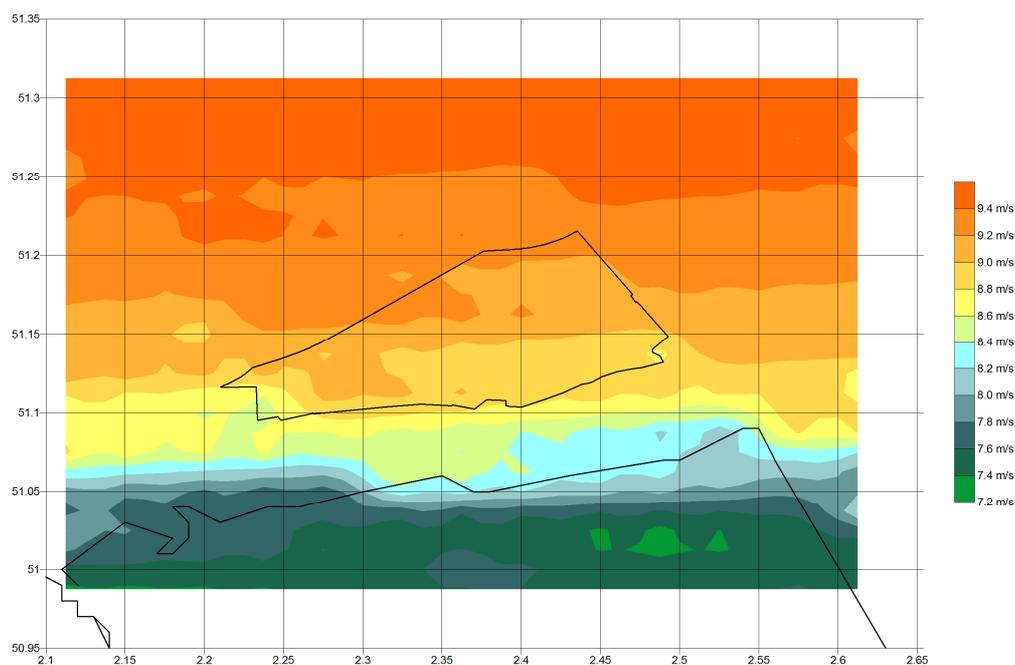


Analyse du risque décennal des forces de vent et des hauteurs de vagues sur la zone de Dunkerque



Version du 02/09/2016

| | | |
|--|--|--|
| <p>Pour la Direction Générale Energie Air et Climat du Ministère de l'Environnement de l'Energie et de la Mer</p> | |   |
|--|--|--|

| | | |
|---|--|---|
| <p>Correspondant commercial : Météo-France, D2C, Toulouse</p> | <p>christophe.periard@meteo.fr + 33 5 61 07 80 85</p> |  |
| <p>Correspondant technique : Météo-France, DIR Ouest, Rennes</p> | <p>franck.baraer@meteo.fr + 33 2 22 51 53 31</p> | |

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| 1- Méthode | 4 |
| 2 – Géographie physique et océanique de la zone | 4 |
| 2.1 Géographie physique..... | 4 |
| 2.2 Géographie marine | 5 |
| 3 – Les différentes situations météorologiques | 6 |
| 3.1 Les situations de sud-ouest..... | 6 |
| 3.2 Les situations de nord à nord-ouest..... | 8 |
| 3.3 Les situations d’est à nord-est | 9 |
| 3.4 Les orages..... | 11 |
| 3.5 Les trombes marines..... | 11 |
| 4 – Climatologie fine du vent | 12 |
| 4.1 Vents observés..... | 12 |
| 4.2 Les vents modélisés..... | 24 |
| 5 - Estimation du potentiel éolien | 31 |
| 5.1 Application du facteur de charge..... | 31 |
| 5.2 Comparaison avec le mât de Kentish Flats (UK)..... | 32 |
| 5.3 Statistiques de potentiel éolien sur la zone Dunkerque (point central) | 32 |
| 5.4 Synthèse du potentiel éolien..... | 35 |
| 6. Les durées de retour des vents forts | 36 |
| 6.1 Durée de retour pour le niveau à 10 mètres | 36 |
| 6.2 Durée de retour pour le niveau à 100 mètres | 37 |
| 7 – L’état de la mer | 39 |
| 7.1 Quelques définitions..... | 39 |
| 7.2 Les données observées | 42 |
| 7.3 Roses de mer du vent modélisées..... | 46 |
| 7.4 Comparaison avec d’autres sources de données | 54 |
| 8 Conclusion..... | 54 |
| 8.1 Pour le vent..... | 54 |
| 8.2 Pour l’état de la mer | 55 |

Annexes :

| | |
|---|---------|
| Annexe1: Description du modèle atmosphérique Arome | page 52 |
| Annexe2: Détails sur la climatologie Arome | page 54 |
| Annexe3: Le modèle de vagues AVAG | page 62 |
| Annexe4 : Analyse d’une situation typique de brise | page 68 |
| Annexe5 : Liste des données fournies en support numérique | page 71 |

L'objet de cette étude consiste à élaborer :

- une climatologie fine du vent dans les basses couches de l'atmosphère (sol 100/160 mètres), au large de Dunkerque à partir de données observées et de données modélisées,
- une présentation des états de mer observés et modélisés au large de Dunkerque.

L'ensemble des données et statistiques seront jointes à ce rapport à l'exception des données observées étrangères.

1- Méthode

Après une description des géographies physique et océanique de la région de Dunkerque, une climatologie fine du vent est élaborée à partir de données observées (françaises, belges et anglaises) et de données du modèle Arome de Météo-France. Une sélection d'un certain nombre de points de grille représentatifs est effectuée pour l'estimation de la distribution spatiale du vent sur la zone d'implantation des éoliennes off-shore. Les données sont présentées sous forme de roses (de vent) et des durées de retour des vents forts sont calculées.

Après le rappel de quelques définitions, la description des états de mer est également proposée sous forme de roses (d'état de mer) et de valeurs observées. Une première estimation des durées de retour est proposée. Le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) complètera cette analyse des vagues et développera cette partie à l'issue des campagnes de mesures qui vont être mises en place durant l'été 2016.

2 – Géographie physique et océanique de la zone

2.1 Géographie physique

Dunkerque se situe 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. En face, à une distance minimale de 33 km se positionne Douvres sur la côte anglaise. Les côtes françaises et anglaises réunissent des paysages variés composés de plages de dunes mais aussi de falaises qui culminent par endroits au-delà de 40 mètres. Ces falaises en bordure du détroit canalisent le vent pour les directions du sud-ouest et du nord-est et en accélèrent la vitesse par effet Venturi. Cette zone 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.

l'état de la mer entre le large et le littoral. Le marnage à Dunkerque dépasse les 5 mètres voire les 6 mètres par marée de vives eaux. Sur la figure 2.2, la couleur « bleu clair » correspond à une hauteur d'eau entre 10 et 20 mètres, celle « bleu foncé » à des hauteurs inférieures à 10 mètres, celle « blanche » à des hauteurs supérieures à 20 mètres. Le niveau de référence est le zéro hydrographique qui correspond à la hauteur d'eau de la basse-mer de coefficient maximal 120. Les corrections apportées aux cartes marines sont régulières. La date de la carte présentée ici est inconnue.

On rappelle que le SHOM (Service Hydrographique et Océanographie de la Marine) est chargé d'affiner la connaissance hydrographique de la zone.

3 – Les différentes situations météorologiques

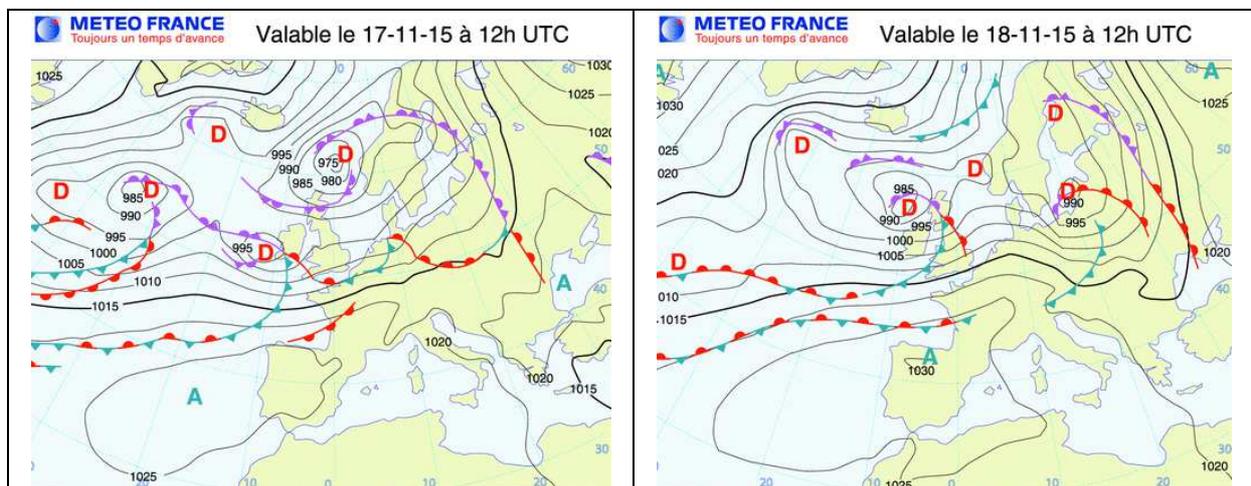
La situation météorologique sur la Manche et la Mer du Nord dépend de la position :

- de l'anticyclone des Açores,
- de la dépression d'Islande,
- de hautes pressions continentales (surtout pour les vents de nord-est à est l'hiver).

Le vent est directement influencé par l'écart entre les lignes isobares (lignes d'égales pressions). Plus ces lignes sont resserrées plus le vent est fort.

De fortes rafales de vent s'observent aussi sous les cumulonimbus (nuages à fort développement vertical) que l'on trouve dans les ciels de traîne, à l'arrière des fronts froids ou lors d'épisodes orageux. Chaque type de situation ci-dessous est illustré par plusieurs cartes et par un profil vertical du vent moyen entre le sol et 160 mètres. Ces données de vent sont extraites du modèle Arome pour un jour et une heure précises, à tous les niveaux disponibles jusqu'à 160 m. Au passage d'un front le profil vertical de vent peut être perturbé par l'apparition de « jets » de basses couches (renforcement ponctuel du vent à l'avant du front). La campagne de mesures in situ apportera un complément d'informations.

3.1 Les situations de sud-ouest



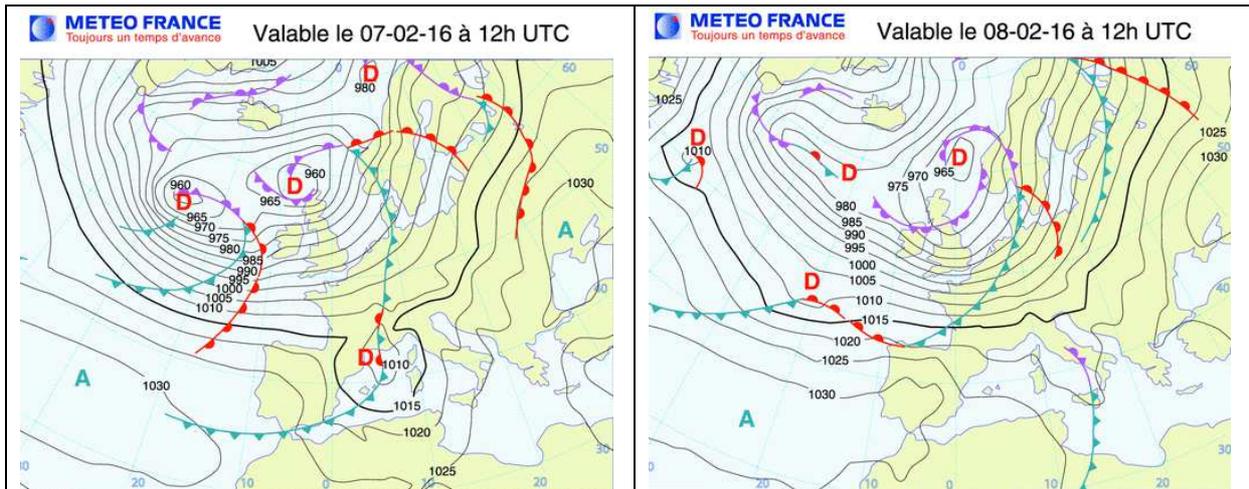
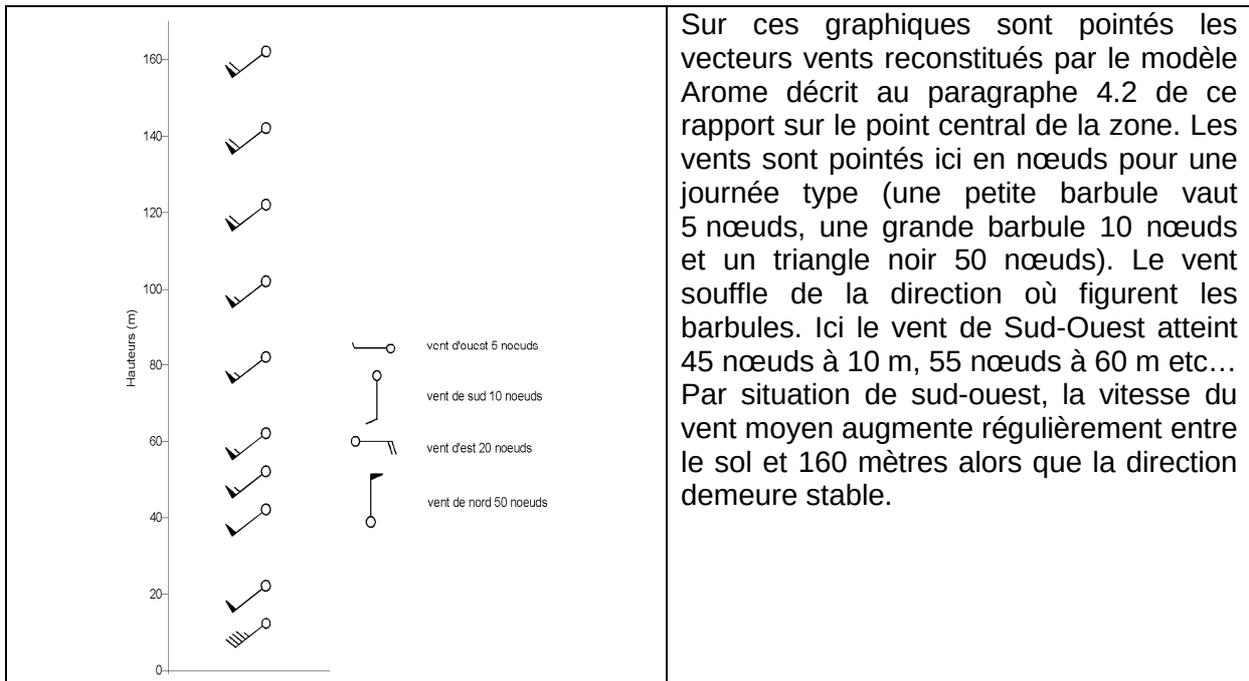


Figure n°3.1a : cartes isobariques correspondant aux situations typiques de Sud-Ouest

Sur les 4 cartes ci-dessus, l'anticyclone des Açores se situe de l'ouest de l'Espagne à la mer Méditerranée. Sa position permet aux dépressions issues de celle d'Islande de circuler sur l'Europe du Nord. Chaque dépression est accompagnée d'une perturbation. Lors du passage des fronts chauds (en rouge) mais surtout au passage des fronts froids (en bleu) du cisaillement de vent (changement de direction et ou de vitesse) se produit, dans les basses couches de l'atmosphère, sur des distances très courtes (quelques kilomètres). Ceci est valable pour toutes les situations décrites dans ce paragraphe.

Le vent de sud-ouest, plutôt doux, souffle régulièrement.



Sur ces graphiques sont pointés les vecteurs vents reconstitués par le modèle Arome décrit au paragraphe 4.2 de ce rapport sur le point central de la zone. Les vents sont pointés ici en nœuds pour une journée type (une petite barbule vaut 5 nœuds, une grande barbule 10 nœuds et un triangle noir 50 nœuds). Le vent souffle de la direction où figurent les barbules. Ici le vent de Sud-Ouest atteint 45 nœuds à 10 m, 55 nœuds à 60 m etc... Par situation de sud-ouest, la vitesse du vent moyen augmente régulièrement entre le sol et 160 mètres alors que la direction demeure stable.

Figure n°3.1b : profil du vent de 10 à 160 m pour une situation typique de Sud-Ouest

3.2 Les situations de nord à nord-ouest

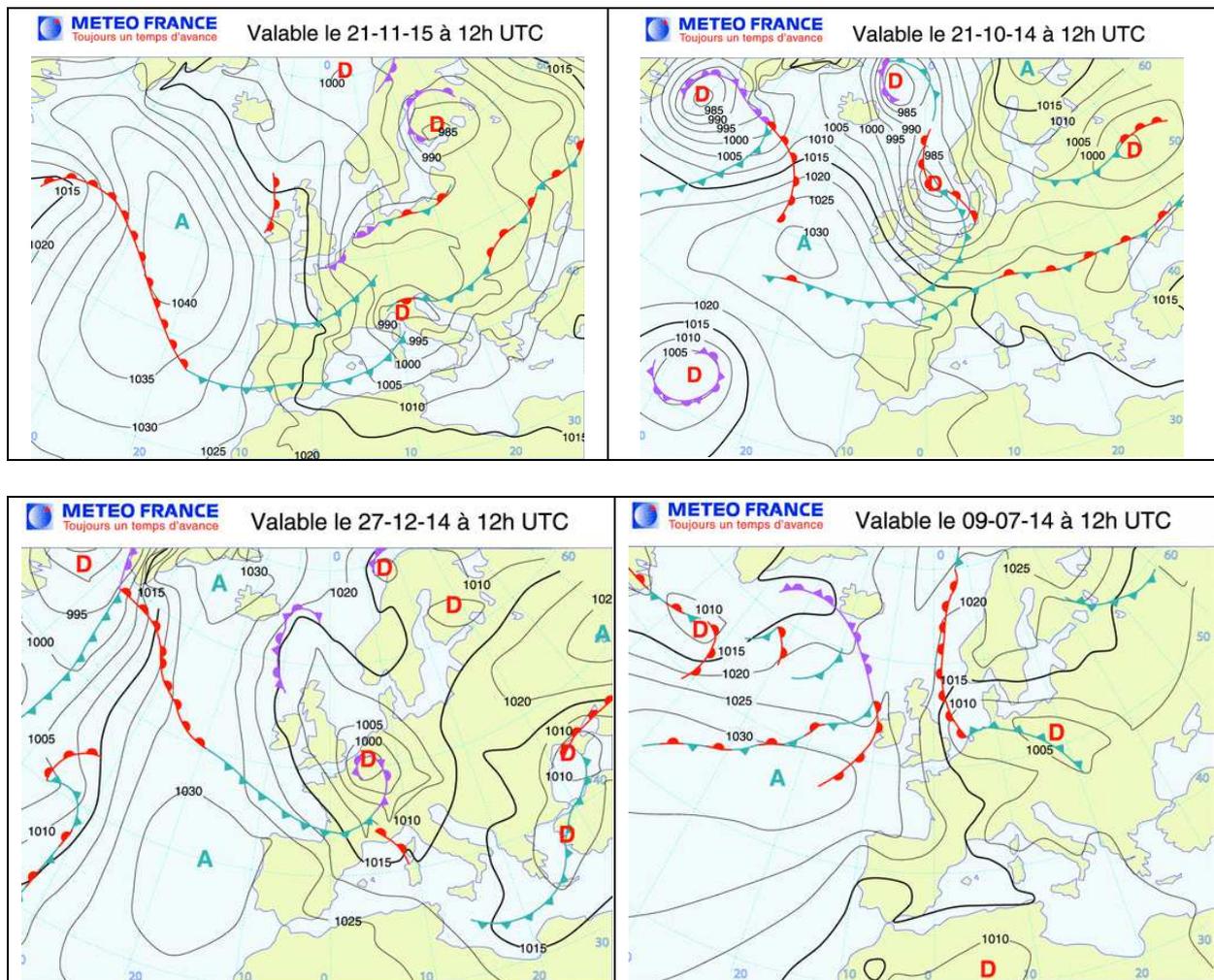


Figure n°3.2a : cartes isobariques correspondant à une situation typique de Nord Nord-Ouest

Ces 4 situations se caractérisent par :

- l'anticyclone des Açores positionné à l'ouest de l'Irlande sur l'Atlantique,
- une zone dépressionnaire à l'est des hautes pressions.

La position des dépressions pour le 21 octobre 2014 et le 27 décembre 2014 renforce le vent de nord à nord-ouest sur l'est de la Manche et sur la mer du Nord. Les vents de nord-ouest ou de nord soufflent irrégulièrement et ils sont plus turbulents. Les rafales associées sont souvent marquées dans une masse d'air instable quand de l'air froid circule en altitude au dessus d'une surface plus chaude (sol ou mer).

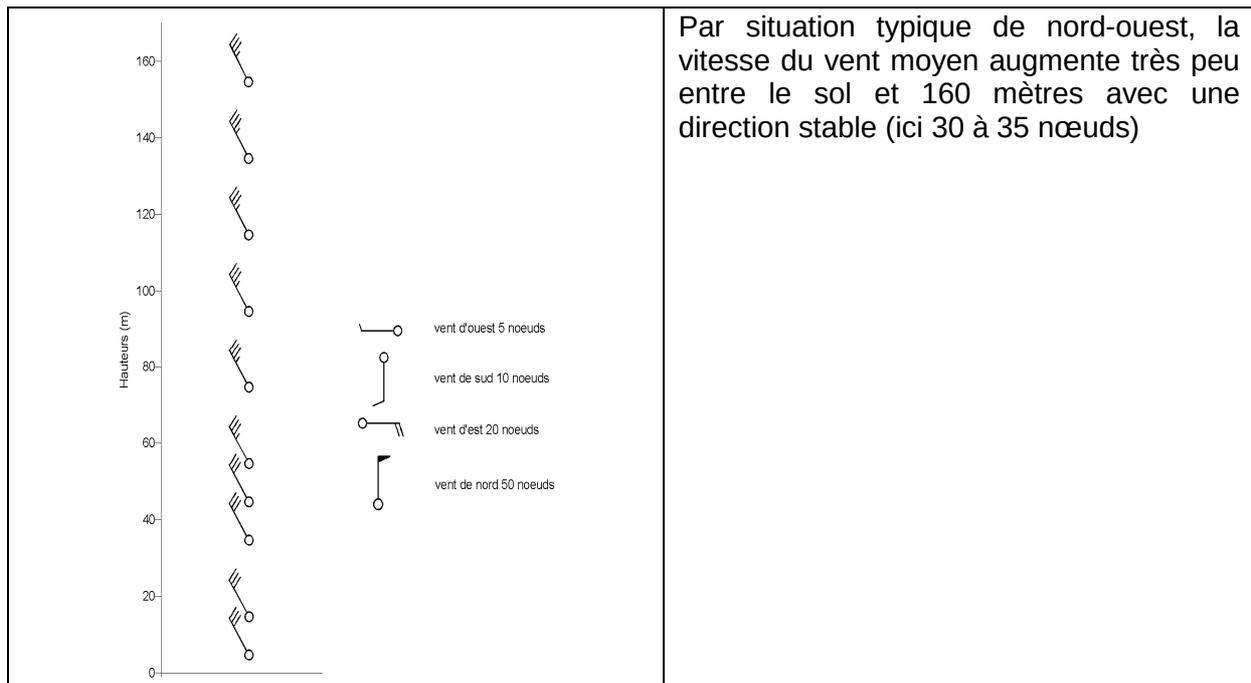


Figure n°3.2b : profil vertical du vent de 10 à 160 m correspondant à une situation typique de Nord-Ouest

3.3 Les situations d'est à nord-est

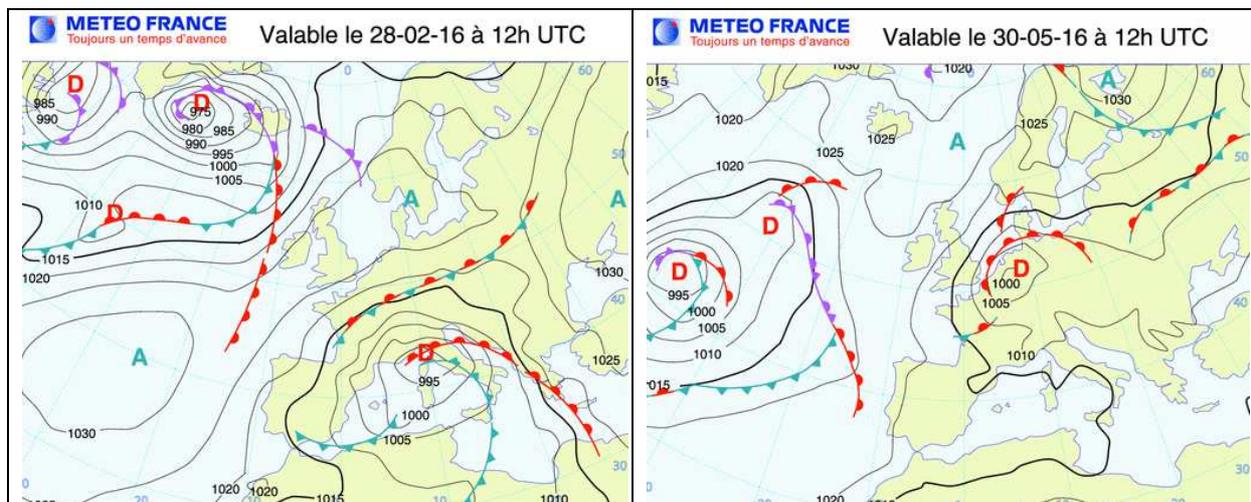
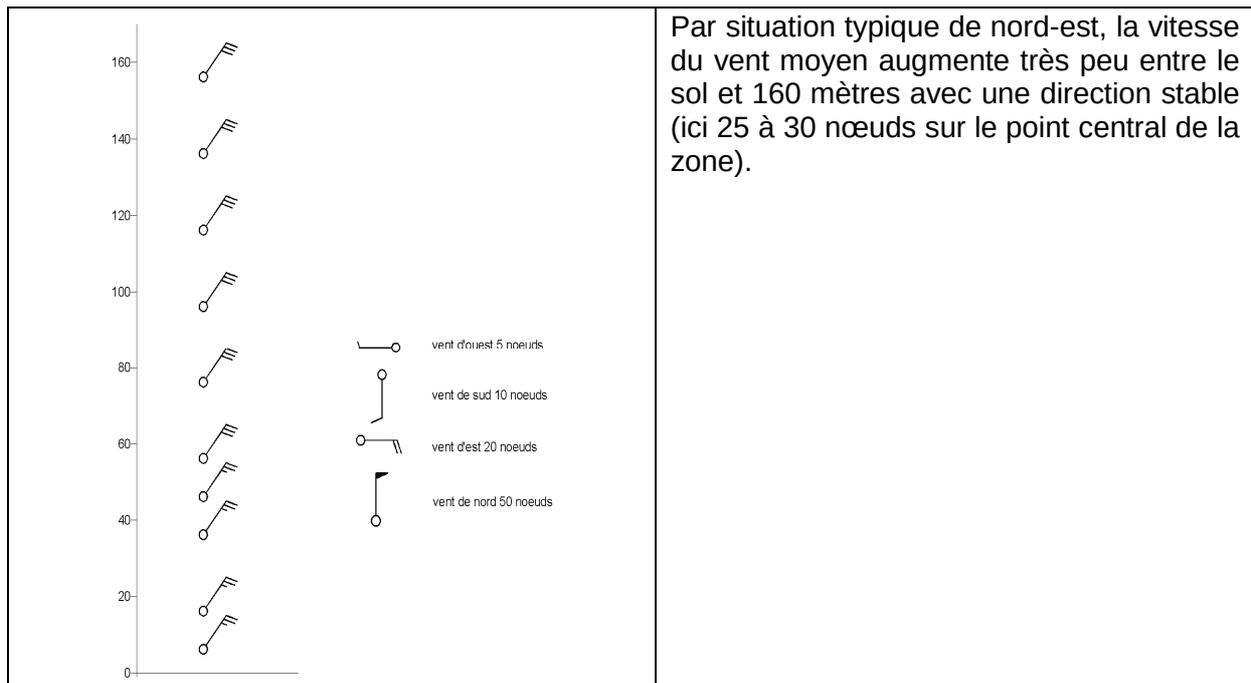


Figure n°3.3a : cartes isobariques correspondant à une situation typique de Nord-Est

Pour ces 2 situations, les hautes pressions repoussent les perturbations océaniques vers le nord. Les basses pressions se situent souvent en mer Méditerranée d'où elles ramènent sur le nord de la France des retours humides qui génèrent des chutes de neige l'hiver. Les vents d'est à nord-est sont des vents réguliers qui accentuent la sensation de froid surtout en hiver.



Par situation typique de nord-est, la vitesse du vent moyen augmente très peu entre le sol et 160 mètres avec une direction stable (ici 25 à 30 nœuds sur le point central de la zone).

Figure n°3.3b : profil du vent de 10 à 160 m correspondant à une situation typique de Nord-Est

3.4 Les orages

Les orages démarrent à partir de mouvements verticaux générés par l'approche d'un front, près d'un relief ou de par un différentiel important de températures de la masse d'air entre les basses couches, chaudes et les hautes altitudes, froides. Ces courants ascendants vont donner naissance, par compensation, à des mouvements subsidents (vers le bas), l'ensemble permet le développement de nuages à forte extension verticale : les cumulonimbus. Ces derniers s'accompagnent d'averses de pluie de grêle, de neige... d'orages et de fortes rafales de vent. Ils peuvent donner lieu à la formation de trombes sur mer et de tornades sur terre.

3.5 Les trombes marines

Ce sont des phénomènes tourbillonnaires violents mais de petite échelle liés à des cumulonimbus et de courte durée de vie (inférieure à une heure).



Figure 3.5.a : deux trombes marines à proximité des Bahamas (photo Patricia Vazquez)

La partie sur les trombes sera développée dans le lot 2 de cette étude.

Les observations utilisées couvrent la période 2000 à 2015 pour être comparées avec les données modélisées par AROME (cf. paragraphe 4.2.2).

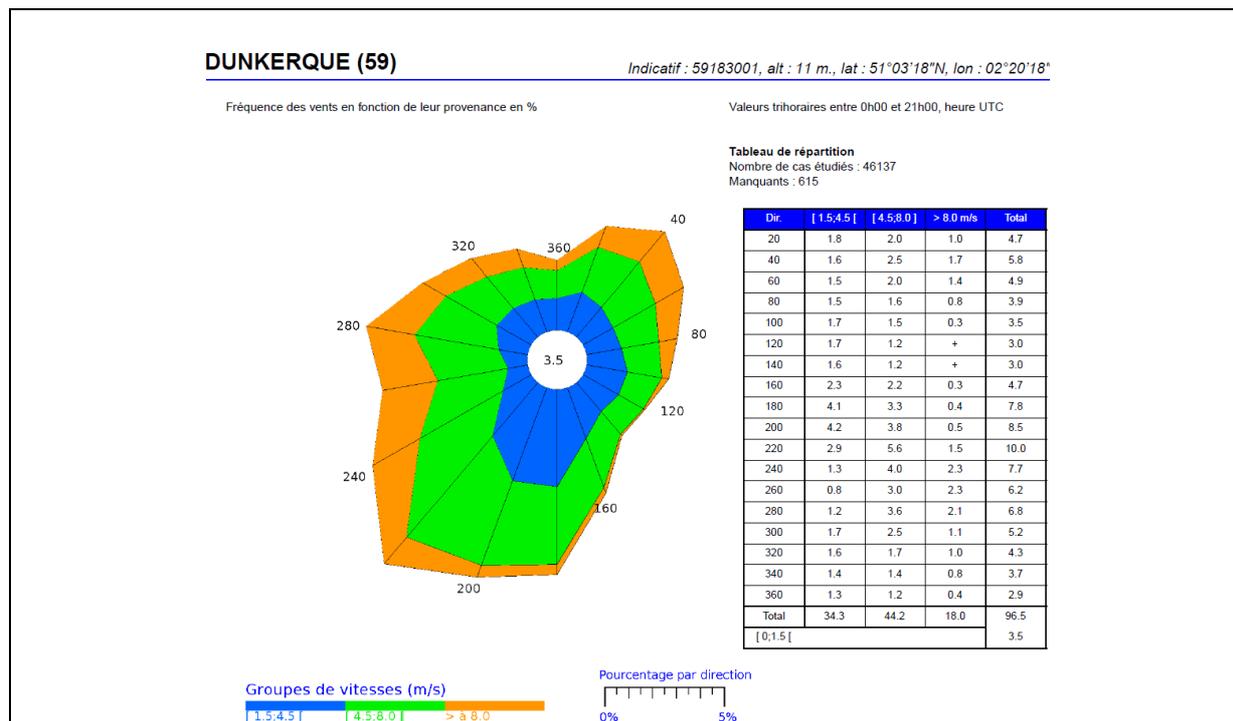


Figure 4.1.1.b : rose annuelle des vents horaires moyennés sur 10 minutes à Dunkerque pour la période 2000/2015

Les directions de vent comprises entre le 180 et le 240 ° (secteur sud à sud-ouest) comptabilisent 34 % des observations. Les directions nord-ouest et nord-est sont aussi bien représentées. Le sud-ouest et le nord-est correspondent à l'axe Manche/sud mer du Nord, les vitesses associées sont influencées par le relief des côtes anglaises et françaises. Les vitesses horaires moyennés sur 10 minutes du vent inférieures à 4,5 m/s représentent 37,8 % des observations, celles supérieures à ce seuil 62,2 %.

Chaque rose saisonnière ci-dessous est comparée à la rose annuelle de Dunkerque (figure 4.1.1.b - période 2000 à 2015).

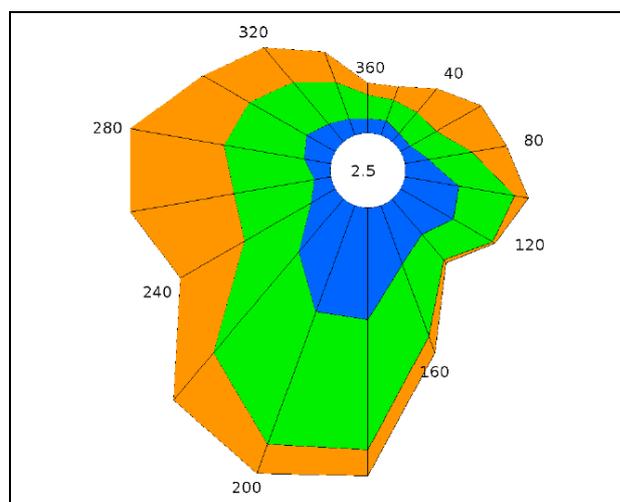


Figure 4.1.1.c : rose d'hiver à Dunkerque (décembre à février - période 2000/2015)

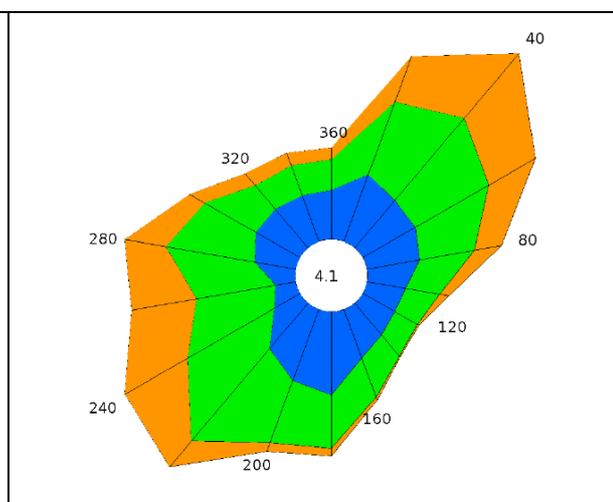


Figure 4.1.1.d : rose de printemps à Dunkerque (mars à mai - période 2000/2015)

La rose saisonnière d'hiver (figure 4.1.1.c) présente une atténuation des observations de vent du 040 ° et une augmentation des vents du 180 au 200 °, par rapport à la rose annuelle. La rose saisonnière de printemps (figure 4.1.1.d) présente une augmentation des observations de vents du 360 au 040 °, par rapport à la rose annuelle.

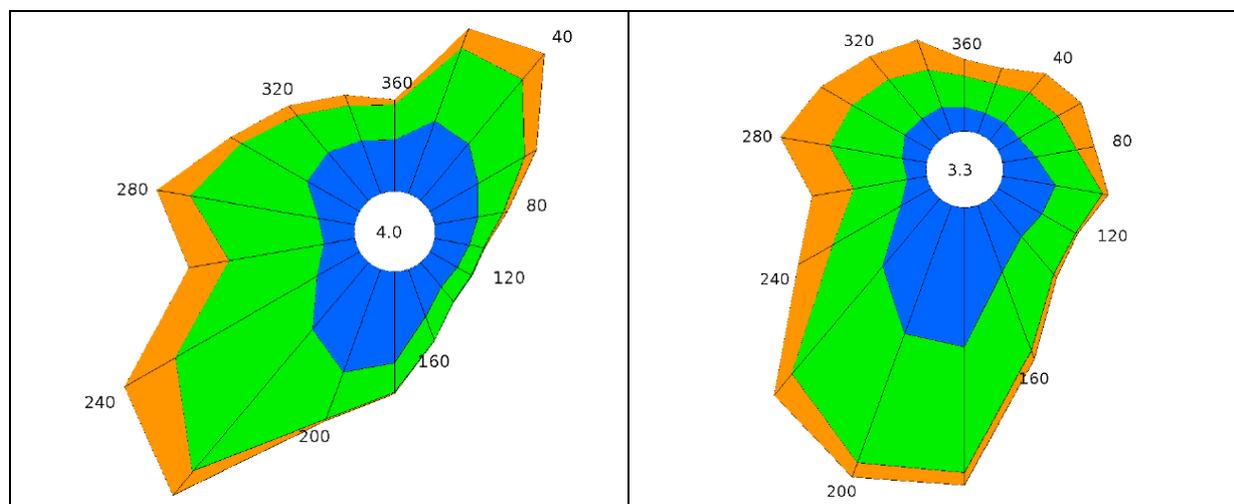


Figure 4.1.1.e : rose d'été à Dunkerque (juin à août - période 2000/2015)

Figure 4.1.1.f : rose d'automne à Dunkerque (septembre à novembre - période 2000/2015)

La rose saisonnière d'été (figure 4.1.1.e) présente une augmentation des observations de vent dans le 220 ° et le 040 °, par rapport à la rose annuelle.

La rose saisonnière d'automne (4.1.1.f) présente une augmentation des observations de vent du 100 au 200 ° et une atténuation du vent de nord-est, par rapport à la rose annuelle.

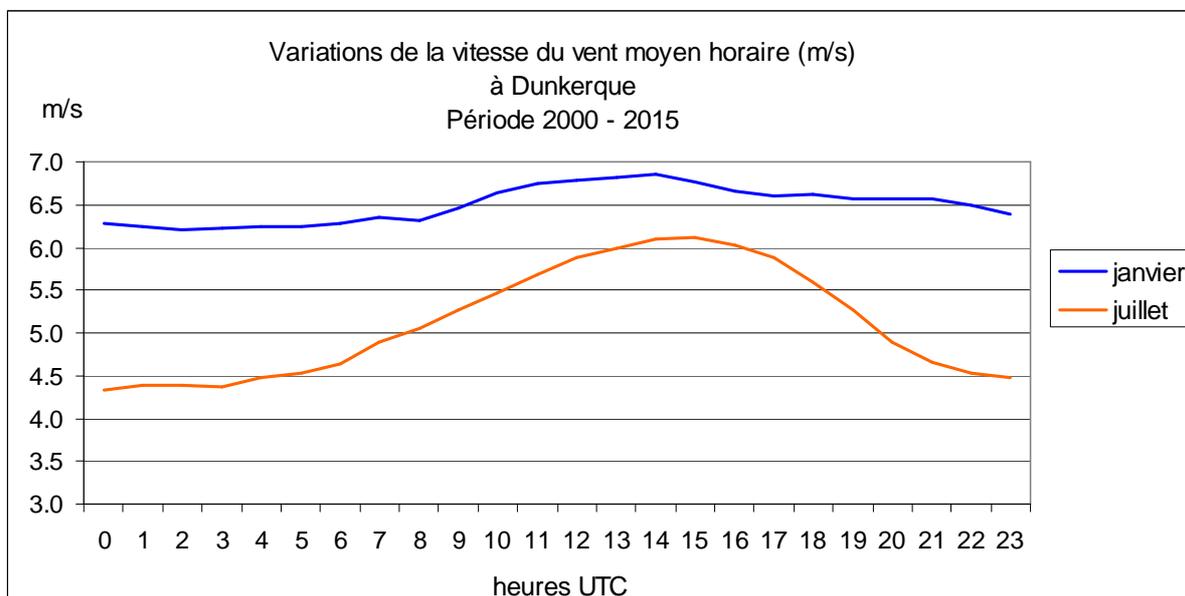


Figure 4.1.1.g : variations diurnes de la vitesse du vent en janvier et en juillet

Le graphique ci-dessus rend compte de l'évolution moyenne du vent mesuré à 10 m au cours de la journée suivant la saison : la vitesse subit peu de variations en hiver, tout en étant plus élevée en moyenne, alors qu'en été, le phénomène de convection est à l'origine de variations plus marquées entre la nuit et la journée.

Conclusion :

- 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 fortes rafales sont majoritairement associées à des vents de sud-ouest.

4.1.2 Boulogne

Le sémaphore de Boulogne se positionne à une altitude de 73 mètres, en retrait du port (flèche rouge figure 4.1.2.a). Cette station est représentative des directions de vent au sud du détroit du Pas de Calais. Les vitesses sont moins représentatives du fait de son altitude. La classe de performance du vent est de 4 sur une échelle de 5 (qualité décroissante de 1 à 5). La présence de bâtiments dans l'ouest du capteur peut altérer la mesure du vent dans cette direction.

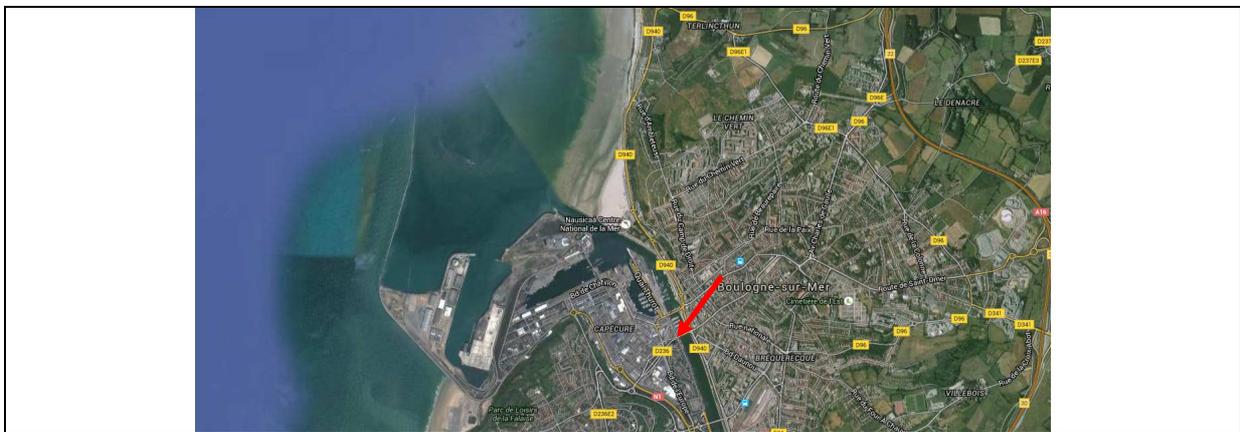


Figure 4.1.2.a : carte du port de Boulogne-sur-Mer – Le sémaphore est pointé par la flèche rouge

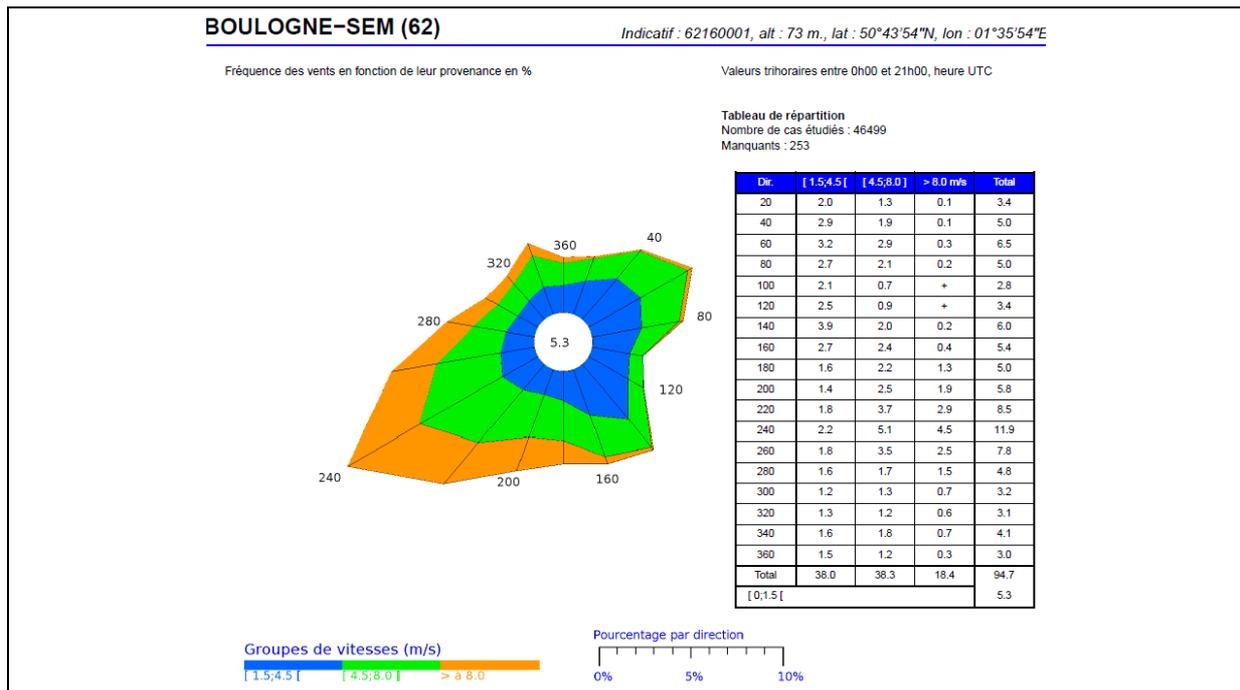


Figure 4.1.2.b : rose annuelle des vents horaires moyennés sur 10 minutes à Dunkerque pour la période 2000/2015

Les directions du vent dominant sont comprises entre le 200 et le 280 ° (secteur sud-ouest à ouest) avec un pic dans le 240 °. Il est aussi observé des pics de vent pour les directions 340, 060 et 140 °. La forme générale de la rose est orientée Manche/sud mer du Nord. Les vitesses maximales moyennées sur 10 minutes du vent supérieures ou égales à 4,5 m/s représentent 56,7 % des observations.

Chaque rose saisonnière ci-dessous est comparée à la rose annuelle de Boulogne (période 2000/2015).

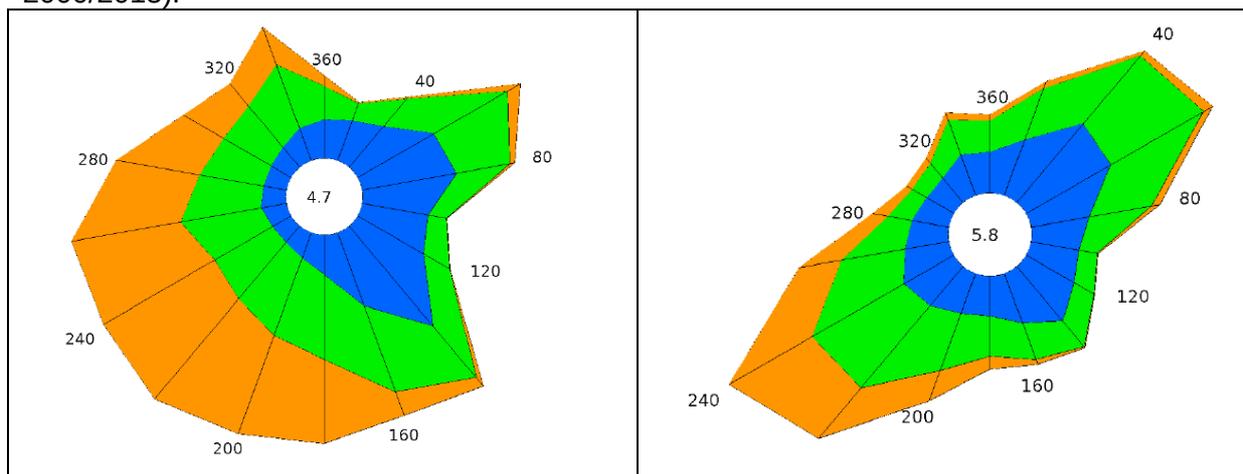


Figure 4.1.2.c : rose d'hiver à Boulogne (décembre à février - période 2000/2015)

Figure 4.1.2.d : rose de printemps à Boulogne (mars à mai - période 2000/2015)

La rose saisonnière d'hiver (figure 4.1.2.c) présente une augmentation des observations de vent du 140 au 200 ° et du 280 au 340 °.

La rose saisonnière de printemps (4.1.2.d) présente une augmentation des observations de vents du 020 au 080 °.

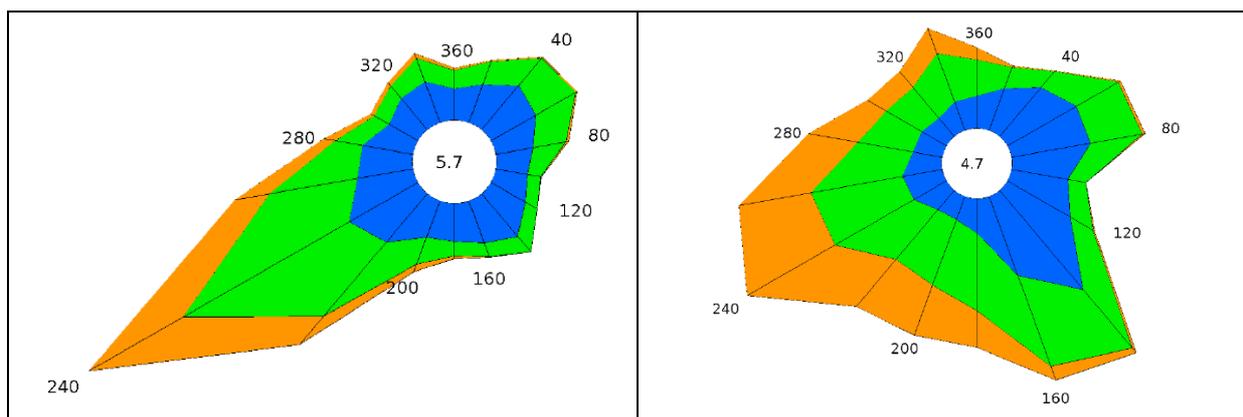


Figure 4.1.2.e : rose d'été à Boulogne (juin à août - période 2000/2015)

Figure 4.1.2.f : rose d'automne à Boulogne (septembre à novembre - période 2000/2015)

La rose saisonnière d'été (4.1.2.e) présente une nette augmentation des observations de vent du 220 au 260 ° (avec effets de brise de mer).

La rose saisonnière d'automne (4.1.2.f) présente une augmentation des observations de vent du 140 au 180 ° et une atténuation de vent de nord-est.

Conclusion :

- la région de Boulogne connaît très peu de périodes de vent calme
- le pourcentage de vent de sud-ouest est supérieur à celui pour Dunkerque ; le détroit du Pas-de-Calais influe sur la répartition spatiale du vent
- les allures générales des roses de printemps et d'été sont proches
- les allures générales 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 fortes rafales sont majoritairement associées à des vents de sud-ouest et 2 fois plus nombreuses qu'à Dunkerque avec une altitude du sémaphore plus élevée.

4.1.3 Les observations étrangères

Des observations de vent sont disponibles depuis le 1^{er} janvier 2000 pour les stations du tableau ci-dessous.

| Nom | Indicatif | Début | Fin | Position |
|-----------------|-----------|------------|------------|--------------------|
| Manston | 03797 | 2000010100 | 2016060123 | 51°21'N – 01°21' E |
| Ostende Airport | 06407 | 2000010100 | 2016060123 | 51°12'N – 02°52' E |
| Langdon Bay | 03796 | 2000010100 | 2016060123 | 51°08'N – 01°21' E |
| Bouée 620170 | 62170 | 2009010100 | 2015123123 | 51°24'N – 02°00' E |

La croix noire correspond à Dunkerque.

La station de Manston est désignée par la flèche rouge

La station d'Ostende est désignée par la flèche magenta

La station de Langdon Bay est désignée par la flèche noire

La bouée 620170 sur un bateau phare est désignée par la flèche verte

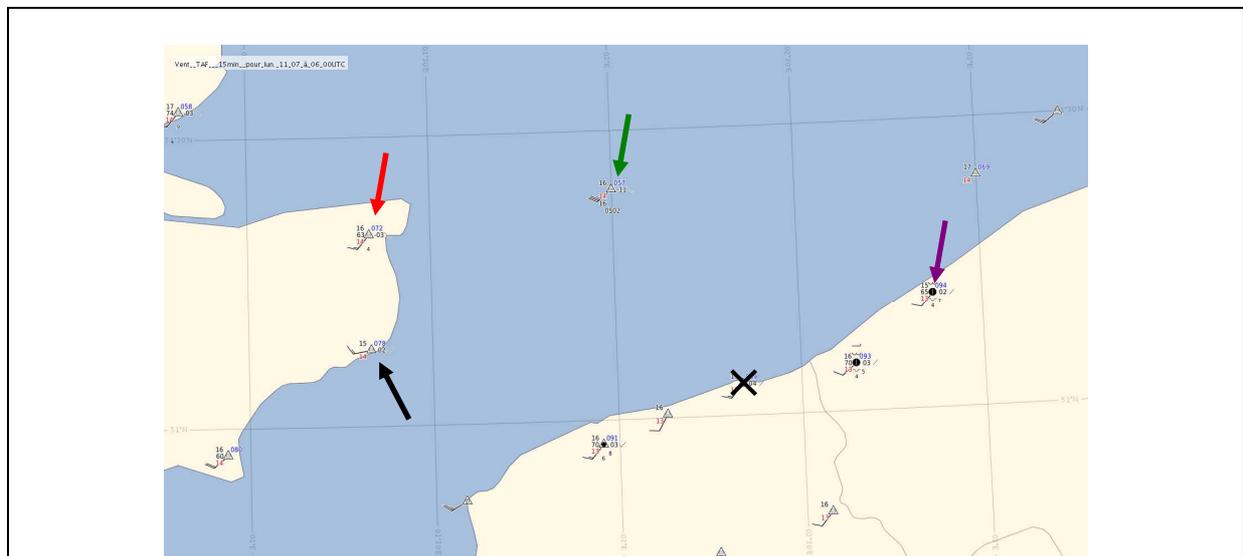
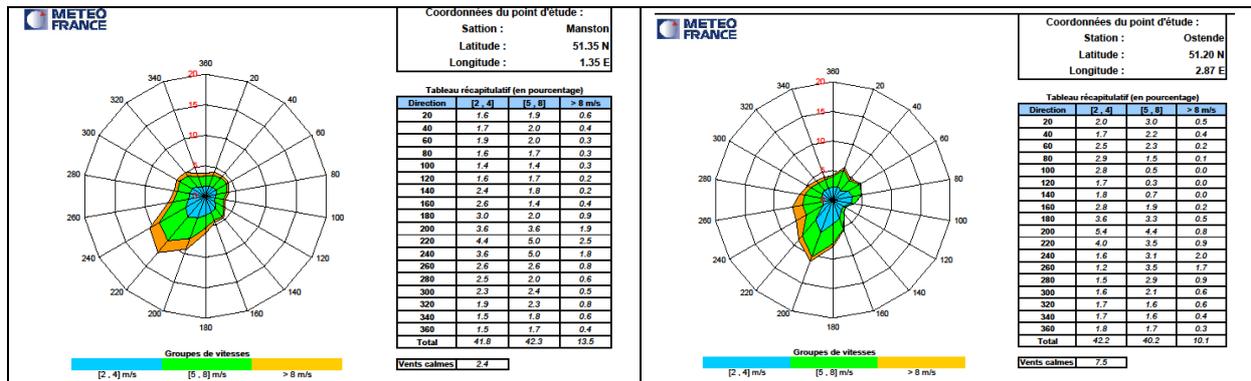
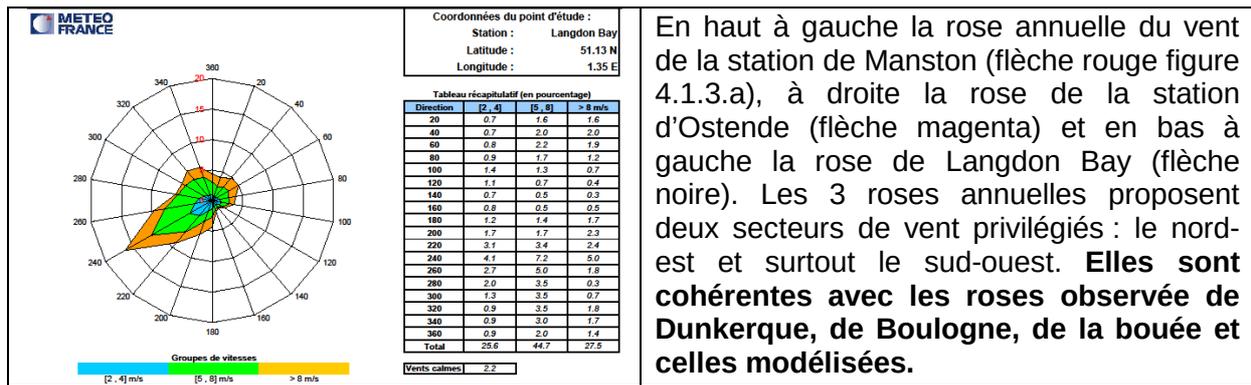


Figure 4.1.3 .a : Position des points de mesure observation le 11 juillet 2016 à 06 UTC





En haut à gauche la rose annuelle du vent de la station de Manston (flèche rouge figure 4.1.3.a), à droite la rose de la station d'Ostende (flèche magenta) et en bas à gauche la rose de Langdon Bay (flèche noire). Les 3 roses annuelles proposent deux secteurs de vent privilégiés : le nord-est et surtout le sud-ouest. Elles sont cohérentes avec les roses observée de Dunkerque, de Boulogne, de la bouée et celles modélisées.

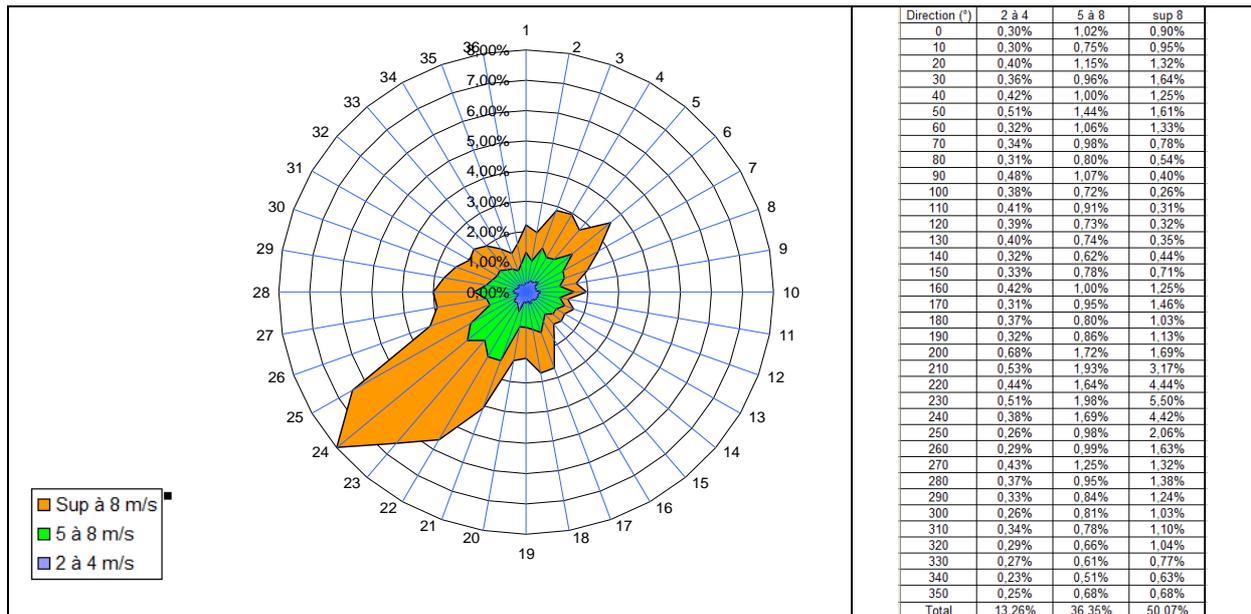


Figure 4.1.3 .b : rose de vent par la bouée 620170 pour la période 2009/2015

La figure 4.1.1.3.b propose une rose de vent à partir des mesures de la bouée 610170 ancrée dans le sud de la mer du Nord (flèche verte figure 4.1.3.a) sur la période 2009 à 2015. Les données sont incomplètes notamment entre février 2012 et avril 2013. Deux secteurs de direction du vent sont privilégiés : le nord-est et surtout le sud-ouest. Le pourcentage de vitesse du vent supérieure ou égale à 8 m/s atteint 50 % des observations et celui inférieure à 4 m/s 13,3 %. L'allure générale de la rose présente de grandes similitudes avec celles du modèle Arome (voir partie nord-ouest de la carte paragraphe 4.2.1). Celle-ci est toutefois plus perturbée au niveau des directions car celles-ci sont utilisées tous les 10° pour cette rose alors que les autres sont arrondies de 20 en 20°.

4.1.4 Le phénomène de brise à Dunkerque

Le trait de séparation entre la mer et la terre, ou plus généralement entre la terre et une étendue d'eau, constitue une ligne de discontinuité pour les différents paramètres météorologiques. Les brises sont des phénomènes qui se créent lorsqu'un contraste thermique important se met en place entre les deux surfaces. L'orientation du vent synoptique (vent de gradient), lié à la position des centres d'action, va s'en trouver modifiée.

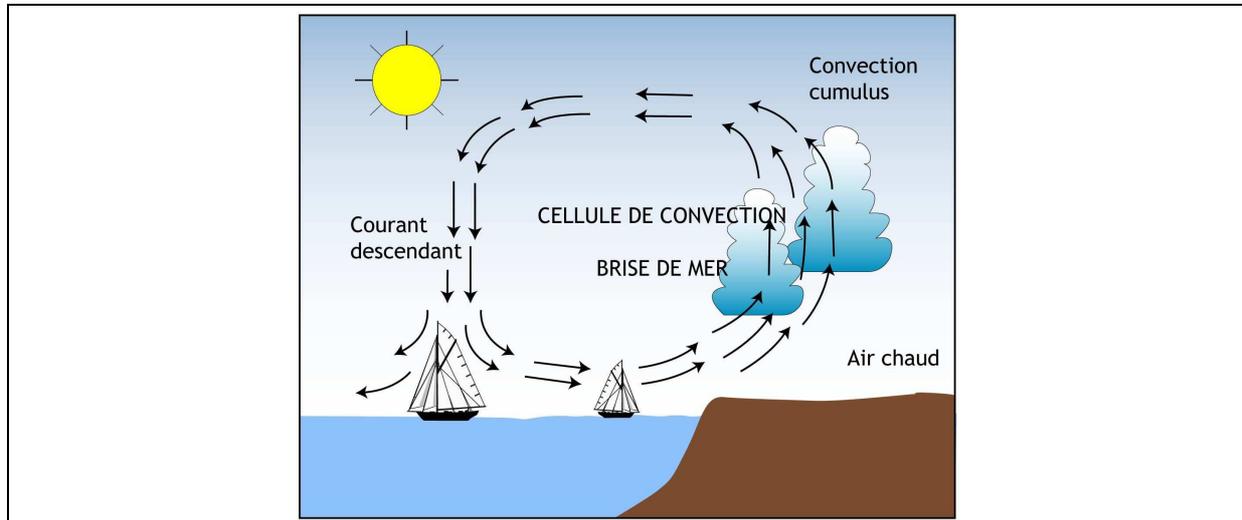


Figure 4.1.4.a : illustration du phénomène de brise de mer

Au cours de la journée, le sol se réchauffe sous l'action du rayonnement solaire plus rapidement que la mer. Par conduction tout d'abord puis par convection, il transmet une grande partie de la chaleur emmagasinée, aux basses couches de l'atmosphère. La pression dans cet air ascendant décroît donc avec l'altitude plus lentement sur terre que sur mer. Les surfaces isobares s'inclinent vers le large et un courant de pente se forme en altitude de la côte vers le large (où il se crée de la subsidence). Dans le même temps, près du sol, un afflux horizontal d'air maritime (donc humide) vient compenser l'ascendance d'air sur terre et peut être à l'origine de formations nuageuses si l'air est potentiellement instable dans les basses couches (voir le front de brise ci-après). Cet afflux constitue la **brise de mer**.

La brise de mer peut pénétrer à environ 50 km à l'intérieur des terres. L'extension du courant subsident (vers le bas) en mer est, par contre, difficilement quantifiable. Les brises de mer peuvent théoriquement atteindre 45 à 50 nœuds abstraction faite des forces de frottement. Dans la réalité, elles atteignent généralement 10 à 15 nœuds (5 à 8 m/s) et l'épaisseur de la couche intéressée par ce phénomène est de l'ordre de 1 000 à 2 000 mètres en moyenne.

Au cours de la nuit, le phénomène s'inverse. A cause du rayonnement nocturne, accentué par la présence d'un ciel dégagé, le sol se refroidit rapidement alors que la mer, en raison de son inertie thermique, reste tiède. Les courants ascendants prennent naissance sur mer et un courant de compensation venant de la terre s'établit. C'est la **brise de terre**. Cette dernière n'a toutefois que très rarement l'intensité et l'extension des brises de mer.

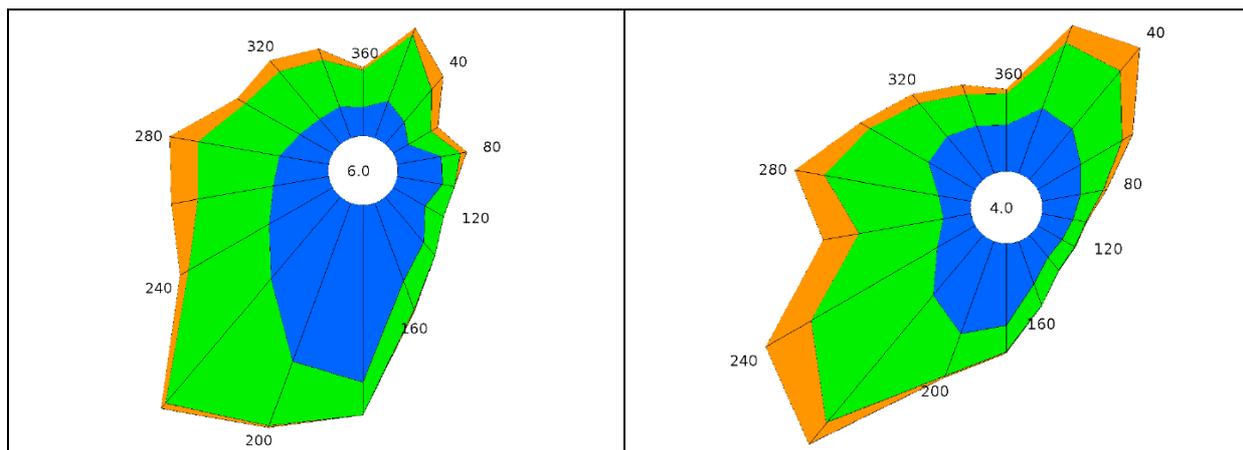


Figure 4.1.4.b : rose d'été à Dunkerque (juin à août - période 2000/2015) à 06 UTC

Figure 4.1.4.c : rose d'été à Dunkerque (juin à août - période 2000/2015) toutes heures confondues

La figure 4.1.4.b décrit la répartition du vent pour l'été à 06 UTC, moment où peut souffler la brise de terre. Cette rose présente par rapport à la rose de la figure 4.1.4.c :

- une augmentation du pourcentage d'observations dans l'intervalle [1.5 ; 4.5 [(couleur bleue) pour les directions comprises entre 140 et 200 ° (vent de terre) avec un pic dans le 180 °.

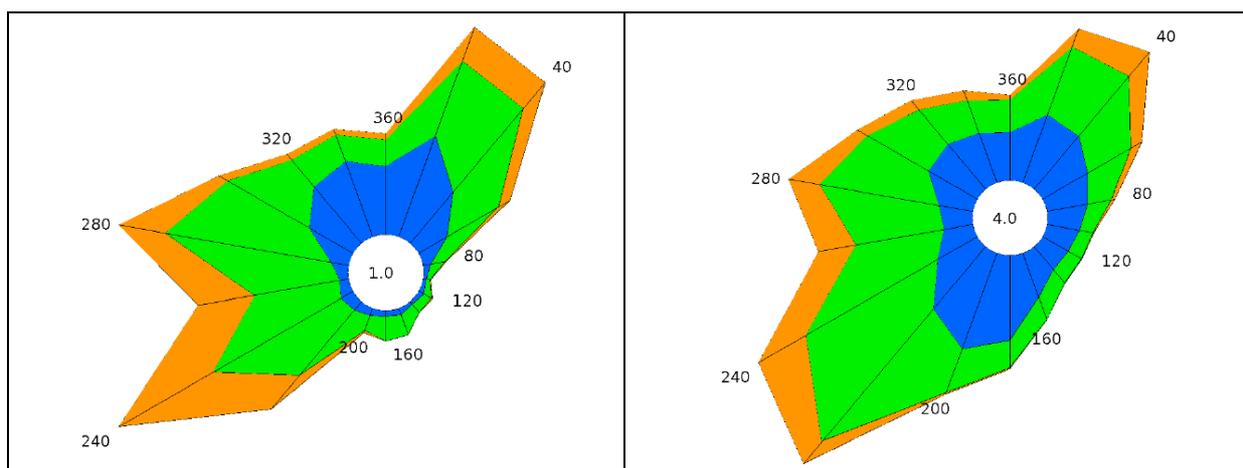


Figure 4.1.4.d : rose d'été à Dunkerque (juin à août - période 2000/2015) à 15 UTC

Figure 4.1.4.e : rose d'été à Dunkerque (juin à août - période 2000/2015) toutes heures confondues

La figure 4.1.4.d décrit la répartition du vent pour l'été à 15 UTC, moment où peut souffler la brise de mer. Cette rose présente par rapport à la rose de la figure 4.1.4.e :

- une augmentation du nombre d'observations pour les directions 240, 280, 020 et 040 ° toutes vitesses confondues
- une augmentation du nombre d'observations pour les directions 320 au 040 ° pour l'intervalle de vitesse [1.5 ; 4.5 [(couleur bleue)
- une forte atténuation du nombre d'observations pour les directions comprises entre le 080 et le 200 ° toutes vitesses confondues
- une atténuation du pourcentage d'observations pour l'intervalle de vitesse [1.5 ; 4.5 [(couleur bleue) pour les directions comprises entre le 080 et le 260 °

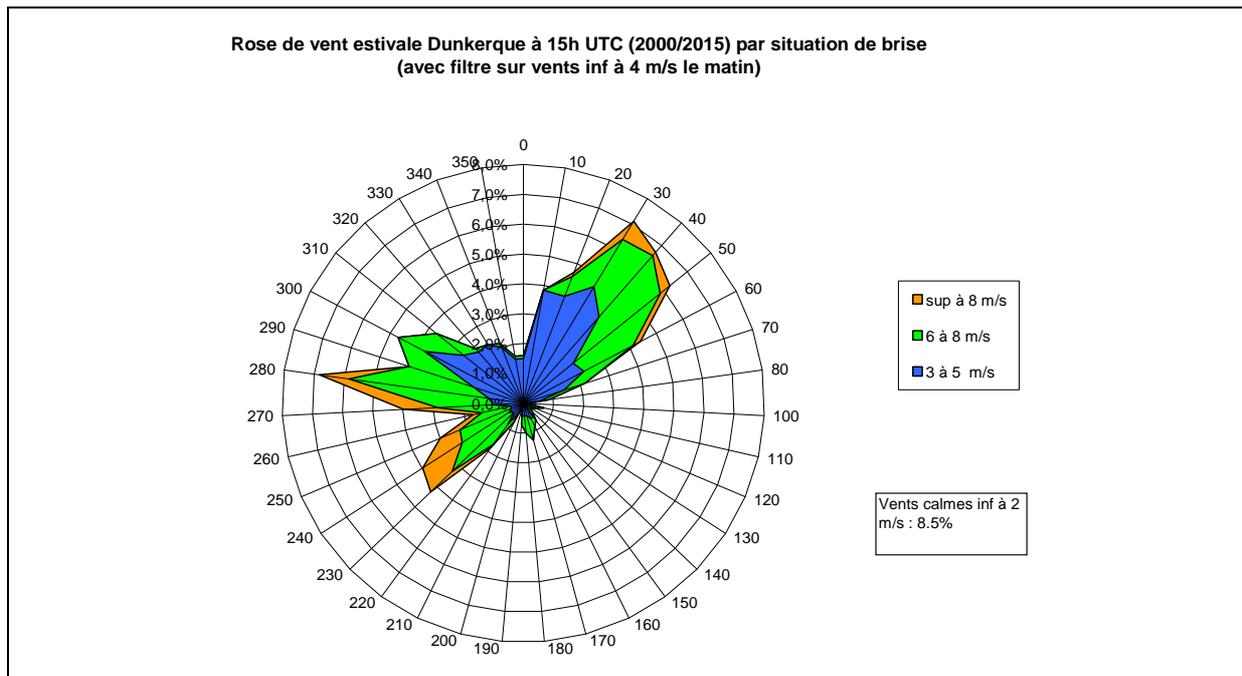


Figure 4.1.4.f : rose d'été à Dunkerque (juin à août - période 2000/2015) à 15 UTC

La figure 4.1.4.f propose une rose de brise, légèrement différente de la figure 4.1.4.d. Cette rose est construite à partir des observations du vent à 15 UTC (de juin à août) pour les journées quand à 06 UTC la vitesse du vent est inférieure à 4 m/s. Elle présente 3 pics de directions privilégiées 230°, 280° et 030°. Au cours d'une journée à brise de mer la direction du vent va tourner en fonction de la direction du vent liée à la distribution spatiale de la pression. Le phénomène de brise est donc plus complexe sur la zone de Dunkerque que sur d'autres portions du littoral français. La situation à brise typique du 18 juillet 2016 est détaillée et illustrée en annexe.

4.1.5 Conclusion sur le vent mesuré à Dunkerque

La zone de Dunkerque se caractérise par :

- 62,2 % des observations avec une vitesse du vent supérieure ou égale à 4,5 m/s
- deux secteurs de direction de vent sont privilégiés : le nord-est et un grand secteur dominant qui s'étend du 200 au 300 °
- des rafales maximales qui soufflent très majoritairement du sud-ouest
- une brise de terre qui souffle du secteur sud avec un pic dans le 180 °
- une brise de mer complexe qui souffle du 240 au 040 ° avec 3 pics de direction 230/240 °, 280 ° et 030 °
- par vent de sud-ouest et situation à brise, la direction du vent tourne vers la droite à partir de la matinée pour revenir vers la gauche en soirée
- par vent de nord-est et situation à brise c'est l'inverse

4.2 Les vents modélisés

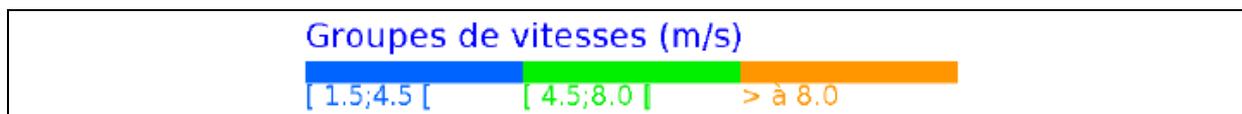
4.2.1 Généralités

Les mesures de vent disponibles, détaillées aux paragraphes, précédents sont insuffisants pour décrire le régime de vent sur la zone d'intérêt au large de Dunkerque. Nous utilisons ici des vents reconstitués par un modèle météorologique adapté.

L'élaboration des roses de vent est issue d'une base de données de climatologie modèle. Pour alimenter cette base, des simulations de descentes d'échelle dynamique du type ERA-I (réanalyse du modèle global du Centre Européen à la résolution de 80 km) puis Aladin (modèle à aire limitée à la résolution de 15 km) puis Arome (modèle régional de résolution très fine : 2,5 km) ont été réalisées pour la période 2000/2015 pour approfondir la connaissance du gisement éolien en France. Ces travaux ont débouché sur la réalisation d'un atlas éolien. L'objectif de ce calcul massif est de constituer une base de données au **pas de temps horaire** de paramètres liés au potentiel éolien (P, T, Hu, DD et FF moyennées sur 10 minutes) à des niveaux proches du sol (de 10 m à 160 m) à la résolution de 2,5 km. Cet atlas est devenu la référence de Météo-France pour l'éolien ; les résultats de cette descente d'échelle ont été comparés aux observations, notamment à des observations par SODAR et par un mât à 60 m en Picardie, et sur d'autres sites français, avec de très bons résultats.

L'utilisation du modèle Arome permet une meilleure prise en compte du relief, des effets côtiers, de la turbulence et des phénomènes de petites échelles (nuages convectifs par exemple). Il décrit avec plus de finesse la répartition spatiale du vent avec un point tous les 2.5 km. **L'ensemble des caractéristiques de cette climatologie Arome et les éléments de validation par rapport aux observations sont détaillés en annexe.**

Les cartes ci-dessous proposent des roses de vent **issues de la modélisation avec AROME** pour la zone d'intérêt. La distance entre 2 roses est de 2,5 km. L'échelle de vitesse est la même que celle choisie pour les roses du vent observé. Dix niveaux sont disponibles : 10, 20, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 140 et 160 mètres ; les résultats pour les niveaux 10 et 100 mètres sont présentés dans ce rapport (pour les autres niveaux, les résultats sont joints à ce rapport).



4.2.2 Vent à 10 mètres

La carte ci-dessous propose la répartition des roses de vent à 10 mètres annuelles tous les 2,5 km sur une zone géographique comprise entre le 51 N et 51.30 N et entre le 2.14 E et le 2.60 E (247 points). Le trait de côte est indiqué par la flèche noire et la zone d'implantation des éoliennes par celle en bleu. Pour plus de visibilité pour la suite du rapport les cartes utilisées comprennent 6 points décrivant la zone d'implantation des éoliennes et Dunkerque.

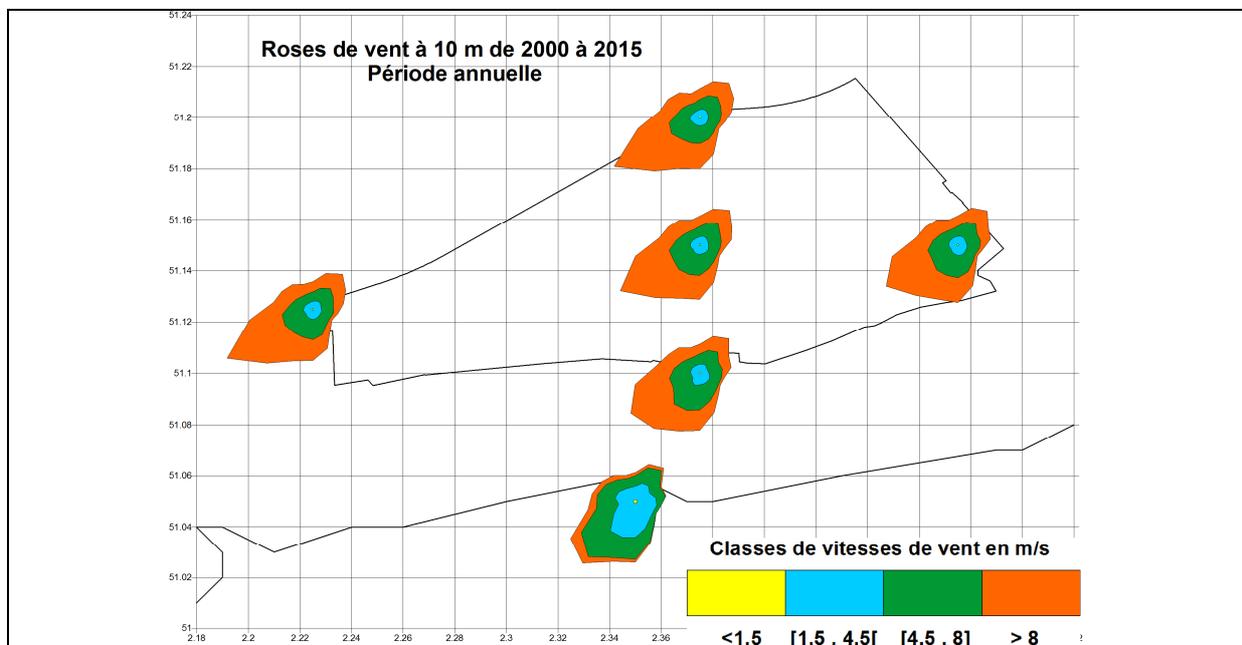
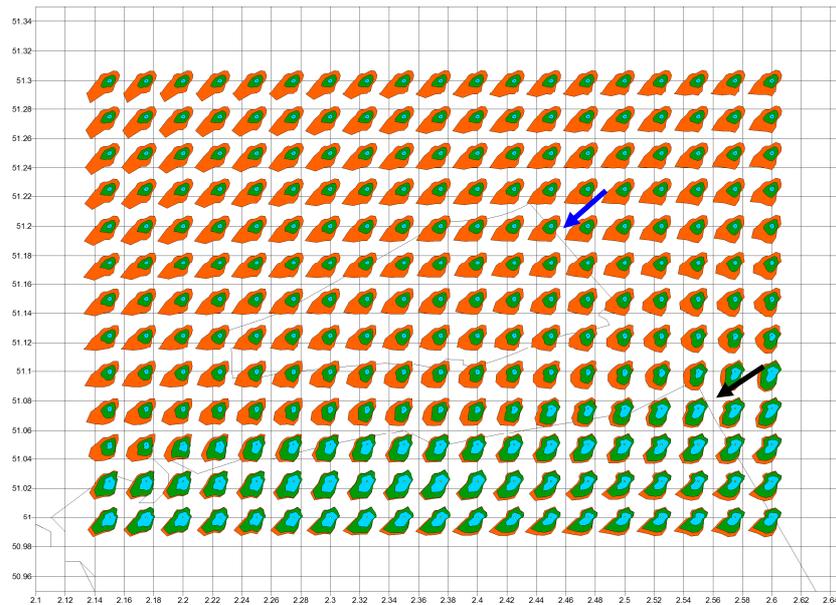


Figure 4.2.2.a : rose annuelle du vent moyen à 10 mètres modélisée (période 2000-2015)

La figure 4.2.2.a appelle les remarques suivantes :

- la vitesse du vent est plus élevée sur mer (plage orange beaucoup plus importante),
- le pourcentage des vents inférieurs à 8 m/s (couleurs verte et bleue) est plus important sur terre ; la rugosité du sol freine la vitesse du vent,
- la direction de sud-ouest domine aux points le plus à l'ouest, celui le plus au nord et celui au centre,
- **l'allure générale de la rose modèle au point le plus proche de Dunkerque présente de grandes similitudes avec celles du vent observé à Dunkerque** (paragraphe 4.1.1 figure 4.1.1.b).

Cette impression visuelle peut être confirmée par des indicateurs numériques. Météo-France utilise pour cela un indicateur de comparaison de roses de vents nommé critère « B95 ». Celui-ci prend des valeurs de 0 à 100%, les roses de vent étant absolument identiques pour le chiffre maximum.

Le calcul de cet indicateur détermine la distance entre les roses de vent observées et des roses de vent reconstituées par modélisation en sommant « classe par classe ».

Pour la station de Dunkerque (pas de temps annuel) sa valeur calculée est de 95.9% pour la direction et 88.6% pour la force au point de grille le plus proche. Le score un peu décevant pour les forces de vent est lié au fait que le sémaphore de Dunkerque se situe très près du trait de côte. Le point de grille Arome comparé est soit sur mer, soit sur terre ce qui biaise les résultats.

Ces valeurs de l'indicateur peuvent être considérées comme bonnes au-delà de cas particuliers compte tenu des éléments de validation fournis en annexe. L'ensemble de nos analyses montrent que, sur la zone considérée, nous n'avons pas de doute sur la qualité de cette source de données.

Zoom sur le point central de la zone

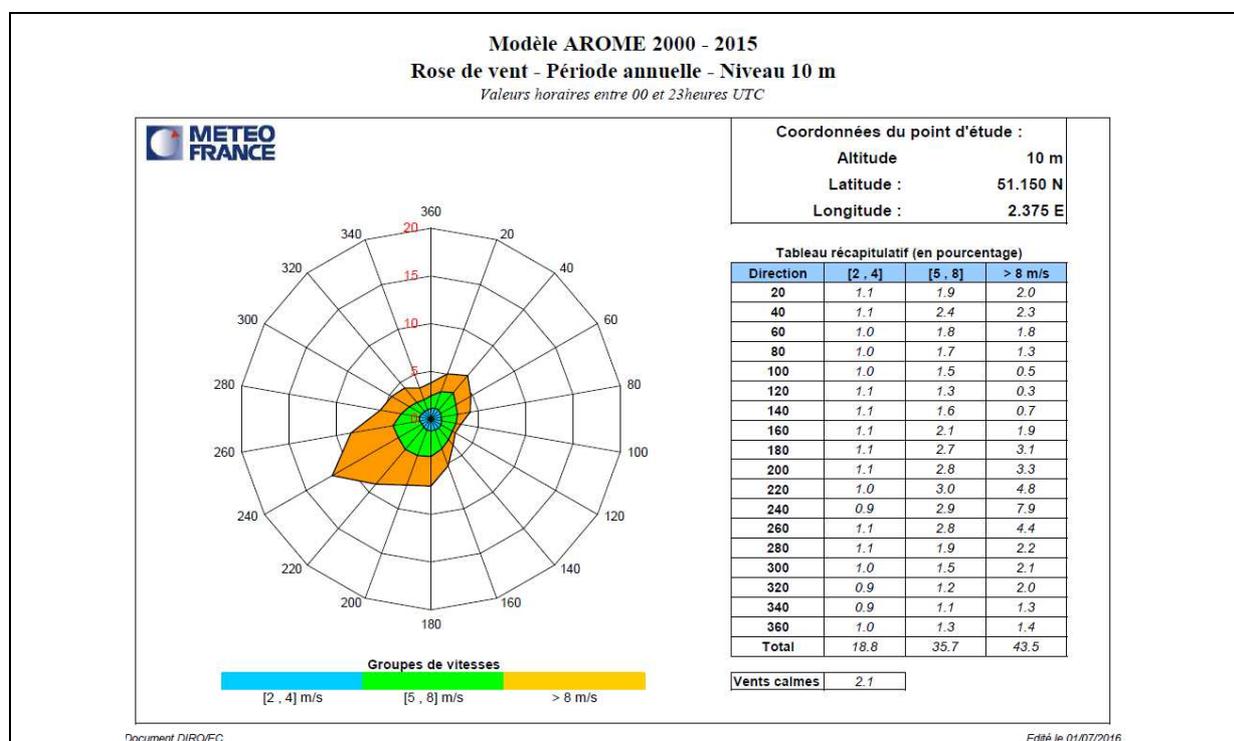


Figure 4.2.2.b : rose annuelle du vent moyen à 10 mètres modélisée (période 2000-2015) au point central

Le tableau de fréquence associé à la rose modèle du point central montre que le pourcentage de vitesse supérieure ou égale à 5 m/s s'élève à 79,2 %. Le secteur de vent compris entre le 180 et le 280 ° représente 48.1 % des données modélisées avec un pic dans le 240 °, celui entre le 020 et le 060° 15,3 %.

Les 4 figures suivantes représentent la distribution du vent à 10 mètres par saison. **Les allures générales des roses saisonnières « modèle », au point le plus proche de Dunkerque, présentent également de grandes similitudes avec celle des roses saisonnières observées à Dunkerque.**

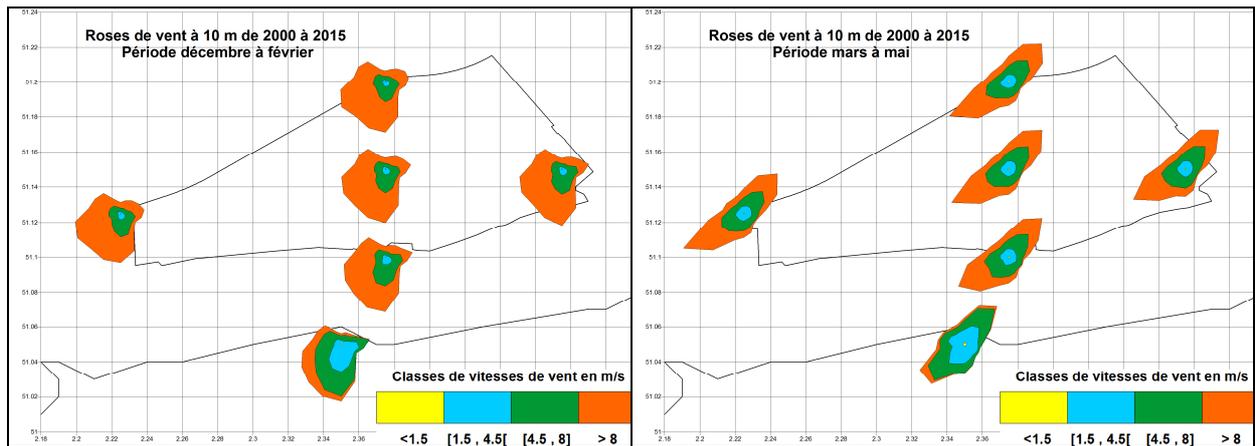


Figure 4.2.2c Rose de vent à 10 m hiver (à gauche) et printemps (à droite)

Les roses hivernales de la figure de gauche montrent que les vitesses de vent supérieures ou égales à 8 m/s sont très fréquentes sur mer pour de nombreux secteurs de vent. Sur terre les vitesses supérieures ou égales à 8 m/s sont plus rarement atteintes.

Les roses printanières de la figure de droite montrent que les vitesses de vent supérieures ou égales à 8 m/s sont fréquentes sur mer dans les secteurs sud-ouest et nord-est. Sur terre ces vitesses sont plus rarement atteintes.

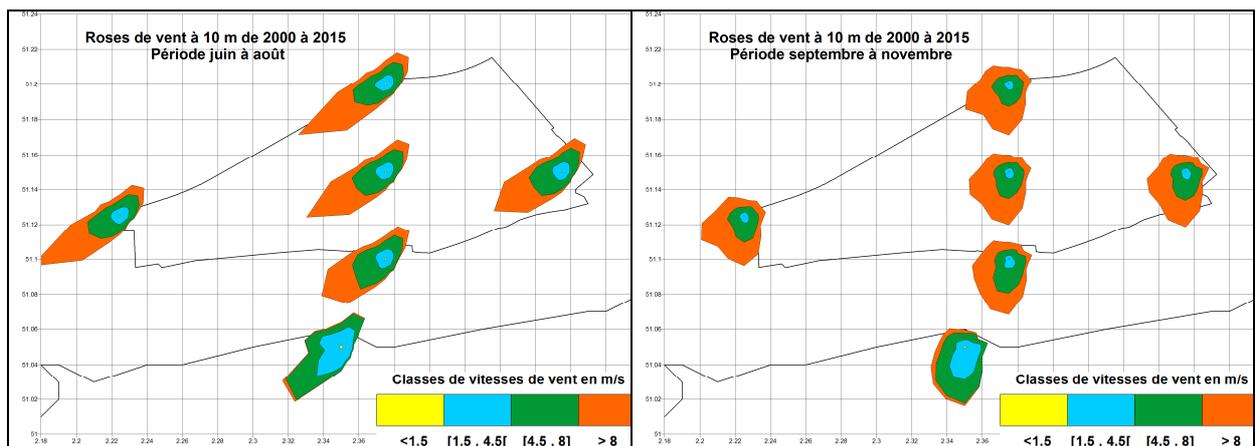


Figure 4.2.2d : Roses de vent estivales à 10 m (à gauche) et automnales (à droite)

Les roses estivales de la figure de droite montrent des vitesses de vent supérieures ou égales à 8 m/s fréquentes sur mer surtout pour les directions du sud-ouest. Les allures générales des roses printanières et estivales sont proches et privilégient deux secteurs de vent : le sud-ouest et le nord-est. Sur terre les vitesses supérieures ou égales à 8 m/s sont plus rarement atteintes.

La rose modèle pour la période automnale (rose de droite) du vent à 10 m montre des vitesses de vent supérieures ou égales à 8 m/s fréquentes sur mer dans les secteurs sud-ouest et nord-ouest. L'allure générale des roses hivernales et automnales sont proches. Sur terre les vitesses supérieures ou égales à 8 m/s sont plus rarement atteintes.

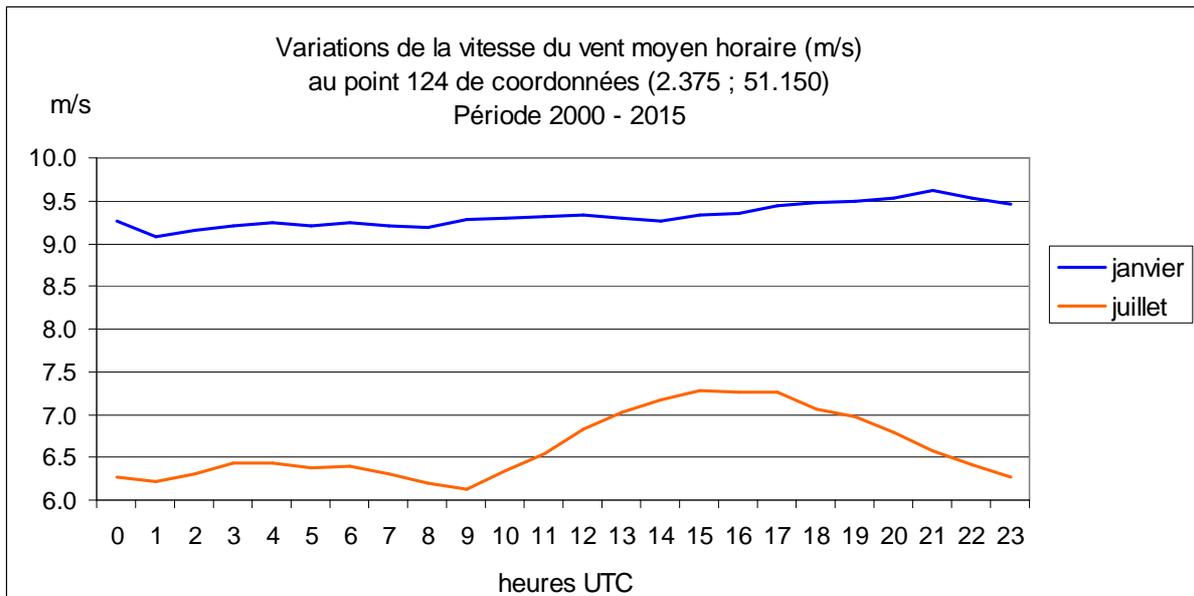


Figure 4.2.2e : variations diurnes de la vitesse du vent en janvier et en juillet à 10 m

A l'échelle de la journée, le graphique ci-dessus rend compte de l'évolution diurne du vent suivant la saison : la vitesse subit peu de variations en hiver, tout en étant plus élevée en moyenne, alors qu'en été, le phénomène de convection est à l'origine de variations plus marquées entre la nuit et la journée. On retrouve au point modèle 124 situé au milieu de la zone d'étude des profils moins contrastés que ceux des observations de la station météorologique de Dunkerque présentés au paragraphe 3.

4.2.3 Vent à 100 mètres

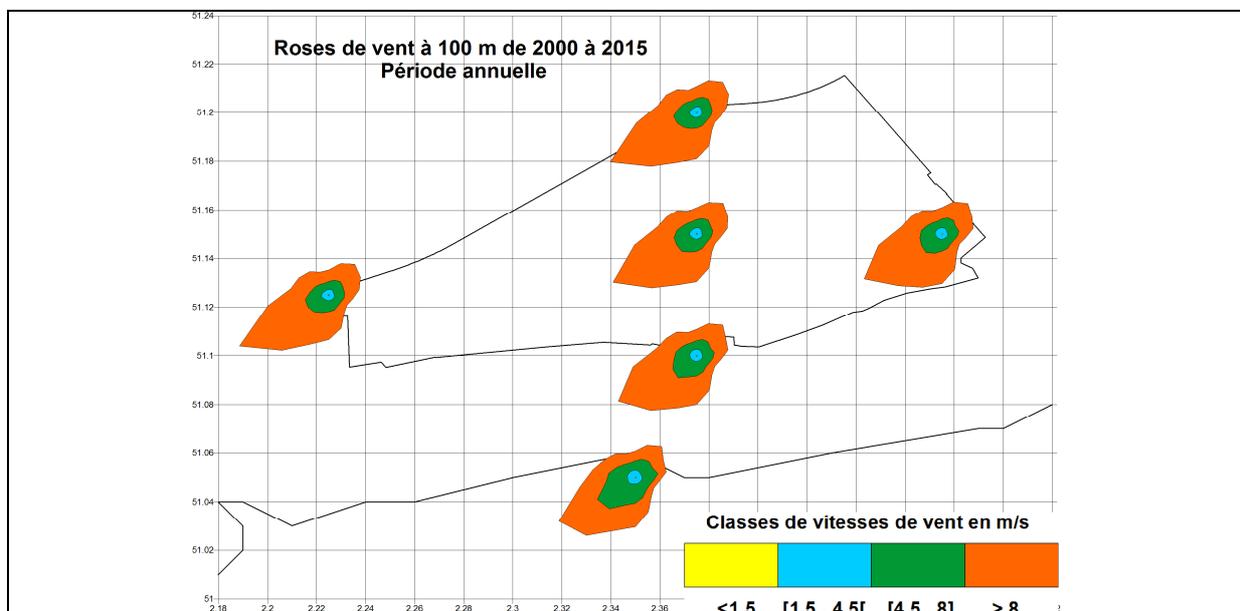


Figure 4.2.3.a : rose annuelle du vent moyen à 100 mètres modélisée (période 2000-2015)

La figure 4.2.3.a appelle les remarques suivantes :

- le pourcentage des vitesses du vent supérieures ou égales à 8,5 m/s (couleur orange) augmente sur le point sur terre ; l'influence de la rugosité du sol s'atténue,
- à 100 mètres la vitesse générale du vent augmente avec l'altitude,
- la composante sud-ouest devient dominante pour l'ensemble des roses.

Zoom sur le point central de la zone d'implantation des éoliennes

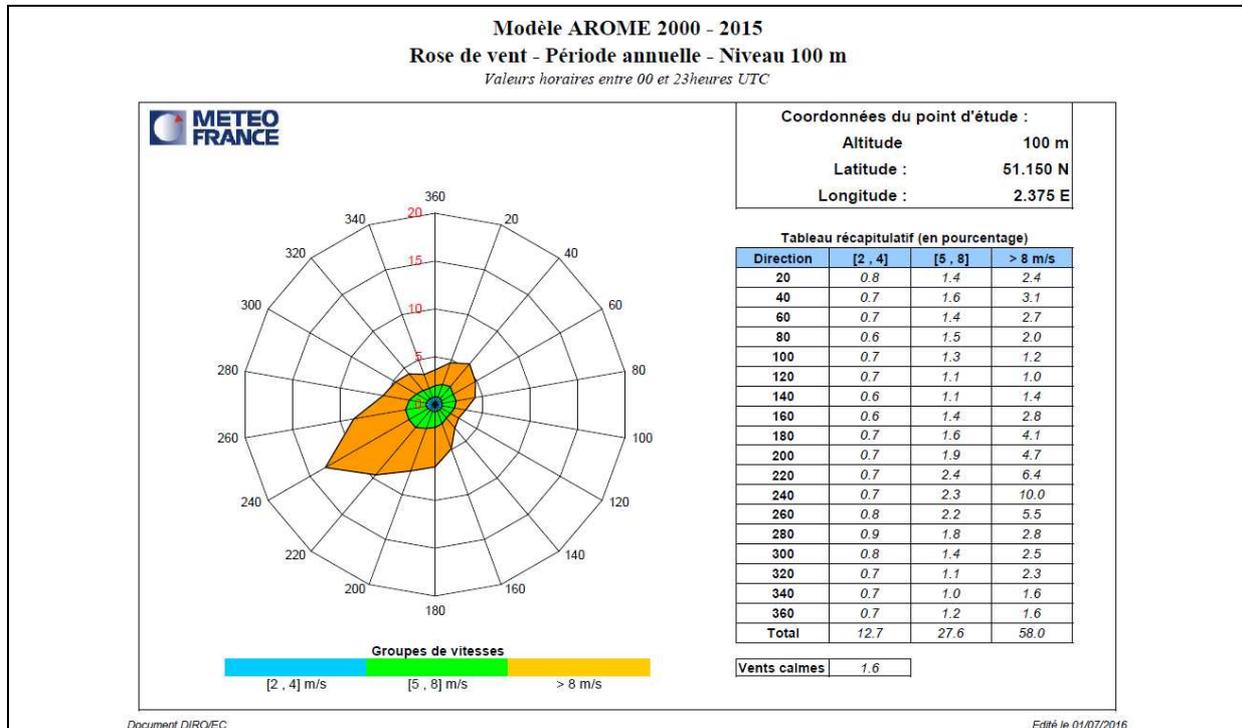
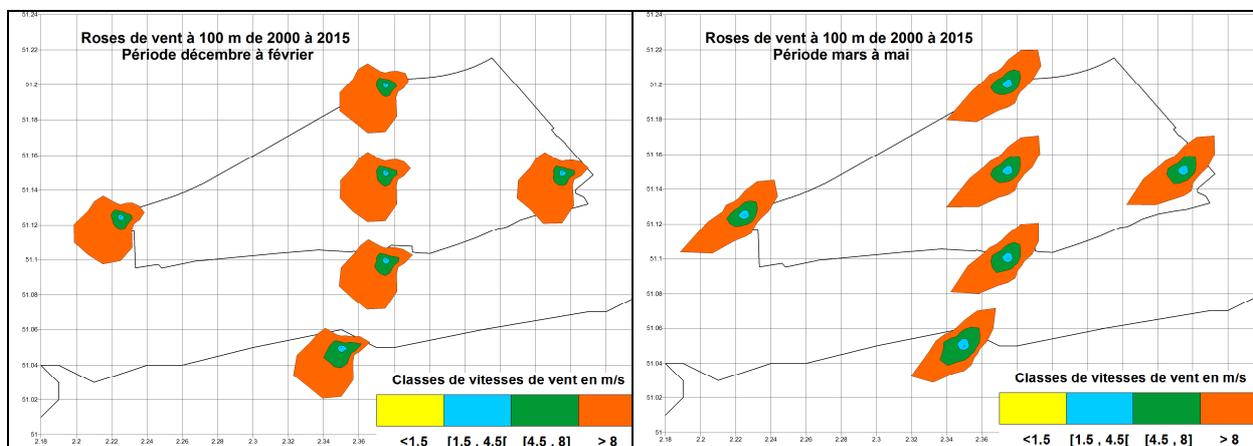


Figure 4.2.3.b : rose annuelle du vent moyen à 100 mètres modélisée (période 2000-2015) au point central

La rose annuelle au point central s'accompagne de son tableau de fréquence de la distribution du vent sur la période 2000 à 2015 à partir des données du modèle Arome. Le pourcentage de vitesses supérieures ou égales à 8 m/s s'élève à 58 %. Le secteur de vent compris entre le 180 et le 280 ° représente 50,2 % des données modélisées.

Les 4 figures suivantes représentent la distribution du vent à 100 mètres par saison.



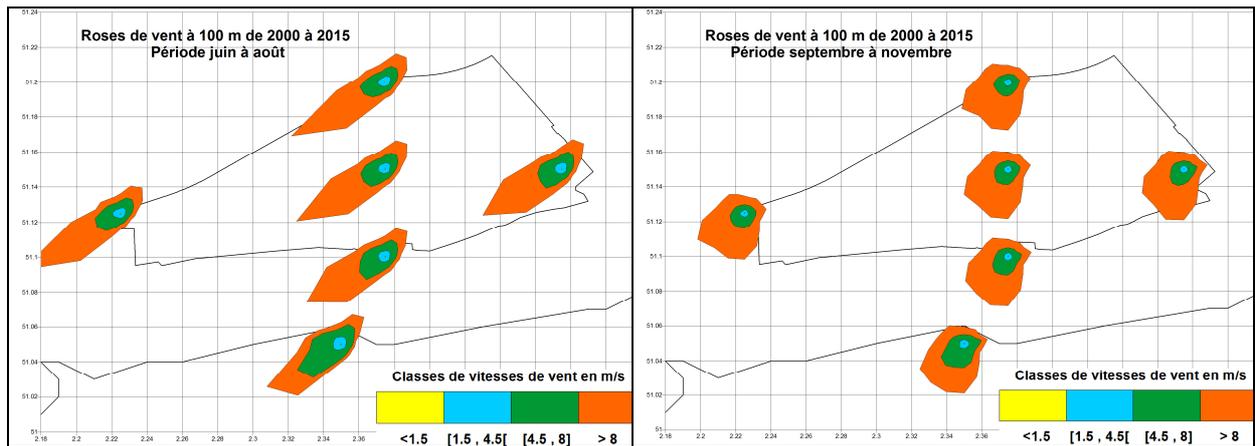


Figure 4.2.3c : roses de vent à 100 m pour les 4 saisons

Par rapport au vent à 10 mètres les roses saisonnières du vent à 100 mètres:

- présentent des similitudes dans leurs allures générales, les roses hivernales et automnales privilégient les directions de vent du nord-est et du sud-est au nord-ouest alors que celles du printemps et de l'été privilégient le sud-ouest et dans un pourcentage un peu moindre le nord-est,
- proposent des pourcentages plus élevés pour l'intervalle de vitesse supérieure à 8 m/s (couleur orange).

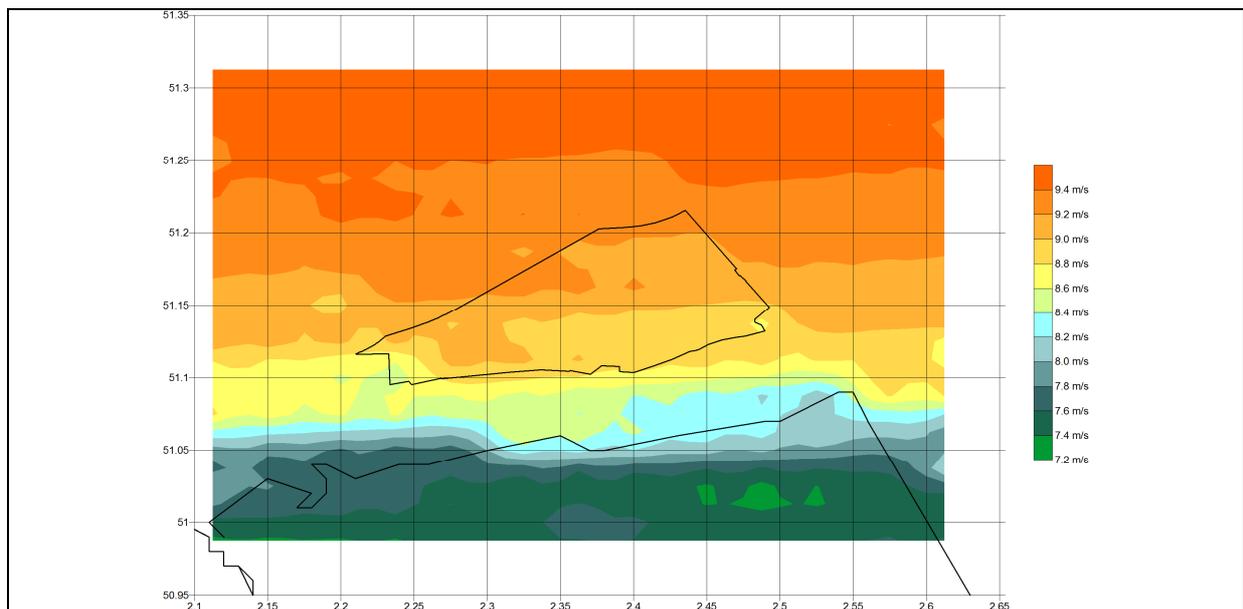


Figure 4.2.3d. : répartition spatiale par plage de couleur de la vitesse moyenne annuelle du vent à 100 mètres

La figure 4.2.3d illustre la répartition spatiale de la vitesse moyenne annuelle du vent à 100 mètres entre le large et le continent. Cette vitesse moyenne varie entre 9,4 et 7,2 m/s. Sur la zone d'installation des éoliennes, elle fluctue entre 9 et 8,6 m/s ce qui justifie le qualificatif de « ventée » pour cette zone.

5 - Estimation du potentiel éolien

Les données de vent issues du modèle Arome, reconstituées à plusieurs hauteurs, permettent de faire une première estimation du potentiel éolien de la zone considérée au large de Dunkerque.

Notre estimation est basée sur l'utilisation d'une courbe de puissance d'une éolienne standard qui permet de transformer les vents en m/s en facteur de charge (pourcentage de puissance utilisable). Les chiffres présentés ici constituent une première estimation de ce potentiel. Ils sont essentiellement destinés à montrer la variabilité (mensuelle, interannuelle) de la production électrique potentielle. L'estimation précise de ce potentiel fera évidemment l'objet d'investigations ultérieures des porteurs de projet.

5.1 Application du facteur de charge

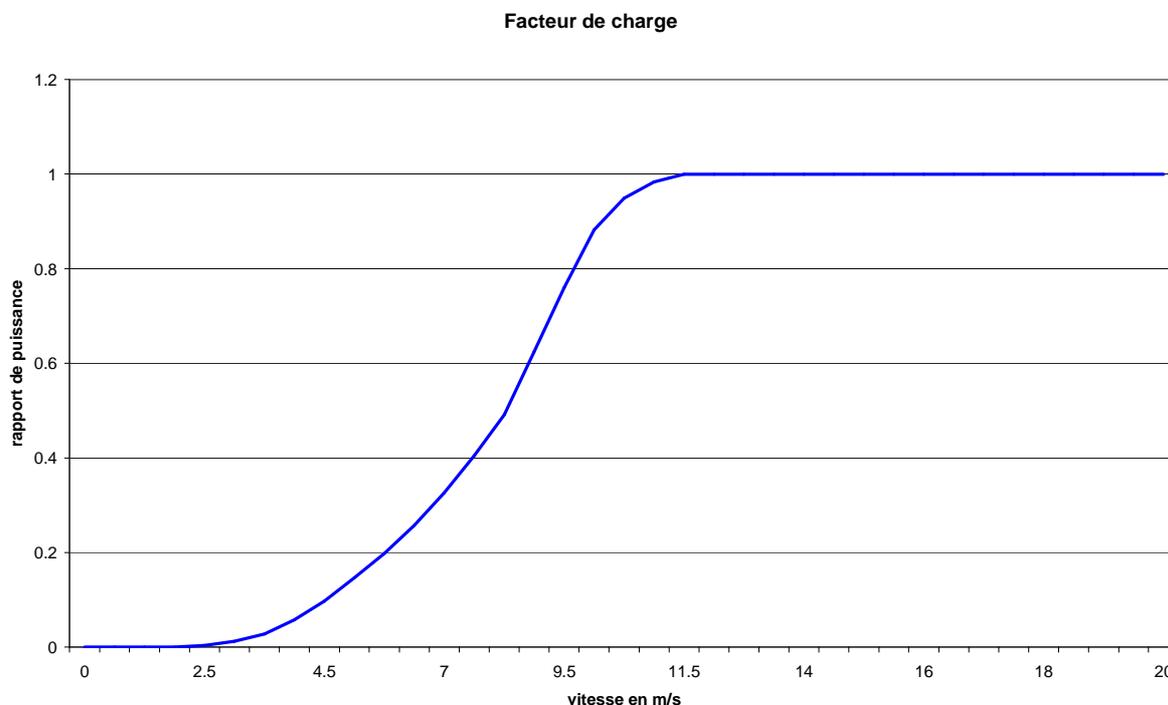


Figure 5.1 : courbe de facteur de charge avec vent en abscisse et rapport de puissance en ordonnée

Pour estimer la production potentielle de la zone Dunkerque, nous avons utilisé la courbe de puissance « standard » ci-dessus. Il s'agit d'une courbe moyenne calculée à partir de courbes de puissance d'éoliennes terrestres. Malgré nos recherches, il n'a pas été possible de trouver des courbes de puissance spécifiques d'éoliennes offshore qui sont probablement un peu différentes et optimisées pour fonctionner sur des zones bien ventées. A noter que nous avons choisi de ne pas limiter la production potentielle pour les vents dépassant 20 m/s qui sont très peu fréquents en pourcentage par rapport aux autres vitesses de vent.

L'analyse statistique de potentiel qui suit doit donc être interprétée avec prudence.

5.2 Comparaison avec le mât de Kentish Flats (UK)

Comme indiqué en début de ce document, les données de vent du modèle Arome reconstituées sur la période 2000 à 2015 au pas de temps horaire ont fait l'objet d'une validation concluante. On montre ici une comparaison complémentaire de données entre les mesures d'un mât anglais à 80 m et celles obtenues à partir du modèle Arome sur une période d'environ 2 ans de novembre 2002 à novembre 2004.

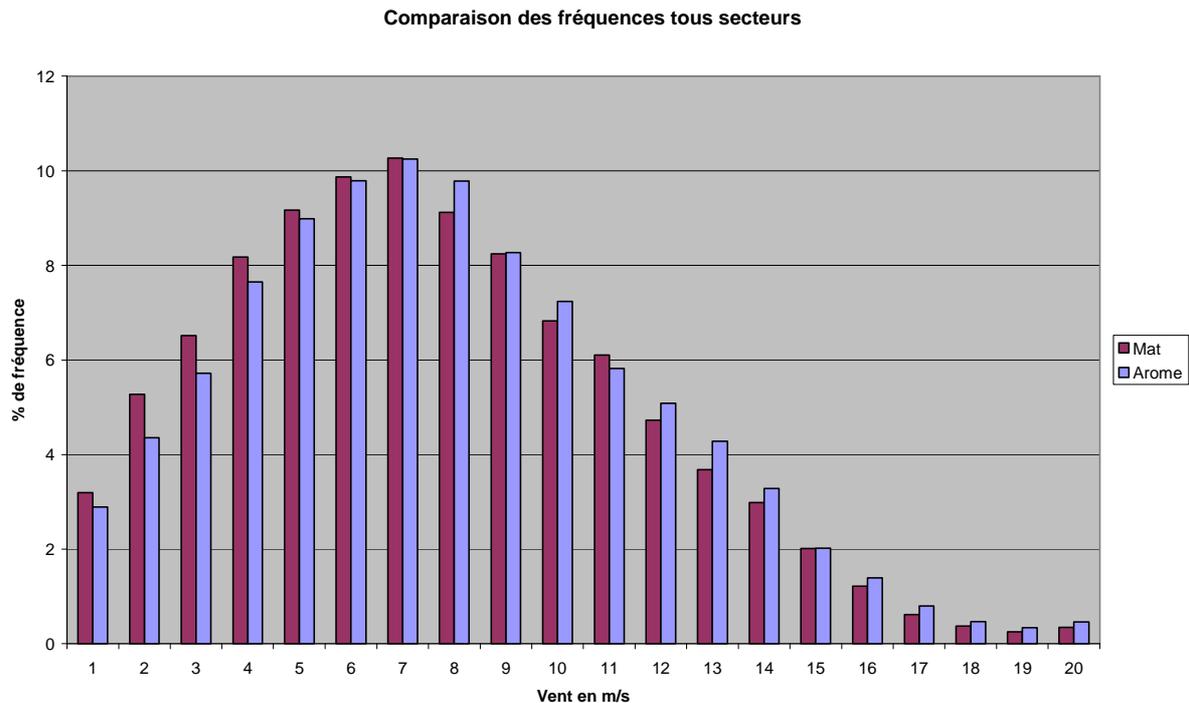


Figure 5.2 : comparaison des fréquences de chaque classe de vent en % entre le mât de mesure anglais et le modèle Arome

En utilisant la courbe de puissance détaillée au paragraphe précédent, le calcul du potentiel éolien donne des valeurs assez proches, sur les deux années décrites plus haut, entre celles calculées grâce aux observations du mât (41,5%) et celles calculées grâce à la reconstitution Arome (43,7%). En équivalence du nombre annuel d'heures en fonctionnement nominal, on obtient 3640 heures à partir des mesures du mât et 3830 à partir d'Arome soit un écart de 5% environ.

Une analyse direction par direction montre que l'essentiel des différences entre les deux sources de données provient des vents soufflants du secteur nord-ouest (réputé très turbulents donc les mesures sur mât ou les estimations par un modèle comme Arome ne sont pas toujours significatives).

5.3 Statistiques de potentiel éolien sur la zone Dunkerque (point central)

Nous avons ensuite utilisé cette même méthode pour analyser la variabilité temporelle du potentiel éolien sur la zone Dunkerque à partir des données issues du modèle Arome, sur le

point central. L'ensemble des données de vent à 100 m sur l'archive complète horaire (2000/2015) a été traduit en facteur de charge.

En premier lieu, il convient de préciser que la zone côtière située juste au nord de Dunkerque bénéficie, selon la climatologie reconstituée par le modèle Arome, d'un régime de vent « généreux » avec une vitesse moyenne annuelle à 100 m avoisinant 9 m/s. Il s'agit probablement de la zone rivage la plus ventée des côtes françaises après le Golfe du Lion.

Le potentiel éolien exprimé en facteur de charge à l'aide de la méthode détaillée juste avant donne une valeur moyenne de l'ordre de 59% ce qui signifie qu'en moyenne sur une année, les machines qui seront installées pourraient tourner l'équivalent de 59% du temps à plein régime, soit plus de 5000 h en moyenne par an !

La figure ci-après montre la variabilité mensuelle de ce facteur de charge, il est logiquement plus favorable les mois d'hiver (70% en moyenne) que les mois d'été (environ 50% entre juin et septembre).

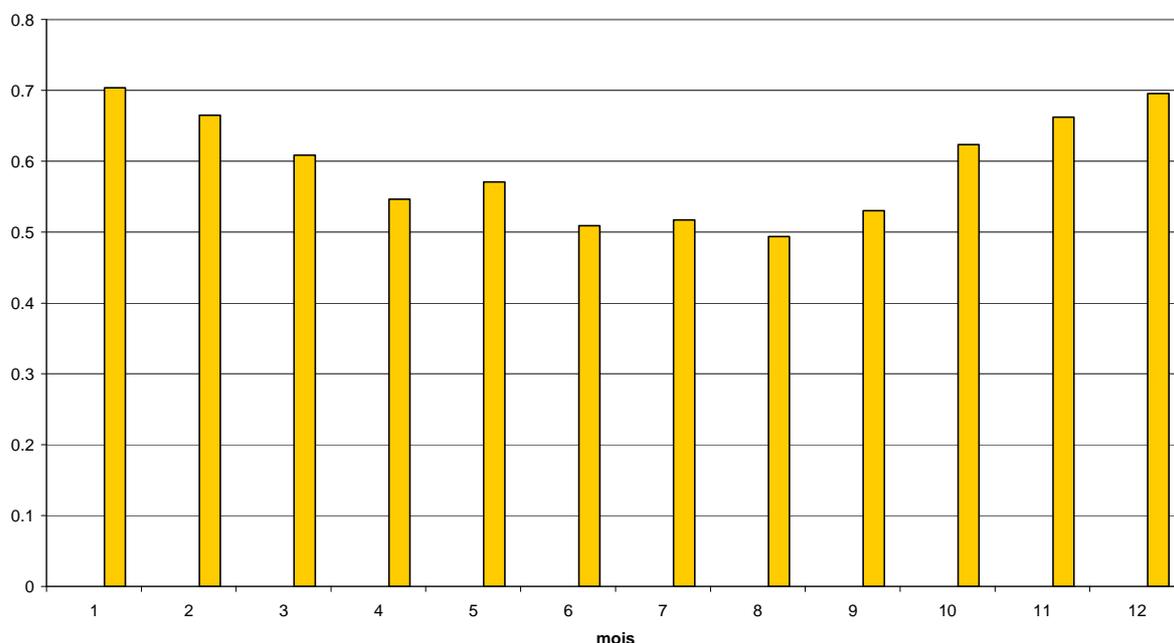


Figure 5.3a : Rapport à la puissance installée : moyenne mensuelle 2000/2015

La variabilité interannuelle de ce facteur de charge moyen est assez faible. Le graphique ci-après montre qu'il varie entre 56 ou 57% les années les plus défavorables (2003, 2004, 2010, 2012, 2014) jusqu'à un maximum de 63% les années les plus ventées (2008 et 2015).

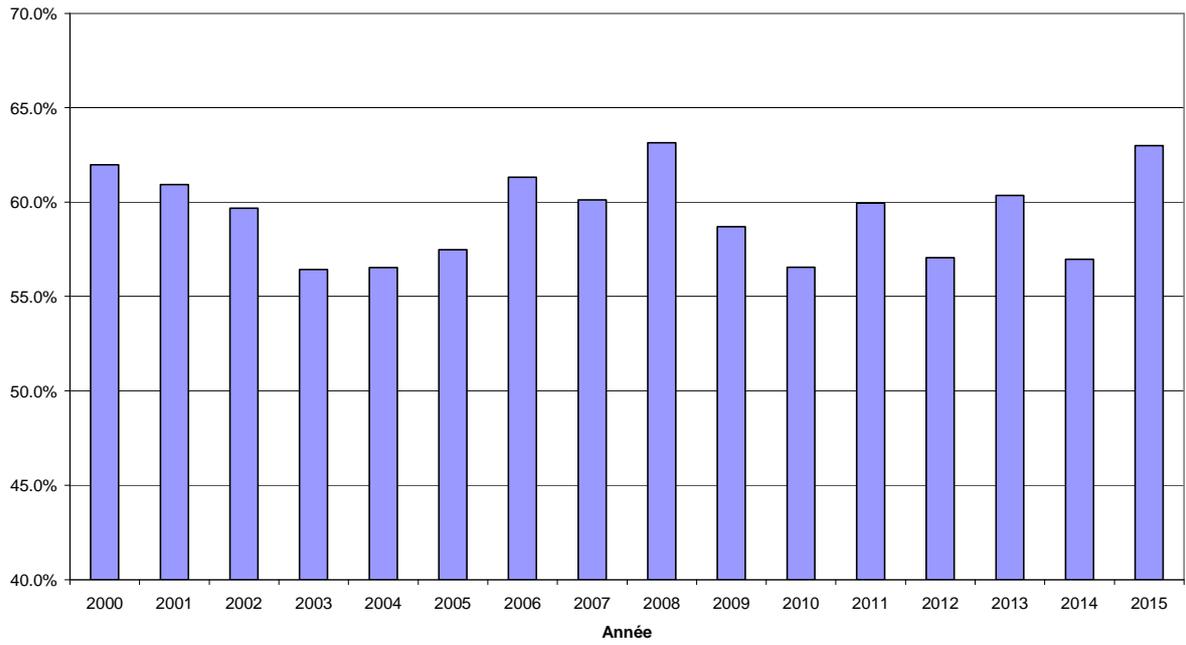


Figure 5.3b : rapport à la puissance installée : moyennes annuelles 2000/2015

5.4 Synthèse du potentiel éolien

Ces premiers calculs de potentiel éolien ont été réalisés à partir d'une méthode assez basique. Ils sont particulièrement robustes et intéressants pour en décrire la variabilité mensuelle et interannuelle. Celle-ci peut être qualifiée de relativement faible.

Il paraît très probable que sur la base des données de vent disponibles dans l'archive Arome, la zone côtière située juste au nord de Dunkerque bénéficie d'un régime de vent tout à fait favorable, probablement un des meilleurs de France si près de la côte.

Les calculs de potentiels éoliens mériteront bien entendu d'être affinés sur la base des mesures de vent lidars qui pourront être réalisées. Par ailleurs, l'utilisation d'une courbe de puissance d'une éolienne off shore pourrait donner des résultats différents de ceux obtenus ici. Enfin, les données du modèle Arome montrent qu'au sein de la zone prospectée, les vitesses de vent peuvent être significativement différentes. Il faudra en tenir compte dans le calcul du potentiel éolien (ici seul le point central a été exploré).

6. Les durées de retour des vents forts

L'objectif est de caractériser la fréquence des vents forts. L'étude des vents extrêmes associés aux fortes tempêtes concerne le lot 2 de cette étude.

Pour toutes les roses précédentes les données vent utilisées étaient celles du vent moyenné sur 10 minutes et au pas de temps horaire. Les calculs des durées de retour pour le point central de la zone se font sur **les valeurs maximales quotidiennes du vent moyen et pas sur les rafales maximales instantanées** calculées à partir des analyses horaires du modèle AROME. Ces valeurs sont disponibles entre le 1^{er} janvier 2000 et le 31 décembre 2015 (soit une période de 16 ans). C'est supérieur à la durée **minimale** de 10 ans nécessaire pour appliquer la **méthode de renouvellement** utilisée ici. Cette méthode d'ajustement a pour avantage de prendre en compte plusieurs maxima annuels au contraire des méthodes type GEV. Elle est donc bien adaptée aux échantillons assez courts. Les vents forts ont été au préalable « décorrélés » pour éviter de prendre en compte deux maxima rapprochés liés à une même tempête.

6.1 Durée de retour pour le niveau à 10 mètres

Le seuil retenu pour le vent à 10 mètres couvre les vitesses maximales quotidiennes du vent moyen entre 20 et 22.2 m/s. L'ajustement qui prend le mieux en compte les fortes valeurs est privilégié pour la détermination de ce seuil.

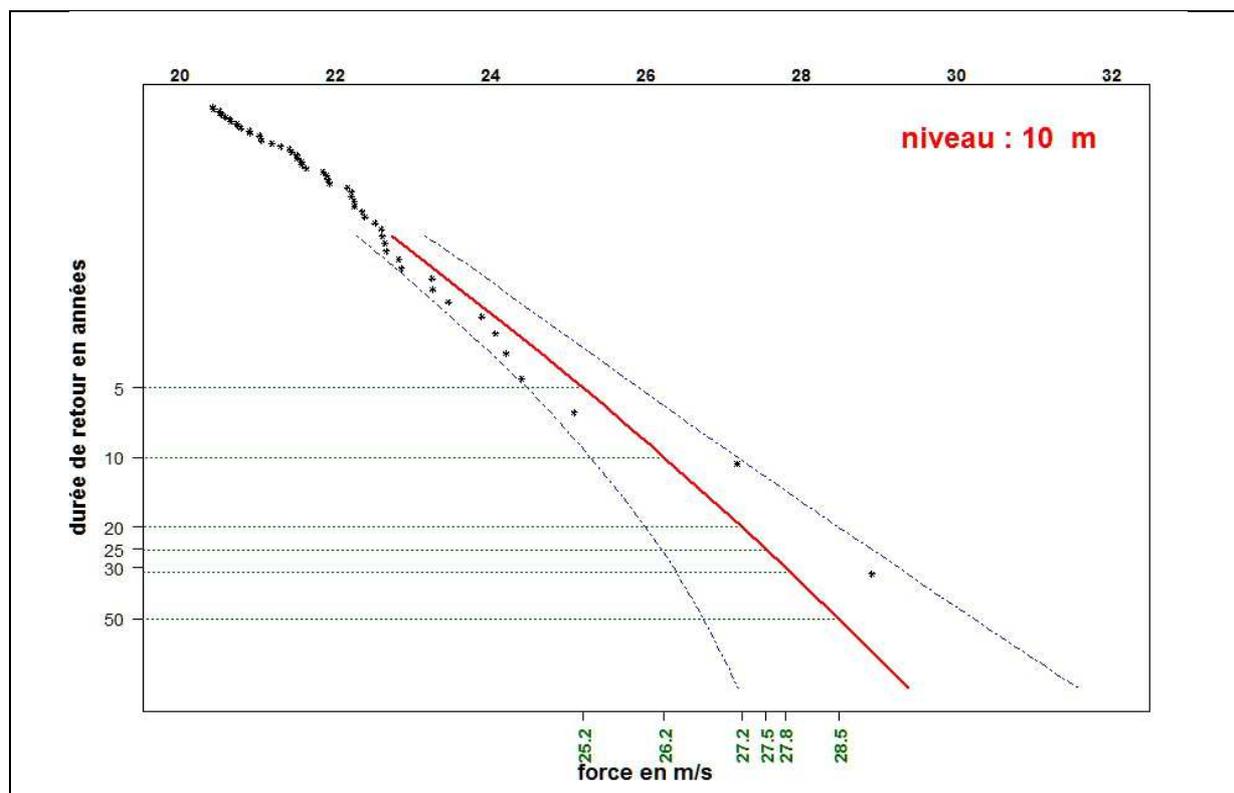


Figure 6.1 : graphe de durée de retour du vent à 10 mètres

L'ajustement est correct, la valeur associée à une durée de retour de 10 ans est de 26,2 m/s soit 51 nœuds (force 10 Beaufort) dans l'intervalle de confiance à 70 % (25,3 – 27,2 m/s)

| | | |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|
| borne inférieure à 70 | vitesse estimée | borne supérieure à 70 |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|

| | | |
|----------|-----------------|----------|
| % | | % |
| 25,3 m/s | 26,2 m/s | 27,2 m/s |

Le tableau suivant présente les dates correspondant aux 5 valeurs « modélisées » les plus élevées pour le niveau 10 mètres.

| | |
|------------------|----------|
| 27 octobre 2002 | 28,9 m/s |
| 18 janvier 2007 | 27,2 m/s |
| 11 janvier 2007 | 25,1 m/s |
| 13 décembre 2000 | 24,4 m/s |
| 24 janvier 2002 | 24,2 m/s |

6.2 Durée de retour pour le niveau à 100 mètres

Le seuil retenu pour le vent à 100 mètres couvre les vitesses maximales quotidiennes du vent moyen entre 23,8 et 26,8 m/s. L'ajustement qui prend le mieux en compte les fortes valeurs est privilégié pour la détermination de ce seuil.

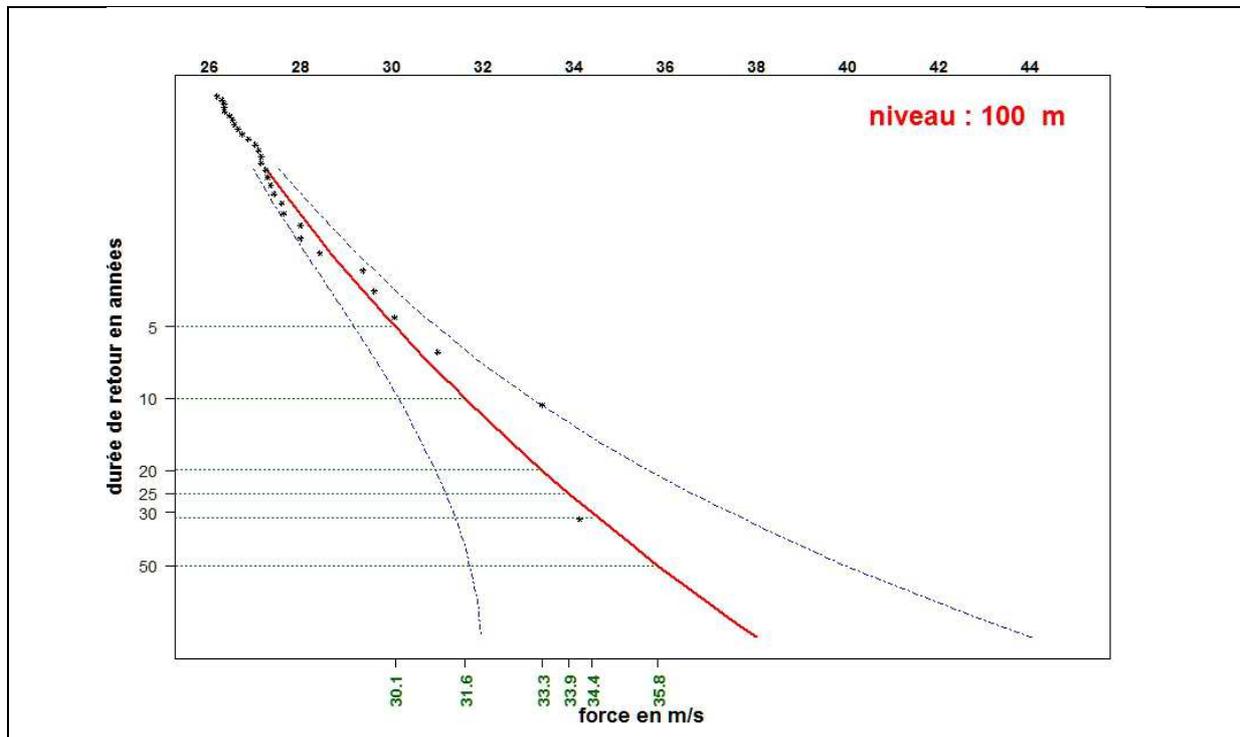


Figure 6.2 : graphe de durée de retour du vent à 10 mètres

L'ajustement est correct, la valeur associée à une durée de retour de 10 ans est de 31,6 m/s soit 61,4 nœuds (force 11 Beaufort) dans l'intervalle de confiance à 70 % (30,2 – 33,1 m/s)

| | | |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|
| borne inférieure à 70 | vitesse estimée | borne supérieure à 70 |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|

| | | |
|----------|-----------------|----------|
| % | | % |
| 30,2 m/s | 31,6 m/s | 33,1 m/s |

Le tableau suivant présente les dates correspondant aux 5 valeurs « modélisées » les plus élevées pour le niveau 100 mètres.

| | |
|-----------------|----------|
| 27 octobre 2002 | 34,2 m/s |
| 18 janvier 2007 | 33,3 m/s |
| 11 janvier 2007 | 31,0 m/s |
| 24 janvier 2002 | 30,1 m/s |
| 31 mars 2015 | 29,6 m/s |

7 – L'état de la mer

Il est le résultat :

- de l'action du vent sur la mer,
- de la bathymétrie, surtout dans les zones de petits fonds où elle modifie sensiblement la répartition spatiale des hauteurs des vagues,
- du relief côtier,
- des courants dus au vent, à la marée...

7.1 Quelques définitions

Le vent : il est l'acteur principal de la genèse et de la croissance des vagues. Il est directement lié au gradient de pression entre deux isobares (lignes d'égale valeur de pression). Plus les isobares sont resserrées plus le vent est fort. Sur mer, pour un même gradient de pression, le vent souffle plus fort que sur terre. Les forces de frottements dues aux reliefs terrestres sont plus importantes au niveau du sol et freinent la vitesse du vent.

Le vent est généré par des centres d'actions, dépression ou anticyclone. Les trois principaux qui intéressent la zone de cette étude sont la dépression d'Islande, l'Anticyclone des Açores et celui de Sibérie. Leurs variations en latitude conditionnent les types de temps rencontrés sur cette zone.

Les paramètres descriptifs d'une vague :

L'amplitude (a) représente le dénivelé entre le niveau moyen de la mer et une crête ou un creux.

La hauteur (h) mesure la hauteur entre une crête et un creux. Pour mesurer une hauteur de vague, on calcule la moyenne de la hauteur du tiers des vagues les plus hautes ($H_{1/3}$).

La longueur d'onde (λ) mesure la distance entre deux crêtes consécutives, généralement de l'ordre de la centaine de mètres, rarement au-delà de 300 mètres.

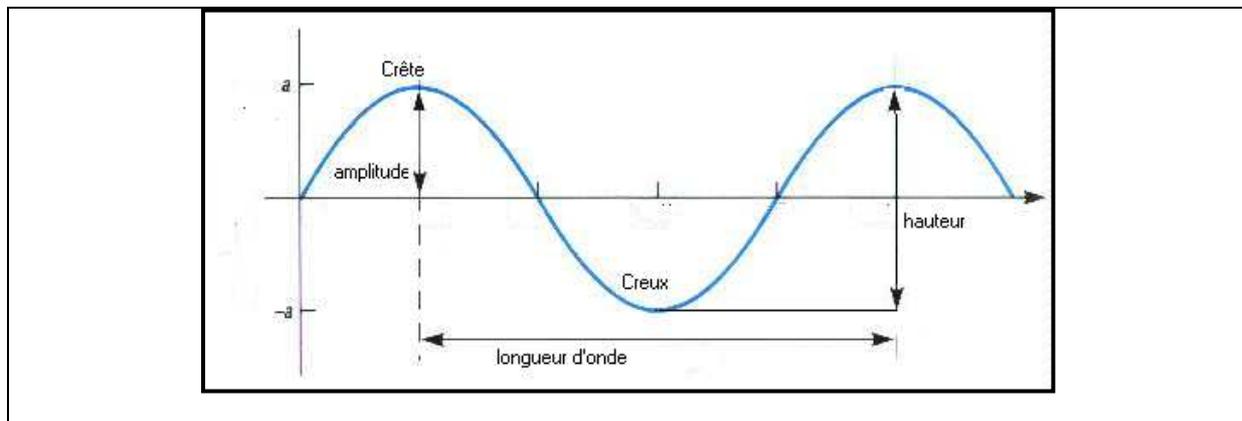


Figure 7.1 a: paramètres descriptifs d'une vague

La **période** (T) représente le temps nécessaire au passage de deux crêtes successives au même endroit. Elle est usuellement comprise entre 1 et 25 secondes. La période d'une mer du vent excède rarement 8 secondes. La période d'une houle est rarement inférieure à 6 secondes.

La **cambrure** correspond au rapport h/λ . Si ce dernier dépasse 14 % la vague déferle.

Le déferlement d'une vague : il est provoqué par la croissance des vagues ou la décroissance de la longueur d'onde, souvent due à la remontée du fond qui, par frottement

à son voisinage, ralentit la vague à son contact, provoquant une augmentation de la cambrure jusqu'à une courbure limite. Cette dernière atteinte, les particules d'eau basculent : c'est le déferlement.

La mer du vent : l'énergie du vent local crée et augmente la hauteur des vagues. Plus le vent est fort et plus les vagues sont hautes. Plus la durée d'action du vent est longue, plus les vagues sont hautes et plus les périodes sont grandes (le déferlement des vagues de petites longueur d'onde transmet l'énergie aux vagues de longueur d'onde supérieure). La mer du vent se caractérise par une hauteur, une direction de provenance et une période.

La houle : elle apparaît lorsque les vagues se déplacent au-delà de la zone où souffle le vent, mais aussi lorsque le vent qui a créé la mer du vent cesse de souffler ou lorsque la direction du vent change de plus de 30 °. Elle dépend du fetch. Les vagues sont plus longues et plus régulières. Elle se caractérise par une hauteur, une direction de provenance et une période. Les périodes d'une houle sont supérieures aux périodes de la mer du vent.

Le fetch : c'est la taille de l'aire maritime sur laquelle souffle le vent.

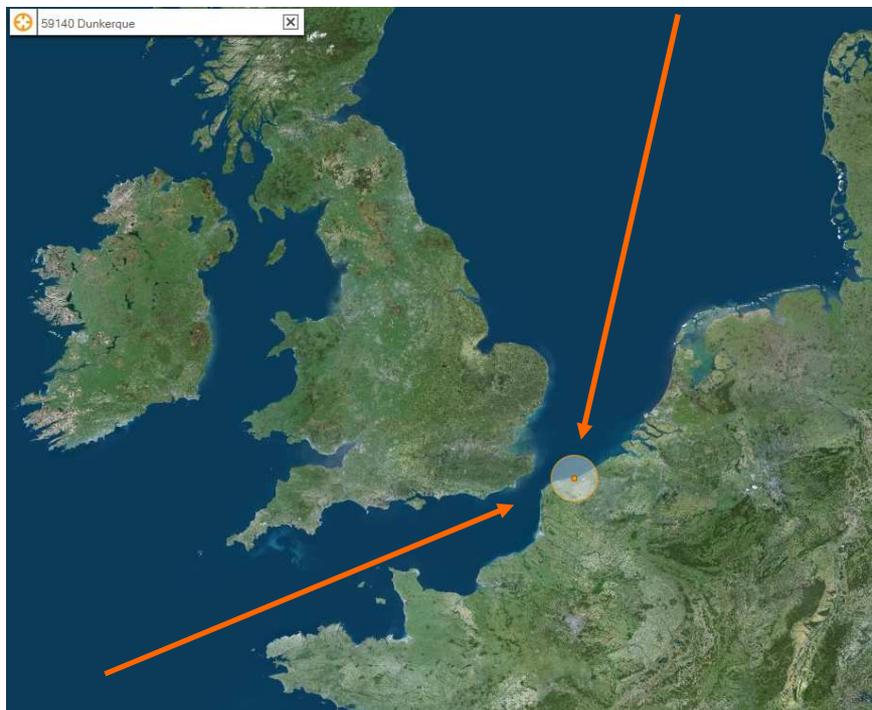


Figure 7.1b : fetchs sur le pas de Calais par vents de Sud-Ouest et Nord-Est

L'aire maritime la plus importante correspond à la mer du Nord pour le secteur nord pour Dunkerque. Dans ce secteur aucun obstacle n'arrête les vagues qui sont canalisées par les côtes du Danemark, des Pays-Bas, de la Belgique et du sud-est de l'Angleterre. L'aire maritime de la Manche est plus étroite avec l'émergence du Cotentin qui vient atténuer les houles d'ouest. Le détroit du Pas-de-Calais constitue un autre obstacle à ces houles d'ouest. Le cercle sur la carte positionne Dunkerque.

L'état de la mer : il se compose des vagues liées à la mer du vent et celles liées à la houle.

Rappel

Les fonds au large de Dunkerque sont de faibles profondeurs très souvent inférieurs 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. Ces bancs et ces dunes provoquent le déferlement des vagues lorsqu'ils émergent.

7.2 Les données observées

7.2.1 Les bouées associées à des « bateaux feu »

Au nord du Pas-de-Calais, les données de 2 bouées sont disponibles, voir carte ci-dessous :

- bouée 620170 par 51.38 N et 2 E
- bouée 620304 par 51.20 N et 1.80 E

Les fichiers des 2 bouées couvrent la période de janvier 2009 à mai 2016, les séries sont incomplètes.

Pour la bouée 620170, seulement 4 hauteurs quotidiennes des « H 1/3 » dépassent les 4 mètres (4,1 m).

Pour la bouée 620304, seulement 1 hauteur quotidienne des « H 1/3 » dépasse les 4 mètres (4,4 m).

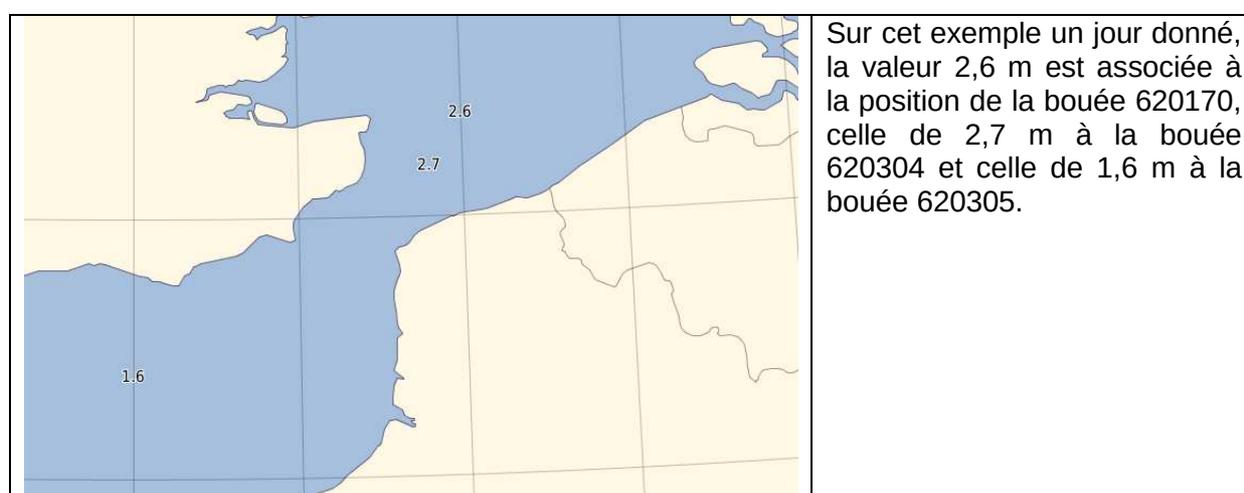


Figure 7.2.1a : position des 3 bouées (mesures un jour donné)

Le tableau ci-après propose les valeurs brutes de « H 1/3 » de mer totale par hauteur décroissante. Pour la bouée 600170, les fortes vagues disponibles dans le fichier brut mais incohérentes avec la situation météorologique (peu de vent) et donc manifestement erronées ont été corrigées. Les valeurs brutes de la bouée 620304 ont été également purgées des hauteurs douteuses.

Remarque

Les données observées sont importantes pour qualifier les modèles mais on doit au préalable en vérifier la cohérence, c'est ce qui a été réalisé ici. Les données figurant dans le tableau ci-après ont été corrigées car visiblement aberrantes par rapport à la situation météorologique du jour.

| Date | H 1/3 mer totale en m | Date | H 1/3 mer totale en m |
|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| 29/12/2011 22:00 | 21,5 | 08/10/2011 08:00 | 6,4 |
| 13/08/2011 22:00 | 20,6 | 06/01/2012 15:00 | 6,3 |
| 24/12/2011 00:00 | 12,2 | 13/02/2014 09:00 | 5,8 |
| 03/02/2012 20:00 | 11,3 | 21/06/2010 06:00 | 5,7 |
| 28/09/2013 20:00 | 11,2 | 09/03/2014 06:00 | 5,3 |
| 02/02/2015 17:00 | 11,0 | 15/02/2015 07:00 | 5,3 |
| 20/11/2015 08:00 | 10,9 | 28/05/2009 23:00 | 5,2 |

| | | | |
|------------------|------|------------------|-----|
| 12/06/2015 07:00 | 10,6 | 27/12/2011 10:00 | 5,2 |
| 25/05/2013 04:00 | 10,3 | 17/12/2009 18:00 | 4,1 |
| 22/11/2014 12:00 | 10,3 | 09/01/2010 19:00 | 4,1 |
| 28/06/2015 02:00 | 10,3 | 23/12/2010 20:00 | 4,1 |
| 29/06/2015 18:00 | 10,3 | 24/12/2010 03:00 | 4,1 |
| 02/07/2009 22:00 | 10,2 | 30/12/2011 02:00 | 4,1 |
| 29/10/2011 00:00 | 10,2 | 17/12/2009 19:00 | 3,9 |
| 20/11/2011 22:00 | 10,2 | 09/01/2010 17:00 | 3,9 |
| 06/10/2015 19:00 | 10,2 | 23/12/2010 19:00 | 3,9 |
| 25/03/2014 01:00 | 6,5 | | |

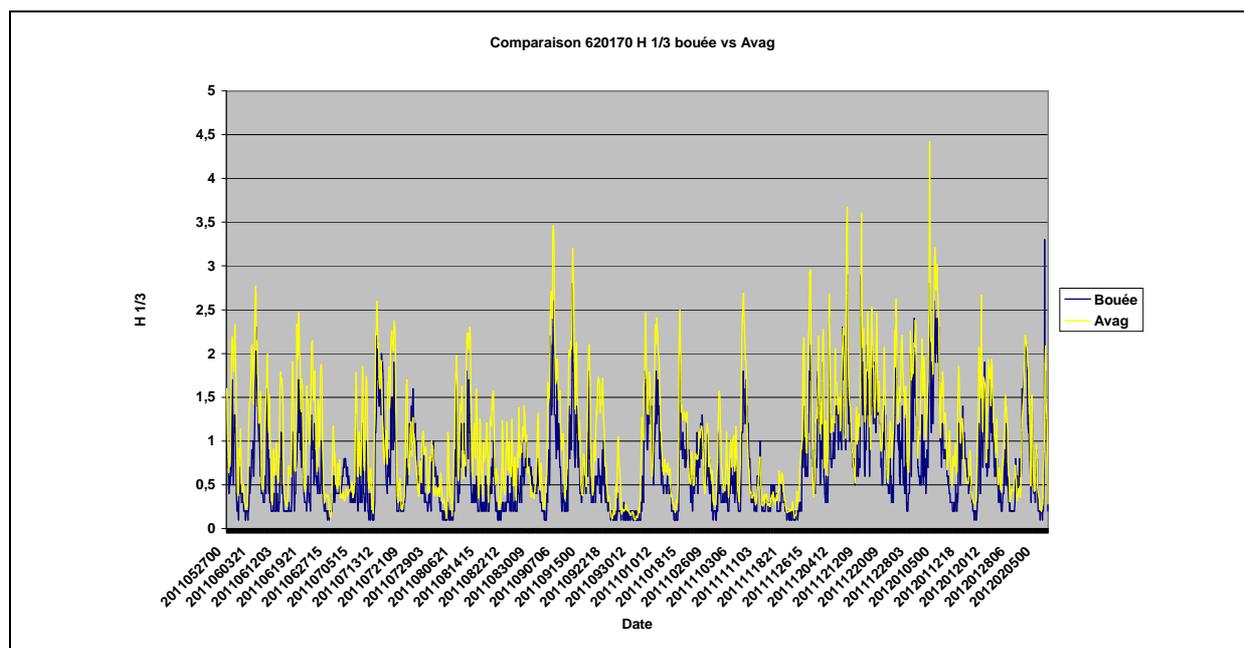


Figure 7.2.1.b : comparaison des observations de la bouée 620170 avec les données des modèles AVAG (jaune) pour la période du 27 mai 2011 au 5 février 2012

La figure 7.2.1.a propose une comparaison entre les hauteurs des « H 1/3 » de la mer totale par la bouée 620170 et les hauteurs « H 1/3 » de la mer totale du point du modèle AVAG le plus proche (courbe jaune) pour la période du 27 mai 2011 au 4 février 2012. Le modèle AVAG décrit dans les paragraphes suivants :

- décrit très correctement le spectre des données de la bouée
- présente un biais quasi systématique de hauteur H1/3

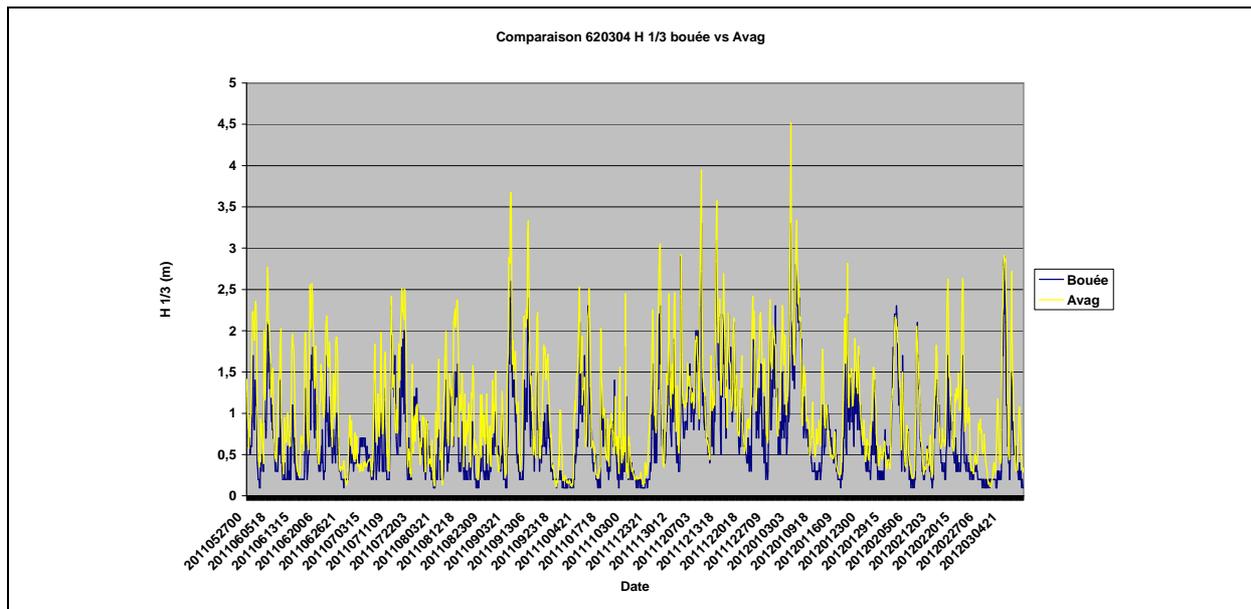


Figure 7.2.1.b : comparaison des observations de la bouée 620304 avec les données du modèle AVAG (jaune) pour la période du 27 mai 2011 au 4 mars 2012

La figure 7.2.1.b propose une comparaison entre les hauteurs des « H 1/3 » de la mer totale par la bouée 620304 et les hauteurs « H 1/3 » de la mer totale du point du modèle AVAG le plus proche (courbe jaune) pour la période du 27 mai 2011 au 3 mars 2012. Le modèle AVAG :

- décrit très correctement le spectre des données de la bouée
- présente un biais quasi systématique par rapport aux données bouées.

Remarque

Un rapport du Centre Européen de Prévision (ECMWF « Quantification of bias of wave measurements from lightvessels par G. Anderson, F. Carse, J. Turton, A. Saulter ») a mis en évidence une sous-estimation chronique, entre 0,30 et 0,45 m, des hauteurs des vagues mesurées par les bouées anglaises. Ce biais est lié à la technologie très particulière de ces bouées qui coulisent sous l'effet des vagues le long du navire où elles sont accolées. On peut donc considérer que l'écart observé sur les figures 5.2.1.a et 5.2.1.b est dû à ce phénomène. **Les données du modèle AVAG sont par conséquent plus proches de la vérité que les mesures de ces bouées anglaises biaisées...**

7.2.2 La bouée Ruytingen (CEREMA)

Cette bouée se positionne dans le nord de Calais voir carte ci-dessous par 51°09 N et 01°46 E (à proximité de la bouée 620304). Il s'agit d'une bouée de mesure flottante classique ancrée par 25 m de fond et à 20,4 km de la côte. Elle a fonctionné très peu de temps, à seulement 50 % pendant les mois de décembre 2009 et février 2010 et à 99,8 % en janvier 2010.



Figure 7.2.2.a : position de la bouée Ruytingen

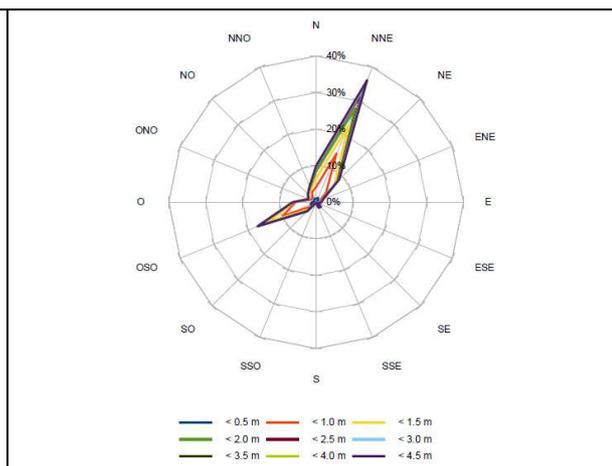
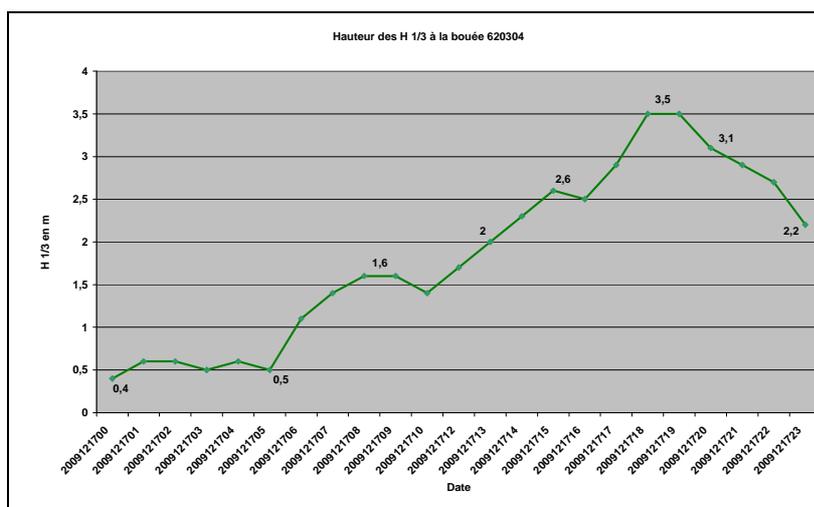


Figure 7.2.2.b : répartition des hauteurs significatives en fonction des directions des vagues

Lors de la tempête du 17 décembre 2009, la bouée Ruytingen a mesuré des hauteurs « H 1/3 » de 4 m et de 6,80 m pour la hauteur maximale. Ces vagues ont été soulevées par un fort vent de secteur nord. Pendant sa courte période de fonctionnement, le secteur nord à nord-est de direction des vagues domine. Les mesures comparées sont très cohérentes avec les estimations du modèle AVAG pendant cette période (sans biais de hauteur comme sur les bouées anglaises, voir figure suivante)



Le 17 décembre 2009, la bouée 620304 située à proximité de la bouée Ruytingen mesure une hauteur maximale de « H 1/3 » de 3,5 m soit 0,50 m de moins que cette bouée ce qui confirme le biais des bouées anglaises adossées aux navires.

Figure 7.2.2c : hauteur de vagues H1/3 mesurées par la bouée anglaise le 17/12/2009

Compte tenu de la position de cette bouée « Ruytingen » (hors du périmètre d'étude), il n'a pas été possible faire une comparaison chronologique des hauteurs de vagues mesurées et de celles reconstituées par le modèle AVAG décrit au paragraphe suivant. On peut toutefois conclure que les ordres de grandeurs des hauteurs, mesurés et reconstitués au cours de séries de fortes vagues, sont tout à fait cohérentes compte tenu de la bathymétrie.

Par ailleurs, les données parcellaires du CEREMA concernant les bouées 05901 (Calais) et 05902 (Dunkerque) ont été analysées. Elles sont trop hétérogènes et disponibles sur de trop courtes périodes (2.5 années cumulées au total sur la période 1989/2010) pour amener des informations intéressantes concernant la climatologie des vagues sur la zone. Les valeurs atteintes lors d'événements de fortes vagues sont qualitativement tout à fait cohérentes avec les données issues du modèle d'AVAG.

7.3 Roses de mer du vent modélisées

Les données utilisées pour ce rapport, proviennent du modèle « AVAG » de Météo-France qui a fonctionné de 2010 jusqu'en septembre 2012. Les caractéristiques de ce modèle de reconstitution des vagues sont présentées en annexe. On parle également dans ce chapitre du modèle de nouvelle génération MFWAM qu'il n'a pas été possible d'utiliser pour compléter la climatologie des vagues compte tenu de sa non homogénéité avec AVAG.

Le modèle « AVAG », à la maille de 10 km, est forcé par les champs de vent du modèle atmosphérique ARPEGE. Il fournit des valeurs au pas de temps horaire sur les directions de provenance, les périodes et **hauteurs significatives** des vagues :

- de la mer du vent,
- de la houle primaire,
- de la houle secondaire,

ainsi que sur la hauteur de la mer totale (mer vent + houles).

Les **hauteurs significatives** correspondent à la moyenne du tiers des vagues les plus hautes et se nomment « H 1/3 ».

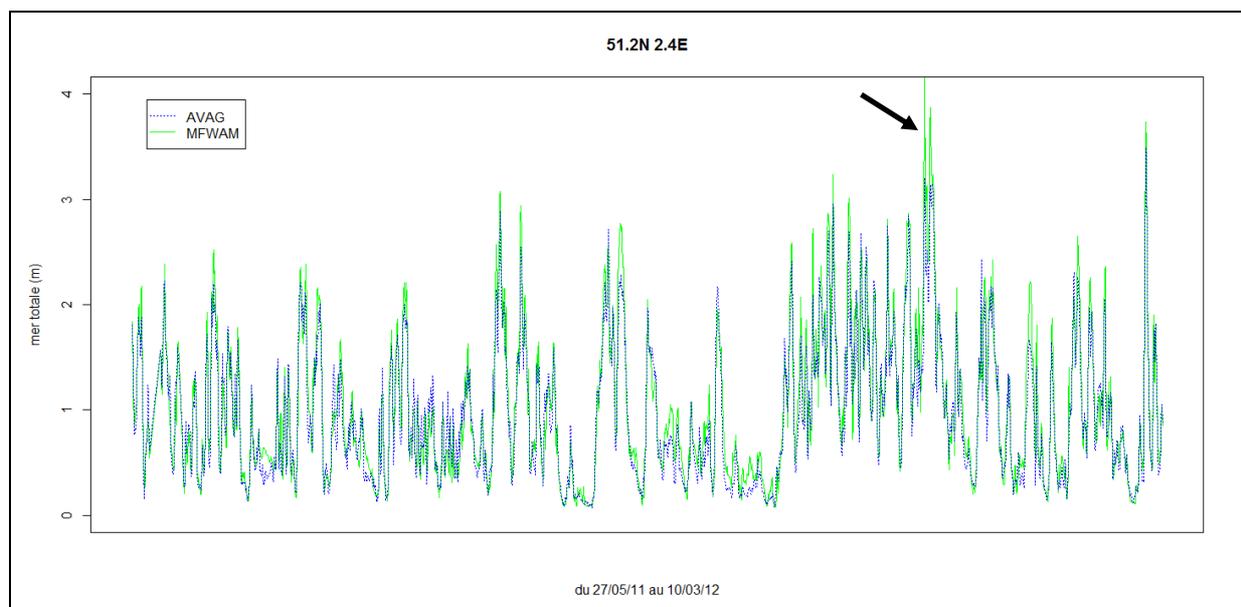


Figure 7.3.a : comparaison entre AVAG (bleu) et MFWAM (vert) pour la période du 27 mai 2011 au 10 mars 2012

La comparaison des modèles AVAG et MFWAM sur une période commune amène les remarques suivantes :

- les deux modèles décrivent un spectre semblable
- le modèle MFWAM génère des hauteurs de vagues H 1/3 de la mer totale (mer du vent + houle), parfois plus fortes que celles de AVAG (flèche noire figure 7.3.a)

Au final, la climatologie des vagues décrite aux paragraphes suivant a été réalisée avec le modèle AVAG (le seul à disposer d'une longue série de données) même si celui-ci est peut être un peu moins performant sur la zone considérée que le modèle MFWAM de dernière génération. Cette hypothèse n'a pu être vérifiée faute de mesure de vagues fiables sur la zone sur les années récentes. Par ailleurs, les directions de provenance des vagues n'ont pu être validées faute de mesures sur une durée suffisante. Elles sont à considérer comme

indicatives en ce qui concerne la mer du vent (et de toute façon très variable sur des mers dites « hachées » ou « chaotiques »).

7.3.1 Roses annuelles de mer du vent

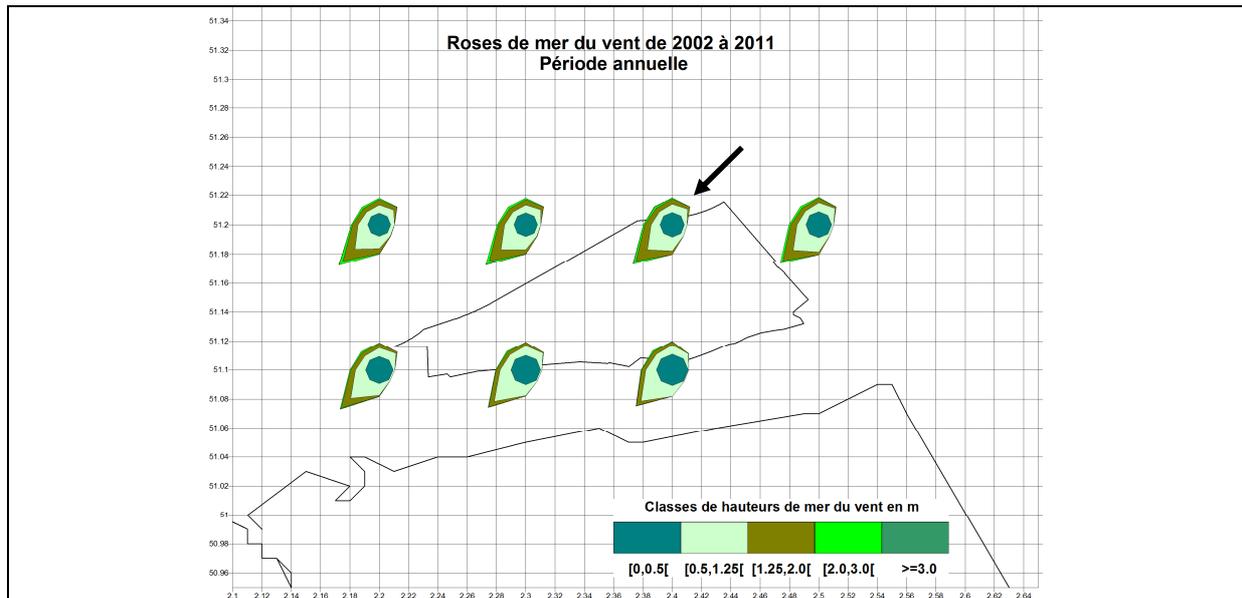


Figure 7.3.1.a : carte des roses annuelles de la hauteur de la mer du vent (période 2002-2011) en fonction des directions des vagues

La figure 7.3.1.a appelle les remarques suivantes :

- la direction dominante des vagues associées à la mer du vent correspond au secteur sud-ouest,
- le pourcentage de hauteurs de vagues supérieures à 3 mètres (couleur vert bouteille) est très faible,
- les hauteurs de vagues les plus élevées (couleur vert fluo) sont surtout présentes sur les roses les plus au nord. Les hauteurs des vagues diminuent à l'approche du littoral.

La figure 7.3.1.b ci-dessous propose un zoom sur le point identifié par la flèche noire de la figure 7.3.1.a.

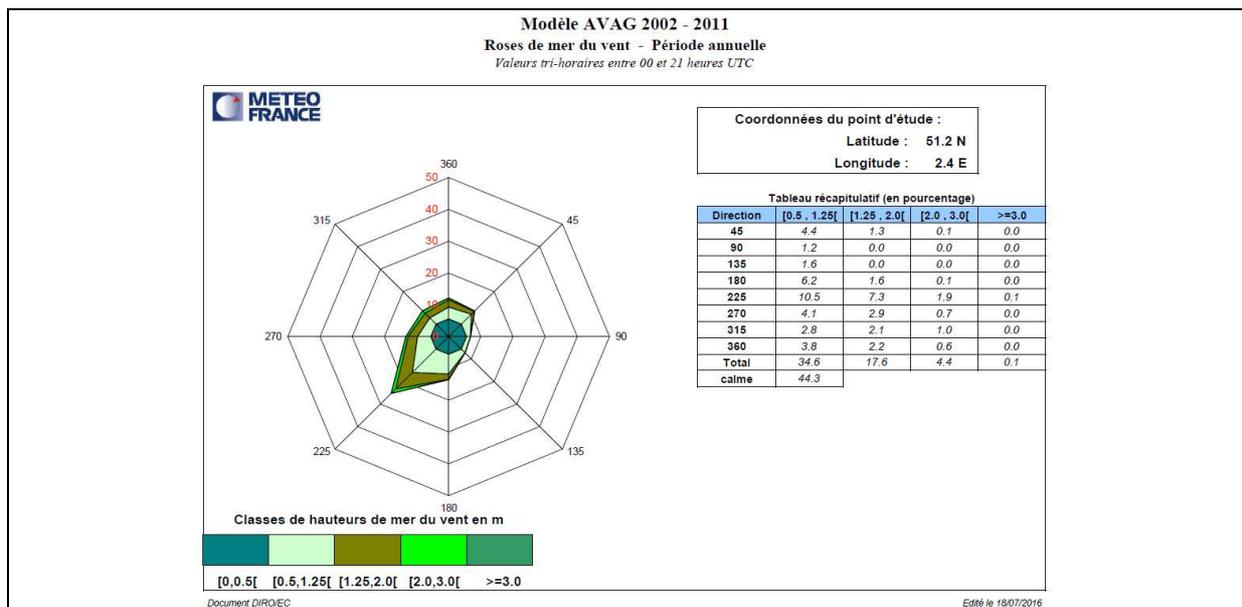


Figure 7.3.1.b : zoom sur rose annuelle de la hauteur de la mer du vent au point 51.20 N et 2.40 E

Les vagues dominantes viennent du sud-ouest (19,8 %) avec un pourcentage de hauteur des « H 1/3 » :

- inférieur à 2 m de 96 %
- supérieur ou égal à 3 mètres de 0,1 %

7.3.2 Roses saisonnières de la mer du vent

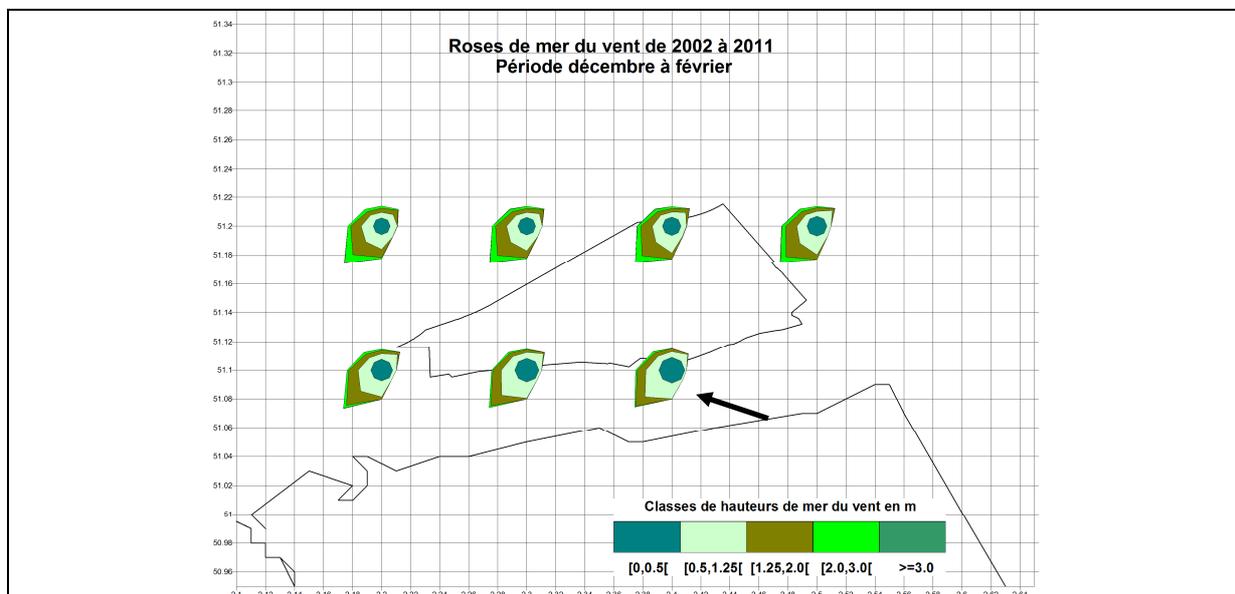


Figure 7.3.2.a : carte des roses d'hiver de la hauteur de la mer du vent (période 2002-2011) en fonction des directions des vagues

L'hiver, la direction des vagues de sud-ouest domine et le pourcentage de hauteurs comprises entre 2 et 3 m (couleur vert fluo) est plus important pour les roses les plus au large, surtout pour des directions comprises entre le sud-ouest et le nord-ouest. Il est le plus faible pour la rose désignée par la flèche noire (rose la plus proche du littoral). Il existe une répartition spatiale des hauteurs de vagues entre le large et le littoral.

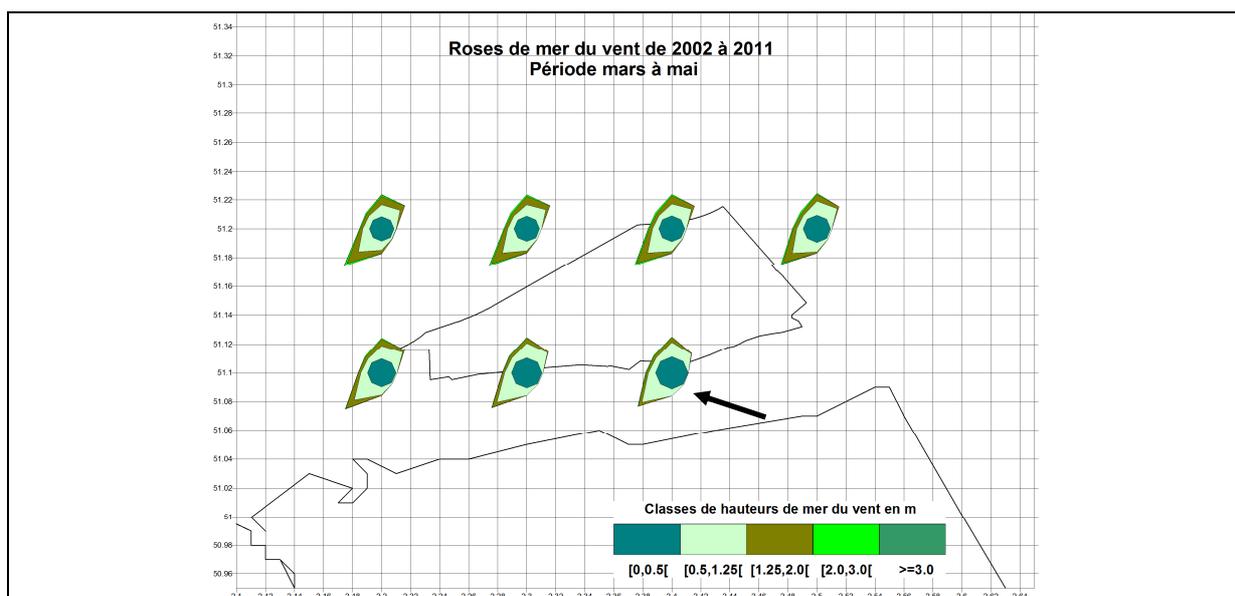


Figure 7.3.2.b : carte des roses du printemps de la hauteur de la mer du vent (période 2002-2011) en fonction des directions des vagues

Au printemps, la direction des vagues de sud-ouest domine un peu plus et le pourcentage de hauteurs comprises entre 2 et 3 m (couleur vert fluo) est moins important que pour les roses hivernales. Les hauteurs de vagues les plus faibles concernent toujours la rose la plus proche du littoral (flèche noire).

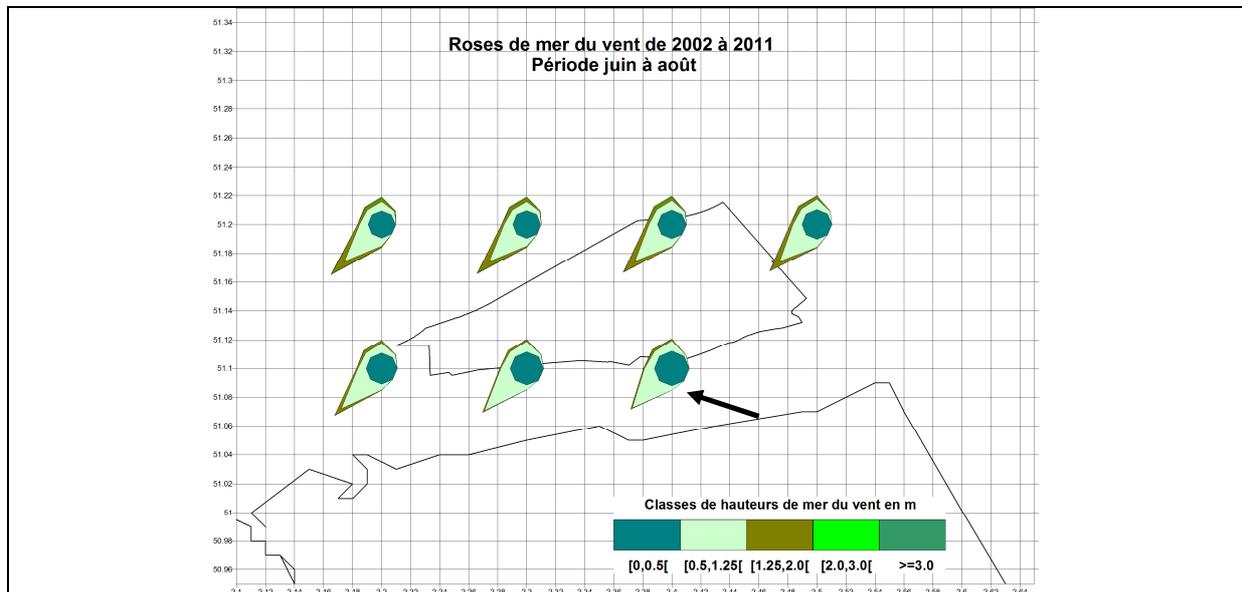


Figure 7.3.2.c : carte des roses d'été de la hauteur de la mer du vent (période 2002-2011) en fonction des directions des vagues

Les hauteurs des vagues décroissent du large vers le littoral. La rose avec les plus faibles hauteurs, souvent comprises entre 0,5 et 1,25 m, demeure celle la plus proche du littoral (flèche noire). La direction des vagues de sud-ouest est encore plus dominante.

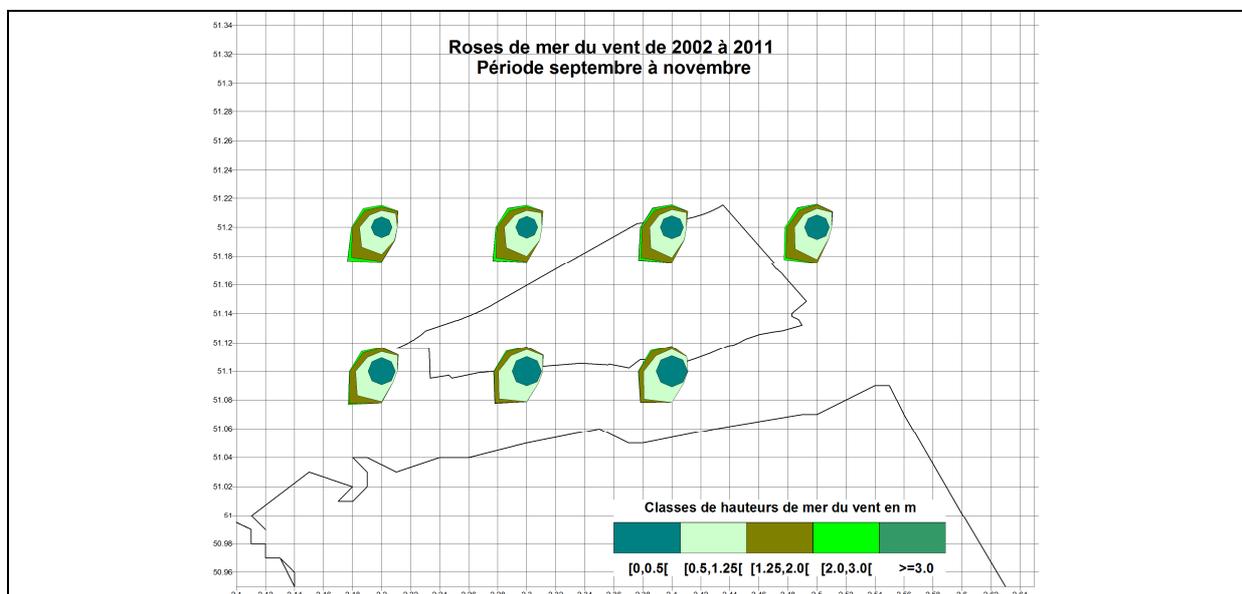


Figure 7.3.2.d : carte des roses d'automne de la hauteur de la mer du vent (période 2002-2011) en fonction des directions des vagues

Avec l'automne, le vent se renforce, les hauteurs décroissent du large (où l'on retrouve des hauteurs comprises entre 2 et 3 m) vers le littoral où le pourcentage de ces hauteurs baisse (flèche noire). La direction des vagues de sud-ouest ne domine plus autant.

7.3.3 Roses annuelles de houle modélisées

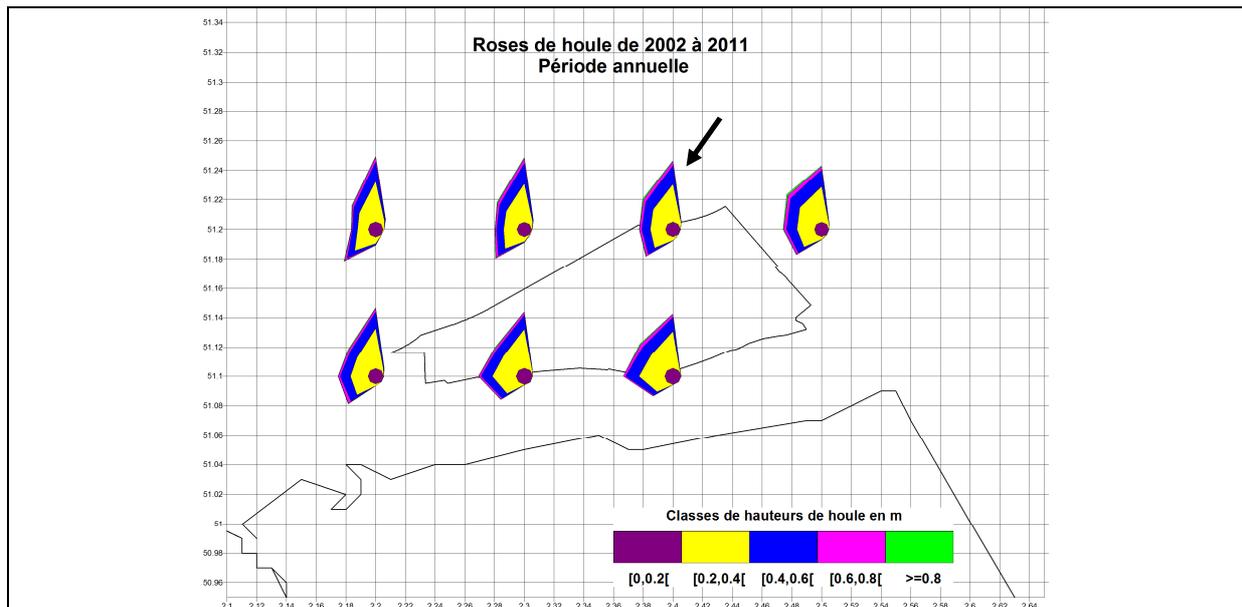


Figure 7.3.3.a : rose annuelle de la hauteur de la mer du vent (période 2002-2011) au point 51.20 N et 2.40 E

Les hauteurs des vagues liées à la houle, au point matérialisé par la flèche noire, sont très faibles et ne dépassent que rarement 0,80 m ; la direction dominante correspond au secteur nord (longueur du fetch plus important de la mer du Nord)

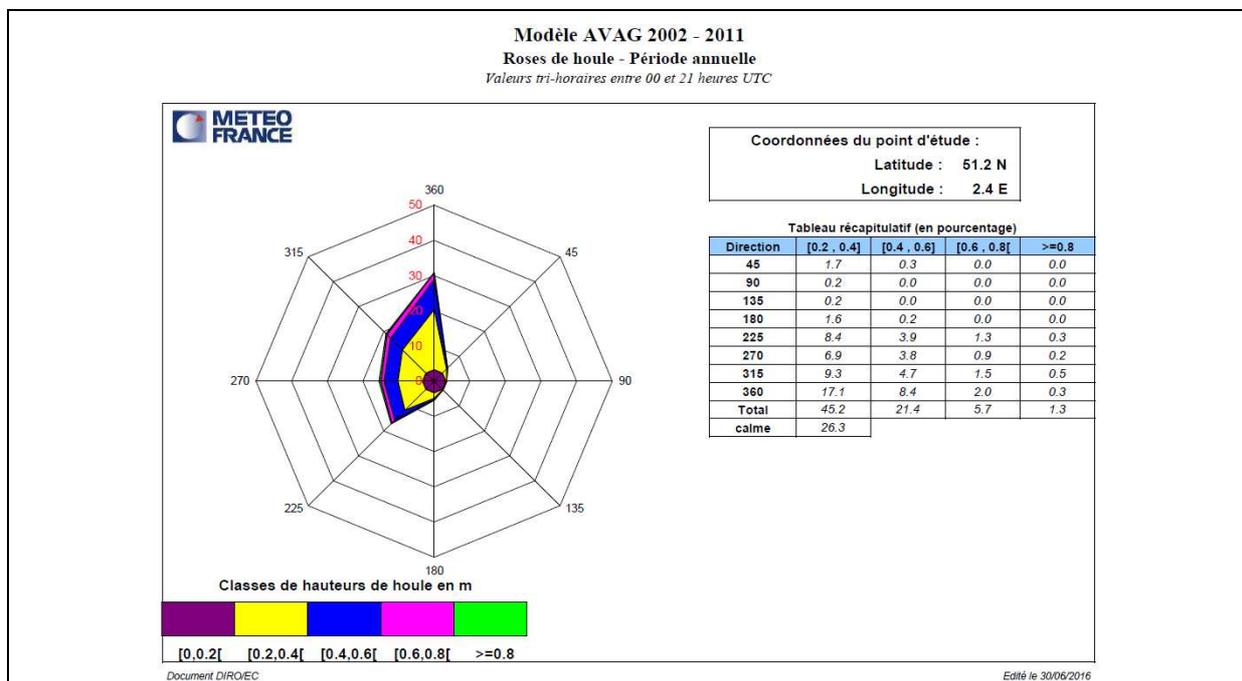


Figure 7.3.3.b : rose annuelle de la hauteur de la mer du vent (période 2002-2011) au point 51.20 N et 2.40 E

La figure 7.3.3.b ci-dessus propose un zoom sur le point identifié par la flèche noire de la figure 7.3.3.a. Il confirme la prédominance des directions de houle de secteur nord et les faibles hauteurs (seulement 1,3 % des données modélisées dépassent 0,80 m).

7.3.4 Les durées de retour

Les calculs se font sur les valeurs maximales quotidiennes des « **H 1/3** » de la mer totale (mer du vent + houle) à partir des données tri-horaires du modèle AVAG disponibles entre le 1^{er} janvier 2002 et le 31 décembre 2011, soit 10 années de données. Une durée de 10 ans est la durée minimale nécessaire pour appliquer la méthode de renouvellement utilisée, mais cela est limité et les résultats doivent être pris avec précaution (à titre indicatif).

Les durées de retour ont été calculées pour 7 points. Les résultats au point le plus nord (51.20 N et 2.40 E) de la zone d'installation sont présentés ci-dessous. Les résultats pour les autres points seront joints à ce rapport. Comme pour le vent, on prend en compte par cette méthode du renouvellement plusieurs maximas annuels des fortes vagues (événements au préalable « décorrélés » pour éviter d'avoir deux vagues trop rapprochées dans le temps).

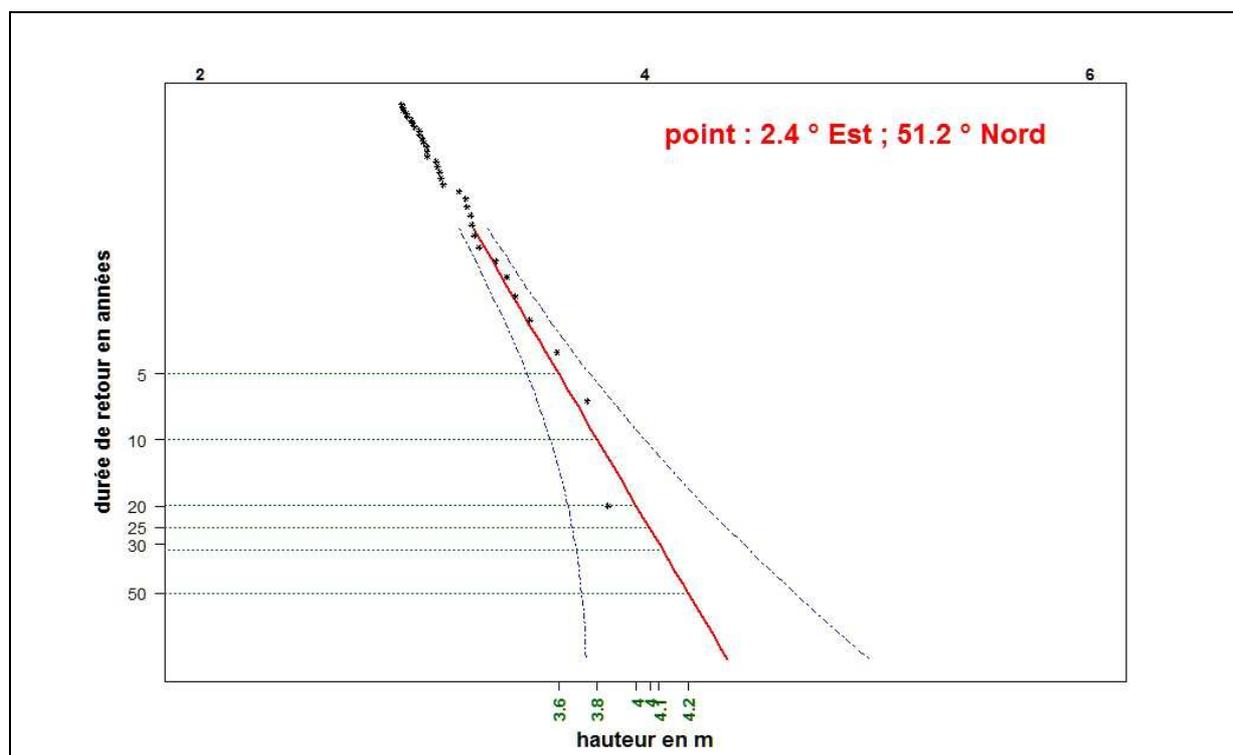


Figure 7.3.4 : graphe de durée de retour des hauteurs de vagues H 1/3 de la mer totale au point 51.20 N et 2.40 E

L'ajustement est très correct, la valeur associée à une durée de retour de 10 ans est de 3,8 m dans l'intervalle de confiance à 70 % (3,6 – 4,0 m)

| borne inférieure à 70 % | Hauteur H1/3 estimée | borne supérieure à 70 % |
|-------------------------|----------------------|-------------------------|
| 3,60 m | 3,80 m | 4,0 m |

Le tableau suivant présente les dates correspondant aux 5 valeurs « modélisées » les plus élevées.

| | |
|-----------------|-------|
| 31 janvier 2004 | 3,8 m |
| 18 janvier 2007 | 3,7 m |
| 27 octobre 2002 | 3,6 m |
| 8 février 2004 | 3,5 m |
| 20 mars 2004 | 3,4 m |

7.4 Comparaison avec d'autres sources de données

Les résultats détaillés au chapitre précédent ont été comparés à deux autres sources de données de vagues reconstituées par modélisation sur la zone considérée.

Le **CEREMA** nous a fourni des données issues de la base ANEMOC2 sur des points très proches ou inclus dans la zone et identifiés (points 5540, 5088, 5118, 6186 et 7726 dans le repère propre à cette base). L'analyse statistique de ces données montre qu'elles sont globalement tout à fait cohérentes avec les données AVAG notamment sur les percentiles de hauteur totale. Elles ne pourront pas être fournies en annexe de ce rapport compte tenu de leurs restrictions de diffusion.

Par ailleurs, le rapport préliminaire fourni par le SHOM et intitulé **EMR Dunkerque Dossier « Etat de connaissance initiale »** donne dans ses conclusions des éléments statistiques de vagues qui se rapprochent de ceux issus de la climatologie AVAG.

On peut donc conclure que malgré des méthodologies différentes (notamment en matière de modélisation des vagues), la prise en compte d'une bathymétrie également différente et des périodes de référence distinctes, ces résultats convergent qualitativement sur la zone considérée. Les nouvelles simulations prévues avec notamment des modèles de vagues plus fins et la prise en compte d'une bathymétrie plus précise permettront d'affiner la connaissance du régime de vagues sur la zone.

8 Conclusion

8.1 Pour le vent

Des données observées ainsi que les données du modèle Arome, sur la période 2000 à 2015, sont utilisées pour établir une climatologie fine du vent moyenné sur 10 minutes, au pas de temps horaire, pour l'implantation des éoliennes.

Les durées de retour sont calculées avec la valeur maximale quotidienne du vent moyenné sur 10 minutes.

La région de Dunkerque est une région ventée. Sous l'influence des côtes et de la proximité de la dépression d'Islande et de hautes pressions, deux directions de vent dominant sur la rose annuelle :

- le nord est,
- un grand secteur qui s'étend du 160 au 280°.

Les rafales les plus fortes sont majoritairement associées à une direction de sud-ouest. Cette direction domine en été.

Il existe une décroissance spatiale des vitesses de vent de la mer vers la terre : les points les plus au large, de la zone d'installation des éoliennes, sont les plus ventés.

Les roses « modèle » présentent de grandes similitudes avec celles observées.

La vitesse du vent augmente avec l'altitude en raison de la diminution de l'influence des effets de frottement dus du relief

A 10 mètres, pour le point central de la zone d'installation des éoliennes :

- le pourcentage de vitesses supérieures ou égales à 5 m/s s'élève à 79,2 %
- la vitesse de vent de durée de retour décennale s'élève à 26,2 m/s

A 100 mètres, pour le point central de la zone d'installation des éoliennes :

- la direction de sud-ouest domine en mer comme sur terre

- le pourcentage de vitesses supérieures ou égales à 5 m/s s'élève à 85,6 % dont 58% supérieures ou égales à 8 m/s
- la vitesse de vent de durée de retour décennale s'élève à 31,6 m/s

8.2 Pour l'état de la mer

Ces conclusions sur la climatologie des vagues sont issues principalement de l'utilisation d'une modélisation des vagues « AVAG » à 10 km de résolution horizontale disponible en continu sur la période 2002/2011. Celle-ci a pu être validée avec de rares données issues de bouées de mesure disponibles plus au large mais à proximité de la zone. Ces éléments convergent pour confirmer que la zone considérée est peu exposée aux fortes vagues (qui dépassent très rarement 3 m en H1/3 au point le plus au large). Celles-ci sont constituées essentiellement de vagues de mer du vent de courte période et de direction prédominante venant du Sud-Ouest. La houle de nord est peu fréquente et de hauteur insignifiante toujours inférieure au mètre.

Compte tenu de la complexité de la bathymétrie (présence de bancs et dunes de sables), les éléments fournis dans ce rapport doivent être interprétés de façon qualitative. Ils pourront être complétés quantitativement par une analyse plus fine (prenant notamment en compte l'effet des hauts fonds sur le déferlement des vagues).

Annexes

Annexe 1 : le modèle atmosphérique AROME

Généralités

AROME a été construit à partir de fonctionnalités de plusieurs modèles de prévision numérique du temps. Les fonctionnalités sont développées depuis plus de dix ans au sein de coopérations internationales et nationales. Il s'agit du noyau dynamique ALADIN-NH développé par des chercheurs du consortium ALADIN, d'une partie de la physique du modèle communautaire Méso-NH, développée par des chercheurs du CNRS et de Météo-France et pour l'assimilation d'une capitalisation des développements d'ARPEGE-IFS et d'ALADIN. Cependant, on peut néanmoins parler d'un modèle d'une nouvelle génération si l'on tient compte du contexte scientifique que l'on met en place pour utiliser ce modèle en opérationnel.

La résolution horizontale d'AROME utilisée est 2,5 km. La résolution verticale est variable : le premier niveau est à 10 mètres, et on compte en tout 60 niveaux.

Se placer d'emblée à cette résolution signifie d'un point de vue modélisation que l'on se situe dans une gamme d'échelles spatiales où les mouvements verticaux associés aux phénomènes convectifs sont traités explicitement par la dynamique du modèle. Ce qui signifie que la convection profonde n'est pas une paramétrisation de la physique du modèle. Cela signifie encore que la notion de pluie sous-maille ou pluie convective n'a pas de sens pour AROME. A ces échelles spatiales, on utilise une « physique pronostique ». C'est à dire par exemple qu'un nuage n'est pas issu d'un diagnostic faisant intervenir les différentes variables d'état du modèle (telles que la température, l'humidité) mais que ses différentes composantes (telles que l'eau nuageuse, la glace, la neige, ...) sont elles-mêmes des variables d'état du modèle avançant à chaque pas de temps au même titre que la pression ou la température.

Les différents changements d'état de l'eau au sein du nuage sont pris en compte au travers de la paramétrisation microphysique qui « remplace » les paramétrisations de la convection profonde et des précipitations de grande échelle.

Toujours en raison de l'échelle spatiale, la description détaillée des différents types de surface devient importante pour modéliser finement les interactions entre la surface et l'atmosphère. Ainsi, le modèle AROME utilise le module de surface SURFEX, ce qui lui permet d'utiliser en particulier un atlas géographique détaillé.

Résolution

Se placer à une échelle spatiale de l'ordre du kilomètre se traduit par un abandon de diverses hypothèses que l'on peut faire à grande échelle (typiquement au dessus de 10 kilomètres). Cela a donc des implications en termes de modélisation numérique à la fois pour la dynamique et la physique du modèle. En particulier, avec des valeurs moyennées sur une maille de 2,5 km de côté, l'équilibre entre le poids et la force verticale de pression (Archimède) n'est plus bien vérifié, ce qui revient à abandonner l'hypothèse hydrostatique et à calculer explicitement les fortes accélérations verticales. De même, la physique du modèle doit elle aussi être adaptée à l'échelle des processus résolus par la dynamique.

La dynamique

La dynamique du modèle AROME est importée du modèle ALADIN dans sa version non hydrostatique.

L'abandon de l'hypothèse hydrostatique permet de rajouter du réalisme dans la prévision des champs météorologiques. AROME a été le premier modèle utilisé en opérationnel par Météo-France à faire cette petite révolution. Les différences entre hydrostatisme et non-hydrostatisme se concentrent sur ce qui se passe sur la verticale. L'hypothèse hydrostatique consiste en gros à considérer que les mouvements violents sur la verticale ne se « voient » qu'à petite échelle. A l'échelle d'AROME, en particulier lors d'épisodes convectifs intenses ou bien près de reliefs pentus, on a des accélérations verticales des particules d'air non négligeables par rapport à la force de gravité.

| | | |
|--------------------------------|---|--|
| 24/08/2016 Page 1 sur 21 | Analyse du risque décennal des forces de vent et des hauteurs de vagues sur la zone de Dunkerque |  METEO FRANCE |
|--------------------------------|---|--|

Le modèle a donc deux variables supplémentaires qui sont :

- l'écart à la pression hydrostatique ;
- la divergence verticale (variation verticale de la vitesse verticale).

Ainsi, la vitesse verticale, reliée à la divergence verticale, est une « vraie » vitesse verticale. A comparer avec la vitesse verticale utilisée couramment, diagnostiquée en gros à partir de la divergence du vent horizontal (vitesse Omega). On peut donc voir avec AROME, par exemple des ascendances convectives fortes sur les champs de vitesse verticale, ce qui n'est pas le cas à l'échelle d'ALADIN (par exemple il n'est pas rare que les vitesses verticales puissent atteindre localement des valeurs fortes, supérieures à la dizaine de m/s).

La physique

La physique du modèle AROME provient directement d'un sous-ensemble des paramétrisations disponibles dans le modèle Méso-NH.

Le modèle possède quatre paramétrisations différentes : le rayonnement, la microphysique, la convection peu profonde ou non précipitante et la turbulence.

Le module de rayonnement utilisé dans AROME est le même que celui du Centre Européen et d'ARPEGE, donc pas de spécificité sur ce thème, si ce n'est que le module de rayonnement est appelé plus fréquemment que dans les modèles de grande échelle pour tenir compte des interactions avec les nuages (tous les quarts d'heure).

Le fait d'avoir une bonne description de la dynamique dans les nuages (en particulier des vitesses verticales) nécessite d'avoir une paramétrisation des changements de phase de l'eau qui soit suffisamment complète pour que les processus de microphysique nuageuse soient également décrits finement (et cela d'autant plus que ceux-ci interagissent avec la dynamique du modèle : poids des hydrométéores, évaporation des pluies, microphysique de la glace, etc.). La microphysique utilisée dans AROME est le schéma ICE3 (pour 3 espèces de glace) qui calcule à chaque pas de temps les rapports de mélange de cinq types d'hydrométéore, qui sont ainsi des variables 3D d'état du modèle :

- l'eau nuageuse ;
- l'eau de pluie ;
- la glace nuageuse ;
- la neige ;
- la neige roulée (« graupel »).

Même à la résolution de 2,5 km, hors rayonnement et interaction avec la surface, il reste un ensemble de processus sous maille qui nécessitent toujours d'être paramétrés. Il s'agit en particulier du mélange turbulent dans la couche limite, des nuages de petite extension horizontale (cumulus) et verticale (sommet des stratocumulus).

Le traitement des surfaces

Le modèle AROME utilise le module de surface dit SURFEX. L'atmosphère dialogue avec le module de surface au moyen d'une interface générique. Ainsi, le modèle AROME inclut de fait tous les développements nouveaux de SURFEX. La maille du modèle est divisée en quatre types de sol qui font chacun appel à des schémas différents. Il s'agit de la mer, des lacs, de la ville (schéma TEB) et de la nature (schéma ISBA). La détermination du type de sol s'appuie sur une base de données de résolution 1 km (ECOCLIMAP) permettant de prendre en compte 215 écosystèmes différents. Le module de surface SURFEX possède ses propres diagnostics.

AROME est utilisé en opérationnel à Météo-France sur la France métropolitaine depuis 2008.

Annexe 2 : Détails sur la climatologie Arome

Informations sur la base de données issue de la modélisation avec AROME

Contexte

Sur la France métropolitaine, les bases de données observées existantes ne permettent pas de disposer d'une information spatialisée et les bases de données numériques spatialisées disponibles ont une résolution spatiale (ex : 80 km de résolution pour ERA Interim) et temporelle (ex : toutes les 6 heures pour ERA-INTERIM) trop lâche pour les besoins liés à l'éolien.

Un calcul intensif a été mené pour constituer une base de données de climatologie modèle spatialisée et à haute résolution.

L'objectif de ce calcul massif est de constituer une base de données **spatialisées, horaires** de paramètres liés au potentiel éolien (P, T, Hu, DD et FF) à des niveaux hauteurs proches du sol (de 20 m à 160 m par pas de 20 mètres) complétée d'autres paramètres¹ et niveaux classiques à la meilleure résolution possible et la plus proche possible des observations.

Pour des raisons de coûts de calcul, il a été choisi de limiter la période de reconstitution à 10 ans (2000 – 2009) et de la compléter ensuite avec l'archive opérationnelle du même modèle sur la période 2009 à 2015 afin d'obtenir une base de données sur 16 ans. L'année commune aux deux sources, 2009, permet de s'assurer de l'homogénéité des séries constituées.

Choix du modèle et technique de descente d'échelle

Un choix d'importance et impactant fortement la qualité des données de vent produites est le choix de la résolution du modèle numérique à utiliser. En se plaçant à 2,5 km de résolution, en plus d'une meilleure représentation du relief qui mécaniquement permet de représenter de façon réaliste l'écoulement du fluide atmosphérique autour des massifs, le modèle de prévision numérique utilisé doit permettre d'appréhender les phénomènes tels que la convection et la brise, typiques de cette échelle avec notamment une meilleure précision dans la description des surfaces composant chaque maille du modèle.

Le choix du modèle non hydrostatique AROME avec une résolution horizontale de 2,5 km et une résolution verticale fine constituée de 60 niveaux a pour objectif de bien décrire localement le vent pour la problématique éolienne. Ce choix provient aussi de la disponibilité (dans la base de données d'archive des runs de prévision) des données AROME utilisées en opérationnel à Météo-France depuis 2008 et dont les principales caractéristiques de configuration sont identiques (notamment les résolutions). Réaliser 10 ans de simulation de 2000 à 2009 permet ainsi de créer une base de données AROME mixte (rejeu et opérationnel) de 2000 à 2015 sur la France métropolitaine.

AROME est un modèle à aire limitée qui nécessite pour fonctionner d'être initialisé et de disposer sur les bords de son domaine de données de couplage tout au long de la simulation.

ERA-INTERIM est une base de données de ré-analyses globales du modèle de prévision numérique IFS du centre européen. Une ré-analyse donne une description numérique d'un climat récent, produit par la combinaison de modèles et d'un très grand nombre d'observations (sol, satellite, altitude). ERA-INTERIM est une base de données de ré-analyse contenant une chronique de données homogènes débutant en 1979 et qui est continuellement mise à jour. La résolution spatiale de ces données de ré-analyse est de 80 km approximativement horizontalement et elles sont disponibles sur 60 niveaux. Cette

¹ Seule une sélection de paramètres issus des chaînes de prévisions est archivée en routine.

base de données est la candidate idéale pour initialiser et coupler un modèle de prévision numérique à aire limitée sur une longue période.

Néanmoins, sa résolution initiale (80 km) est considérée comme trop lâche pour pouvoir être utilisée directement pour coupler AROME (2,5 km). Pour éviter un trop grand saut en résolution un modèle intermédiaire a été intercalé entre AROME et ERA-INTERIM : le modèle hydrostatique ALADIN à 15 km de résolution.

La descente d'échelle dynamique finalement retenue est ERA-INTERIM (80 km) → ALADIN (15 km) → AROME (2,5 km) sur la période allant du 1^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2009 (cf. domaines la figure associée).

Cette méthodologie et la taille des domaines permettent d'assurer la liberté nécessaire à chaque modèle pour représenter correctement les processus dynamiques et physiques pour lesquels ils sont utilisés mais aussi de contraindre suffisamment ceux-ci pour qu'ils soient pilotés par la ré-analyse ERA-INTERIM.

Les données utiles de la base de données ERA-INTERIM sont:

- les réanalyses sexti-horaires (00h, 06h, 12h et 18h UTC)
- les guess (prévisions à court terme) à 3 et 9 heures des analyses à 0 et 12 heures UTC

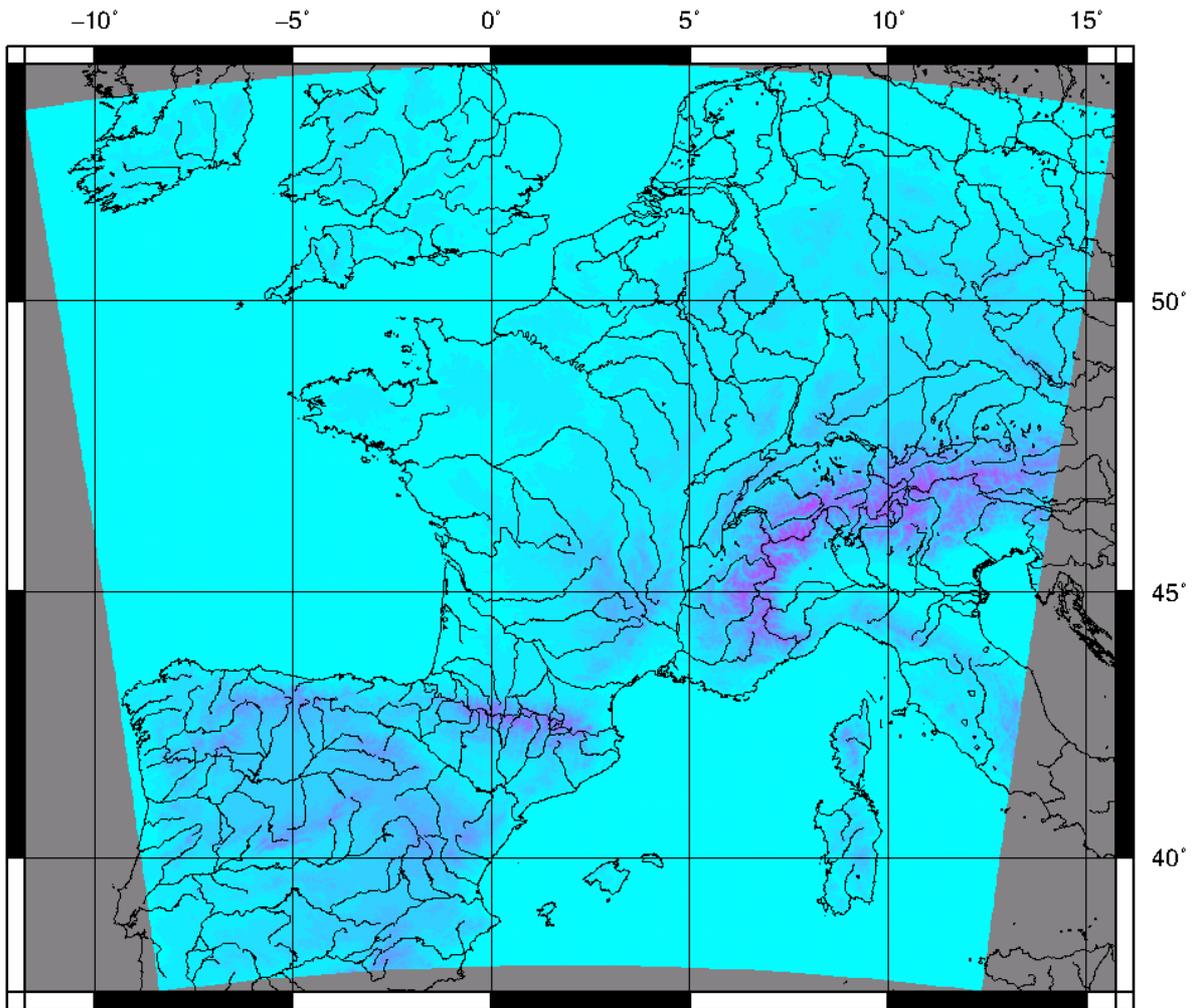
Ces données constituent un jeu de fichiers disponibles toutes les 3 heures, de 2000 à 2009 utiles au couplage et à l'initialisation des simulations ALADIN.

L'utilisation de données issues du modèle IFS (le modèle utilisé pour constituer ERA-INTERIM) et notamment de son module de surface HTESSSEL comme données d'initialisation de la surface dans SURFEX (ALADIN) est problématique. Par construction, HTESSSEL et SURFEX sont très différents et les équilibres qu'ils entretiennent avec l'atmosphère aussi. Ainsi, l'initialisation de SURFEX avec des données HTESSSEL, même avec des méthodes complexes, peut avoir de fâcheuses conséquences sur les paramètres liés au flux d'humidité à la surface (humidité et température de l'air à 2 m). Même si cet impact est limité pour le paramètre vent, et pour garantir une utilisation la plus large possible de la future base de données de 10 ans, un cycle d'analyse de surface a été mis en œuvre dans la chaîne de production ALADIN pour pallier ce problème. Cette analyse de surface consiste en la prise en compte des observations de vent, température et humidité des stations terrestres comprises dans le domaine de modélisation. Elle ne considère que les surfaces terrestres, le problème d'initialisation n'existant pas sur mer (les SST utilisées dans la descente d'échelle dynamique sont celles analysées dans ERA-INTERIM).

On réalise une simulation par jour J. La simulation débute J-1 à 18h UTC et se poursuit jusqu'à J+1 à 00h UTC. On ne garde que les 24 dernières heures pour constituer la base de données (on laisse le temps au modèle de créer ses propres structures dans les 6 premières heures de simulation : spin-up). On initialise l'atmosphère à l'aide des données ERA-INTERIM, et on utilise un fichier de couplage toutes les 3 heures provenant d'ERA-INTERIM pendant les 30 heures de simulations. Parallèlement on réalise un cycle d'analyses de surface toutes les 6 heures.

Le calcul de scores sur ces simulations ALADIN pour les humidités et températures à 2 mètres par rapport aux observations a montré une nette amélioration par rapport à une chaîne de descente d'échelle sans cycle d'analyse et un effet quasi neutre sur le vent à 10 mètres.

Dans la foulée des simulations ALADIN, on réalise les simulations AROME en débutant la simulation J-1 à 18h UTC jusqu'à J+1 à 00h UTC. On ne garde que les 24 dernières heures pour constituer la base de données (spin-up de 6 heures). On initialise l'atmosphère et la surface à l'aide des données ALADIN, et on utilise un fichier de couplage toutes les heures provenant d'ALADIN pendant les 30 heures de simulations. On réalise une analyse de surface après 6 heures de simulation.



Domaine de calcul et relief du modèle AROME France

Concaténation avec l'archive opérationnelle

Pour compléter la chronique de données horaires spatialisées sur 10 ans (de 2000 à 2009), l'archive du modèle AROME utilisé pour la prévision numérique depuis 2009 jusqu'à aujourd'hui a été exploitée. L'homogénéité des deux jeux de données (le rejeu d'une part, l'archive opérationnelle d'autre part) a pu être vérifiée pour l'ensemble de l'année 2009 et a montré des résultats très proches en particulier pour le paramètre vent.

Les quantiles de la force du vent à 10 m des simulations AROME (rejeu et archive opérationnelle) sont proches de ceux des observations avec un avantage au rejeu à 00h et 06h UTC qui surestiment moins les vents faibles.

Quelle différence avec la précédente base de données issue d'AROME également?

Il est important de noter qu'en 2014 Météo-France avait constitué, pour la DGEC, un jeu de données spatialisés de paramètres d'intérêt pour l'éolien.

Ce jeu de données a été diffusé par le Ministère dans le cadre du 2nd exercice de planification de l'éolien en mer.

Il est constitué de l'archive opérationnelle du modèle AROME de 2009 à 2013 et d'une reconstitution basée sur la méthode des analogues pour la période 2004 – 2008.

Pour la période 2004 – 2008, cette chronologie avait été reconstituée pour un objectif de calcul d'indicateurs climatologiques, à partir de la méthode des analogues, en s'appuyant sur la méthodologie dite B95+:

- réalisation d'une classification en types de temps sur une profondeur de 30 ans à base du géopotential à 700 hPa de ERA Interim à l'analyse de 12H UTC sur une zone plus large que le domaine du modèle AROME. 19 classes de type de temps sont ainsi identifiées.
- Identification pour chaque journée de 2004 à 2008 de sa classe type de temps d'appartenance.
- Sélection de 102 dates parmi les 2*365 possibles de la période où AROME est opérationnel (2009 et 2010), équilibrées en représentativité sur les 19 classes de type de temps; ces dates serviront à affecter des analogues aux dates de 2004-2008. Extraction du vent à 100m AROME pour ces dates.
- Reconstitution des années 2004-2008 à partir de ces analogues.

L'atlas ainsi constitué comportait 10 années de données seulement et reposait sur une technique de reconstitution qui ne permettait pas de garantir une cohérence chronologique par rapport aux situations météorologiques mais offrait une solution pour approcher des grandeurs statistiques climatologiques du vent.

A posteriori des deux exercices (la reconstitution par la méthode des analogues et la simulation physique complète sur une période plus étendue), on notera que le premier a fourni des indications de vitesses moyennes très proches du second.

La simulation physique et la base de données utilisées dans cette étude, permettent des analyses complémentaires et notamment des comparaisons directes de chroniques de données horaires de vent à différentes hauteurs sur toute la profondeur de l'archive.

Le paragraphe suivant présente de façon synthétique, les résultats de la qualification de cette nouvelle base de données pour l'éolien qui montre de très bons résultats voire d'excellents en milieu marin où le relief comme la rugosité ne sont pas des limites à la représentation à 2,5 km du modèle.

Comparaison de la climatologie éolienne issue d'AROME 2000 – 2015 avec les observations

Les résultats de la modélisation ont été confrontés à ceux des mesures physiques disponibles sur la même période. En métropole, le niveau 10 m a été traité avec 140 stations présentant une classe environnementale de bonne qualité.

En complément et pour rendre compte des hauteurs d'intérêt du secteur éolien, une trentaine de points de mesure à des hauteurs supérieures à 10 m ont pu être exploités, de 20 m à 150 m. Cette comparaison est essentiellement terrestre du fait des restrictions de diffusion des données de mât offshore.

Observations terrestres à 10m

Ce paragraphe est volontairement peu détaillé car il concerne des hauteurs proches du sol et non des hauteurs directement d'intérêt pour les professionnels de l'éolien. Néanmoins, dans le contexte météorologique, c'est un exercice de contrôle systématique.

La richesse du réseau de mesure du vent à 10 m permet l'évaluation de l'apport d'un modèle de plus fine résolution par rapport à son modèle de forçage.

Les indicateurs utilisés pour cette évaluation sont le biais et l'erreur quadratique moyenne.

Pour la vitesse du vent, les deux indicateurs sont bien améliorés par rapport à ERA-Interim. Ainsi, on diminue de 0,5 m/s l'erreur quadratique moyenne entre ERA-Interim et AROME et le biais d'AROME, moins marqué par le cycle saisonnier, s'approche de 0.

La simulation AROME améliore nettement les scores aux observations atypiques comme au Mont-Aigual ou à Bourg-Saint-Maurice.

Observations terrestres supérieures à 20 m

Au-delà de 10 m, les mesures de vent sont beaucoup plus rares et leur accessibilité plus difficile.

Dans cet exercice de qualification, ont donc été recherchés un maximum de sites de mesures disposant d'une classe environnementale acceptable.

Plusieurs stations de mesure de sémaphore, positionnées sur le toit des bâtiments, mesurent le vent entre 20 et 60 m. Des mâts de mesure viennent en complément à des hauteurs plus élevées : 60, 80 et 100 m. Dans cette catégorie, on notera la mise à disposition par le SIRTA, des données du mât de Saclay, à 100 m, qui constitue l'archive de données la plus longue à notre disposition à cette hauteur. S'agissant d'un dispositif d'observation suivie par une unité scientifique, elle offre une précieuse référence. Les autres mâts sont associés à des sites éoliens. Enfin quelques sodars complètent ce panel de stations et permettent d'obtenir de l'information à 150 m.

Sur l'ensemble des trente et un points de comparaison, on observe que les écarts de vitesse moyenne sur la période commune à la mesure et à la modélisation, sont majoritairement inférieurs à 10% quelque soit le site et la hauteur considérés: 84% des points de mesures présentent un écart inférieur à 10%. A 100 m, sur neuf points de comparaison terrestre, l'écart constaté sur la vitesse moyenne est inférieur à 7,6%.

On constate que l'estimation de la force du vent est globalement meilleure à 100 m qu'à 50 m et légèrement meilleure à 150 m qu'à 100 m. Cela est cohérent avec l'expertise des modélisateurs : de meilleurs résultats sont attendus dès lors que l'on s'éloigne du sol et des impacts d'une rugosité ou d'un relief local vu de manière simplifiée dans le modèle.

Les sites côtiers présentent de bons résultats malgré des hauteurs encore faibles à l'exception de la station de Lège-Cap-Ferret, site exceptionnel géographiquement puisque localisé sur une bande de terre entre l'Océan et le Bassin d'Arcachon. C'est à ce point de

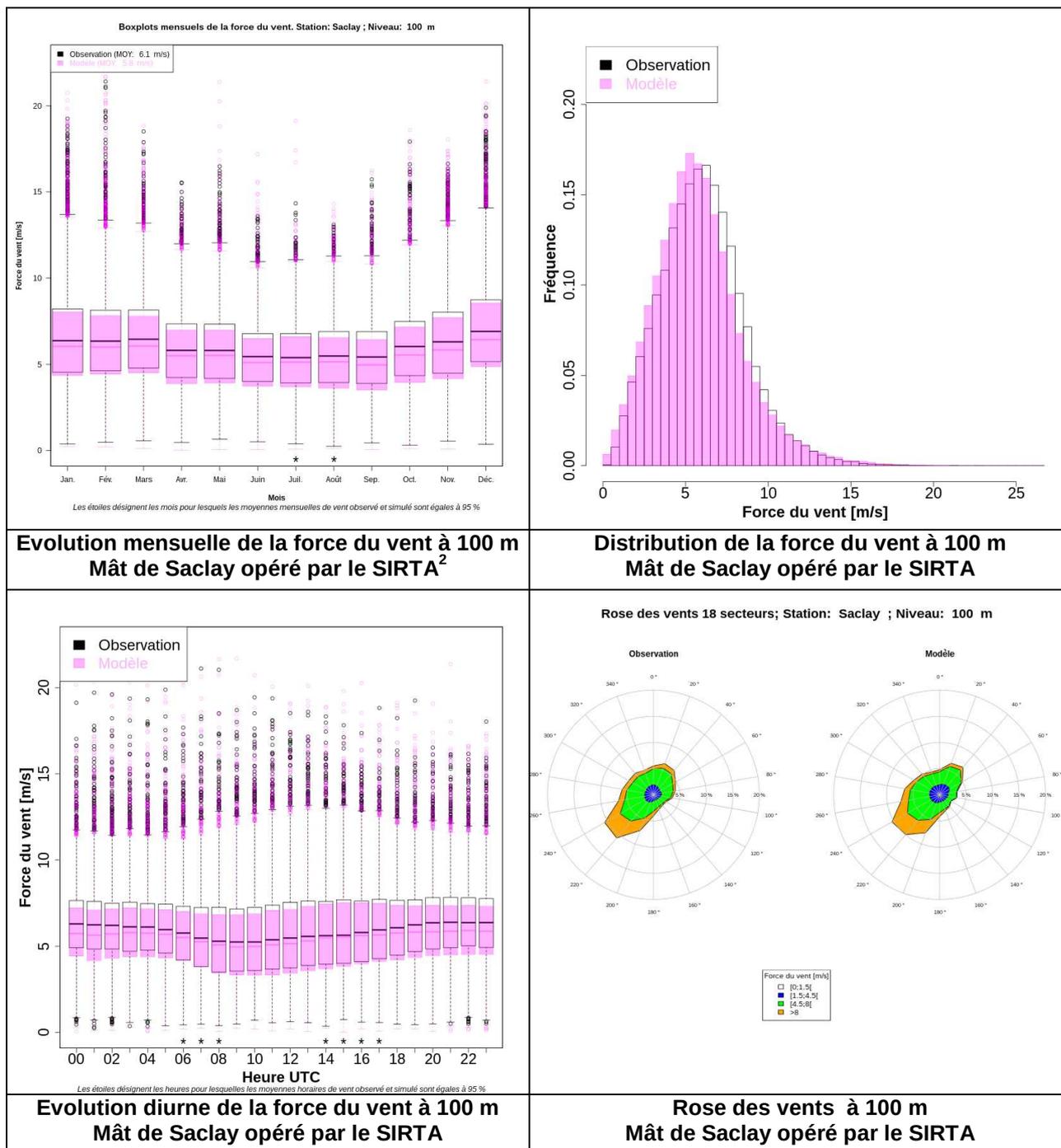
mesure que l'on enregistre le plus grand écart sur l'ensemble des points de comparaison : 22%.

La représentation du cycle diurne est globalement bien restituée par le modèle. Celle-ci est d'autant plus proche du comportement observé que l'on atteint des hauteurs élevées.

La modélisation avec AROME montre une bonne aptitude à reproduire les données de vents observés sur les points de comparaison onshore.

Elle s'avère meilleure lorsque l'on considère des hauteurs de 100 et 150 m et des sites de plaine mais montre aussi d'excellentes aptitudes à restituer les phénomènes littoraux et reste satisfaisante, en première approche, dans des zones de relief resserré.

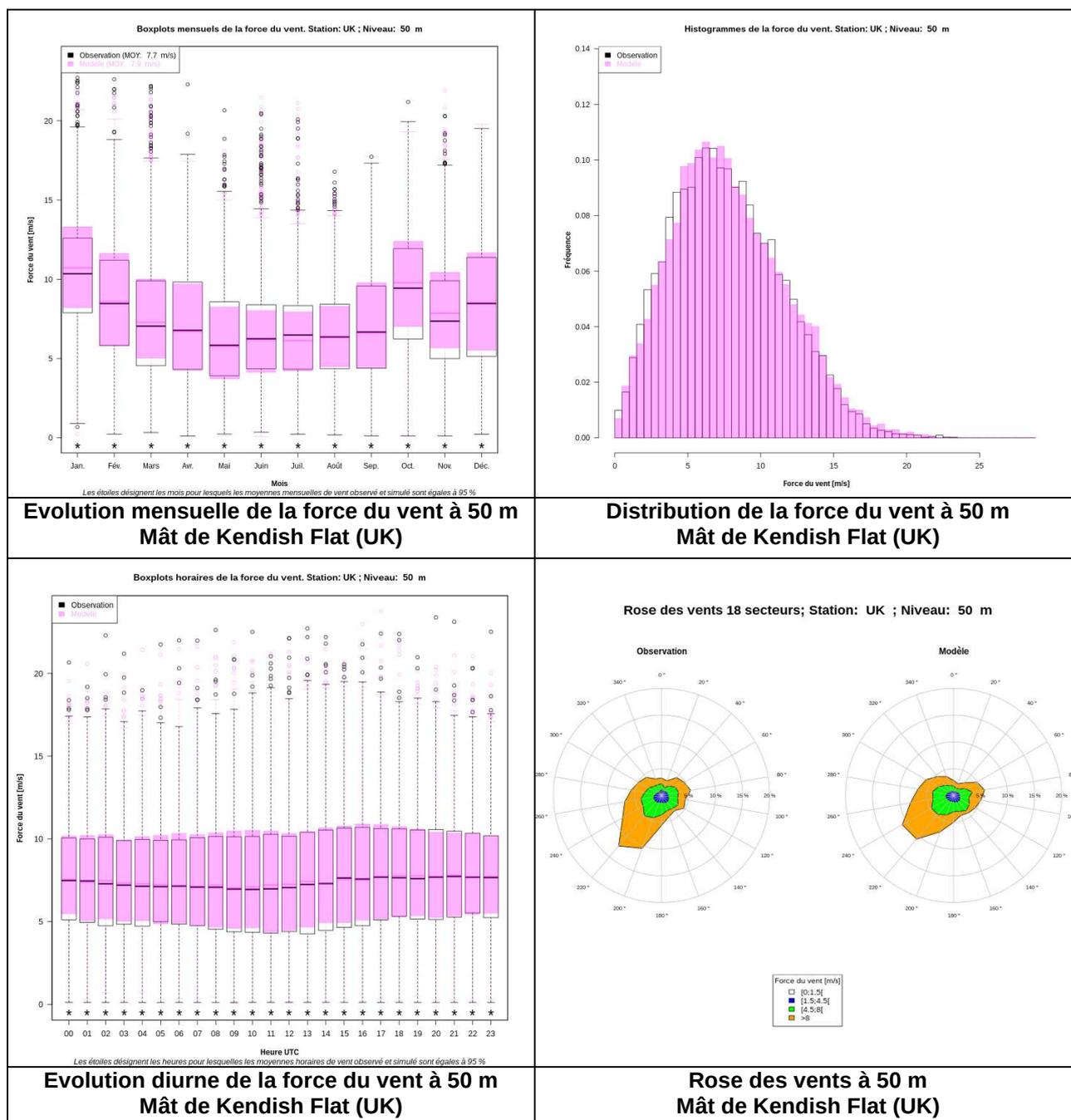
C'est cependant dans ces zones que l'on constate les principales limites du modèle, liées à la représentation simplifiée du relief adapté à sa résolution.

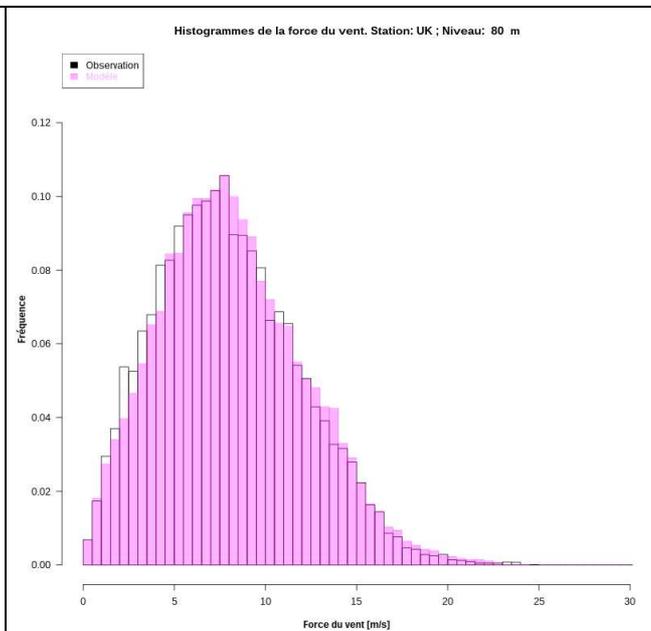
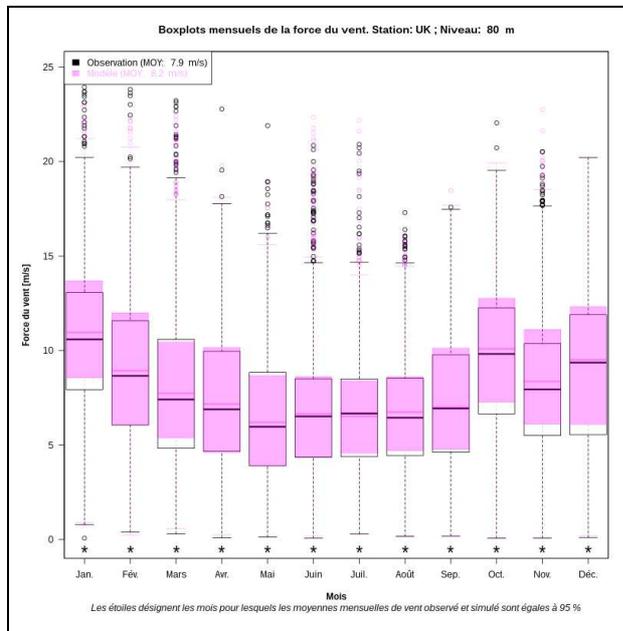


Observations offshore

Les points de comparaison existent mais les données sont rarement accessibles. Les données du mât de la ferme offshore de Kendish Flat (UK) sont toutefois accessibles et comprises dans le domaine géographique de la modélisation AROME. Elles sont diffusées par The Crown Estate qui en possède le copyright. Elles sont exploitées dans les graphiques ci-dessous.

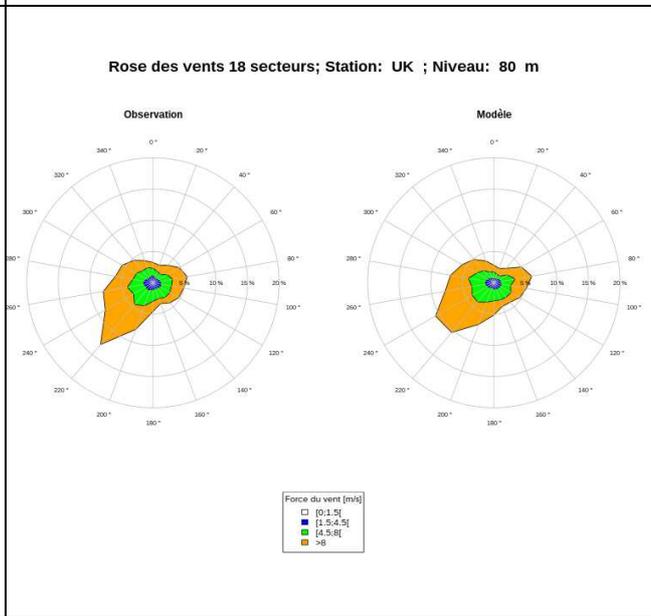
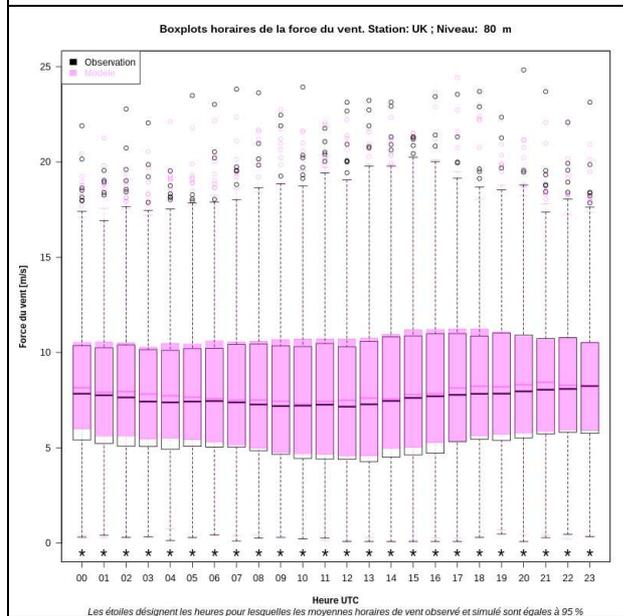
Ce mât présente un niveau de mesure à 50 et à 80 m. Les données disponibles le sont du 10/10/2002 au 05/01/2005.





Evolution mensuelle de la force du vent à 80 m Mât de Kendish Flat (UK)

Distribution de la force du vent à 80 m Mât de Kendish Flat (UK)



Evolution diurne de la force du vent à 80 m Mât de Kendish Flat (UK)

Rose des vents à 80 m Mât de Kendish Flat (UK)

On notera qu'à 50 m, comme à 80 m, les échantillons observés et mesurés de vitesse horaires par mois sont statistiquement identiques à 95% quelque soit le mois considéré. La représentation de l'historique des vitesses horaires issue de la modélisation est excellente à 50 comme à 80 m.

La visualisation des roses des vents, comme l'historique nous montre toutefois une légère sous-estimation des vitesses de vent les plus forts.

La représentation du cycle diurne est également très bien vue par le modèle.

Annexe 3 : le modèle de vagues AVAG

Le modèle de prévision de l'état de la mer VAG repose sur la résolution numérique de l'équation de bilan d'énergie, dont une expression simplifiée a d'abord été introduite par Gelci et al. (1957). Les travaux de Hasselmann (1962) ont ensuite conduit à l'introduction de termes sources déduits de théories sur les mécanismes de génération des vagues. L'équation de bilan n'est valable que si les amplitudes, les longueurs d'ondes et les périodes des vagues varient lentement par rapport à l'échelle d'espace et de temps qui leurs sont propres. VAG est un modèle dit de "seconde génération", couplé discret : les interactions non linéaires sont représentées de façon non explicite.

Physique du modèle

Introduction

Les termes sources du modèle VAG paramétrisent les apports d'énergie par le vent, les pertes d'énergie par dissipation (déferlement intermittent), et les transferts d'énergie dus aux interactions non-linéaires. Les mécanismes d'interactions avec le fond (frottement des vagues sur le fond de la mer et percolation), la réfraction angulaire (modification de la direction de propagation des vagues liée à la modification de la profondeur), le « shoaling » (convergence de l'énergie liée à la modification de la vitesse de groupe des vagues), peuvent également être pris en compte dans la modélisation des vagues en eau peu profonde.

Apport d'énergie

Dans la formulation originale du modèle VAG (Guillaume 87, 90) l'apport d'énergie par le vent repose sur deux termes qui paramétrisent les effets de la croissance linéaire proposée par Phillips (1957) et de la croissance exponentielle proposée par Miles (1981). Le terme exponentiel est de type Snyder (1981). Cette formulation initiale a été modifiée par Fradon (1997), afin de mieux équilibrer les termes de croissance et de dissipation, et de minimiser ainsi l'effet de la limitation d'énergie introduite dans la version originale du modèle. Le terme linéaire décrit dans Golding 1983 a été calibré par Guillaume (1987). Suivant Komen et al. (1984), le vent est remplacé par la vitesse de frottement u_* dans le terme de croissance exponentielle et u_* est calculé à partir du vent selon les relations de Wu (1982). Une pondération adaptée à chaque terme a été introduite.

| | | |
|---------------------------------|--|--|
| 24/08/2016 Page 11 sur 21 | Analyse du risque décennal des forces de vent et des hauteurs de vagues sur la zone de Dunkerque |  METEO FRANCE |
|---------------------------------|--|--|

Dissipation

L'expression de la dissipation utilisée dans la version originale de VAG a été proposée par Golding (1983) sur la base de la théorie de Hasselmann (1974). Le terme de dissipation avait été ajusté par Golding 1983 pour que la croissance et la dissipation s'équilibrent au mieux lorsque la mer est bien développée, c'est-à-dire lorsque le spectre d'énergie est un spectre de Pierson-Moskowitz.

Une nouvelle formulation de la dissipation, de type WAM (WAMDI, 1988), a été introduite dans le code du modèle. Elle repose sur la théorie de Hasselmann (1974), modifiée par Komen et al. (1994) lors de la mise en place d'un couplage vent/vagues dans WAM selon Janssen (1991).

Les termes de croissance et de dissipation sont pondérés par des coefficients ajustés d'après les travaux de Fradon et al. (2000), Stephanescu et Lefèvre (2001), et Lefèvre et al. (2003).

Limitation de l'énergie

Lorsque la mer du vent atteint son plein développement, c'est-à-dire lorsque le spectre de la mer du vent est un spectre de Pierson-Moskowitz (1964), croissance et dissipation doivent théoriquement s'équilibrer. Cependant, les processus de croissance et de dissipation des vagues restent plus ou moins bien connus et les paramétrisations utilisées pour les décrire ne sont pas parfaites. L'équilibre entre croissance et dissipation n'est donc qu'approché. Pour éviter que l'énergie de la mer du vent ne devienne supérieure à celle du spectre de Pierson-Moskowitz, considérée comme une limite pour les cas de mer bien développée, on a donc recours à une limitation de l'énergie de la mer du vent. Cette limitation est faite en même temps que la première étape de la détermination du domaine « mer du vent » du spectre : si l'énergie contenue dans le domaine correspondant au spectre de Pierson-Moskowitz en première approximation de l'énergie de la mer du vent, est supérieure à l'énergie du spectre de Pierson-Moskowitz, on ramène artificiellement l'énergie de la mer du vent à la valeur du Pierson-Moskowitz. Le spectre de la mer du vent est dans ce cas exactement égal au spectre de Pierson-Moskowitz.

Dissipation par frottement sur le fond

En eau peu profonde, la dissipation par le fond peut jouer un rôle important pour la dissipation des vagues. Deux mécanismes principaux peuvent intervenir : la dissipation par frottement sur le fond et la dissipation par percolation. Les paramétrisations de ces mécanismes ont été introduites à partir des formulations décrites dans Shemdin et al. (1978) et ont été ajustées par Kabidi (1994) puis Franchisteguy et Gueusquin (1996).

| | | |
|---------------------------------|---|--|
| 24/08/2016 Page 12 sur 21 | Analyse du risque décennal des forces de vent et des hauteurs de vagues sur la zone de Dunkerque |  METEO FRANCE |
|---------------------------------|---|--|

Les interactions non linéaires

Les interactions non linéaires ne sont pas traitées explicitement dans le modèle VAG. Leur prise en compte se fait à travers une contrainte sur le spectre résultant de la croissance et de la dissipation. Le spectre d'énergie est alors séparé en deux parties : une partie houle et une partie mer du vent. La partie houle reste inchangée et les contraintes imposées ne concernent que la partie mer du vent. L'énergie totale contenue dans cette partie du spectre n'est pas modifiée, elle est simplement redistribuée pour que le spectre de la partie mer du vent corresponde à un spectre JONSWAP (Hasselmann et al.1973). La méthode de séparation houle/mer du vent est décrite en détail dans Guillaume (1987) et Fradon (1997). Elle repose sur plusieurs propriétés des spectres de mer du vent. D'abord, le vent ne crée de l'énergie que dans les vagues dont la direction de propagation fait un angle de moins de 90° par rapport à la sienne pour une force de vent donnée, ensuite, la fréquence pic du spectre f_p dépend de l'énergie totale de celui-ci et ne descend pas en-dessous d'une valeur limite égale à la fréquence pic du spectre de Pierson-Moskowitz f_{PM} , enfin, la forme escarpée de la face avant du spectre fait que pour des fréquences inférieures à $0,8f_p$ l'énergie s'annule.

Dans le cas de l'eau peu profonde, le spectre JONSWAP a été remplacé par un spectre de type TMA (Texel Marsen Arslø) proposé par Bouws et al. (1985).

Aspects numériques

Propagation, shoaling, réfraction

Le schéma numérique utilisé pour décrire la propagation des vagues est un schéma d'ordre 1 « upstream » en coordonnées sphériques (Komen et al., 1994) , introduit par Bouksim (1993).

Ce schéma remplace le schéma initial d'ordre 2 qui n'avait pas assez de diffusion dans les directions orthogonales à celles de la propagation (Cloarec, 1987). La discrétisation angulaire a été choisie pour minimiser l'effet de l'absence de diffusion dans les directions Nord-Sud et Est-Ouest (Franchisteguy et Guesquin, 1996). Les termes de réfraction et de shoaling peuvent être activés indépendamment dans le modèle VAG. Ils apparaissent dans les termes de propagation.

Intégration des termes sources

Pour l'intégration temporelle des termes sources, un schéma explicite du premier ordre est utilisé, sauf pour ceux liés à l'eau peu profonde pour lesquels un schéma d'ordre 2 est utilisé (Franchisteguy et Guesquin, 1996). Les différents termes sources sont calculés successivement, après prise en compte du terme d'advection : les termes de croissance et

de dissipation sont calculés les premiers, le terme d'interactions non linéaires étant calculé dans un deuxième temps.

Fonctionnalités et configurations opérationnelles

Assimilation de données altimétriques

L'assimilation de données altimétriques dans le modèle de vagues utilise la technique de l'interpolation optimale. Elle s'appuie sur le schéma développé dans WAM (Lionello et al. 1992.), adaptée par Le Meur et al. (1995). Leur apport sur la prévision des vagues est également décrit dans Lefèvre and Cotton (2002). Les champs de hauteurs de vagues et de vitesses de vent sont combinés avec les mesures altimétriques selon un cycle de 6 heures. Le spectre d'énergie des vagues est analysé. Il subit une normalisation permettant de reproduire l'énergie totale déduite de la hauteur significative interpolée, et d'un étirement visant à corriger la fréquence moyenne. Les adaptations dans VAG reposent essentiellement sur le remplacement des paramétrisations de mer du vent et de croissance introduites dans l'analyse de WAM par celles de type JONSWAP inhérentes à la physique de VAG. La séparation entre les cas de houle et de mer du vent a également été supprimée au profit d'un traitement simultané des deux parties du spectre. Pour la partie mer du vent, la fréquence moyenne est ajustée à partir d'une paramétrisation de la croissance (propre au modèle VAG), en supposant que la durée d'action est correcte. Pour la partie houle, le spectre est étiré de telle sorte à assurer la conservation de la pente moyenne des vagues lors de leur propagation. Une option a également été introduite dans le code d'assimilation, permettant l'utilisation de la vitesse du vent déduite de l'altimètre au lieu de celle déduite de la mer du vent dans le processus d'analyse.

La sélection des données est réalisée dans une sphère d'influence et les longueurs de corrélation empiriques, déduites des données modèles et des données altimétriques sont de 250 km pour le vent et 600 km pour les vagues. Les données géophysiques sont corrigées selon les relations de calibration proposées par Queffeuilou et al. (1996)

Imbrication

La possibilité d'imbrication de sous-domaines a été introduite après les études de Bocrie, Grimal et Périer (1995). Il est possible d'imbriquer plusieurs sous-domaines en parallèle.

Les modèles opérationnels

4 modèles tournent sur la chaîne opérationnelle.

- Un modèle global, effectuant des prévisions à 72 h d'échéance, 4 fois par jour, forcé par les champs de vent du modèle ARPEGE étiré (Courtier et al. 1991).

Domaine : global

Résolution spatiale : 1°x1°

Résolution spectrale : 12 fréquences en progression géométrique de 0.2, de 0.04 Hz à 0.3hz, 18 directions (première direction, 95° à partir de nord géographique)

Forçage atmosphérique : vents à 10 m du modèle ARPEGE toutes les 6 heures, interpolés à partir d'une grille en résolution 1.5°X1.5°.

Bathymétrie : ETOPO5, modifiée.

Masque de glace à partir de la température de la mer d'ARPEGE,

Pas de temps : 900 S

Assimilation : 4 analyses par jour utilisant les données vent/vagues de l'altimètre d'ERS2 (produits URA du SMT).

- Un modèle global, effectuant des prévisions à 72 h d'échéance, une fois par jour (réseau de 0 UTC) forcé par les champs de vents du modèle ARPEGE/TROPIQUE (grille non étirée)

Domaine : global

Résolution spatiale : 1°x1°

Résolution spectrale : 12 fréquences en progression géométrique de 0.2, de 0.04 Hz à 0.3hz, 18 directions (première direction, 95° à partir de nord géographique)

Forçage atmosphérique : vents à 10 m du modèle ARPEGE/TROPIQUE toutes les 6 heures, interpolés à partir d'une grille en résolution 1.5°X1.5°.

Bathymétrie : ETOPO5, modifiée.

Masque de glace à partir de la température de la mer d'ARPEGE,

Pas de temps : 900 S

Assimilation : 4 analyses par jour utilisant les données vent/vagues de l'altimètre d'ERS2 (produits URA du SMT).

- Un modèle régional, couvrant les mers européennes, effectuant des prévisions à 48 h d'échéances, forcé par les champs de vents du modèle ARPEGE, imbriqué dans le modèle régional.

Domaine : 30N-67N, 12W-42E

Résolution spatiale : 0.25°x0.25°

Résolution spectrale : 12 fréquences en progression géométrique de 0.2, de 0.04 Hz à 0.3hz, 18 directions (première direction, 95° à partir de nord géographique)

Forçage atmosphérique : vents à 10 m du modèle ARPEGE toutes les 6 heures, pour analyses, toutes les 3 heures pour les prévisions, interpolés à partir d'une grille en 0.5°x0.5°.

Bathymétrie : ETOPO5, modifiée.

Masque de glace à partir de la température de la mer d'ARPEGE,

Pas de temps : 300 S

Assimilation : néant

- Un modèle "côtier", couvrant les côtes françaises métropolitaines, effectuant des prévisions à 48 h d'échéances, forcé par les champs de vents du modèle ALADIN (1997), imbriqué dans le modèle régional.

Domaine : 35N-57N , 11W-17E

Résolution spatiale : 0.1°x0.1°

Résolution spectrale : 12 fréquences en progression géométrique de 0.2, de 0.04 Hz à 0.3hz, 18 directions (première direction, 95° à partir de nord géographique)

Forçage atmosphérique : vents à 10 m du modèle ALADIN toutes les 3 heures, provenant d'une grille en 0.1°X0.1°.

Bathymétrie : interpolée à partir d'ETOPO5, puis modifiée.

Masque de glace à partir de la température de la mer d'ARPEGE,

Pas de temps : 150 s

Assimilation : néant

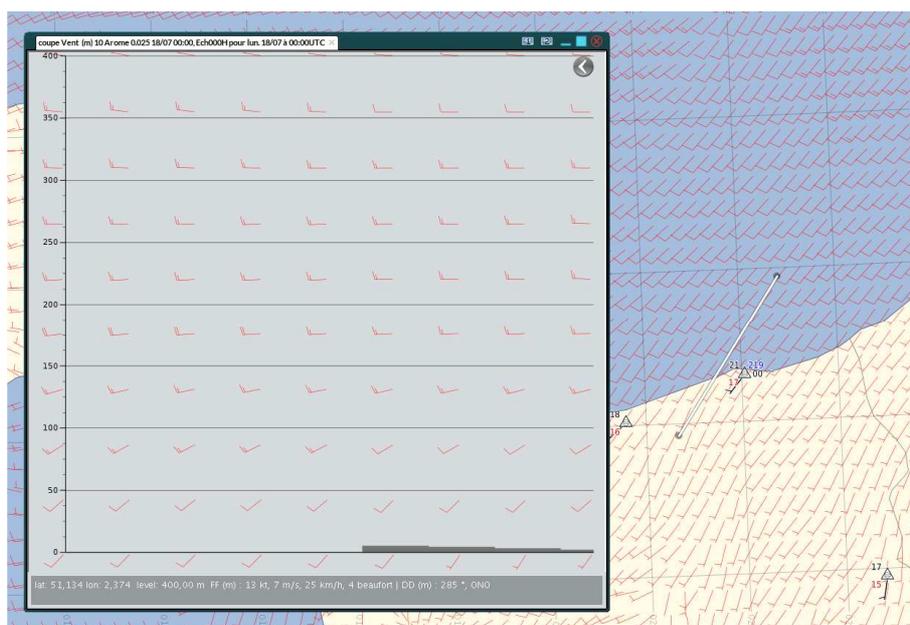
Annexe 4 : Analyse d'une situation typique de brise

Situation à brises le 18 juillet 2016 par le modèle Arome

A 00 UTC

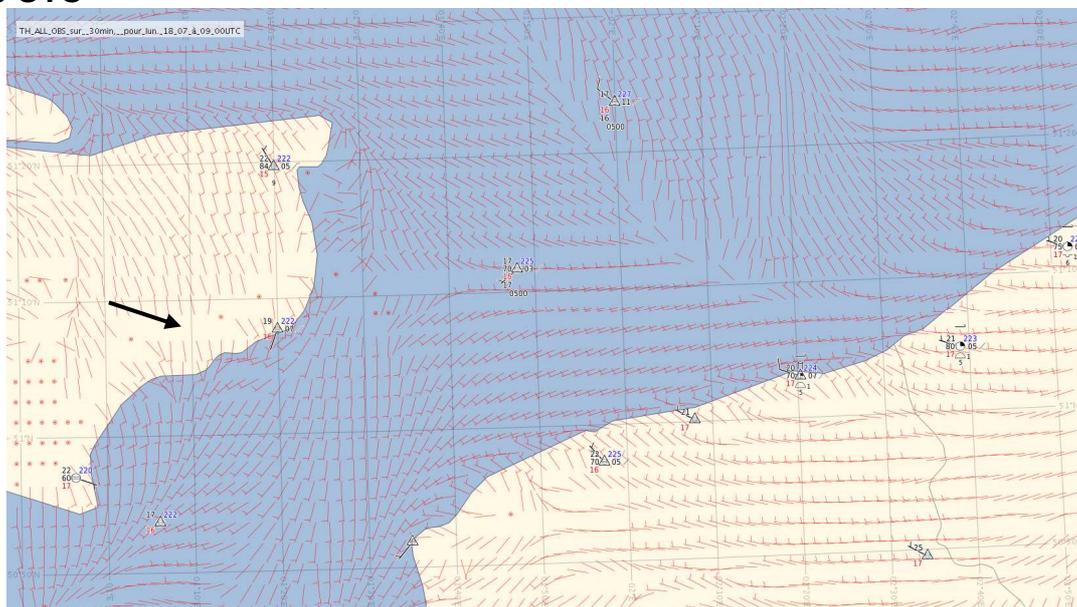


La carte ci-dessus, et celles qui suivent, superposent la prévision du vent Arome aux observations du 18 juillet. La pression au niveau de la mer est supérieure à 1020 hPa. A 00 UTC, le vent souffle de l'ouest puis du sud-ouest dans le Pas-de-Calais en allant de la Manche vers la mer du Nord. Sur les terres le vent souffle de la terre vers la mer (brise de terre). La prévision du vent (en rouge) est tout à fait correcte ; sa vitesse est plus élevée à la sortie du détroit côté français par effet de cap. Elle atteint 15 nœuds au large.



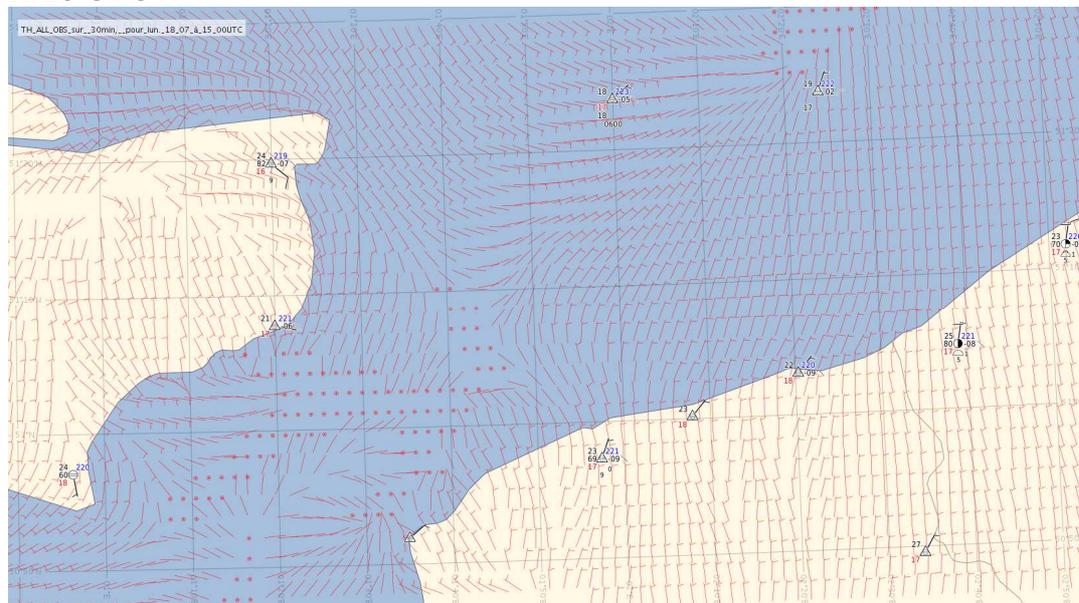
La coupe ci-dessus propose la répartition spatiale des vents entre le sol et 400 m à 00 UTC suivant la coupe matérialisée par le trait blanc sur la carte. Les informations sur la gauche correspondent au point en mer et celles à droite sur le point à terre. La direction du vent de sud-ouest près du sol s'oriente au secteur ouest au-dessus de 100 m avec une légère augmentation de la vitesse.

A 09 UTC

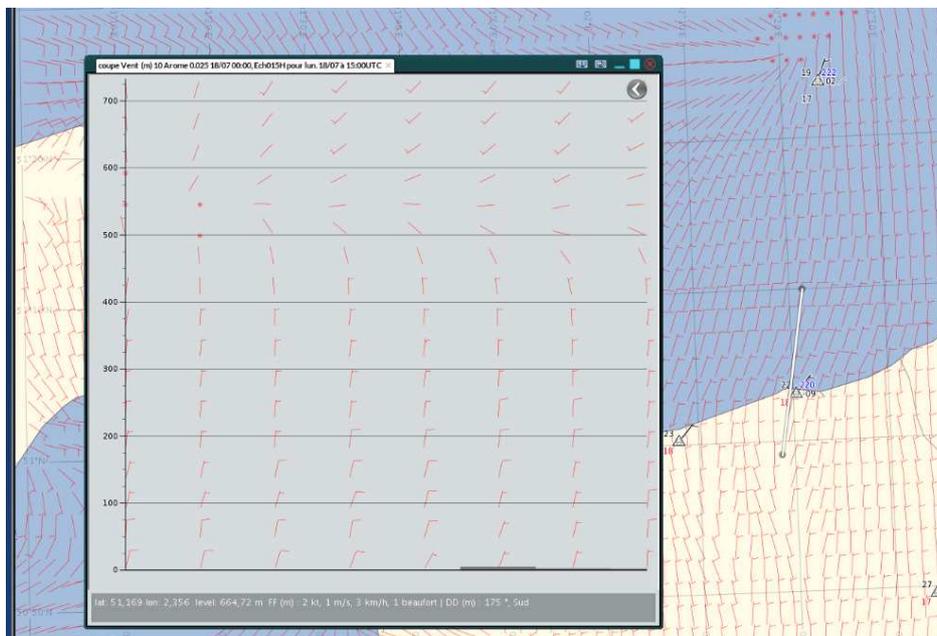


Le vent s'oriente plus franchement de la mer vers la terre sur le littoral français. Il amorce ce changement de direction sur la côte sud-est de l'Angleterre avec une ligne de convergence à l'intérieur des terres (flèche noire). La brise de mer s'installe. La prévision du vent demeure très correcte.

A 15 UTC



La brise de mer souffle du nord sur la région de Dunkerque, le vent est très faible dans le détroit. La prévision du modèle Arome est pertinente.



La coupe de vent ci-dessus propose la répartition spatiale des vents entre le sol et 700 m à 15 UTC matérialisée par le trait blanc sur la carte. La lecture s'effectue de la gauche vers la droite et correspondent au trait de coupe du nord vers le sud. L'influence de la brise s'étend sur les 500 premiers mètres.

Conclusion

Pour cette journée typique de brise, la reconstitution du vent par le modèle Arome est tout à fait pertinente. On retient que la vitesse et la direction de la brise sont relativement homogènes entre le sol et le niveau 160 mètres selon le modèle Arome.

Annexe 5 : Description des fichiers fournis

Principaux paramètres des fichiers fournis

Pour le vent :

10 niveaux d'altitude possibles : 10m (N10), 20m (N20), 40m (N40), 50m (N50), 60m (N60), 80m (N80), 100m (N100), 120m (N120), 140m (N140) et 160m (N160)

période couverte par les données de vent : 2000-2015

pas de temps étudié : annuel et saisonniers

(hiver : décembre à février, printemps : mars à mai, été : juin à août, automne : septembre à novembre)

domaine étendu [51.0 ; 51.3] U [2.15 ; 2.6], contenant 247 points (maille 0.025 pour le modèle AROME)

référéncés dans le fichier lat-lon_pts_arome.txt

(en partant du point en bas à gauche vers le point en haut à droite)

domaine restreint [51.0 ; 51.24] U [2.18 ; 2.52] pour permettre un zoom sur 6 points caractéristiques de la zone d'étude

référéncés dans le fichier lat-lon_6pts.txt

classes de vitesses (m/s) standard des roses de vent : [1.5 ; 4.5[, [4.5 ; 8], >8, les vents calmes <1.5 m/s sont stockés dans les fichiers sous la direction 38

Pour l'état de la mer :

période couverte par les données d'état de la mer : 2002-2011

maille des données du modèle AVAG : 0.1°(7 points sur le domaine restreint référéncés dans le fichier lat-lon_pts_avag.txt)

classes de hauteurs de houle : [0.2 ; 0.4[, [0.4 ; 0.6[, [0.6 ; 0.8[, >=0.8, les hauteurs <0.2 m sont stockées dans les fichiers sous la direction 38

classes de hauteurs de mer du vent : [0.5 ; 1.25[, [1.25 ; 2[, [2 ; 3[, >=3, les hauteurs <0.5 m sont stockées dans les fichiers sous la direction 38

Inventaire des archives

archive obs_vent_horaire.zip :

données observées de vent traduites par direction en rose de 360°, vitesse en m/s entre 2000 et 2015

pour la station de Dunkerque (59183001) et le sémaphore de Boulogne (62160001)

archives donneesH Niveau.zip (247 x 10 fichiers) :

données horaires vitesse, direction du vent moyen

pour les 247 points du domaine étendu

pour les 10 niveaux

archives frequences_vent_Niveau.zip (5 x 247 x 10 fichiers) :

fréquences en % du vent horaire

pour les 5 pas de temps

pour les 247 points du domaine étendu

pour les 10 niveaux

par classe de directions (en dizaines de degrés par pas de 20° sur rose de 360°) et classe de vitesses (pas de 1 m/s)

Les 42 classes de vitesse sont définies implicitement comme suit :

[0 ; 0.5[, [0.5 ; 1.5[, [1.5 ; 2.5[, [39.5 ; 40.5[, >=40.5

| | | |
|---------------------------------|--|--|
| 24/08/2016 Page 20 sur 21 | Analyse du risque décennal des forces de vent et des hauteurs de vagues sur la zone de Dunkerque |  METEO FRANCE |
|---------------------------------|--|--|

archive cartes_vent_zone_restreinte.zip (5 x 10 fichiers) :
cartes de roses de vent pour les 6 points de la zone restreinte, format image
pour les 5 pas de temps
pour les 10 niveaux

archive cartes_vent_zone_etendue.zip (2 x 5 fichiers) :
cartes de roses de vent sur le domaine étendu, format image
pour les niveaux 10 et 100m
pour les 5 pas de temps

archive fichiers_rosesdevent.zip (10 x 5 fichiers) :
fréquences des vents
pour 5 pas de temps
pour 10 niveaux
par classe de directions (en dizaines de degrés par pas de 20° sur rose de 360°) et classe
de vitesses standard des roses de vent
où chaque point est identifié en en-tête par ses coordonnées

archive fichiers_roses_etat_mer.zip (2 x 5 fichiers) :
fréquences de hauteur de houle
pour 5 pas de temps
par classe de directions (de 1 à 8 par pas de 45° sur rose de 360°) et classe de hauteurs
fréquences de hauteur de mer du vent
pour 5 pas de temps
par classe de directions (de 1 à 8 par pas de 45° sur rose de 360°) et classe de Hauteurs

archive cartes_roses_etat_mer.zip (2 x 5 fichiers) :
cartes de roses de houle et de mer du vent sur le domaine restreint, format image