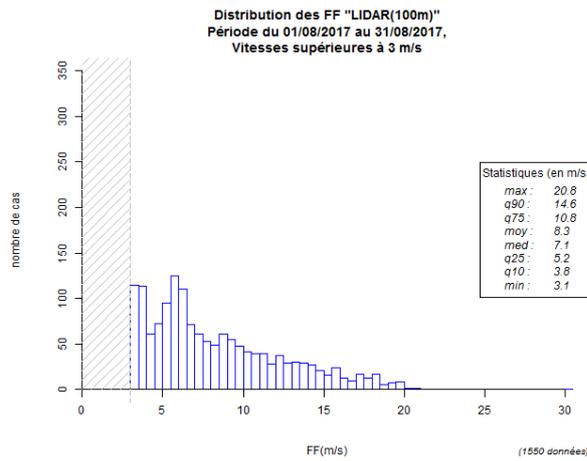
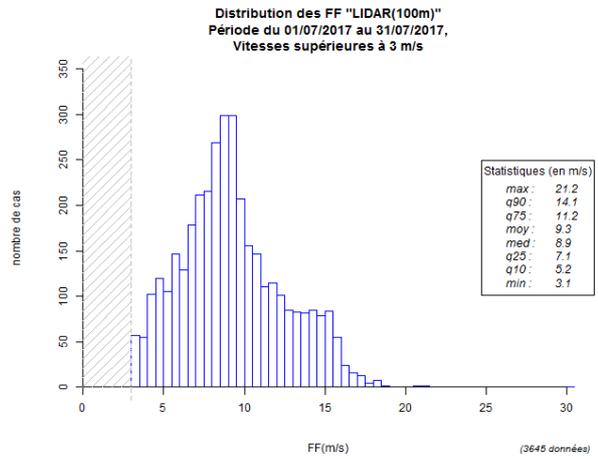
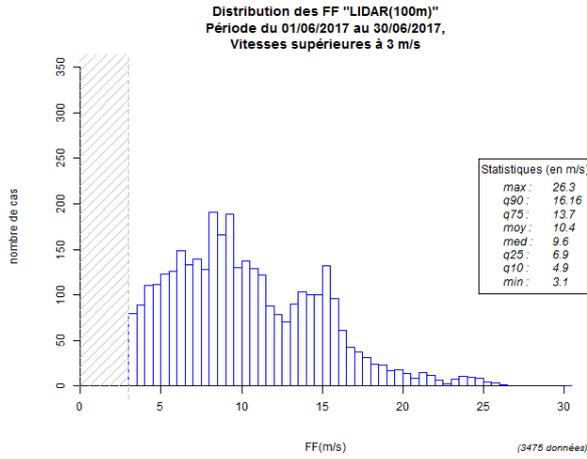


Distribution des FF "LiDAR(100m)"
Période du 01/04/2017 au 30/04/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



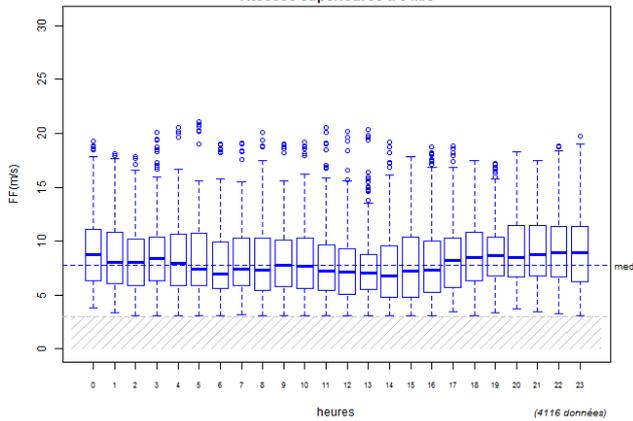
Distribution des FF "LiDAR(100m)"
Période du 01/05/2017 au 31/05/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



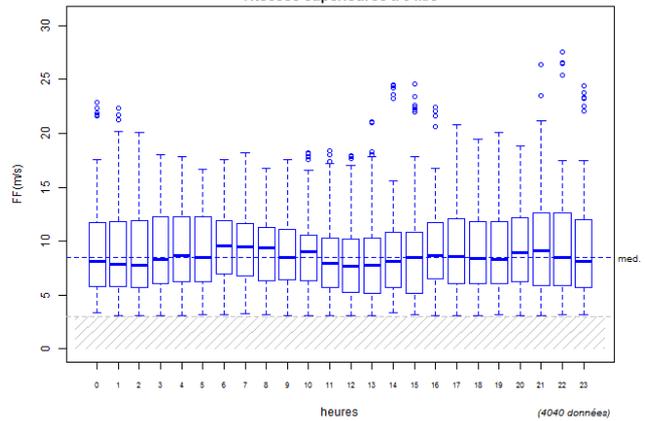


ANNEXE 10 : Répartitions horaires par mois des forces de vent du LiDAR à 100 m (données brutes seuillées à 3 m/s)

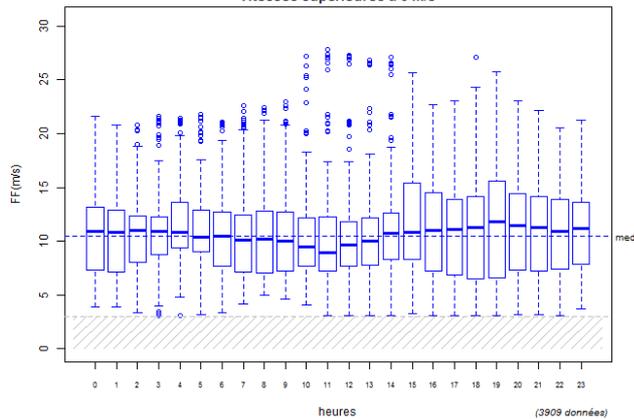
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/12/2016 au 31/12/2016,
Vitesses supérieures à 3 m/s



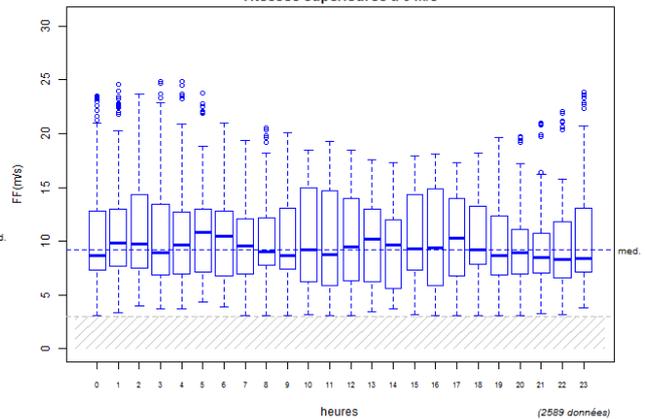
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/01/2017 au 31/01/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



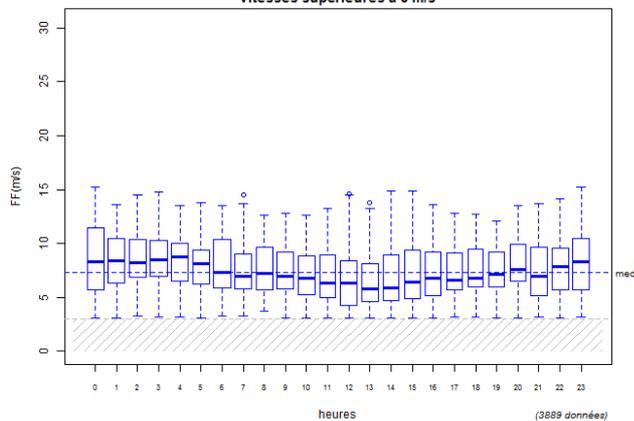
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/02/2017 au 28/02/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



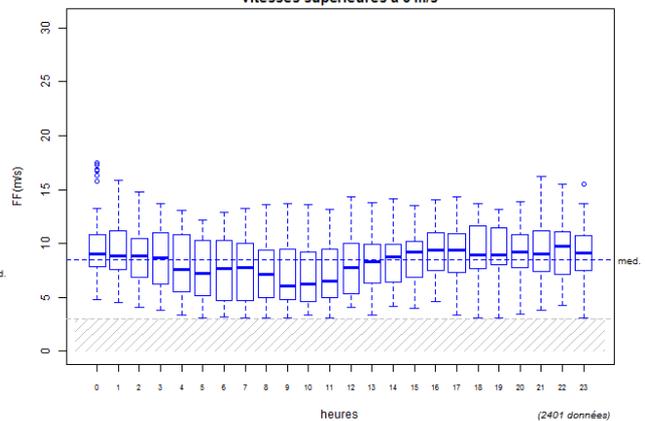
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/03/2017 au 31/03/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



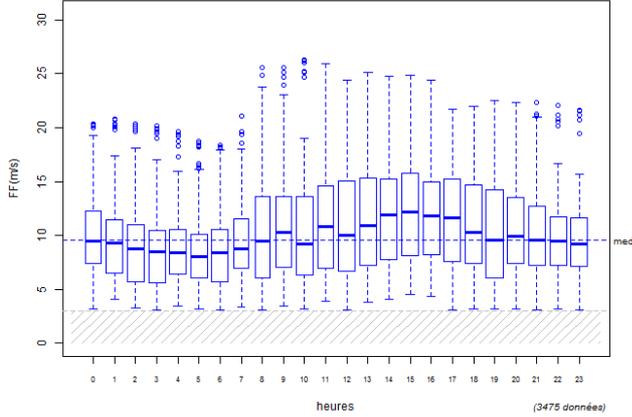
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/04/2017 au 30/04/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



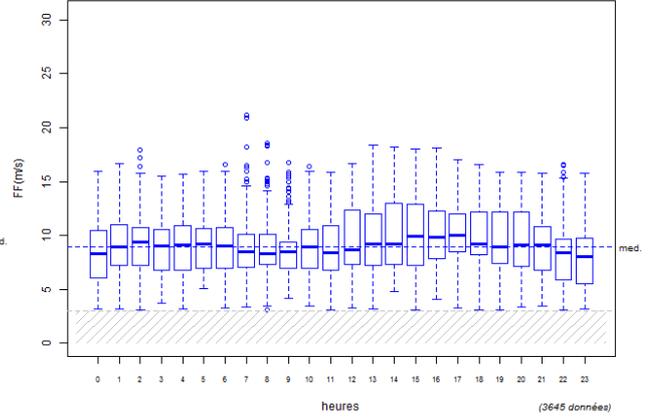
Répartition des FF "LiDAR(100m)" par heure
Période du 01/05/2017 au 31/05/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



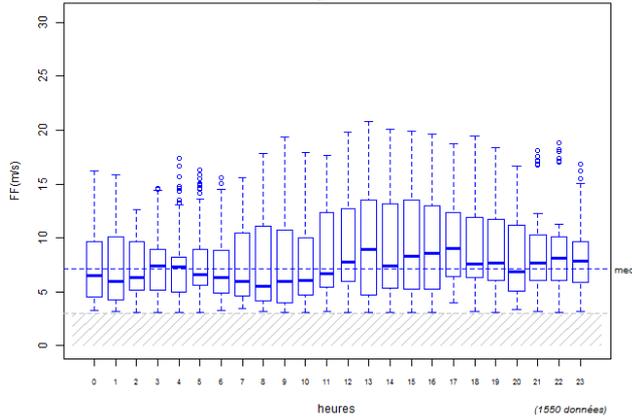
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/06/2017 au 30/06/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



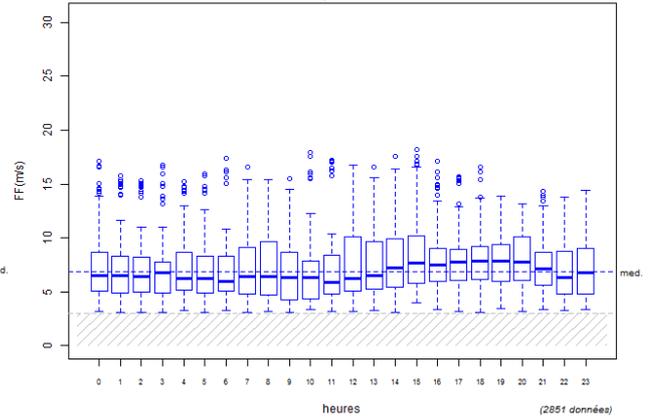
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/07/2017 au 31/07/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



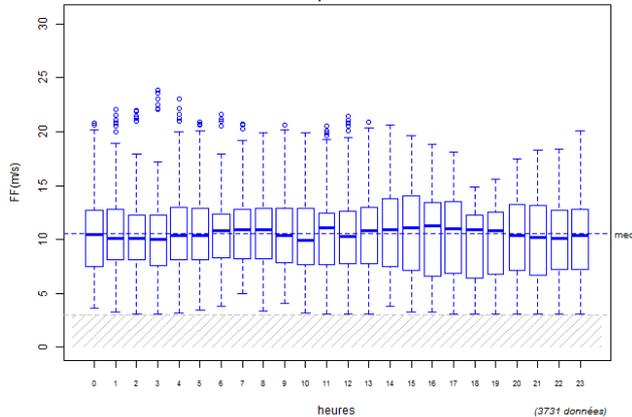
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/08/2017 au 31/08/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



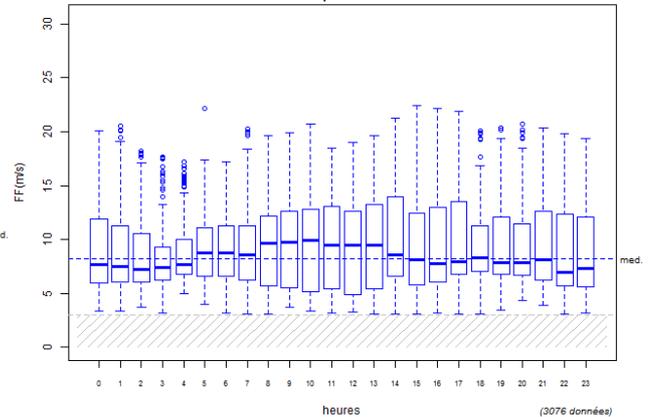
Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/09/2017 au 30/09/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/10/2017 au 31/10/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



Répartition des FF "LIDAR(100m)" par heure
Période du 01/11/2017 au 30/11/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



ANNEXE 11 : Roses des vents mensuelles du LiDAR à 100 m (données brutes)

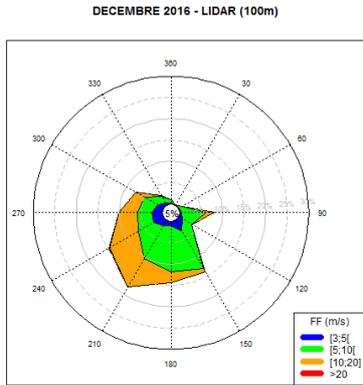


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4337

	[3;5]	[5;10]	[10;20]	>20	total
30	0.1	.	.	.	0.1
60	0.0	1.0	.	.	1.0
90	0.4	5.6	2.0	.	8.0
120	1.0	2.6	0.0	.	3.6
150	2.8	10.3	1.0	.	14.1
180	1.1	10.9	2.4	.	14.3
210	1.5	8.8	7.7	.	18.1
240	2.7	4.0	7.7	0.3	14.7
270	2.5	3.3	4.3	0.0	10.1
300	1.5	3.6	2.4	.	7.5
330	0.6	1.8	0.3	.	2.7
360	0.2	0.9	0.0	.	1.1
Total	14.4	52.7	27.8	0.3	95.2
[0; 3]					4.8

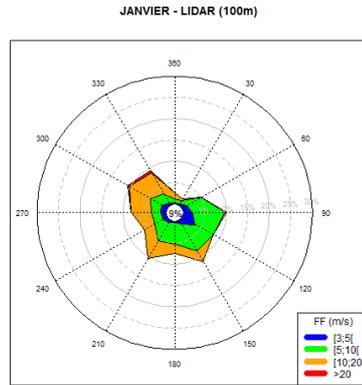


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4458

	[3;5]	[5;10]	[10;20]	>20	total
30	0.4	0.8	0.5	.	1.7
60	1.2	3.9	.	.	5.1
90	2.1	7.5	0.4	.	10.0
120	3.5	4.8	0.0	.	8.3
150	1.0	7.3	2.9	.	11.2
180	0.2	5.2	2.1	.	7.5
210	0.7	4.8	4.9	.	10.4
240	1.1	2.3	2.6	.	6.0
270	1.3	2.0	4.8	.	8.2
300	1.5	3.1	5.6	0.4	10.6
330	0.6	2.6	5.5	0.7	9.4
360	0.2	1.1	1.4	.	2.7
Total	13.8	45.4	30.9	1.2	91.3
[0; 3]					8.7

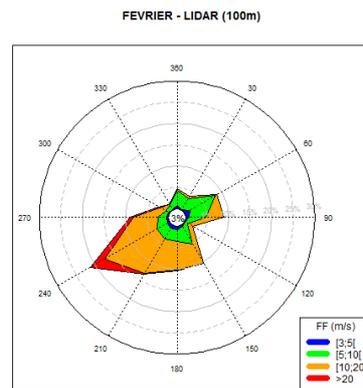


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4037

	[3;5]	[5;10]	[10;20]	>20	total
30	0.2	3.0	0.6	.	3.8
60	1.4	6.8	0.5	.	8.7
90	0.9	3.8	4.2	.	9.0
120	0.1	0.7	1.4	.	2.2
150	0.3	4.7	5.2	.	10.3
180	0.9	2.8	6.7	0.1	10.4
210	0.8	2.9	9.3	0.3	13.4
240	0.5	2.8	14.1	3.9	21.3
270	0.4	2.0	5.8	0.7	8.8
300	0.3	0.8	1.4	0.4	3.0
330	0.1	1.2	0.2	.	1.6
360	0.9	3.5	0.3	.	4.8
Total	6.9	35.1	49.8	5.5	97.3
[0; 3]					2.7

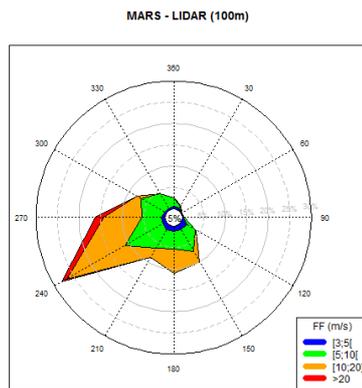


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 2736

	[3;5]	[5;10]	[10;20]	>20	total
30	0.6	0.5	0.2	.	1.3
60	0.0	0.1	.	.	0.2
90	0.3	0.1	.	.	0.4
120	1.4	2.4	0.3	.	4.1
150	1.3	6.0	2.9	.	10.1
180	1.3	4.0	5.8	.	11.1
210	1.4	4.8	2.5	.	8.7
240	0.8	10.3	15.6	1.3	28.0
270	1.0	4.4	8.8	1.9	16.2
300	0.5	6.3	1.1	.	7.9
330	0.4	4.0	0.2	.	4.6
360	0.7	1.9	0.1	.	2.7
Total	9.7	44.8	37.4	3.3	95.1
[0; 3]					4.9

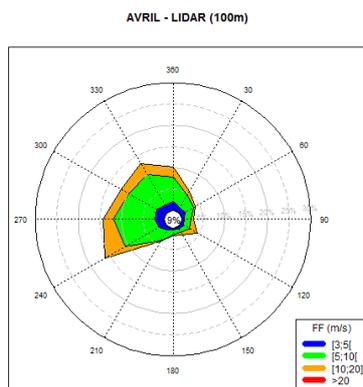


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 4314

	[3;5]	[5;10]	[10;20]	>20	total
30	1.2	3.4	1.1	.	5.7
60	1.2	2.4	0.6	.	4.1
90	0.6	1.5	0.5	.	2.7
120	0.9	1.4	2.0	.	4.3
150	0.5	0.9	0.8	.	2.2
180	0.4	1.2	0.2	.	1.8
210	0.9	3.0	0.1	.	4.0
240	1.7	9.2	5.2	.	16.2
270	2.3	9.6	2.4	.	14.3
300	2.5	7.3	2.2	.	12.0
330	1.8	8.3	3.0	.	13.1
360	2.2	5.8	2.3	.	10.3
Total	16.2	54.1	20.4	.	90.7
[0; 3]					9.3

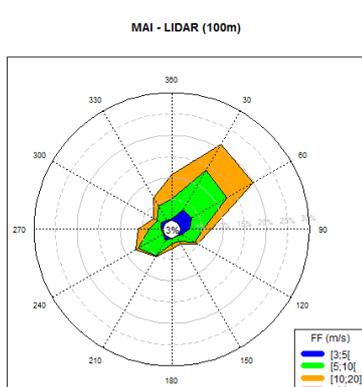


Tableau de répartition (en %)
Nombre total de cas : 2453

	[3;5]	[5;10]	[10;20]	>20	total
30	3.2	10.7	7.1	.	21.0
60	3.2	9.5	7.1	.	19.9
90	2.2	3.0	2.0	.	7.2
120	0.7	3.5	0.7	.	4.9
150	0.0	1.2	0.7	.	2.0
180	0.0	1.5	1.2	.	2.7
210	1.0	4.3	0.2	.	5.4
240	0.2	6.8	0.6	.	7.5
270	0.4	2.9	2.5	.	5.8
300	0.8	1.1	1.0	.	3.0
330	0.4	3.8	2.3	.	6.5
360	0.4	4.7	5.7	.	10.8
Total	12.7	52.9	31.0	.	96.6
[0; 3]					3.4

Acquisition et suivi des mesures sur site durant un an

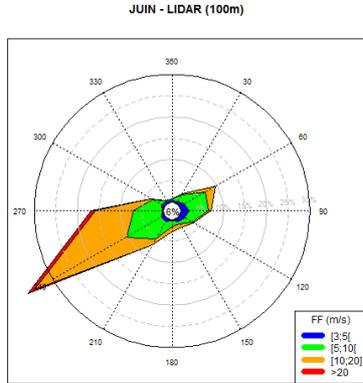


Tableau de répartition (en %)
 Nombre total de cas : 3700

	[3;5[	[5;10[	[10;20[	>20	total
30	0.6	1.8	0.2	. .	2.6
60	1.2	5.7	2.7	. .	9.6
90	2.1	4.5	0.6	. .	7.1
120	1.3	2.1	0.2	. .	3.5
150	0.9	0.5	1.1	. .	2.5
180	0.4	1.2	1.3	. .	2.8
210	0.9	4.8	1.5	. .	7.2
240	0.9	9.3	24.6	1.9	36.7
270	0.2	6.8	8.7	1.1	16.8
300	0.8	2.7	0.4	. .	3.8
330	0.5	0.3	. .	. .	0.8
360	0.5	0.3	. .	. .	0.8
Total	10.3	39.9	41.2	2.9	94.4
[0; 3[					5.6

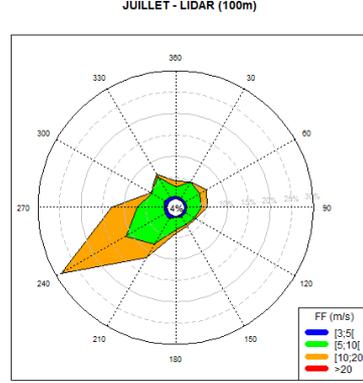


Tableau de répartition (en %)
 Nombre total de cas : 3820

	[3;5[	[5;10[	[10;20[	>20	total
30	0.7	4.2	. .	. .	4.8
60	0.5	3.9	1.9	. .	6.3
90	0.5	3.5	1.4	. .	5.4
120	0.6	2.4	0.2	. .	3.2
150	0.6	2.0	0.5	. .	3.1
180	0.2	2.9	0.8	. .	3.9
210	1.0	6.9	3.6	. .	11.5
240	0.9	10.5	17.3	. .	28.7
270	0.8	6.2	5.9	. .	12.9
300	1.0	3.5	0.3	. .	4.8
330	0.7	5.5	0.6	. .	6.9
360	0.7	2.2	1.3	0.1	4.2
Total	8.1	53.8	33.7	0.1	95.6
[0; 3[					4.4

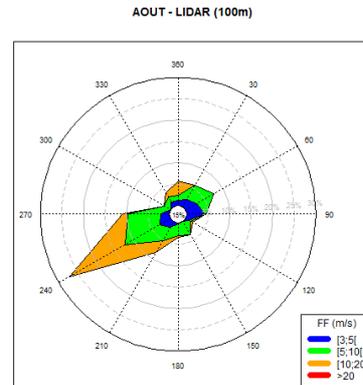


Tableau de répartition (en %)
 Nombre total de cas : 1854

	[3;5[	[5;10[	[10;20[	>20	total
30	2.0	3.7	0.1	. .	5.8
60	3.1	4.6	. .	. .	7.7
90	4.3	0.2	. .	. .	4.5
120	0.9	0.4	0.6	. .	1.9
150	. .	3.5	0.1	. .	3.6
180	0.2	2.7	0.5	. .	3.4
210	1.6	3.5	3.2	. .	8.3
240	2.9	9.4	14.9	0.1	27.2
270	2.0	7.6	1.2	. .	10.8
300	0.1	1.6	0.1	. .	1.8
330	1.3	1.3	1.2	. .	3.9
360	1.3	1.0	3.3	. .	5.7
Total	19.6	39.6	25.2	0.1	84.5
[0; 3[					15.5

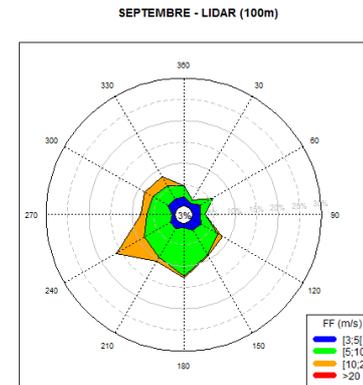


Tableau de répartition (en %)
 Nombre total de cas : 2948

	[3;5[	[5;10[	[10;20[	>20	total
30	1.2	0.7	. .	. .	1.9
60	2.4	3.3	. .	. .	5.8
90	1.7	1.3	. .	. .	3.0
120	2.5	4.6	1.2	. .	8.4
150	2.2	6.8	0.2	. .	9.2
180	1.1	11.4	0.3	. .	12.8
210	1.8	7.6	1.3	. .	10.7
240	1.6	6.9	7.7	. .	16.1
270	0.7	5.8	1.4	. .	7.9
300	2.2	4.1	2.2	. .	8.5
330	2.2	3.7	2.3	. .	8.2
360	2.3	2.5	. .	. .	4.8
Total	21.9	58.6	16.6	. .	97.2
[0; 3[					2.8

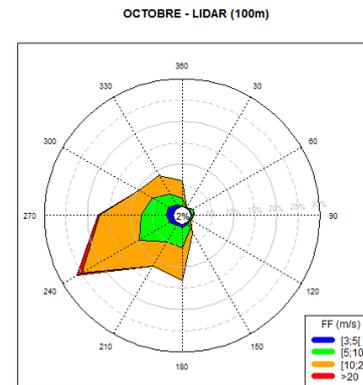


Tableau de répartition (en %)
 Nombre total de cas : 3806

	[3;5[	[5;10[	[10;20[	>20	total
30	. .	. .	0.1	. .	0.1
60	0.2	0.8	. .	. .	1.0
90	0.3	0.4	0.2	. .	0.9
120	0.2	0.2	. .	. .	0.5
150	0.4	1.3	1.2	. .	2.8
180	0.8	4.8	7.6	. .	13.2
210	0.7	4.5	6.4	. .	11.6
240	1.3	8.2	15.4	1.3	26.2
270	1.7	5.9	9.7	0.2	17.5
300	1.8	4.3	3.7	. .	9.7
330	0.7	3.0	5.1	. .	8.8
360	0.2	1.8	4.1	. .	6.1
Total	8.3	35.1	53.4	1.5	98.3
[0; 3[					1.7

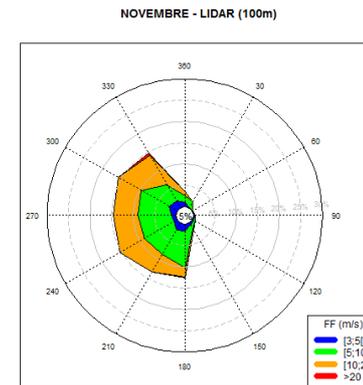
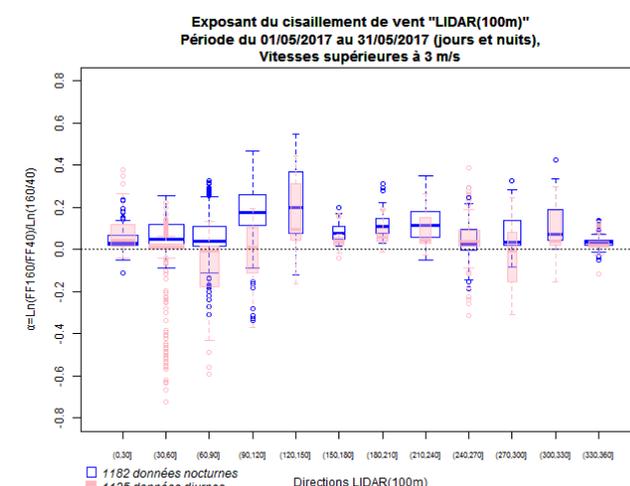
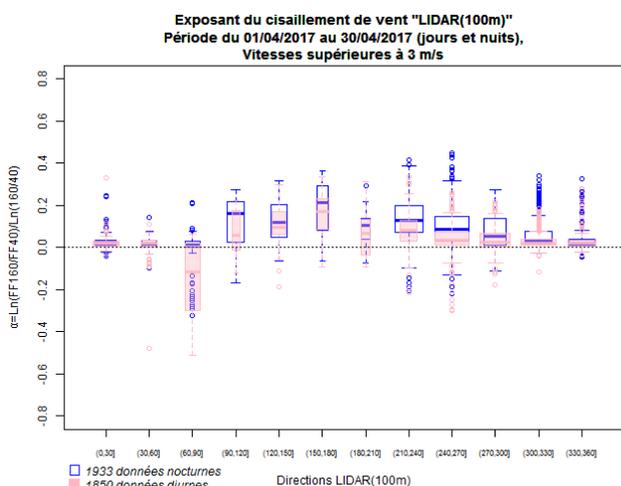
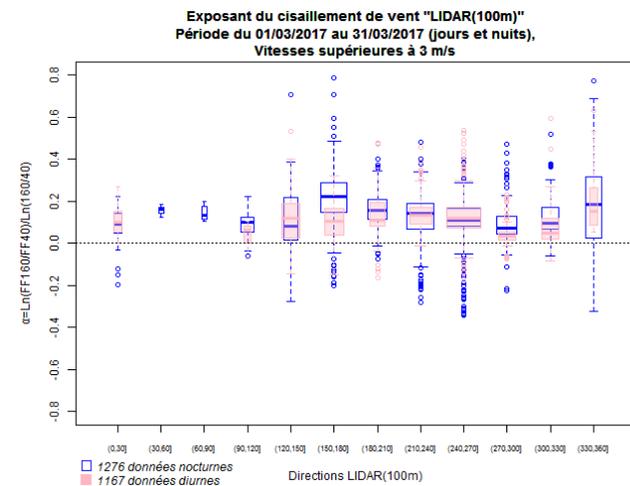
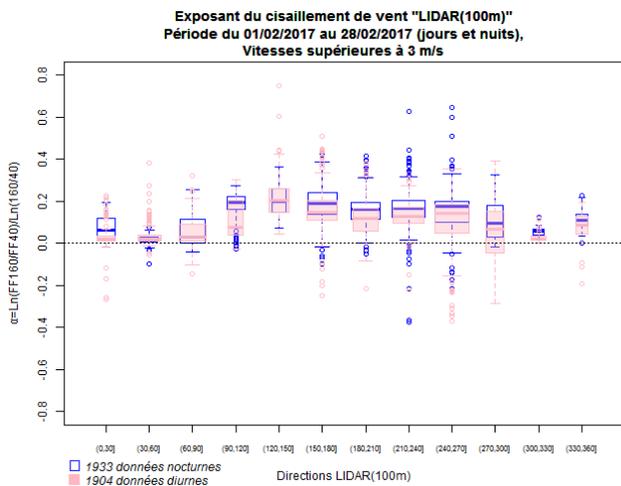
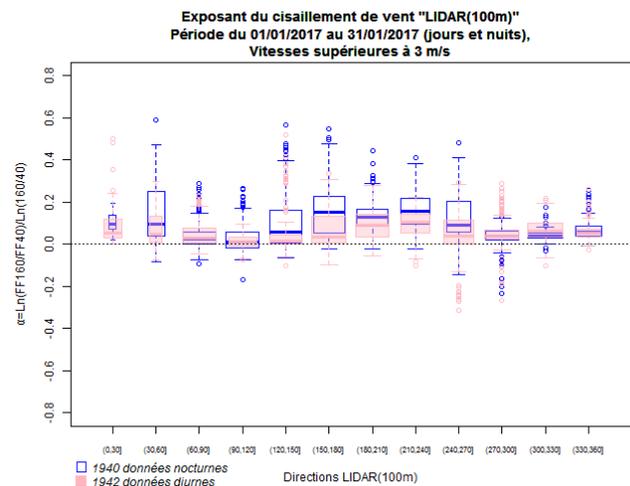
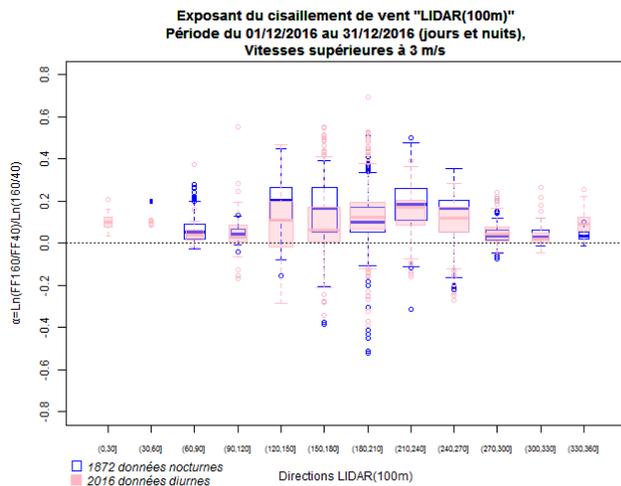


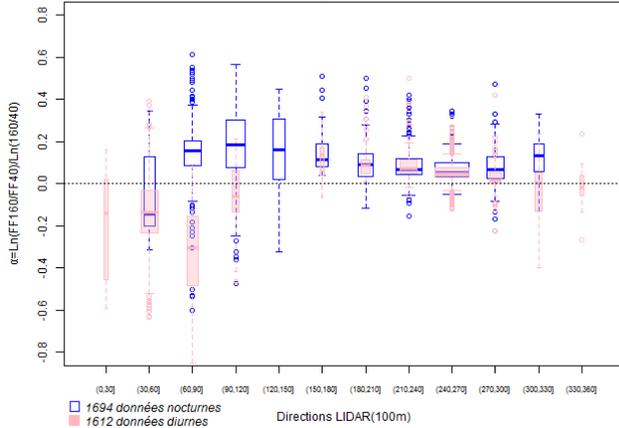
Tableau de répartition (en %)
 Nombre total de cas : 3245

	[3;5[	[5;10[	[10;20[	>20	total
30	0.1	1.7	0.0	. .	1.8
60	. .	0.1	. .	. .	0.1
90	0.3	0.1	. .	. .	0.4
120	0.5	0.2	. .	. .	0.7
150	0.6	1.0	0.3	. .	2.0
180	1.6	8.7	2.2	0.1	12.6
210	1.9	6.5	4.7	0.0	13.2
240	0.9	7.9	6.5	0.1	15.3
270	1.0	7.9	5.6	. .	14.5
300	2.3	7.4	6.0	0.2	15.9
330	1.9	4.4	7.8	0.7	14.8
360	1.1	1.4	1.0	. .	3.6
Total	12.3	47.5	34.2	1.0	95.0
[0; 3[					5.0

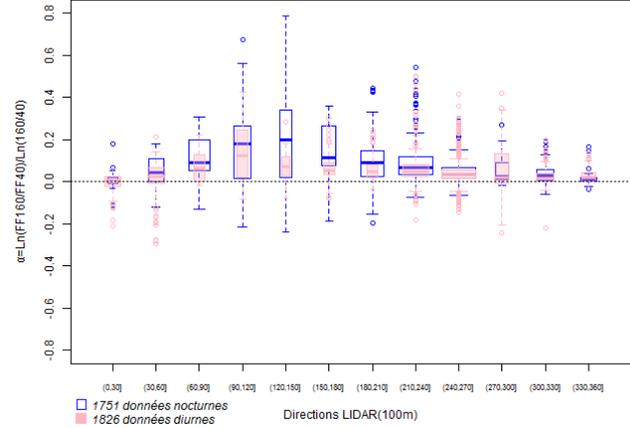
ANNEXE 12 : Cisaillement du vent du LiDAR à 100 m (données brutes seuillées à 3 m/s)



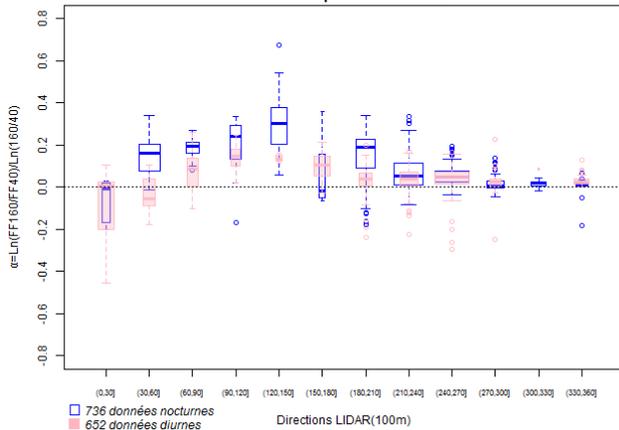
**Exposant du cisaillement de vent "LIDAR(100m)"
Période du 01/06/2017 au 30/06/2017 (jours et nuits),
Vitesses supérieures à 3 m/s**



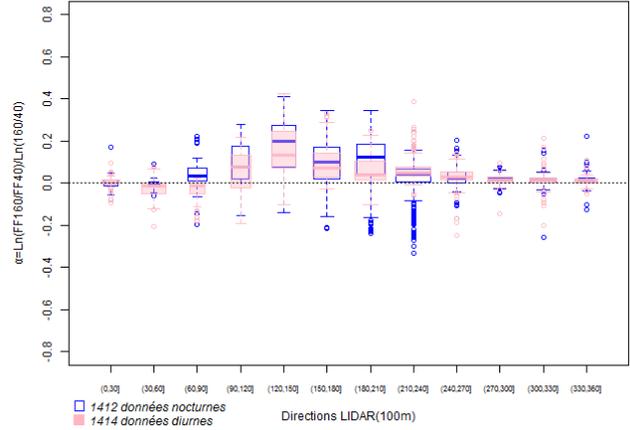
**Exposant du cisaillement de vent "LIDAR(100m)"
Période du 01/07/2017 au 31/07/2017 (jours et nuits),
Vitesses supérieures à 3 m/s**



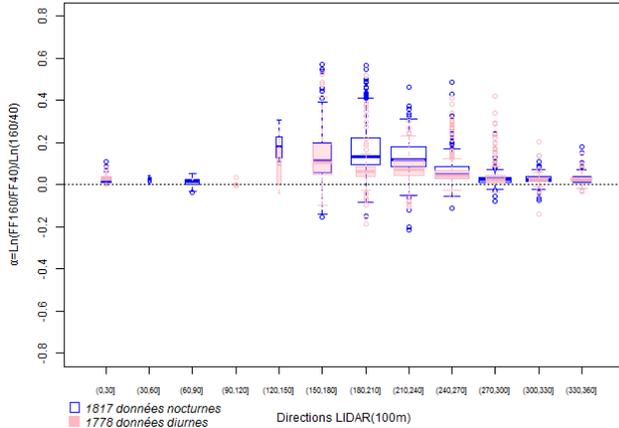
**Exposant du cisaillement de vent "LIDAR(100m)"
Période du 01/08/2017 au 31/08/2017 (jours et nuits),
Vitesses supérieures à 3 m/s**



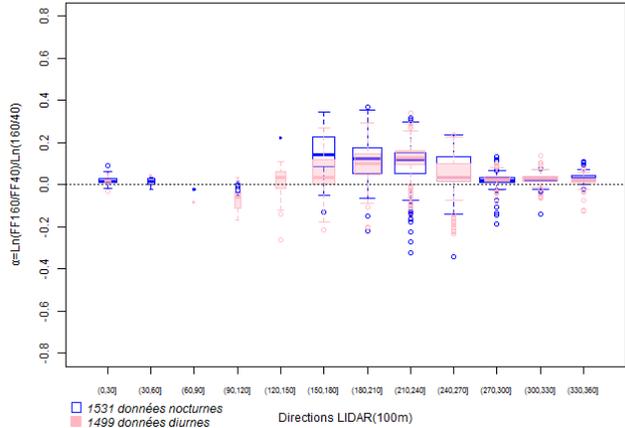
**Exposant du cisaillement de vent "LIDAR(100m)"
Période du 01/09/2017 au 30/09/2017 (jours et nuits),
Vitesses supérieures à 3 m/s**



**Exposant du cisaillement de vent "LIDAR(100m)"
Période du 01/10/2017 au 31/10/2017 (jours et nuits),
Vitesses supérieures à 3 m/s**

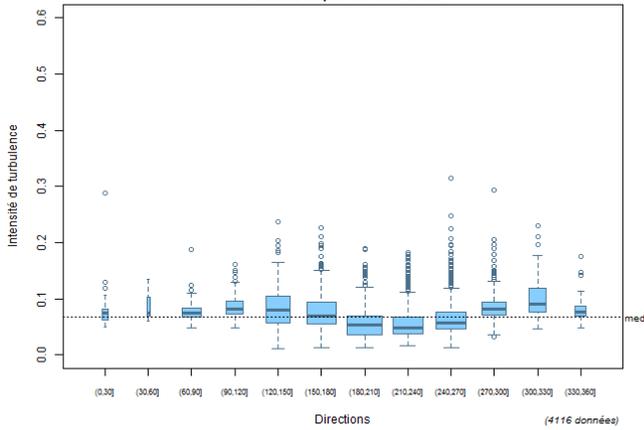


**Exposant du cisaillement de vent "LIDAR(100m)"
Période du 01/11/2017 au 30/11/2017 (jours et nuits),
Vitesses supérieures à 3 m/s**

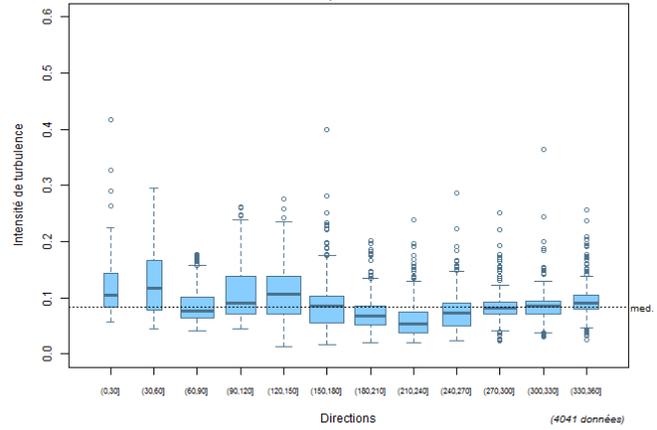


ANNEXE 13 : Turbulence du vent du LiDAR à 100 m (données brutes seuillées à 3 m/s)

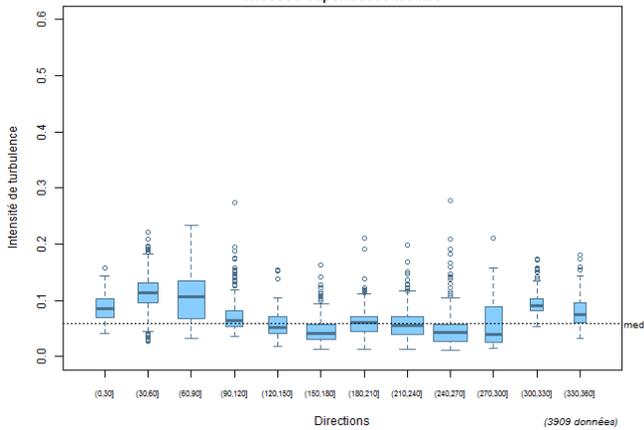
Turbulence du LiDAR à 100 m par directions
Période du 01/12/2016 au 31/12/2016,
Vitesses supérieures à 3 m/s



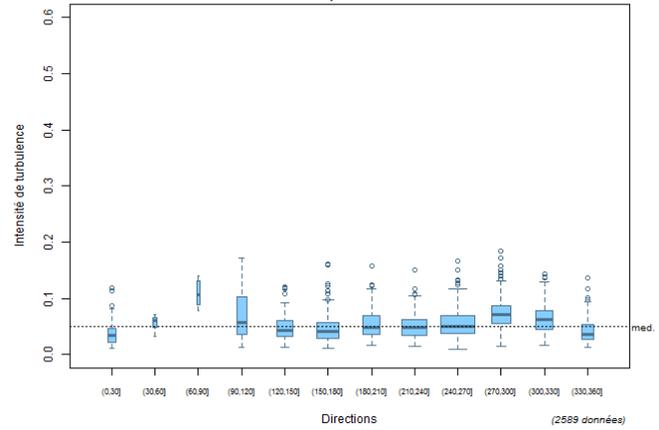
Turbulence du LiDAR à 100 m par directions
Période du 01/01/2017 au 31/01/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



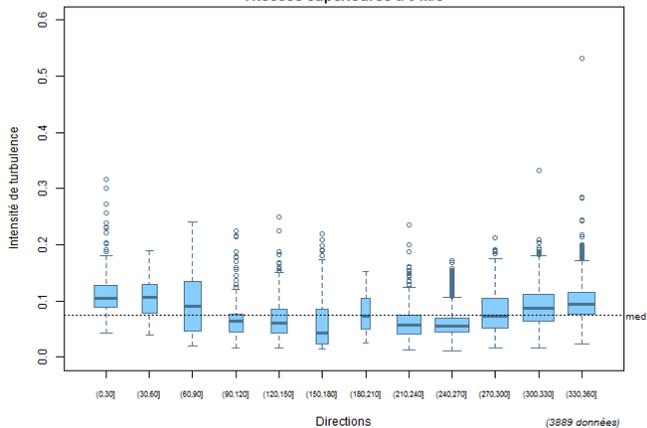
Turbulence du LiDAR à 100 m par directions
Période du 01/02/2017 au 28/02/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



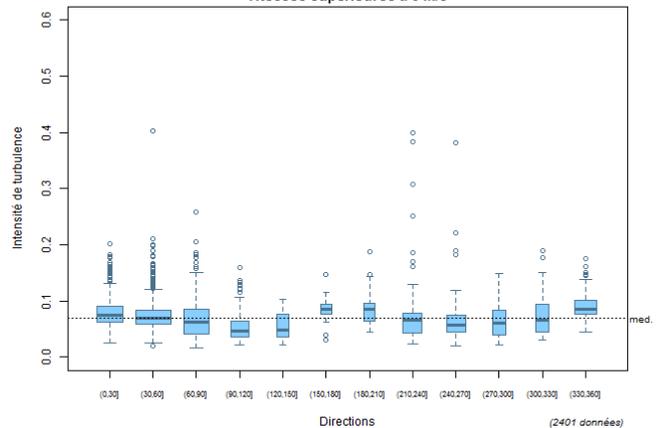
Turbulence du LiDAR à 100 m par directions
Période du 01/03/2017 au 31/03/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



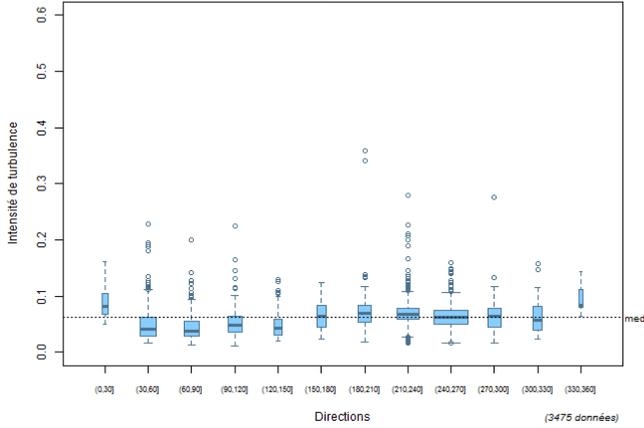
Turbulence du LiDAR à 100 m par directions
Période du 01/04/2017 au 30/04/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



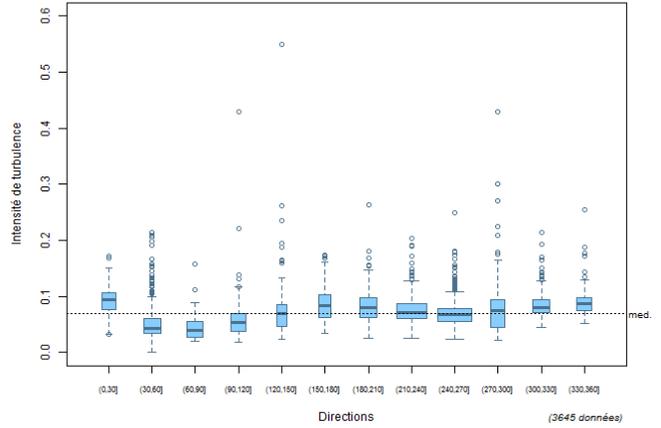
Turbulence du LiDAR à 100 m par directions
Période du 01/05/2017 au 31/05/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



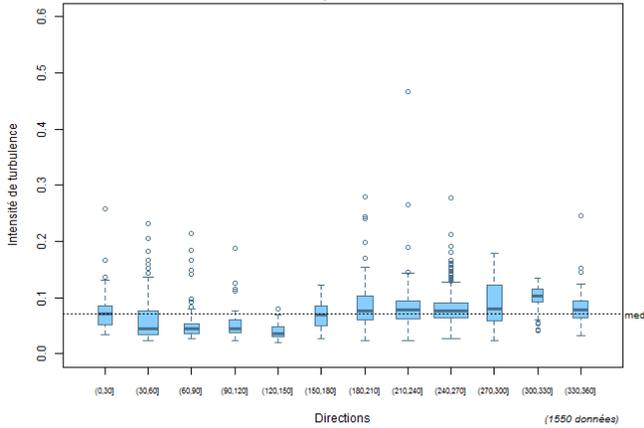
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/06/2017 au 30/06/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



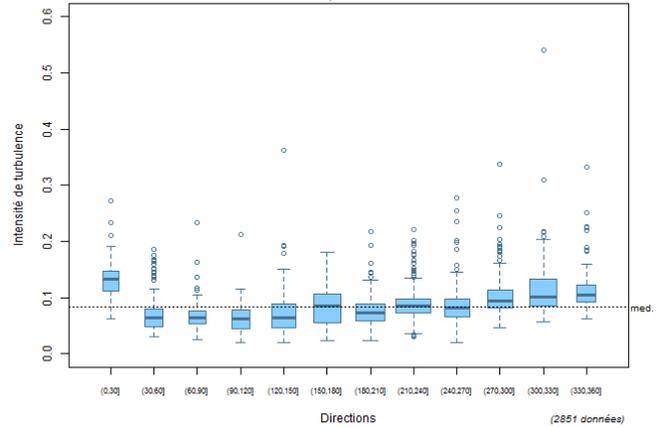
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/07/2017 au 31/07/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



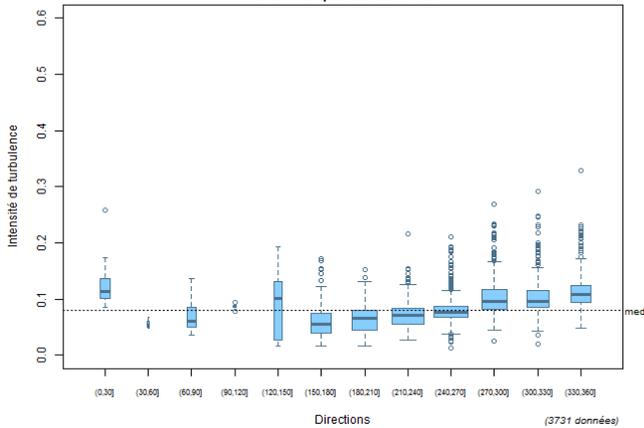
Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/08/2017 au 31/08/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/09/2017 au 30/09/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/10/2017 au 31/10/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s



Turbulence du LIDAR à 100 m par directions
Période du 01/11/2017 au 30/11/2017,
Vitesses supérieures à 3 m/s

