

Projet de parc éolien off-shore Dunkerque

Lot 2 : Analyse des tempêtes et des vagues extrêmes



Version 2.0 du 23/01/2017

Réalisation : Carole Cibot et Sébastien Lorge (DIRO/Previ), Alice Dalphinnet (DIROP/Previ/Mar) et Sophie Gautier (DIRO/EC)


Chargé d'affaires : Christophe JACOLIN	christophe.jacolin@meteo.fr	
Responsable technique : Franck BARAER, DIRO/EC	franck.baraer@meteo.fr	

Table des matières

Objectifs.....	5
1. Sélection des tempêtes.....	5
2. Sources de données.....	5
2.1. Bases de données observées.....	5
2.1.1. Problèmes relatifs à la mesure du vent.....	6
2.1.2. Problèmes relatifs à la mesure de la hauteur des vagues.....	9
2.2. Bases ou listes d'événements tempêtes.....	11
3. Élaboration des fiches.....	12
4. Rejeux de situations marquantes.....	14
4.1. Description des simulations.....	14
4.2. Simulation de 1953.....	15
4.2.1. Rappel conditions météorologiques.....	15
4.2.2. Analyse des résultats.....	15
4.3. Simulation de février 1990.....	17
4.3.1. Rappel des conditions météorologiques.....	17
4.3.2. Analyse des résultats.....	18
4.4. Simulation de février 1996.....	20
4.4.1. Rappel des conditions météorologiques.....	20
4.4.2. Analyse des résultats.....	20
4.5. Simulation de janvier 2007.....	23
4.5.1. Rappel des conditions météorologiques.....	23
4.5.2. Analyse des résultats.....	23
4.6. Simulation de décembre 2011.....	26
4.6.1. Conditions météorologiques fournies par la prévision d'ensemble.....	26
4.6.2. Analyse des résultats.....	26
4.7. Synthèse de ces simulations de vagues.....	29
Annexe 1. Liste des tempêtes retenues.....	30
Annexe 2. Les trombes marines.....	31
Annexe 3. Présentation de la configuration WW3 à Météo-France.....	37
Annexe 4. Description des fichiers livrés.....	45

Liste des illustrations

Illustration 1 : mer formée par un vent de force 10 Beaufort. Illustration tirée du « Observer Handbook for Voluntary Observing Ship Climate » de la NOAA.....	6
Illustration 2 : localisation des bateaux-feux F3 et Sandettie par rapport à la zone d'étude.....	8
Illustration 3 : état de la mer observée à Dunkerque à 12 UTC (code S) sur la période 1949-2005.....	11
Illustration 4 : hauteur significative de la mer totale (mètres), le 1er février 1953.....	16
Illustration 5 : zoom sur la zone d'étude, hauteur significative et direction de la mer totale (mètres), le 1er février 1953 à 01 UTC.....	16
Illustration 6 : évolution temporelle de la hauteur significative des vagues pour la simulation de 1953, en un point de grille qui est à chaque heure celui où la mer totale est maximale dans la zone d'étude.....	17
Illustration 7 : hauteur significative de la mer totale (mètres), le 26 février 1990 à 11 UTC.....	18
Illustration 8 : zoom sur la zone d'étude, hauteur significative (mètres) et direction de la mer totale, le 26 février 1990 à 11 UTC.....	19
Illustration 9 : évolution temporelle de la hauteur significative des vagues pour la simulation de 1990, en un point de grille qui est à chaque heure celui où la mer totale est maximale dans la zone d'étude.....	19
Illustration 10 : hauteur significative de la mer totale (mètres) le 19 février 1996 à 10 UTC (gauche) et le 20 février 1996 à 05 UTC (droite).....	21
Illustration 11 : zoom sur la zone d'étude, hauteur significative (mètres) et direction de la mer totale, le 19 février 1996 à 11 UTC.....	21
Illustration 12 : zoom sur la zone d'étude, hauteur significative (mètres) et direction de la mer totale, le 20 février 1996 à 03 UTC.....	22
Illustration 13 : évolution temporelle de la hauteur significative des vagues pour la simulation de 1996, en un point de grille qui est à chaque heure celui où la mer totale est maximale dans la zone d'étude.....	22
Illustration 14 : hauteur significative de la mer totale (mètres) le 18 janvier 2007 à 10 UTC avec un vent de sud-ouest (gauche) et à 15 UTC avec un vent d'ouest (droite).....	24
Illustration 15 : zoom sur la zone d'étude, hauteur significative (mètres) et direction de la mer totale, le 18 janvier 2007 à 12 UTC.....	24
Illustration 16 : évolution temporelle de la hauteur significative des vagues pour la simulation de 2007, en un point de grille qui est à chaque heure celui où la mer totale est maximale dans la zone d'étude.....	25
Illustration 17 : forçage de vent (m/s) utilisé, le 16 décembre 2011 à 12 UTC (gauche) et le 17 décembre 2011 à 00 UTC (droite).....	27
Illustration 18 : hauteur significative de la mer totale (mètres) le 16 décembre 2011 à 14 UTC (gauche) et le 17 décembre 2011 à 02 UTC (droite).....	27
Illustration 19 : zoom sur la zone d'étude, hauteur significative (mètres) et direction de la mer totale, le 17 décembre 2011 à 01 UTC.....	28
Illustration 20 : évolution temporelle de la hauteur significative des vagues pour la simulation de 2011, en un point de grille qui est à chaque heure celui où la mer totale est maximale dans la zone d'étude.....	28
Illustration 21 : trombe marine et éolienne dans les parages de l'île d'Anholt dans le Cattégat entre le Danemark et la Suède, le 23 avril 2016.....	31
Illustration 22 : trombes marines vues depuis Argalasti en Grèce, le 15 juillet 2014 - crédit photo : Evagelia Diannelaki.....	34
Illustration 23 : trombes marines signalées en Mer du Nord et entrée de Manche sur la période 1976-2016 - source : European Severe Weather Database.....	35

Illustration 24 : répartition mensuelle d'un échantillon de 25 trombes marines signalées par des bateaux (temps présent WW = 19 dans le message SHIP) entre 50 et 55° N et 1° W et 7° E sur la période 1976-2016 - source des données : European Severe Weather Database.....	35
Illustration 25 : exemple de spectre normalisé issu d'un modèle de vagues (direction en ° et fréquence en s-1).....	38
Illustration 26 : maillage de la configuration Manche/Atlantique.....	41
Illustration 27 : zoom du maillage Atlantique et bathymétrie (m) sur le détroit du Pas-de-Calais.....	42

Liste des tableaux

Tableau 1 : échelle Beaufort – correspondances entre l'échelle Beaufort, la vitesse du vent (code OMM 1100), et l'état de la mer.....	7
Tableau 2 : principaux événements conduisant à une rupture d'homogénéité dans la mesure de la force du vent à Dunkerque (liste non exhaustive).....	9
Tableau 3 : échelle d'état de la mer (code S) et hauteurs significatives des vagues.....	10
Tableau 4 : récapitulatif des caractéristiques des tempêtes sélectionnées.....	13
Tableau 5 : critères employés pour caractériser la sévérité des tempêtes sélectionnées.....	14
Tableau 6 : caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation de 1953.....	17
Tableau 7 : caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation de 1990.....	20
Tableau 8 : caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation de 1996 (avec niveaux).....	23
Tableau 9 : caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation de 2007.....	25
Tableau 10 : caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation de 2011.....	29
Tableau 11 : aspects successifs de la trombe marine au cours de son cycle de vie.....	33
Tableau 12 : forçages utilisés.....	43

Glossaire

Abréviation	Signification
BDCLIM	Base de Données Climatologiques
BDEM	Base de Données des Evénements Marquants
IRM	Institut Royal Météorologique
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
HYCOM	Modèle de simulation des niveaux marins
WW3	Modèle de vagues haute résolution
MFWAM	Modèle de vagues moyenne résolution
ANEMOC	Base de simulation d'états de mer
PEARP	Système de prévision ensembliste de Météo France
BOBWA	Autre base de simulation d'état de mer

Objectifs

On vise au travers de cette sélection de tempêtes “historiques” à décrire les événements les plus intenses survenus, dans le nord de la France, au cours de la période 1896-2015 (la documentation est trop peu étoffée pour renseigner les tempêtes antérieures à 1890). Nous nous sommes toutefois attachés à garder une bonne diversité de contextes de grande échelle afin que ce travail reste suffisamment représentatif de la climatologie des tempêtes dans la région de Dunkerque. Nous avons cependant davantage retenu de tempêtes associées à des vents de secteur nord, que nous conduirait à le faire une stricte application de la fréquence climatologique, dans la mesure où ce sont celles qui ont le plus d'impacts sur la formation des plus fortes vagues observées dans le sud de la mer du Nord.

1. Sélection des tempêtes

Plusieurs critères ont été employés pour effectuer la sélection des tempêtes :

- 1- la force des vents observés à Dunkerque et dans sa région (Calais, Boulogne-sur-Mer, Lille et parfois, mais plus rarement, des postes plus éloignés). Pour ce critère, nous n'avons retenu que les événements ayant généré des vents dont la vitesse (du vent moyen sur 10 mn) a atteint ou dépassé 18 m/s (soit le seuil du coup de vent force 8 Beaufort).
- 2- indépendamment de la force du vent, nous avons retenu les événements qui ont eu un impact significatif, en mer ou à la côte (en excluant toutefois les cas de submersions marines résultant principalement de la conjonction d'une surcote et d'une marée de vives-eaux).
- 3- nous avons enfin souhaité conserver une bonne diversité en termes de taille et de durée (vaste tempête ou coup de vent de dimension modeste), de saison, de trajectoire et de direction de vents, ce qui nous a parfois fait rejeter certains événements qui nous paraissaient faire doublon.

Notre sélection garde donc une part d'appréciation subjective. Après l'avoir un temps envisagé, nous avons renoncé à réaliser une sélection à l'aide de filtres appliqués sur des champs météorologiques issus de réanalyses.

2. Sources de données

Nous avons eu recours à des bases de données observées (stations terrestres, navires, bouées), à des bases d'événements météorologiques marquants et à des listes de tempêtes élaborées dans le cadre d'autres travaux.

2.1. Bases de données observées

Il a été fait usage des données issues de la BDCLIM ; principale base de données climatologique employée au sein de l'établissement Météo-France. Cette base compile les données d'observations des stations météorologiques françaises.

On peut accéder à des données météorologiques marines au travers du National Climatic Data Center de la NOAA à l'adresse : <http://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/datatools>

Dans le cadre de travaux climatologiques, il est prudent de porter un regard critique sur les données employées. Les séries temporelles de données climatologiques présentent en effet des problèmes d'homogénéité. Ces ruptures d'homogénéité ont trois grandes origines : les changements dans l'environnement de mesure, les évolutions dans la définition du paramètre mesuré (pour les stations terrestres, le vent a ainsi été mesuré à 6 m du sol avant la Seconde Guerre Mondiale avant que la hauteur ne soit fixée à 10 m), et enfin les évolutions de capteur.

Dans le cadre des critères retenus pour notre sélection, deux paramètres posent problème : la force du vent et l'état de mer.

2.1.1. Problèmes relatifs à la mesure du vent

Pour les stations terrestres et selon les normes de l'OMM, le vent doit être mesuré à une hauteur de 10 m, sur un site ayant une longueur de rugosité de 3 cm. Cette dernière règle nécessite un environnement dégagé qu'il est difficile d'obtenir et plus encore de conserver. Le changement dans l'environnement de mesure (suite à la construction de nouveaux bâtiments ou au développement de la végétation, voire consécutivement au déplacement du point de mesure) est une première source d'inhomogénéité dans la mesure du vent. La seconde est liée au changement de capteur (on a ainsi connu successivement la détermination de la force du vent via l'emploi de l'échelle Beaufort, puis l'usage de capteurs de plus en plus sophistiqués : d'abord mécaniques, puis électromécaniques, et enfin électroniques). Au final, il apparaît difficile de conserver des conditions de mesure comparables plus de quelques années.



Illustration 1 : mer formée par un vent de force 10 Beaufort. Illustration tirée du « Observer Handbook for Voluntary Observing Ship Climate » de la NOAA

En mer, la mesure du vent a longtemps reposé sur l'utilisation de l'échelle Beaufort qui établit une relation entre l'aspect des vagues d'une mer formée et la vitesse du vent.

Degré Beaufort	Dénomination	Vitesse du vent à 10 m (en m/s)	Etat de la mer au large
0	Calme	0 à 0,2	la mer est comme un miroir
1	Très légère brise	0,3 à 1,5	il se forme des rides, mais il n'y a pas d'écume
2	Légère brise	1,6 à 3,3	vaguelettes courtes ; leurs crêtes ont une apparence vitreuse mais ne déferlent pas
3	Petite brise	3,4 à 5,4	très petites vagues ; écume d'aspect vitreux, apparition de moutons
4	Jolie brise	5,5 à 7,9	petites vagues devenant plus longues ; moutons nombreux
5	Bonne brise	8,0 à 10,7	vagues modérées, allongées ; moutons nombreux
6	Vent frais	10,8 à 13,8	des lames se forment ; crêtes d'écume blanche plus étendues, embruns
7	Grand frais	13,9 à 17,1	la mer grossit ; l'écume est soufflée en traînées ; lames déferlantes
8	Coup de vent	17,2 à 20,7	lames de hauteur moyenne ; de leurs crêtes se détachent des tourbillons d'embruns
9	Fort coup de vent	20,8 à 24,4	grosses lames ; leur crête s'écroule et déferle en rouleaux, visibilité réduite par les embruns
10	Tempête	24,5 à 28,4	très grosses lames à longues crêtes en panache ; déferlement en rouleaux intense et brutal
11	Violente tempête	28,5 à 32,6	lames exceptionnellement hautes ; mer recouverte de bancs d'écume blanche
12	Ouragan	+ de 32,7	air plein d'écume et d'embruns ; mer entièrement blanche ; visibilité très réduite

Tableau 1 : échelle Beaufort – correspondances entre l'échelle Beaufort, la vitesse du vent (code OMM 1100), et l'état de la mer

Vitesse du vent et échelle Beaufort, un lien problématique

Au début du XIXe siècle, l'échelle Beaufort a été conçue pour que les capitaines puissent consigner, dans leur carnet de bord, des indications sur la force des vents rencontrés au cours de leurs périples. Le problème de la conversion de l'échelle Beaufort en valeurs de vitesse de vent s'est rapidement posé et a longtemps alimenté des débats nourris. Après plusieurs propositions (en 1906, 1926 et 1939), on parvient à adopter en 1947 le code OMM 1100 que l'on connaît encore aujourd'hui et qui fixe la relation entre échelle Beaufort, force du vent, et état de la mer. De l'avis de nombreux chercheurs en climatologie, qui militent pour sa révision, la table de conversion adoptée en 1947 sous-estime les vents faibles et surestime les vents forts (force 9 Beaufort et +).

Avant 1949, les vents mesurés par les stations terrestres étaient convertis en degrés Beaufort avant leur diffusion. Les stations terrestres françaises utilisaient une échelle de 0-9 dite "télégraphique" comparable en tout point à l'échelle Beaufort, sauf pour les vents de force supérieure ou égale à 10 Beaufort confondus dans la classe 9 Beaufort. Un vent de force 9 Beaufort signalé par une station terrestre n'a donc pas le même sens qu'un vent 9 Beaufort observé en mer.

En mer, l'utilisation d'anémomètres à bord des bateaux peut donner des mesures plus justes que le recours à l'échelle Beaufort, à la condition toutefois de respecter des règles très strictes pour leur implantation ; les perturbations du champ de vent générées par les infrastructures du navire pouvant altérer la qualité des relevés. De manière générale, il semble que la force des vents les plus forts puisse être sous-estimée par les bouées en raison de l'effet d'abri lié aux vagues dans une mer formée alors qu'on peut plutôt s'attendre à une surestimation du vent à bord des bateaux où la mesure est réalisée à une hauteur supérieure à 10 m au-dessus de l'eau (les bateaux étant de plus en plus grands et hauts, ce biais va même croissant au fil du temps).

Au cours de cette étude, nous avons plus particulièrement eu recours aux valeurs de vent issues des bateaux-feux F3 et Sandettie armés par le Met-Office.

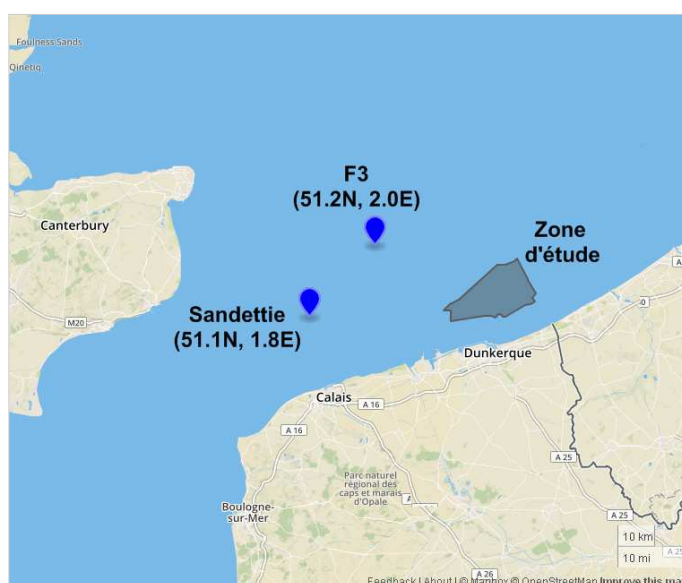


Illustration 2 : localisation des bateaux-feux F3 et Sandettie par rapport à la zone d'étude

Pour le domaine terrestre, nous avons fait un usage important des données de vent relevées à Dunkerque, en particulier pour illustrer l'évolution du vent en force et direction au cours des tempêtes. Le tableau ci-après récapitule quelques-uns des événements ayant le plus impacté la mesure de la force du vent à Dunkerque.

Date du changement	Environnement	Mesure
1862 : premières mesures de vent à Dunkerque dans le cadre du réseau d'avertissement des tempêtes	Poste situé dans le port de Dunkerque	Probablement échelle Beaufort terrestre pour les postes télégraphiques (voir remarque sur cette échelle dans l'encadré)
1917	Après une suspension des mesures en 1915, ? la station est déplacée au sémaphore à un emplacement plus proche de la mer	
1947	La ville de Dunkerque a subi de lourds dommages au cours de la guerre. Le sémaphore est reconstruit à un emplacement proche du précédent	Capteur électromagnétique
1966	Déplacement du capteur sur le toit du sémaphore (mesure à 16 m du sol)	Id.
09-1974	Id.	Capteur fréquencesmétrique
1978	Déplacement de 600 m du mât vers le sud-est	
09-1994	id.	Ensemble vent Déolia
06-2001	Pylône Galaxy (10 m du sol)	Id.
03-2009	Id.	Capteur Alizia

Tableau 2 : principaux événements conduisant à une rupture d'homogénéité dans la mesure de la force du vent à Dunkerque (liste non exhaustive)

2.1.2. Problèmes relatifs à la mesure de la hauteur des vagues

Au temps de la marine à voile, l'échelle Beaufort établissait un lien entre voilure et force du vent. Cette relation est tombée en désuétude avec l'arrivée de la vapeur et des turbines diesel. Une échelle Beaufort renouvelée lui a succédé qui lie état de la mer et force du vent. En un point donné, l'état de mer résulte de la superposition des trains de houle et des vagues engendrées par le vent local (mer du vent). Pour décrire l'état de la mer, on n'utilise ni la hauteur maximale des vagues (trop grande), ni la hauteur moyenne (trop faible), mais la hauteur moyenne du tiers des vagues les plus hautes : cette hauteur caractéristique est appelée H1/3 ou hauteur significative. L'état de mer a d'abord été évalué à l'aide d'une échelle qualitative élaborée par Douglas (échelle de 0-9 d'abord en usage dans la Royal Navy avant de devenir une norme internationale suite aux recommandations de la conférence internationale de Copenhague en 1929). En 1947, lors de la conférence de Washington, l'échelle de Douglas est complétée par une évaluation des hauteurs de vagues pour une mer ouverte, profonde et éloignée de la côte. Un saut qualitatif a lieu dans les années 60 avec la mesure de hauteur de vague via les accéléromètres équipant les premières bouées houlographes. Dans les premiers temps, ces instruments n'ont couvert qu'une partie du spectre d'énergie des vagues et ont eu donc tendance à sous-estimer leurs hauteurs significatives (comme cela semble également être le cas pour les observations réalisées par les bateaux-feu F3 et Sandettie, selon une étude anglaise comparant les données observées à des données modélisées ; ou des observateurs embarqués).

Echelle Douglas	Termes descriptifs	Anciens termes (Angot - 1918)	Hauteur significative (en m)
0	calme	<i>id.</i>	hauteur = 0 m
1	ridée	<i>très belle</i>	0 < hauteur < 0,10 m
2	belle	<i>id.</i>	0,10 < hauteur < 0,50 m
3	peu agitée	<i>id.</i>	0,50 < hauteur < 1,25 m
4	agitée	<i>id.</i>	1,25 < hauteur < 1,50 m
5	forte	<i>houleuse</i>	2,50 < hauteur < 4,00 m
6	très forte	<i>très houleuse</i>	4,00 < hauteur < 6,00 m
7	grosse	<i>id.</i>	6,00 < hauteur < 9,00 m
8	très grosse	<i>id.</i>	9,00 < hauteur < 14,00 m
9	énorme	<i>furieuse</i>	Hauteur > 14,00 m

Tableau 3 : échelle d'état de la mer (code S) et hauteurs significatives des vagues

On dispose de données sur les hauteurs de vagues au travers du code de l'état de la mer transmis par les sémaphores de Dunkerque et de Boulogne-sur-Mer. Les observations réalisées par les sémaphores ne respectent pas toutes les préconisations dans la mesure où par principe, elles ne sont pas effectuées pour une « mer ouverte, profonde et éloignée de la côte ». Les sémaphores occupent par ailleurs une position dominante par rapport à la mer qu'ils surveillent et ont tendance à plutôt sous-estimer les faibles hauteurs de vagues. Nous pensons également que l'observation de vagues venant se briser sur les bancs qui barrent la côte (en particulier au large de Dunkerque) entraîne un signalement fautif de mers grosses à énormes. Ce défaut paraît avoir été corrigé au cours du temps à Dunkerque (cf. illustration 3 : à noter la plus grande dispersion des données sur la période 1949-1960, en particulier vers les fortes valeurs d'état de mer.)

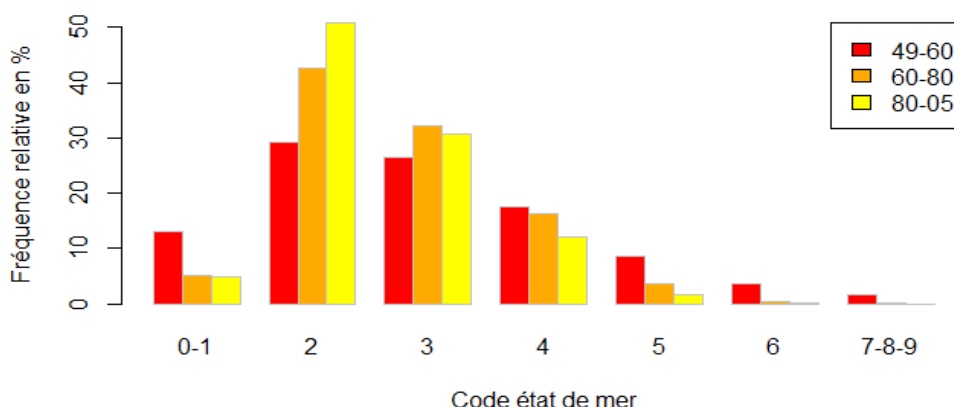


Illustration 3 : état de la mer observée à Dunkerque à 12 UTC (code S) sur la période 1949-2005

2.2. Bases ou listes d'événements tempêtes

Dans un premier temps, nous avons consulté la BDEM (Base de Données des Evénements marquants). Il s'agit d'une la base de données (interne à Météo-France) qui centralise les événements météorologiques dommageables observés en France. Un bon nombre des événements que nous avons finalement retenus n'y figurent pas, car considérés comme parfois localisés à une portion trop excentrée du territoire national.

Nous avons également parcouru les fiches des événements sélectionnés dans le cadre du projet « Anthemis », un projet qui vise à offrir au public un portail internet recensant les tempêtes les plus dommageables survenues en France métropolitaine. Les tempêtes retenues par le projet « Vimers » sur les submersions marines dans l'ouest de la France ont aussi été prises en compte.

Nous avons confronté notre sélection à des listes de tempêtes remarquables ayant eu lieu dans les pays limitrophes :

- pour la Belgique : sur le site de l'IRM. Au travers de la rubrique "Événements marquants depuis 1901", listant une série d'événements tempétueux survenus en Belgique sur la période 1901-2000 et accessible à l'adresse : <http://www.meteo.be/meteo/view/fr/1103446-Temp%c3%aates.html>

- pour les Pays-Bas : le catalogue des tempêtes remarquables du KNMI sur la période 1979-2011 (+ tempête de 1953). Ces dernières sélectionnées surtout en raison de leur impact sur les niveaux marins. Accessible au travers de l'adresse : <http://projects.knmi.nl/hydra/stormcatalogus/>

- pour la Grande-Bretagne : "Extreme wind storm catalogue" élaboré en partenariat par le Met Office et des universités anglaises. Il s'agit ici des tempêtes ayant provoqué le plus de dégâts (en termes de coût pour les assurances) en Europe de l'Ouest sur le domaine 15°W-25°E, 35°N-70°N, sur la période 1979-2013. A l'adresse : <http://www.europeanwindstorms.org/cgi-bin/storms/storms.cgi?sort=date&opt=>

3. Élaboration des fiches

Pour chaque tempête sélectionnée, nous avons rédigé une fiche se décomposant en trois parties :

- une description, illustrée par une carte d'analyse tirée des bulletins de renseignements de l'époque, permettant de décrire sommairement les éléments ayant donné naissance à la tempête, et ses grandes caractéristiques ;
- des éléments sur la trajectoire suivie par le centre dépressionnaire associé à la tempête (la trajectoire est soit reprise de travaux antérieurs soit estimée d'après les réanalyses NCEP ou 20CRV2c de la NOAA ; ce dernier jeu de données ayant le mérite de couvrir la période 1851-2014), ainsi qu'une analyse des vents forts ayant frappé la région dunkerquoise ;
- dans une dernière partie, nous dressons le bilan des impacts observés et nous reprenons quand cela est possible les valeurs de vent observé à Dunkerque et dans sa région, ainsi que des éléments sur les hauteurs de vagues observées.

A l'issue de notre analyse, nous avons établi un indice de sévérité noté de 1 à 3 des tempêtes les moins aux plus dommageables. Les indices ont été évalués en intégrant trois facteurs : l'intensité, la durée de l'événement et une évaluation subjective du cisaillement (importance de la rotation des vents, stabilité de la masse d'air).

Ces fiches ont ensuite servi à choisir les situations pour lesquelles nous avons fait tourner des modèles de vagues de petite échelle (rejeu). Ce choix a toutefois été limité aux dates pour lesquelles on disposait déjà des champs de vent qui permettent de forcer le modèle de vagues.

Evénements	Vent max. zone		Evaluation				Rejeu	
	Dir.	Force (B)	FF	Du	Cs	CI		
30-09 et 01-10-1911	N à NW	9 à 10	+	+++	+	2	-	
06-11-1921	SW puis NW	9 à 10	+	+	+++	2	-	
24 et 25-02-1935	S à SW	9	0	+++	0	1	-	
28-02 et 01-03-1949	W puis NW	10 à 11	+++	+++	+	3	-	
31-01 et 01-02-1953	W à NW	10	+++	+++	0	3	Oui	Tempête « historique » associant vents frontaux et marée de vives-eaux
16 et 17-10-1967	SW puis W	8	0	+	+	1	-	
13-11-1972	SW puis NW	10	+	0	+++	2	-	
02-04-1973	SW puis NW	9 à 10	+	0	+	2	-	
02 et 03 -01-1976	W puis NW	10 à 11	+++	+++	+	2	-	
12-01-1978	N à NE	10 à 11	+++	+	+	2	-	
27 -11-1983	SW	9 à 10	+	+	0	1	-	
16-10-1987	S	9 à 10	+	0	0	1	Non	Tempête « historique » associée à des vents de sud
5-01-1990	S à SW	10 à 11	+++	+++	0	3	Non	Violente tempête avec vents de sud-ouest
26-02-1990	SW	9 à 10	+	+++	0	2	Oui	Violente tempête avec vents de sud-ouest et forte houle
10-12-1990	N à NE	9	0	+	0	1	Non	Tempête associée à des vents frontaux
14-11-1993	W à NW	9 à 10	+	+	+	2	-	
22-01-1995	SW	8 à 9	0	0	+++	1	-	
19 et 20-02-1996	N à NE	9	0	+++	0	1	Oui	Tempête associée à des vents frontaux
24 et 25-02-1997	S puis SW	9 à 10	+	0	+	1	Non	Violente tempête avec vents de sud-ouest
27 et 28-02-2002	W	9 à 10	+	+++	0	2	Oui	Violente tempête avec vents d'ouest
18-01-2007	SW puis W	9 à 10	+	+	+	2	Oui	Violente tempête avec vents de ouest à sud-ouest et marée de vives-eaux

Tableau 4 : récapitulatif des caractéristiques des tempêtes sélectionnées

La sévérité des tempêtes a été évaluée en tenant compte de trois paramètres : la force maximale du vent (FF), la durée de la tempête (Du) et le caractère plus ou moins turbulent du vent (Cs). Au final, les tempêtes ont été classées (CI) sur une échelle de 1 à 3 selon un indice de sévérité croissante.

Paramètre / indices	0	+	+++
FF (Force) : force maximale du vent sur la zone du projet	Inférieur ou égal à 9 Beaufort	9 à 10 Beaufort	Supérieur ou égal à 10 Beaufort
Du (Durée) : durée pendant laquelle la force du vent à Dunkerque a dépassé 18 m/s (évaluation parfois subjective en cas de données modérément fiables ou incomplètes)	6 heures et moins	6 à 18 heures	Plus de 18 heures
Cs (Cisaillement ou turbulence) : importance du changement de masse d'air et/ou importance de la rotation du vent consécutifs au passage de la tempête	Faible	Modéré	Fort

Tableau 5 : critères employés pour caractériser la sévérité des tempêtes sélectionnées

Cette sélection de tempêtes nous permet au final de retenir 4 épisodes susceptibles de provoquer de fortes vagues sur la zone retenue au large de Dunkerque. Ce choix a été motivé par ce potentiel de vagues (importantes en raison de la direction des vents forts associés) mais également par la disponibilité, à Météo France, de rejeux (ou reconstitution) de paramètres météorologiques servant à forcer les modèles utilisés (vent à 10m et pression niveau de la mer, pour des pas de temps horaires, sur une maille de 0,1°).

Les résultats de ces simulations de vagues sont présentés au chapitre suivant.

4. Rejeux de situations marquantes

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulations de vagues à maille fine pour 5 épisodes de vents forts sélectionnés sur la base des éléments décrits aux chapitres précédents. On rappelle qu'un rejeu de situation est une simulation la plus proche possible de la réalité réalisée en forçant un modèle de vague à partir de champs de vent réalistes à fréquence horaire et maille horizontale de 10 km. Cela doit permettre d'avoir des informations quantitatives sur les vagues probables au sein de la zone d'intérêt lors de 4 événements historiques marquants et d'un événement fictif.

4.1. Description des simulations

Le modèle de vagues utilisé pour les rejeux est le modèle très haute résolution WaveWatch III. Une présentation détaillée est fournie en annexe 3. C'est un modèle à maille irrégulière, adaptée à la géométrie du trait de côte, avec une résolution accrue près des côtes (jusqu'à 200 m à la côte). Il a l'avantage de permettre une bonne représentation des processus en eau peu profonde. La bathymétrie utilisée est issue du SHOM (résolution de 100 m, produite en 2015).

Les courants de surface et niveaux d'eau du modèle HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) du SHOM ont été pris en compte pour simuler l'effet de la marée, notamment lors des épisodes à forts coefficients.

Le forçage atmosphérique servant à générer les vagues était disponible à Météo France pour chaque situation retenue à maille horizontale 0,1° et fréquence horaire. Il provient soit du modèle atmosphérique Arpège de Météo-France, soit du projet INCREO (projet de réanalyse d'événements météo-océaniques), soit pour la simulation de 2011 d'un run de prévision d'ensemble Arpège de Météo-France. Il s'agit pour cette dernière d'une situation de tempête fictive dont le principe de re-jeu est explicité au paragraphe 4.6.

4.2. Simulation de 1953

Cette simulation tient compte des niveaux d'eau fournis par le modèle HYCOM. Le forçage atmosphérique utilisé provient du rejeu effectué lors du projet INCREO.

4.2.1. Rappel conditions météorologiques

Une dépression circulant du nord des Îles britanniques au Danemark entraîne un long épisode de vents tempétueux de nord à nord-ouest sur le littoral de la mer du Nord. Les vents les plus forts soufflent de secteur ouest en soirée du 31 janvier, puis s'orientent au nord-ouest et se maintiennent à des valeurs très élevées quasiment toute la journée du 1^{er} février. On rappelle que cette situation a généré de graves débordements aux pleines mers par fort coefficient de marée.

4.2.2. Analyse des résultats

Pour cette tempête, l'état de la mer est très étroitement corrélé au comportement du vent sur la zone. Les vagues générées sont les plus hautes lorsque le vent est au plus fort, et se propagent du nord-ouest au sud-est. Le modèle simule des vagues atteignant entre 3 et 3,5 mètres sur toute la moitié nord de la zone d'étude, de la soirée du 31 janvier jusqu'à la fin de journée du 1^{er} février. Les hauteurs maximales sont aux alentours de 01 UTC le 1^{er} février. Les vagues faiblissent seulement en soirée du 1^{er} février en s'orientant peu à peu au nord, comme le vent.

La contribution de la houle est très faible pour cette simulation, ce qui va également être le cas des simulations suivantes.

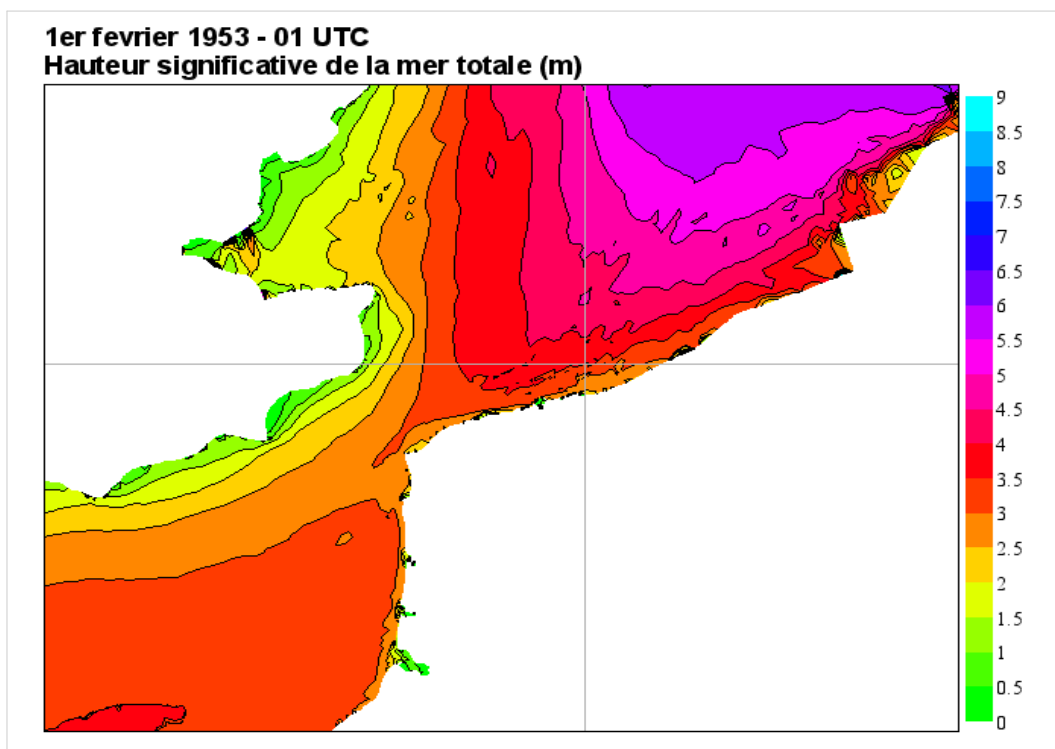


Illustration 4 : hauteur significative de la mer totale (mètres), le 1er février 1953

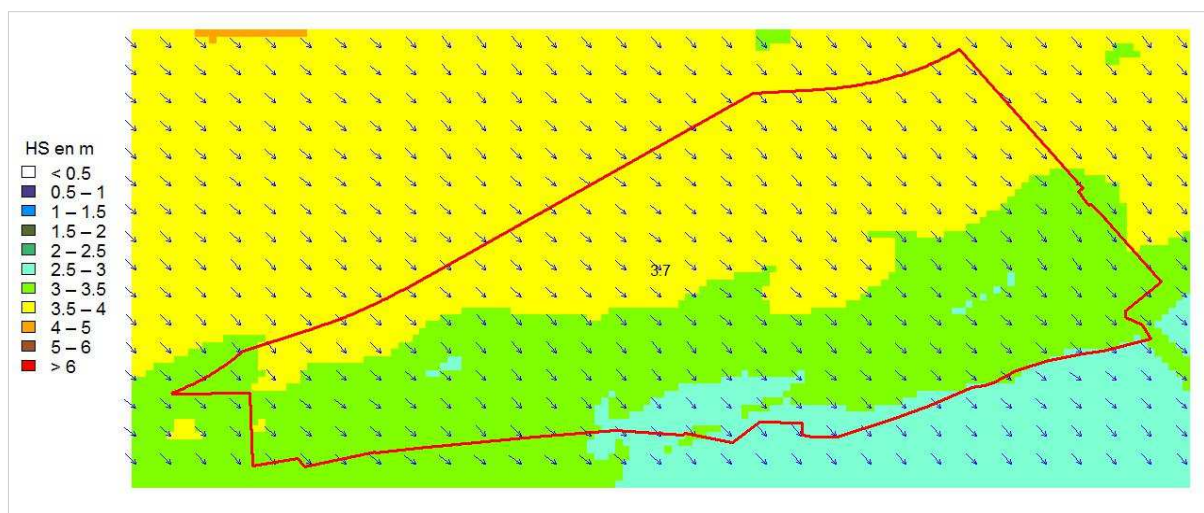


Illustration 5 : zoom sur la zone d'étude, hauteur significative et direction de la mer totale (mètres), le 1er février 1953 à 01 UTC

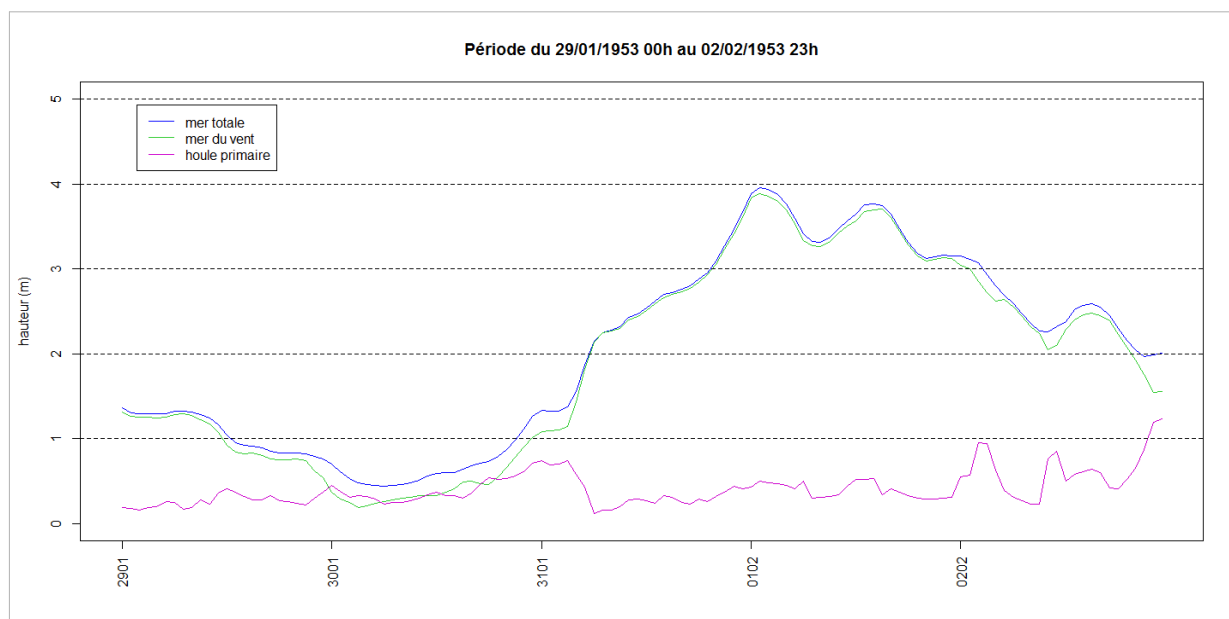


Illustration 6 : évolution temporelle de la hauteur significative des vagues pour la simulation de 1953, en un point de grille qui est à chaque heure celui où la mer totale est maximale dans la zone d'étude.

Caractéristiques principales :

- mer du vent prédominante
- propagation de nord-ouest avec gradient nord-ouest/sud-est sur la zone d'étude

	Zone d'étude	Domaine de simulation
Hauteur maximale	3,96 m	6 m
Heure	01 UTC	01 UTC
Localisation	nord/nord-ouest	Mer du Nord au nord-est du domaine de simulation
Direction	nord-ouest	
Contribution mer du vent/houle	mer du vent prédominante	

Tableau 6 : caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation de 1953

4.3. Simulation de février 1990

Cette simulation tient compte des niveaux d'eau fournis par le modèle HYCOM. Le forçage atmosphérique provient du projet INCREO.

4.3.1. Rappel des conditions météorologiques

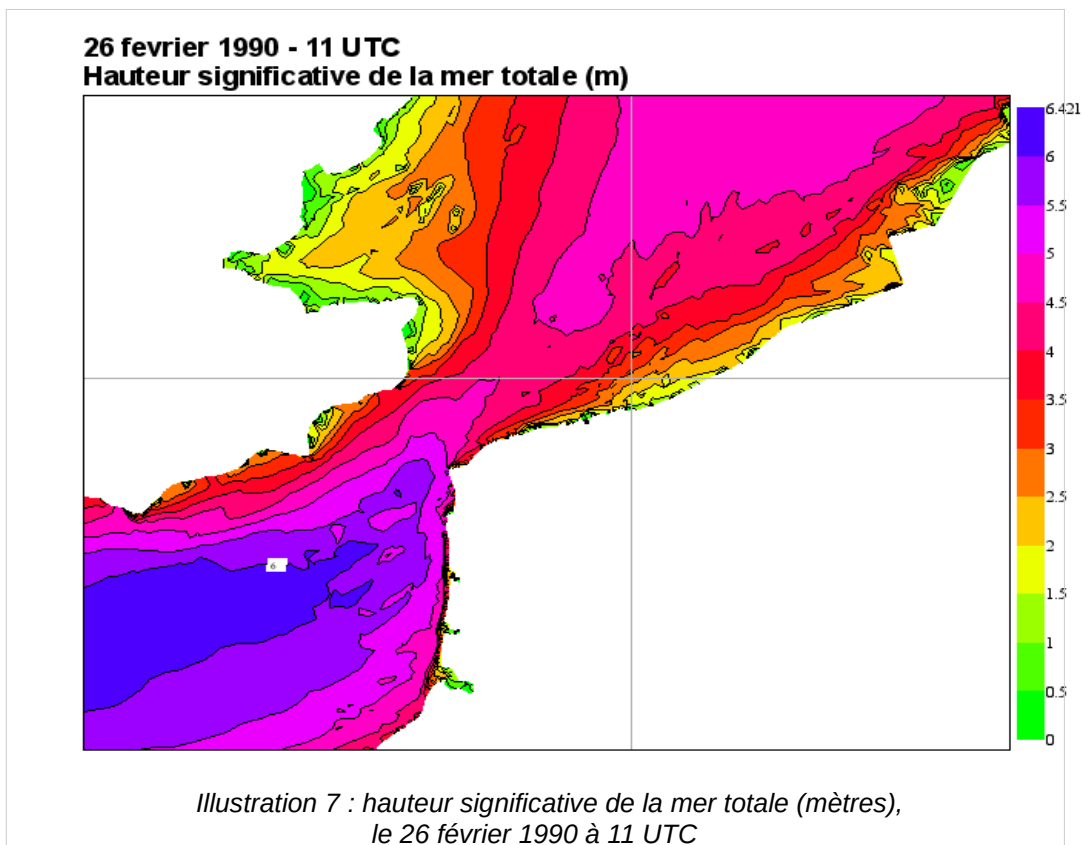
Une dépression traverse la Mer du Nord le 26 février. Le vent, de secteur sud le 25 février, s'oriente alors au sud-ouest en se renforçant très rapidement, le pic de vent le plus fort ayant lieu en matinée du 26 février. Ces phénomènes se sont produits lors d'un épisode de vives eaux.

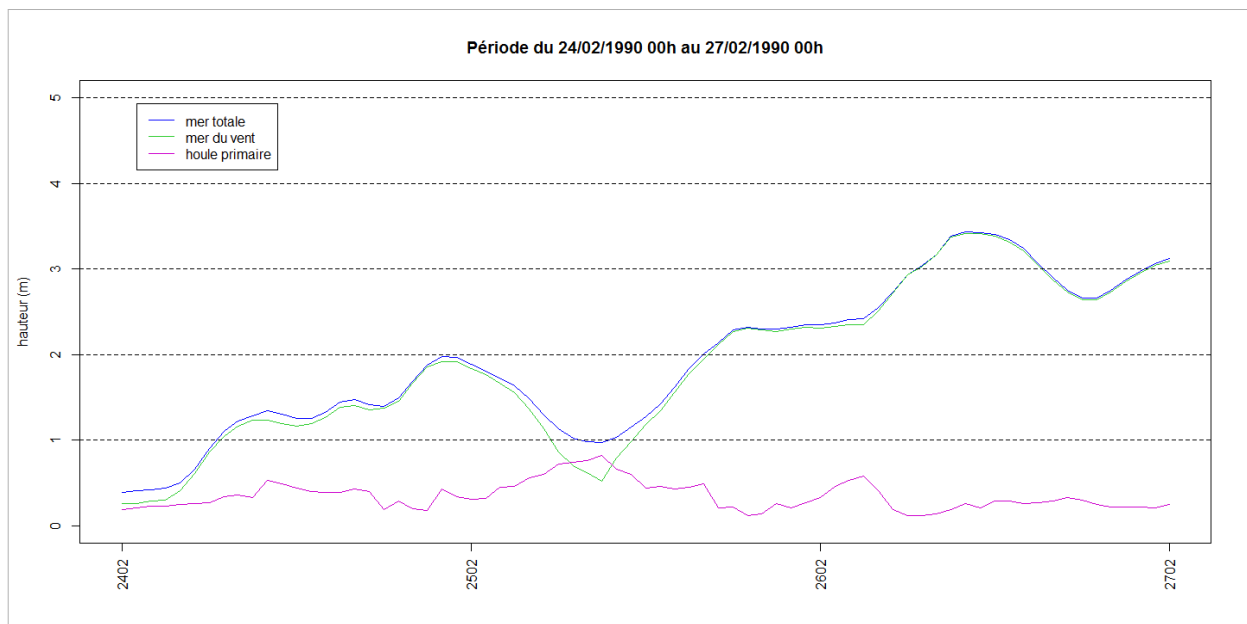
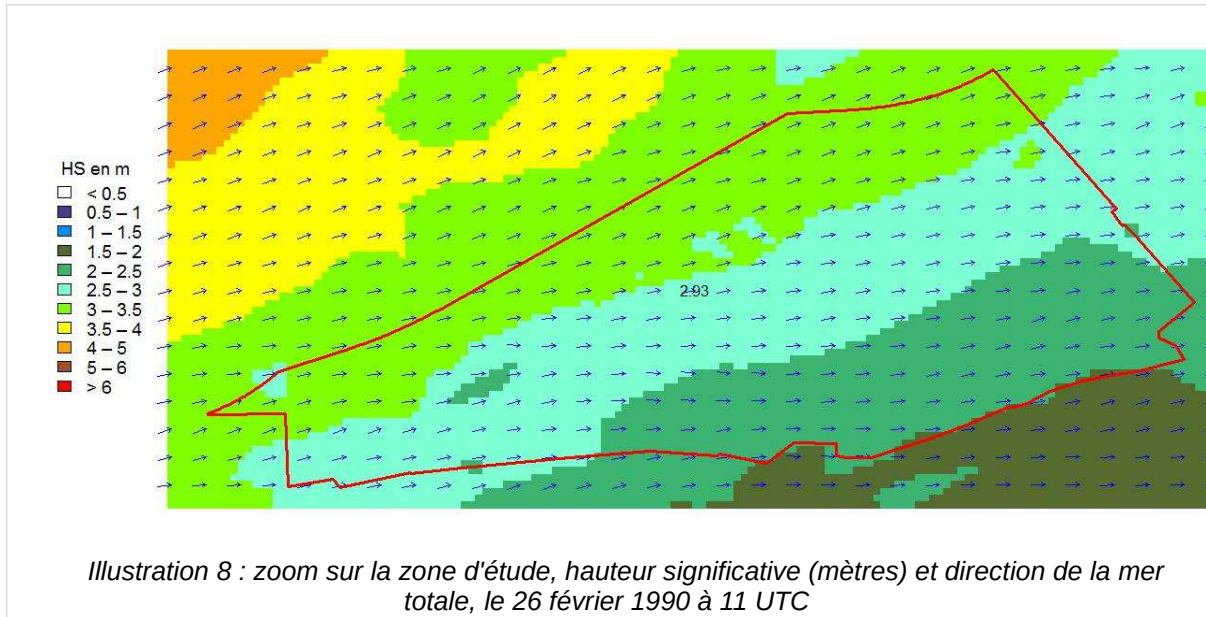
4.3.2. Analyse des résultats

Comme en 1953, l'état de la mer est très étroitement corrélé au comportement du vent sur la zone, avec des hauteurs maximales de vagues le matin du 26 février et une propagation d'ouest à sud-ouest. La contribution de la houle est quasiment inexistante.

On trouve les vagues les plus hautes en amont du détroit du Pas-de-Calais, où elles dépassent 6 mètres, alors qu'elles sont atténuées en aval du détroit. Au point central de la zone d'étude, les vagues simulées ne dépassent pas 3 mètres, et sont comprises entre 3 et 3,5 mètres sur le nord-ouest de la zone. L'atténuation se fait lentement en journée du 26 février.

Au sud-ouest du détroit du Pas-de-Calais (51.0N, 1.5E), les hauteurs de vagues relevées sont de l'ordre de 4 à 5 mètres la journée du 26 février, correspondant aux valeurs simulées par le modèle. Aux abords de Dunkerque, la simulation est également tout à fait réaliste, on retrouve des valeurs entre 2,5 et 3 mètres, correspondant à la mer forte signalée par le sémaphore (vagues comprises entre 2,5 et 4 mètres).





Caractéristiques principales :

- mer du vent prédominante
- propagation d'ouest à sud-ouest avec gradient nord-ouest/sud-est sur la zone d'étude
- flux de sud-ouest peu favorable à de très fortes vagues près du littoral du Nord

	Zone d'étude	Domaine de simulation
Hauteur maximale	3,44 m	6,48 m
Heure	10 UTC	13 UTC
Localisation	nord	en Manche au sud-ouest du domaine
Direction	ouest à sud-ouest	
Contribution mer du vent/houle	mer du vent prédominante	

Tableau 7 : caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation de 1990

4.4. Simulation de février 1996

4.4.1. Rappel des conditions météorologiques

Cette tempête se produit en conditions hivernales avec un flux de nord à nord-est. Un premier pic de vent a lieu en journée du 19 février en secteur nord, suivi d'un second pic, plus important, la nuit du 19 au 20 février en secteur nord-est. Il s'agit là aussi de phénomènes qui se sont produits lors d'une période de vives eaux.

4.4.2. Analyse des résultats

L'état de la mer suit le comportement du vent sur la zone. Lors du premier pic de vent, la hauteur des vagues est comprise entre 3 et 3,5 m sur la moitié nord-ouest de la zone d'étude. Les vagues les plus hautes se trouvent en limite nord du domaine de simulation, avec des vagues comprises entre 4,5 et 5 m.

Lors du second pic de vent, les vagues prennent une direction nord/nord-est, avec des vagues atteignant 4 à 4,5 mètres en Mer du Nord. Sur la zone d'étude, les hauteurs de vagues atteignent sensiblement les mêmes valeurs que la veille, entre 3 et 2,5 m, mais sur une portion plus réduite de la zone, en limite nord-ouest.

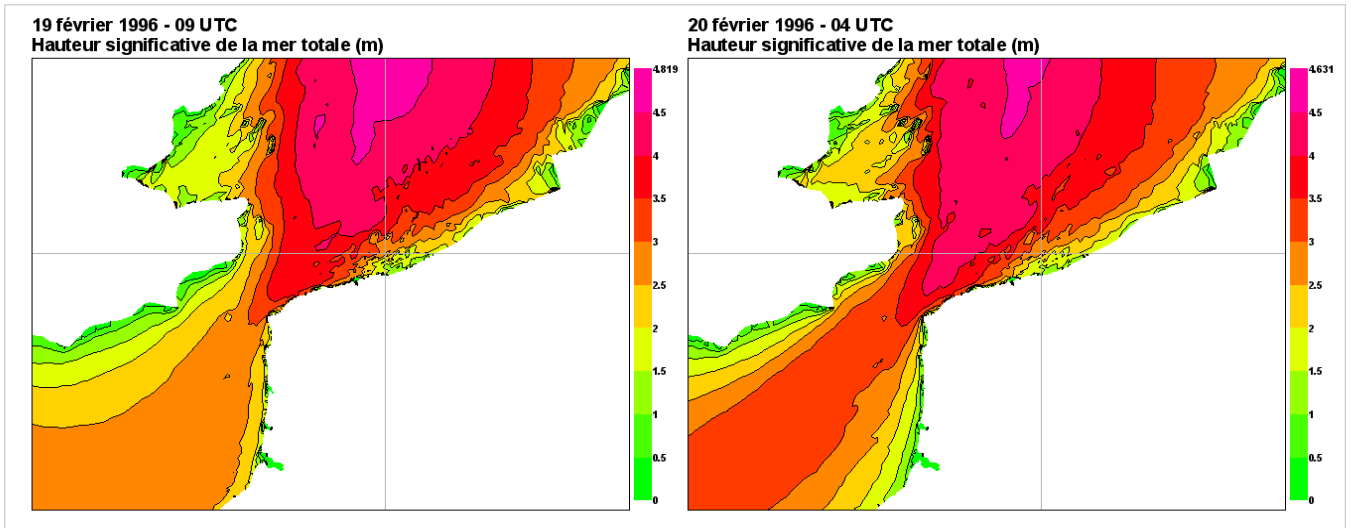


Illustration 10 : hauteur significative de la mer totale (mètres)
le 19 février 1996 à 10 UTC (gauche) et le 20 février 1996 à 05 UTC (droite)

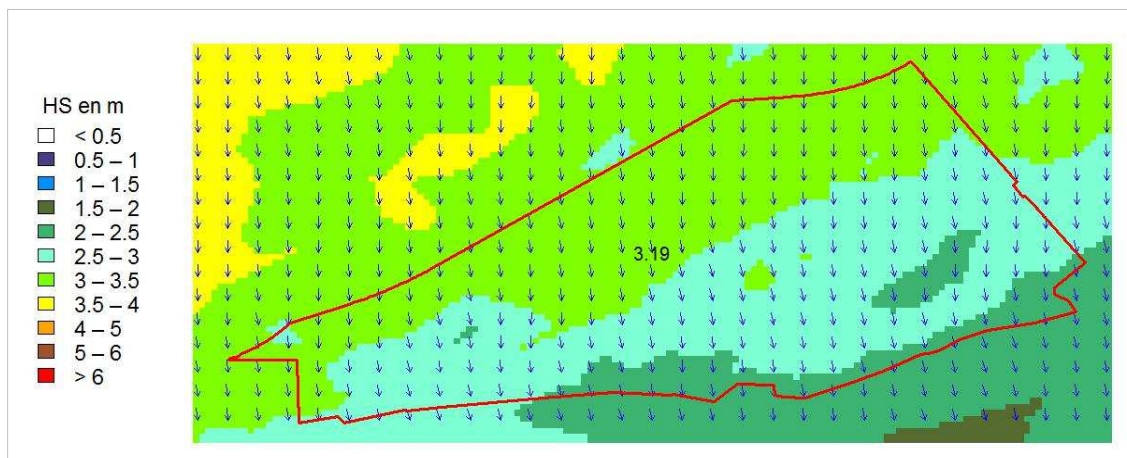


Illustration 11 : zoom sur la zone d'étude, hauteur significative (mètres) et direction de la mer totale, le 19 février 1996 à 11 UTC

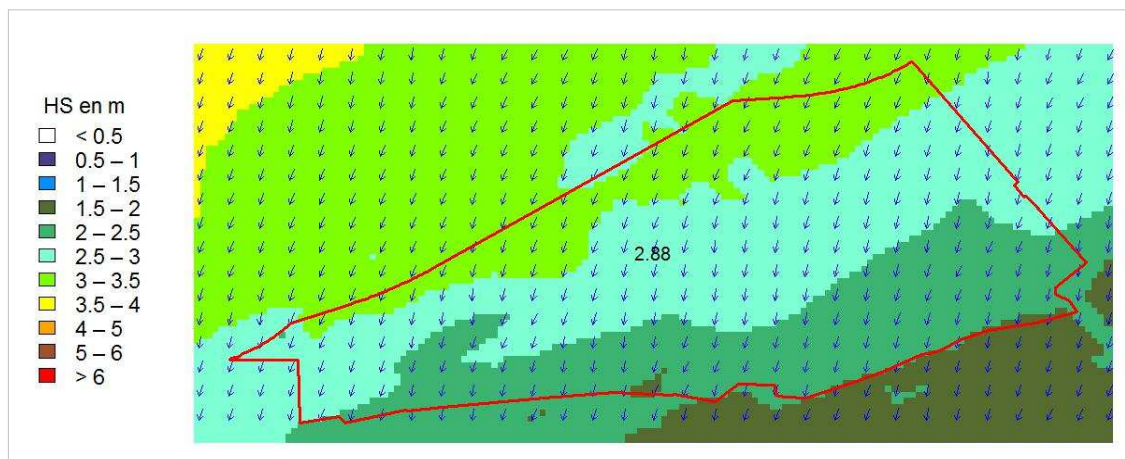


Illustration 12 : zoom sur la zone d'étude, hauteur significative (mètres) et direction de la mer totale, le 20 février 1996 à 03 UTC

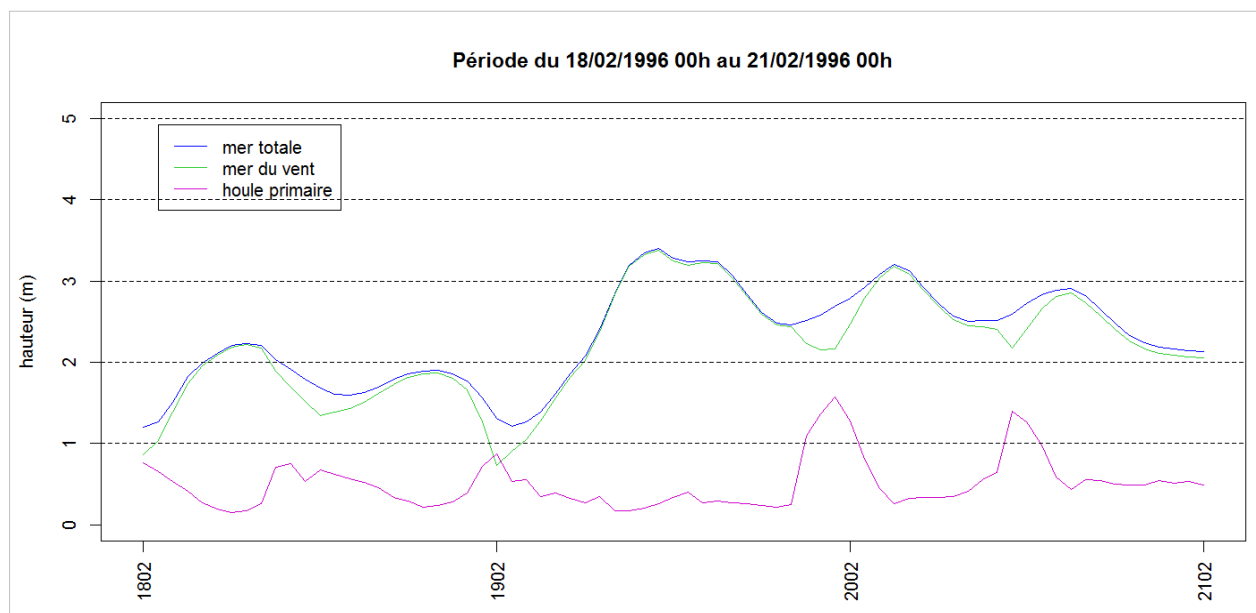


Illustration 13 : évolution temporelle de la hauteur significative des vagues pour la simulation de 1996, en un point de grille qui est à chaque heure celui où la mer totale est maximale dans la zone d'étude.

Pour cette simulation, on remarque que les fortes valeurs mesurées par la bouée Sandettié ne sont pas reproduites par la modélisation WW3 (jusqu'à 5,5 mètres de hauteur significative). Différents tests de modélisation ont été réalisés, n'ayant pas permis d'obtenir des hauteurs de vagues comparables à celles observées sur ce point.

Caractéristiques principales :

- mer du vent prédominante
- propagation de nord à nord-est avec gradient nord-ouest/sud-est sur la zone d'étude
- vagues légèrement plus fortes sur la zone d'étude en secteur nord qu'en secteur nord-est

		Zone d'étude	Domaine de simulation
1^{er} maximum	Hauteur maximale	3,41 m	4,82 m
	Heure	19/02 à 11 UTC	19/02 à 09 UTC
	Localisation	nord	Mer du Nord, au nord du domaine
	Direction	nord	
2^{ème} maximum	Hauteur maximale	3,21 m	4,63 m
	Heure	20/02 à 03 UTC	20/02 à 04 UTC
	Localisation	nord	Mer du Nord, au nord du domaine
	Direction	nord à nord-est	nord-est
Contribution mer du vent/houle		mer du vent prédominante	

Tableau 8 : caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation de 1996 (avec niveaux)

4.5. Simulation de janvier 2007

Cette simulation tient compte des niveaux d'eau fournis par le modèle HYCOM. Le forçage atmosphérique provient du modèle opérationnel de Météo-France, Arpège.

4.5.1. Rappel des conditions météorologiques

Une dépression circulant du nord de l'Irlande au Danemark entraîne un épisode de vents tempétueux de sud-ouest à ouest. Les vents les plus forts soufflent de secteur sud-ouest en matinée, puis de secteur ouest en cours d'après-midi du 18 janvier. Pour cette situation, les coefficients de marée sont élevés (proches de 100) avec une surcote importante (plus de 1 mètre à Dunkerque).

4.5.2. Analyse des résultats

Comme précédemment l'état de la mer est très étroitement corrélé au comportement du vent sur la zone. C'est en Manche que le vent génère les vagues les plus fortes. Le changement d'orientation du vent pendant la tempête va avoir un impact sur la hauteur des vagues au nord du détroit du Pas-de-Calais.

Le matin, lorsque le vent souffle du sud-ouest, les fortes vagues se propagent de part et d'autre du détroit, avec des hauteurs dépassant 4,5 mètres. Pour mémoire les valeurs relevées aux bouées sont de 3,5 à 4 mètres.

L'après-midi, lorsque le vent s'oriente à l'ouest, bien qu'il se maintienne à des valeurs équivalentes voire légèrement supérieures à celles du matin, les vagues se propagent plus difficilement au nord du détroit. Les vagues générées y sont plus faibles que le matin, alors qu'elles dépassent 6 mètres en Manche et sont alors à leur niveau maximal.

Sur la zone d'étude, les vagues atteignent leurs hauteurs maximales juste avant la bascule de vent, à la mi-journée. Les vagues les plus fortes sont comprises entre 3 et 3,5 mètres sur le nord-ouest et nord de la zone. Elles se propagent d'ouest à sud-ouest.

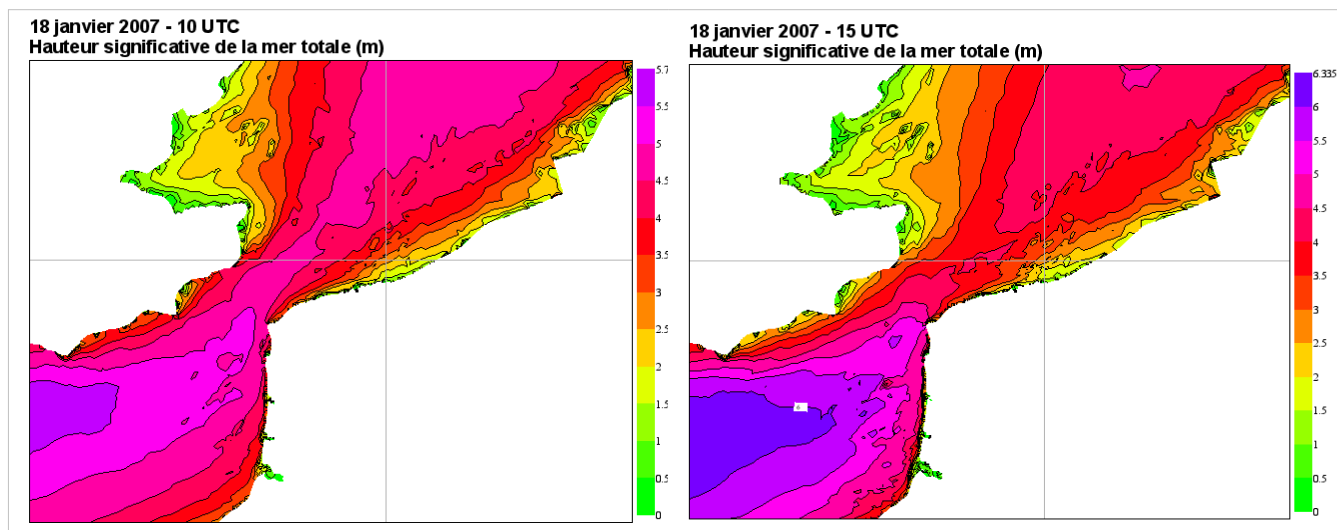


Illustration 14: hauteur significative de la mer totale (mètres) le 18 janvier 2007 à 10 UTC avec un vent de sud-ouest (gauche) et à 15 UTC avec un vent d'ouest (droite)

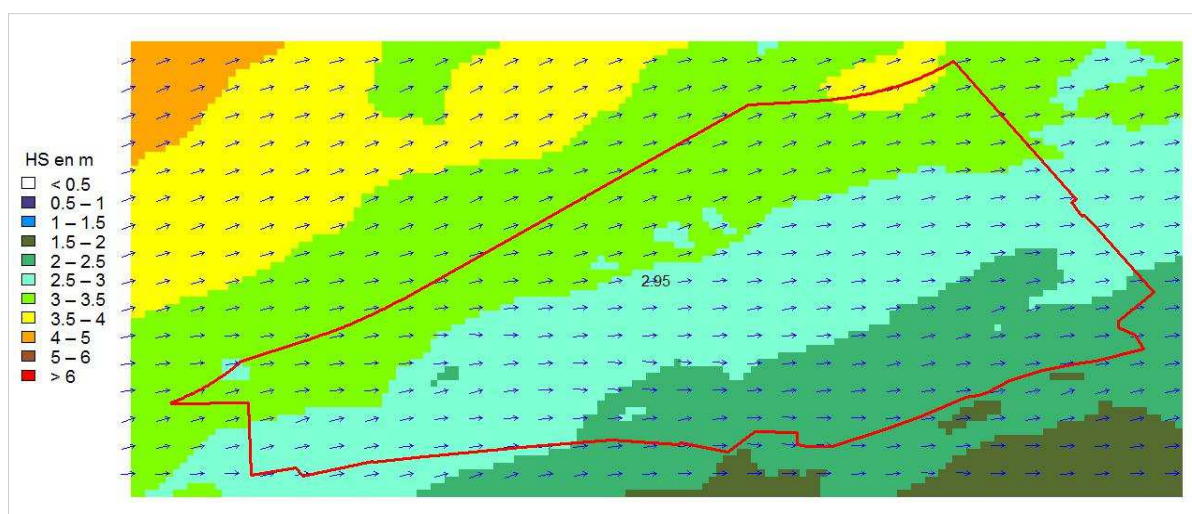


Illustration 15 : zoom sur la zone d'étude, hauteur significative (mètres) et direction de la mer totale, le 18 janvier 2007 à 12 UTC

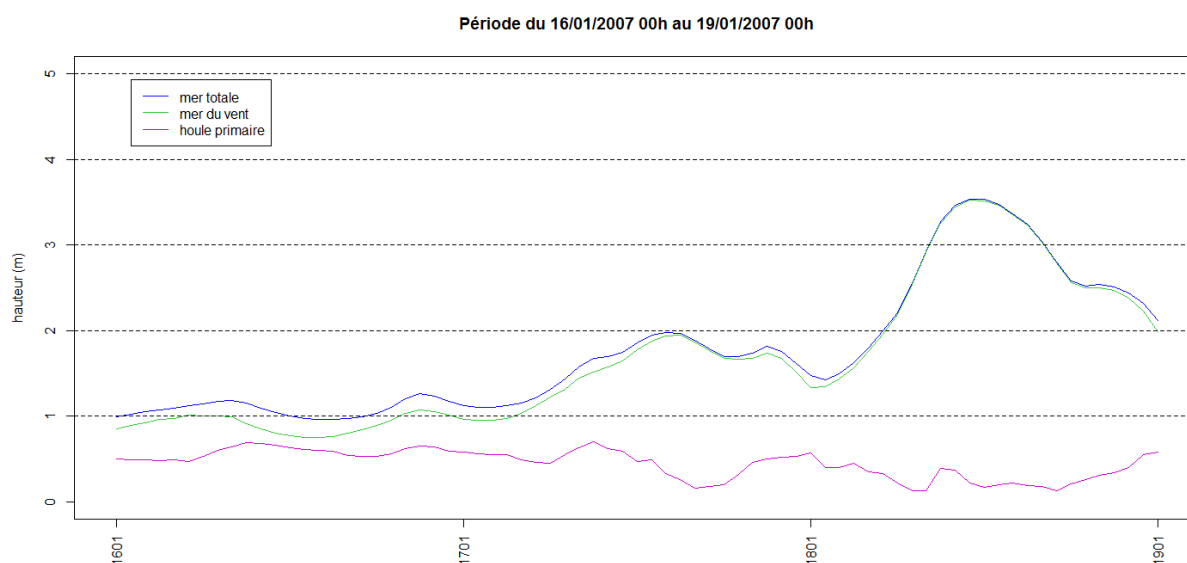


Illustration 16 : évolution temporelle de la hauteur significative des vagues pour la simulation de 2007, en un point de grille qui est à chaque heure celui où la mer totale est maximale dans la zone d'étude

Caractéristiques principales :

- mer du vent prédominante
- propagation d'ouest à sud-ouest avec gradient nord-ouest/sud-est sur la zone d'étude
- vagues plus fortes sur la zone d'étude lorsque le vent est de secteur sud-ouest que de secteur ouest

	Zone d'étude	Domaine de simulation
Hauteur maximale	3,53 m	6,34 m
Heure	11 UTC	15 UTC
Localisation	nord	Manche, au sud-ouest du domaine
Direction	ouest à sud-ouest	
Contribution mer du vent/houle	mer du vent très largement prédominante	

Tableau 9 : caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation de 2007

4.6. Simulation de décembre 2011

Cette simulation est particulière, puisque les champs atmosphériques utilisés pour forcer le modèle de vagues proviennent de la prévision d'ensemble élaborée à Météo-France à partir du modèle Arpège. La prévision d'ensemble fournit un éventail de scénarios possibles pour une situation donnée. Nous avons sélectionné au sein de cet éventail de tempêtes fictives, une tempête particulièrement marquante avec des vents atteignant force 12 sur l'est de la Manche.

Un filtre double, portant à la fois sur la force du vent (seuil de 25 m/s) et sur la durée de la période où la force est supérieure à ce seuil a été appliqué à la totalité des runs PEARP de 06 et 18 h dont les échéances couvrent les journées des 16 et 17/12/11. Le run numéro 17 du 13/12/11 18 UTC, qui prévoit sur cette journée des forces de vent allant jusqu'à 36 m/s, a ainsi été retenu.

Par conséquent ce run extrême a permis de simuler une tempête fictive mais élaborée à partir de vents réalistes.

Pour cette simulation, la prise en compte des niveaux d'eau fournis par le modèle HYCOM n'est pas présentée dans le rapport, dans la mesure où la tempête ne concordait pas avec des grandes marées et que les vagues induites étaient inférieures en hauteur. La simulation ici présentée a été effectuée avec un niveau d'eau fixé **au niveau moyen de la mer**. Les courants de surface pour une marée de coefficient moyen (ici 60) sont assez faibles sur la zone (moins de 1 nœuds).

4.6.1. Conditions météorologiques fournies par la prévision d'ensemble

Le run extrême sélectionné est associé à une dépression très creuse circulant dans un flux d'Ouest sur le sud des Iles britanniques avant de se décaler vers la Mer du Nord. Les vents de Sud-Ouest puis Ouest associés soufflent jusqu'à force 12 en Manche Orientale. Avec le décalage de la dépression vers le Danemark, ils tournent au Nord-Ouest au large de Dunkerque pendant quelques heures en atteignant alors force 10. De telles conditions très violentes mais réalistes sont susceptibles de générer de fortes vagues sur la zone d'intérêt.

4.6.2. Analyse des résultats

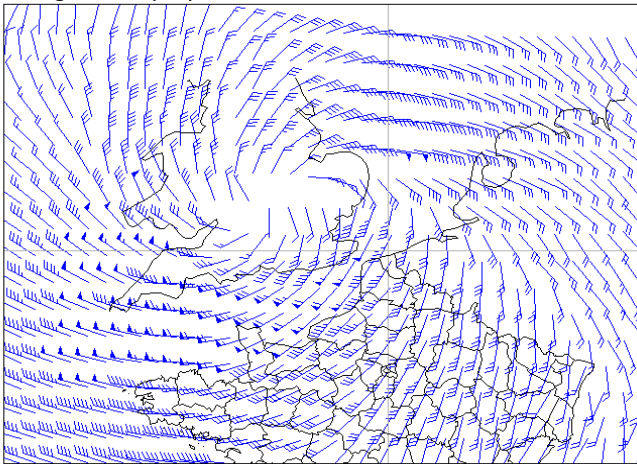
On constate que les hauteurs de vagues obtenues se rapprochent de celles de la tempête majeure de 1953 (sans pour autant atteindre les mêmes valeurs).

Sur l'ensemble du domaine de simulation, les vagues les plus fortes sont simulées en Manche l'après-midi du 15 décembre (jusqu'à 9 m), lorsque la dépression circule sur les Iles britanniques et génère des vents de sud-ouest puis ouest en Manche. C'est lorsque la dépression se décale vers le Danemark pendant la nuit, engendrant des vents de nord-ouest en Mer du Nord, que les vagues atteignent leur hauteur maximale au large de Dunkerque (de 3 à 3,5 mètres sur le nord-ouest de la zone d'étude).

Comme pour les simulations précédentes, la contribution de la houle est faible, des vents de nord-ouest ne permettant pas la formation d'une houle importante au large de Dunkerque.

Cette simulation fait apparaître un phénomène de déferlement des vagues dans la moitié sud-est de la zone d'étude (zones « bruitées » sur l'illustration 19). Ce phénomène s'avère significatif lorsque les niveaux d'eau sont peu élevés (donc en particulier par marée basse de vives eaux).

16 décembre 2011 - 12 UTC
Forçage de vent (m/s)



17 décembre 2011 - 00 UTC
Forçage de vent (m/s)

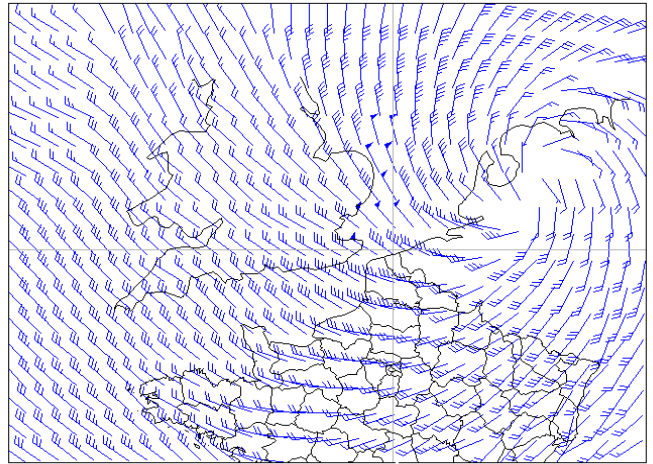
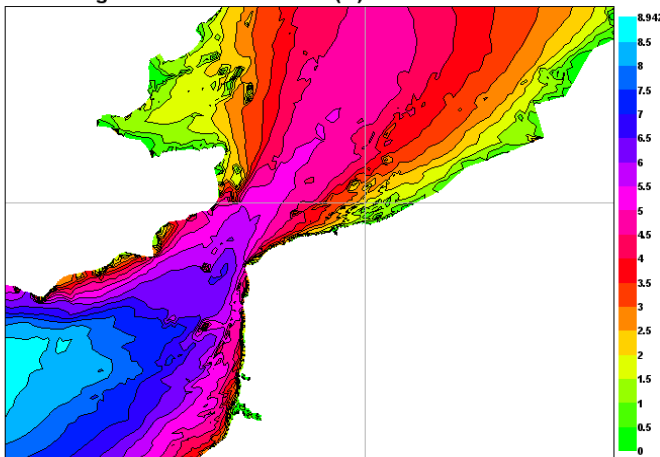


Illustration 17 : forçage de vent (m/s) utilisé,
le 16 décembre 2011 à 12 UTC (gauche) et le 17 décembre 2011 à 00 UTC (droite)

Sur cette représentation graphique du vent, un triangle représente 50 nœuds et une barre 10 nœuds. Le vent atteint donc 70 nœuds en Manche Est à 12h et 50 noeuds en mer du Nord à 00h.

16 décembre 2011 - 14 UTC
Hauteur significative de la mer totale (m)



17 décembre 2011 - 02 UTC
Hauteur significative de la mer totale (m)

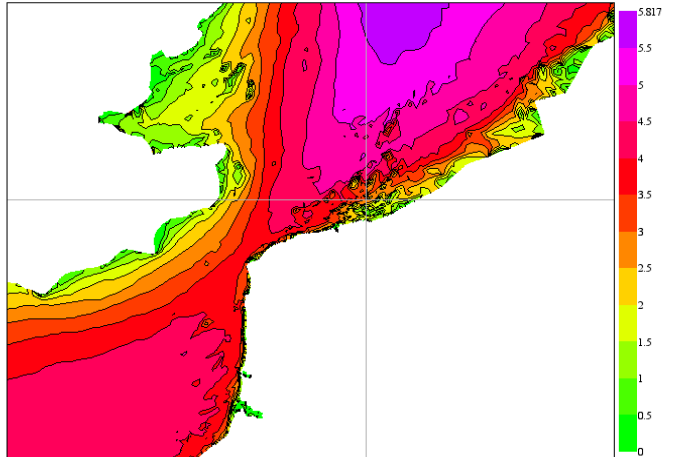


Illustration 18 : hauteur significative de la mer totale (mètres)
le 16 décembre 2011 à 14 UTC (gauche) et le 17 décembre 2011 à 02 UTC (droite)

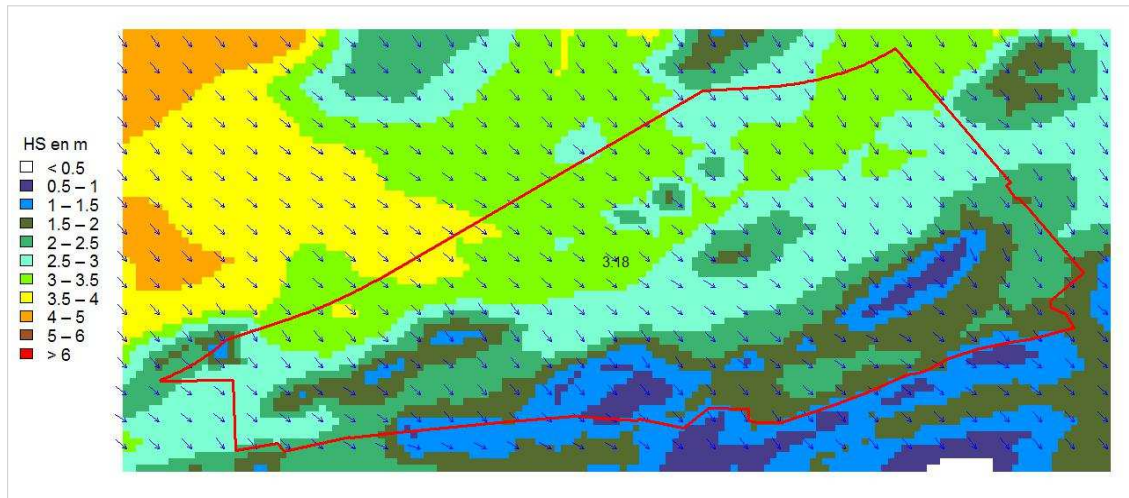


Illustration 19 : zoom sur la zone d'étude, hauteur significative (mètres) et direction de la mer totale, le 17 décembre 2011 à 01UTC

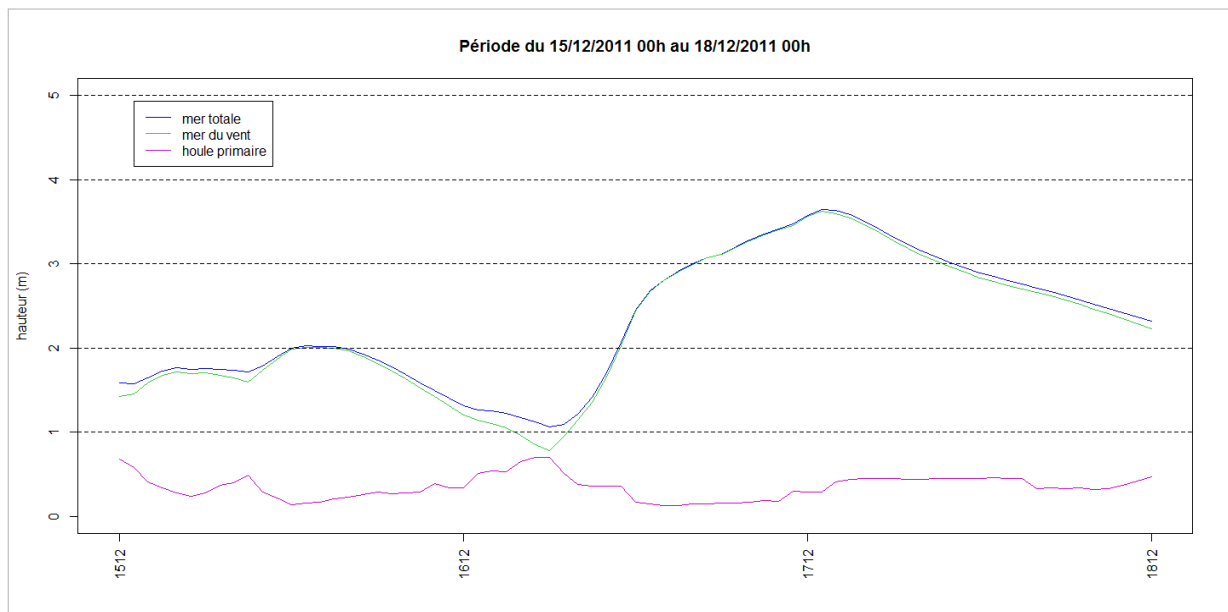


Illustration 20 : évolution temporelle de la hauteur significative des vagues pour la simulation de 2011, en un point de grille qui est à chaque heure celui où la mer totale est maximale dans la zone d'étude.

Caractéristiques principales :

- mer du vent prédominante
- propagation de nord-ouest avec gradient nord-ouest/sud-est sur la zone d'étude

	Zone d'étude	Domaine de simulation
Hauteur maximale	3,64 m	5,82
Heure	01 UTC	02 UTC
Localisation	nord-ouest	Mer du Nord, nord du domaine
Direction	nord-ouest	
Contribution mer du vent/houle	mer du vent très largement prédominante	

Tableau 10 : caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation de 2011

4.7. Synthèse de ces simulations de vagues

Pour estimer les vagues extrêmes, la proposition de Météo France consistait à rechercher les tempêtes potentiellement impactantes dans les 100 dernières années et à simuler les vagues associées. Il est évident que toute autre méthodologie dans la recherche d'événements (par exemple l'utilisation des bases « Anemoc2 » ou « BOBWA ») auraient pu conduire à des épisodes de fortes vagues différents de ceux que nous avons ici sélectionnés.

Les 5 situations rejouées à l'aide d'un modèle de vagues à maille fine (ww3 200 m de résolution sur la zone considérée) permet de dégager des éléments intéressants sur la connaissance des vagues extrêmes. Les hauteurs H1/3 de mer totale obtenues atteignent le plus souvent des valeurs de l'ordre de 3,5 à 4 m avec des directions de provenance de l'Ouest ou du Nord pour les plus impactantes. Malgré l'utilisation de forçages de vents forts voire très forts, il n'a pas été possible de dépasser ces valeurs. Selon le modèle utilisé ici WW3, modèle qui a fait l'objet de plusieurs campagnes de validation, ces fortes vagues obtenues dans nos simulations pourraient représenter une sorte de maximum de hauteur significative des vagues possibles sur la zone considérée. Ce résultat reste toutefois à confirmer si une tempête encore plus forte que celle utilisée pouvait survenir ou si on utilisait une autre source de données pour sélectionner les épisodes de fortes vagues.

Les fortes valeurs obtenues sont tout à fait cohérentes avec les valeurs les plus fortes obtenues au sein de la climatologie AVAG explicitée dans le rapport du lot 1 de cette étude.

Les simulations à maille fine présentées ici indiquent clairement des déferlements des vagues sur certains hauts fonds sableux au sein de la zone d'intérêt. Il est à noter que la bathymétrie utilisée ici est fine mais probablement encore différente de la bathymétrie réelle. L'occurrence de déferlements au sein de la zone paraît très plausible mais la localisation de ceux-ci est probablement différente dans la réalité de celle figurant dans nos simulations.

FIN DE DOCUMENT

Annexe 1. LISTE DES TEMPÊTES RETENUES

Liste des événements tempétueux pour lesquels une fiche descriptive a été réalisée

30 septembre et 1^{er} octobre 1911

6 novembre 1921

24 et 25 février 1935

28 février et 1^{er} mars 1949

31 janvier et 1^{er} février 1953

16 et 17 octobre 1967

13 novembre 1972

2 avril 1973

2 et 3 janvier 1976

12 janvier 1978

27 novembre 1983

16 octobre 1987

05 janvier 1990

26 février 1990

10 décembre 1990

14 novembre 1993

22 janvier 1995

19 et 20 février 1996

24 et 25 février 1997

27 et 28 février 2002

18 janvier 2007

Annexe 2. LES TROMBES MARINES

Les tempêtes sont des phénomènes bien connus et redoutés de longue date des marins. Un phénomène de nature différente et d'échelle plus réduite peut être également à l'origine de sinistres maritimes : les trombes marines. Comme les tempêtes, mais balayant une surface réduite, les trombes sont à l'origine de violentes rafales de vent. Ce phénomène météorologique, d'échelle aérologique, est à la fois bref et de petites dimensions :

- 5 à 100 m d'extension horizontale
- de 300 à 3000 m de développement vertical
- avec une durée de vie inférieure à 30 minutes.



Illustration 21 : trombe marine et éolienne dans les parages de l'île d'Anholt dans le Cattégat entre le Danemark et la Suède, le 23 avril 2016

La trombe se forme en mer sous des nuages convectifs du genre cumulus ou cumulonimbus. Sa trajectoire l'amène parfois à toucher terre, on parle dès lors de trombe terrestre pour la distinguer de la tornade proprement terrestre (cela semble avoir été le cas à Dunkerque le 9 novembre 2001 ou plus récemment, le 25 octobre 2011, à Sanary dans le Var où une trombe d'origine marine a endommagé une centaine de villas).

Plus encore que les valeurs en pointe des rafales, ce sont les termes de cisaillements de vent et les contraintes qu'ils exercent sur les structures qui présentent un risque pour l'intégrité des fermes éoliennes marines.

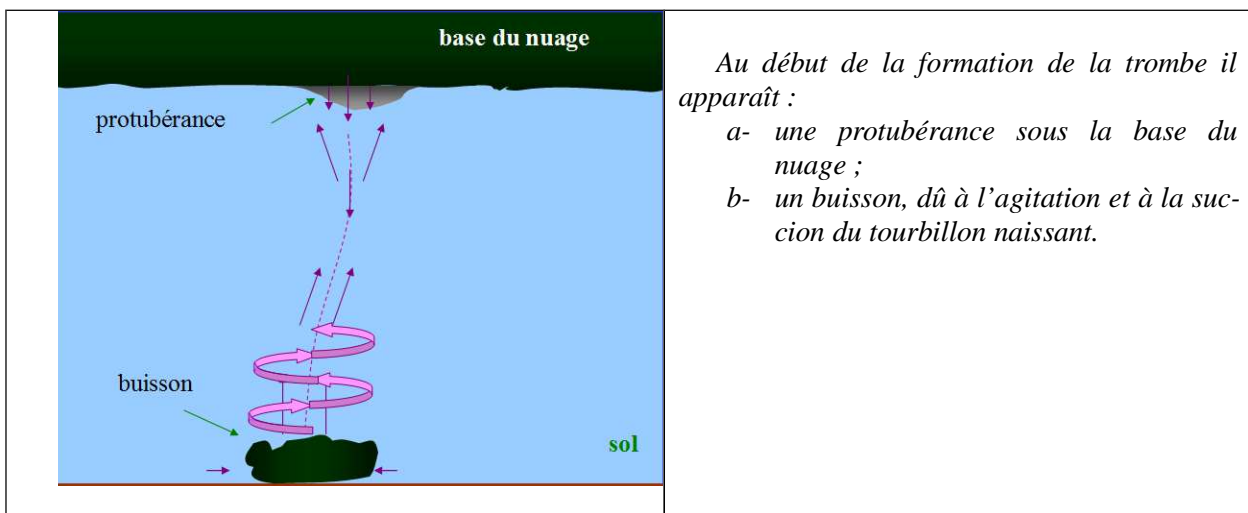
Selon leur origine, on distingue deux types de trombes :

- les trombes tornadiques (type A), qui se forment sous des super-cellules orageuses. Elles sont à la fois rares et très violentes.
- les trombes marines proprement dites (type B). Elles se développent sous des nuages d'extension beaucoup plus modeste parfois de simples cumulus congestus, donc par «beau temps». Ce sont les plus fréquentes en Mer du Nord. Les vents associés ne sont toutefois pas à négliger et peuvent atteindre jusqu'à 50 m/s (EF1 sur l'échelle de Fujita modifiée).

Pour mémoire les tornades, un phénomène apparenté, sont plus puissantes que les trombes marines. Les plus puissantes tornades ont un effet dévastateur. En effet, les différences de températures entre le sol et la masse d'air sont ici plus importantes, en conséquence l'énergie mise en jeu par le tourbillon associé est capable de souffler, de soulever, et de déplacer des objets très lourds.

1- Aspect et développement

A un observateur suffisamment éloigné, la trombe apparaît sous la forme d'un tube s'étirant de la base d'un nuage vers la mer : le tuba. Le tourbillon de vents violents au contact de la surface liquide provoque une éjection de l'eau en tout sens et la formation d'une structure buissonnante : le buisson.



	<p>Un cône, constitué de gouttelettes nuageuses attirées vers le bas, annonce la formation du tuba qui joint le buisson au nuage. Les flèches décrivent les différents mouvements.</p>
	<p>La colonne nuageuse atteint le buisson : le tuba est entièrement matérialisé. Son diamètre ne dépasse que rarement une dizaine de mètres.</p>
	<p>En fin de vie, le tuba s'incline et la trombe disparaît aussi rapidement qu'elle est apparue.</p>

Tableau 11 : aspects successifs de la trombe marine au cours de son cycle de vie



*La présence
simultanée de
plusieurs trombes
peut sous
certaines
circonstances
n'être pas rare*

*Illustration 22 : trombes marines vues depuis Argalasti en Grèce,
le 15 juillet 2014 - crédit photo : Evagelia Diannelaki*

2 - Origine et climatologie

Les trombes marines sont des phénomènes de nature convective qui apparaissent quand de l'air froid vient surplomber une mer relativement chaude. Le phénomène a également été observé sur des lacs de grandes dimensions comme le lac Léman et les grands lacs américains, voire sur certains grands fleuves comme le Saint-Laurent au Canada.

En raison du contraste nécessaire entre l'air et la surface marine sous-jacente, les trombes sont préférentiellement observées, pour ce qui relève de la Mer du Nord, entre la fin de l'été et le début de l'automne quand les températures de surface de la mer sont au plus haut et que surviennent les premières incursions d'air froid polaire. C'est donc également dans les eaux peu profondes situées près des côtes, plus chaudes l'été que vers le large, que les trombes sont le plus souvent observées.

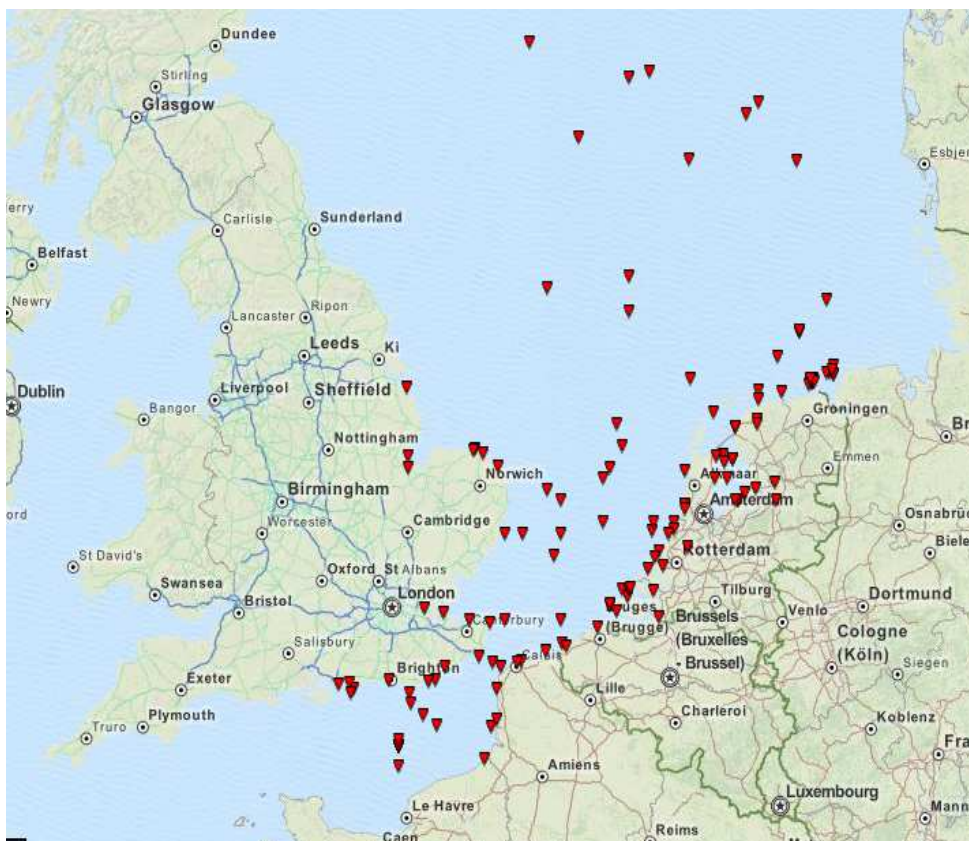


Illustration 23 : trombes marines signalées en Mer du Nord et entrée de Manche sur la période 1976-2016 - source : European Severe Weather Database

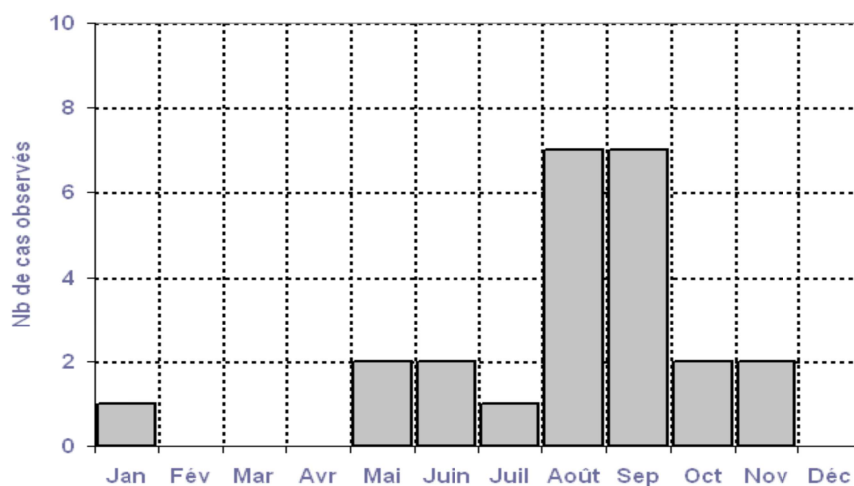


Illustration 24 : répartition mensuelle d'un échantillon de 25 trombes marines signalées par des bateaux (temps présent WW = 19 dans le message SHIP) entre 50 et 55° N et 1° W et 7° E sur la période 1976-2016 - source des données : European Severe Weather Database

La formation d'une trombe nécessite :

- une forte humidité dans les basses couches (afin que la base du nuage ne soit pas trop élevée)
- un fort potentiel d'instabilité (mais avec des éléments inhibant le déclenchement de la convection)
- un vent pas trop fort et de faibles cisaillements verticaux (pour éviter que la turbulence ne détruise l'organisation verticale)

Ces éléments réunis, il faut qu'un élément déclencheur vienne ensuite libérer le potentiel instable qui à son tour doit se traduire par une forte accélération du vent sur la verticale. Il s'agit le plus souvent :

- de cisaillements de vent horizontaux d'échelle sous-synoptique (tels que les brises)
- de courant de densité qui accompagne le déclenchement des averses sous un nuage situé à proximité.

La connaissance de ces éléments précurseurs a permis d'élaborer différents indices contribuant avec un relatif succès à la prévision du risque de formation de trombes marines tels que les indices de Van de Velde, de Szilagyi (SWI index), et Kuiper-van der Hoven (KHI index).

3 – Conclusion

Les trombes marines sont des phénomènes pouvant s'accompagner de vents violents, mais dont la brève durée de vie limite la dangerosité. Le risque théorique qu'a un parc éolien offshore d'être sur le trajet d'une trombe marine a été évalué à un cas par an et par portion de 10 000 km² par Nikolai Dotzek et son équipe, pour ce qui est des surfaces marines de la Baltique et de la Mer du Nord jouxtant les côtes allemandes. Malgré nos recherches, il n'a pas été possible de trouver trace ou estimation de dégâts sur un parc éolien off shore en cas de trombe mais on peut supposer que ceux-ci seraient significatifs selon l'intensité de la trombe.

Annexe 3. Présentation de la configuration WW3 à Météo-France

DirOP/MAR/R&D – 11/01/2017



Le modèle de vagues en côtier WW3 a été mis en place à Météo-France en 2015 sur les façades métropolitaines de l'Atlantique et de la Méditerranée, dans le cadre du projet Homonim. Ce projet a été mené en collaboration avec le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) et financé par la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques). L'objectif du volet « état de mer » était d'améliorer la prévision des états de mer à la côte par un modèle haute résolution.

WW3 prend en compte certains effets littoraux (déferlement bathymétrique, réflexion,...) sur les vagues. La possibilité de ce modèle d'utiliser des grilles non-structurées est un atout important pour disposer de résultats finement résolus au niveau des côtes, autour de 200 m, tout en gardant une résolution raisonnable au large, 10 km. La haute résolution en eau peu profonde permet de représenter de façon réaliste l'effet du trait de côte et de la bathymétrie.

L'objet du rapport est de présenter le modèle WW3 et les configurations utilisées dans l'étude sur la zone de Dunkerque.

1 - présentation du modèle WW3

WAVEWATCH III est un modèle de 3^e génération développé par la NOAA/NCEP (Tolman, 1997) en se basant sur les acquis du modèle WAM (Komen et al. ,1994). Il est utilisé par plusieurs services opérationnels de surveillance des états de mer (NOAA, Météoffice,...). MFWAM utilise le code de calcul WAM, proche de celui de WW3. La configuration actuelle de MFWAM est l'aboutissement de différents travaux, notamment de Ardhuin et al. (2010) et du projet européen MyWave (2014).

La version mise en place est la version 4.18.

1.3 - les modèles numériques de vagues

Un modèle de vagues de 3^e génération, comme MFWAM ou WW3, décrit la génération et la propagation des états de mer en résolvant l'équation de conservation de l'énergie.

L'action N est définie par la densité d'énergie par pulsation relative, évoluant dans l'espace, le temps et l'espace des directions et fréquences. De façon schématique, cette équation a la forme suivante :

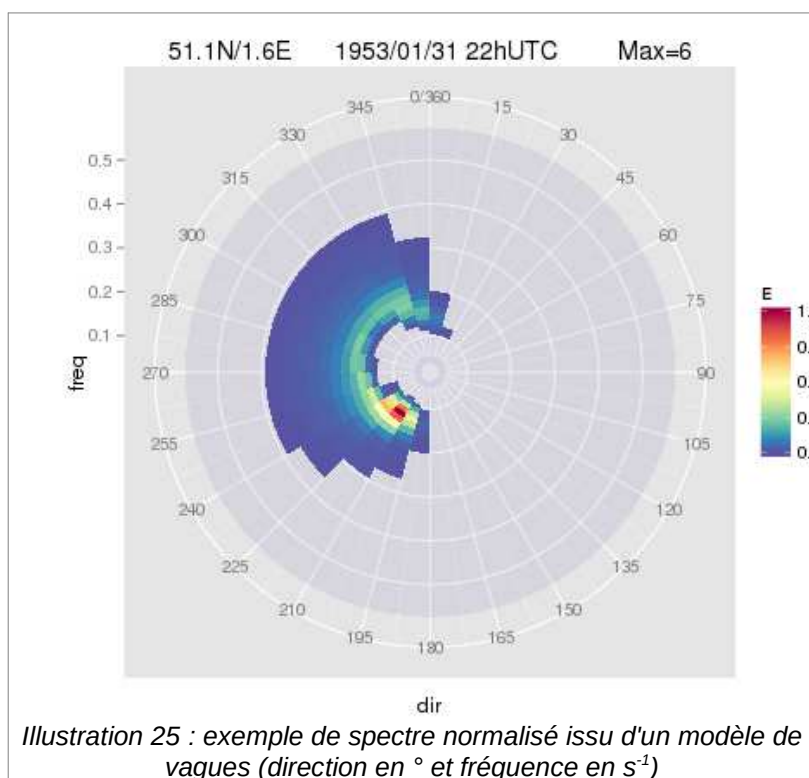
$$\begin{array}{l} \text{Evolution de N dans} \\ \text{l'espace} \\ \text{le temps} \\ \text{les directions} \\ \text{les fréquences} \end{array} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bf} + S_{db} + S_{ref}$$

où les termes sources S sont :

- S_{in} est la croissance due à l'action du vent, prenant ici la forme développée par Janssen (1991)
- S_{nl} représente les interactions non linéaires vague-vague, avec l'approximation « Discrete Interaction Approximation » (Komen et al, 1984)
- S_{ds} représente la dissipation par moutonnement, issue des travaux de Ardhuin et al. (2010). Cette paramétrisation est basée sur un mécanisme de seuil sur la saturation du spectre de vagues
- S_{bf} représente la dissipation par friction sur le fond
- S_{db} représente le déferlement bathymétrique
- S_{ref} représente la réflexion des vagues.

Ces six termes sources sont présents dans la configuration WW3 utilisée à Météo-France. Les paramétrisations d'action du vent, d'interactions non linéaires et de dissipation par moutonnement sont identiques entre MFWAM et WW3 à Météo-France.

La variable d'état dans un modèle de vagues est l'énergie discrétisée en direction et fréquence sur chaque point de maille. Le graphique ci-dessous représente un exemple de spectre, c'est-à-dire une répartition de l'énergie dans l'espace des fréquences et directions, pour un point donné à une date donnée.



Les paramètres disponibles en sortie des modèles de vagues sont des paramètres moyens calculés à partir du spectre, comme la hauteur significative, la direction moyenne ou la période moyenne.

1.2 - paramètres de sortie

Les paramètres de sortie des modèles de vagues sont des intégrations du spectre sur les directions et fréquences sur tout ou partie du spectre.

On distingue en effet différents états de mer dans un spectre de vagues :

- la **mer totale**, soit l'intégralité du spectre ;
- la **mer du vent**, c'est-à-dire la partie du spectre poussée par le vent de surface. Elle est extraite du spectre à partir de la direction et de la force du vent.
- la **houle** totale, partie du spectre indépendante du vent. Elle peut être divisée en sous-ensembles :
 - » houle primaire, train de vagues (défini par une direction et une fréquence restreinte) de la houle la plus énergétique ;
 - » houle secondaire, train de vagues de la houle la plus énergétique après la houle primaire.

Les paramètres standards sont définis ci-après.

Hauteur significative (m)

$$H_s = 4 \sqrt{\int F(f, \theta) df d\theta}$$

Période moyenne (s)

$$T_m = \frac{\int \frac{1}{f} \cdot F(f, \theta) df d\theta}{\int F(f, \theta) df d\theta}$$

Direction moyenne (°)

$$Dir_m = \text{atan}\left(\frac{\int \sin(\theta) \cdot F(f, \theta) df d\theta}{\int \cos(\theta) \cdot F(f, \theta) df d\theta}\right)$$

où F représente le spectre d'énergie, f la fréquence et θ la direction d'où viennent les vagues.

Pour chaque paramètre, l'intégration sur la fréquence et la direction est calculée sur la partie du spectre voulue (mer totale, mer du vent, houle primaire,...).

1.3 - particularités de WW3

WW3 a la faculté d'utiliser des grilles structurées, curvilignes ou bien déstructurées. Ce dernier type de grille a été préféré à Météo-France afin de disposer de sorties haute résolution, à 200 m à la côte, avec une résolution variable qui se relâche vers le large. Les contraintes de rapidité de l'opérationnel sont ainsi respectées. Des effets de bord potentiels dus à l'imbrication de plusieurs modèles sont évités. De plus, le maillage triangulaire permet de mieux représenter la complexité de la ligne de côte, notamment les digues, barres, îles et ports.

La version du modèle utilisée permet de bénéficier de paramétrisations récentes sur la réflexion des vagues à la côte (Ardhuin et Roland, 2012) et sur la réfraction due au courant ou à la bathymétrie (Ardhuin et al., 2012).

WW3 a la particularité de résoudre l'équation de conservation de la densité de l'action dans l'espace des directions et nombres d'onde, contrairement à MFWAM qui la résout dans l'espace des directions et fréquences.

2 - configuration utilisée à Météo-France

Les choix sur la paramétrisation physique dans WW3 sont donnés dans la partie 1.1. Tous les termes des processus en eau profonde sont identiques entre MFWAM et WW3. Ils ont notamment bénéficié d'ajustements fin 2014 sur le terme de dissipation à la suite de travaux dans le projet européen MyWave.

2.1 - maillage non structuré

Le maillage pour la Manche et l'Atlantique a été produit à partir de celui utilisé pour Previmer (Boudière et al, 2013). Celui pour la Méditerranée a été entièrement réalisé dans le cadre d'Homonym. Ils atteignent 200 à 400 m près des côtes et 10 km au large.

Dans le cadre de l'étude, seule la configuration Manche/Atlantique a été lancée.

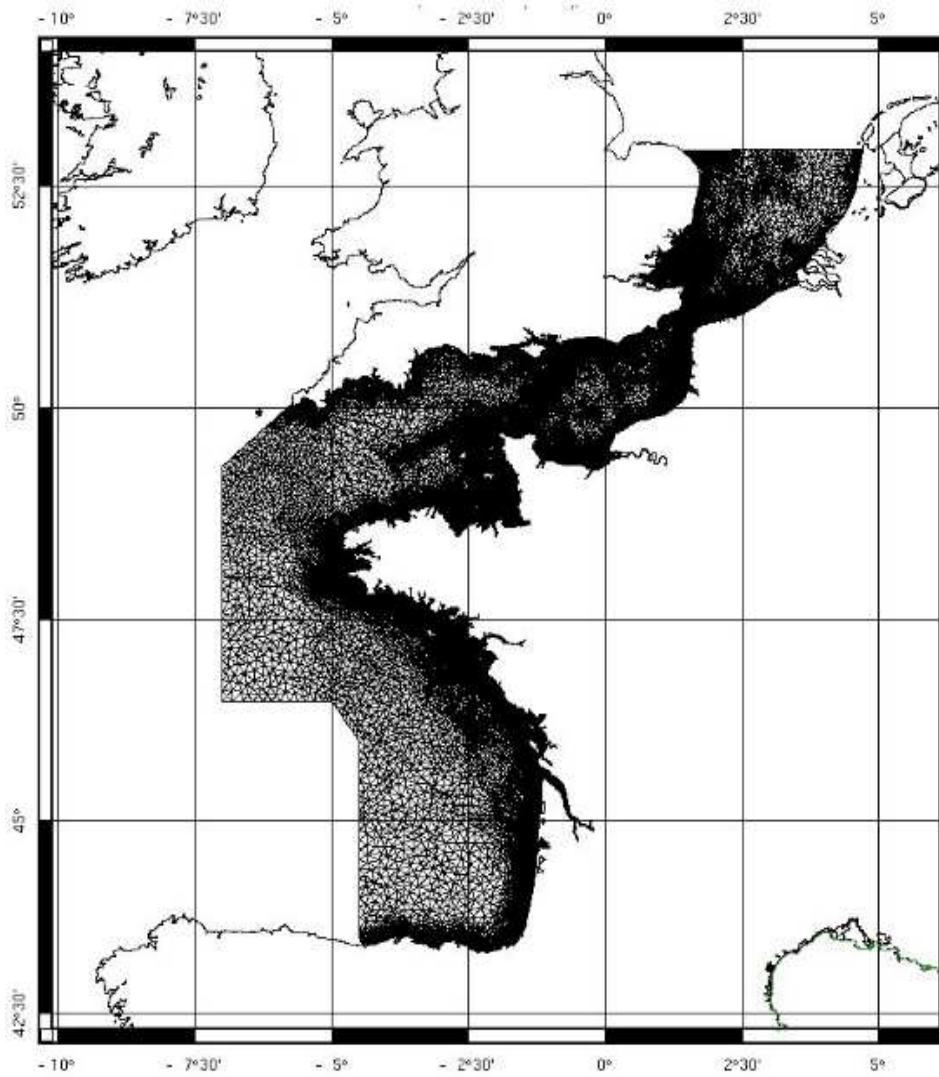
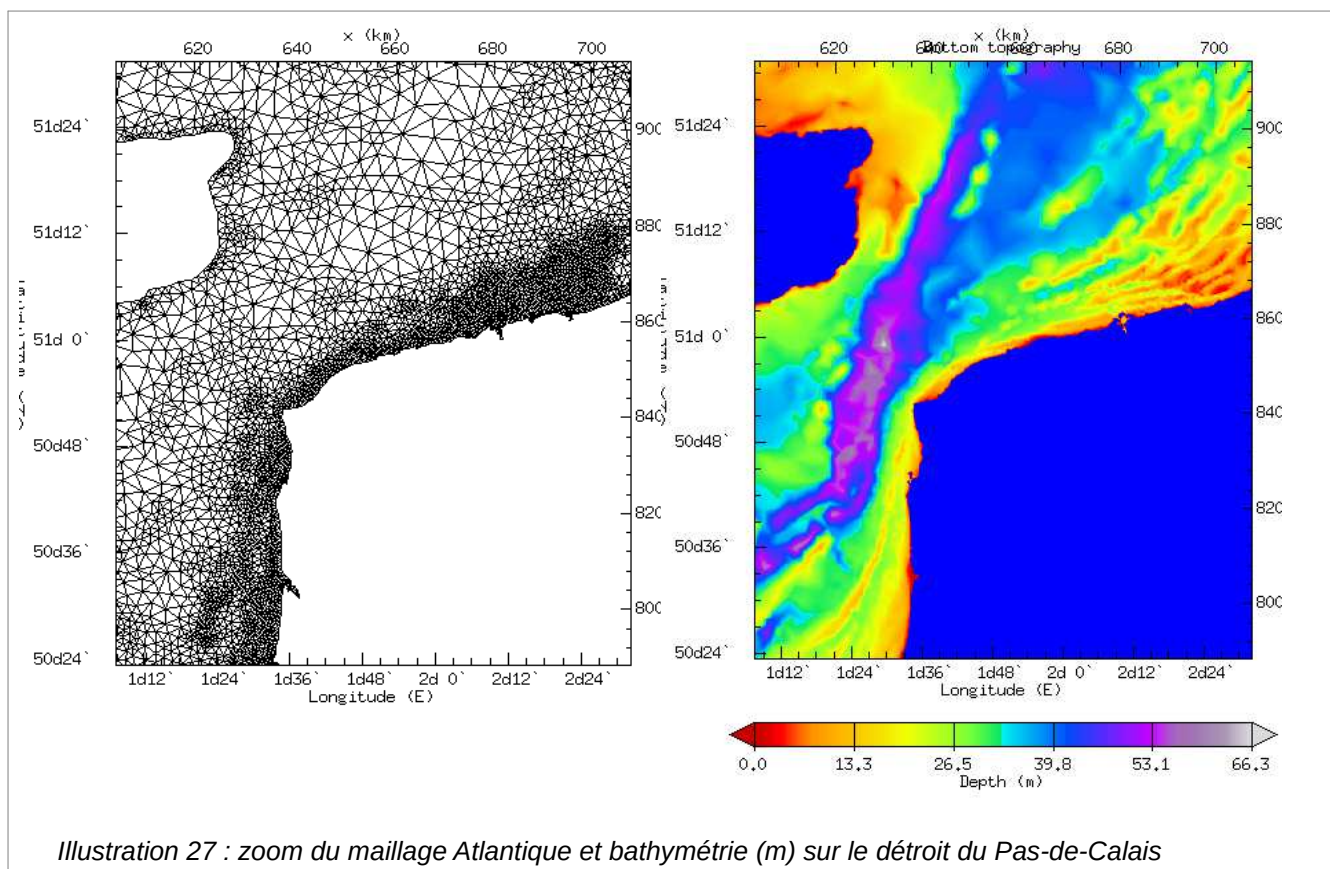


Illustration 26 : maillage de la configuration Manche/Atlantique

La résolution du maillage dépend de la bathymétrie. Celle utilisée a été produite par le SHOM en 2015, à résolution 100 m, dans le cadre du projet Homonim, en se basant sur les derniers relevés disponibles.



Le maillage resserré près du littoral français visible sur le zoom sur le détroit du Pas-de-Calais (figure 3) correspond à une résolution de 500 m environ, pour une bathymétrie de 25 m et moins. Les points les plus proches de la côte sont eux espacés de 200 à 300 m. On remarque des bancs de sable dans la bathymétrie au large de Dunkerque. Ils affleurent à moins de 10 m de la surface.

2.2 - forçages et conditions aux limites

Dans le cadre de la présente étude, les meilleurs forçages de vent disponibles ont été utilisés. Pour les événements concordant avec un épisode de grande marée, des forçages de courants de surface et de niveau d'eau issus du modèle de circulation barotrope Hycom¹ ont également été mis en entrée du modèle de vagues.

La zone d'étude est en effet soumise à des marnages importants, pouvant atteindre 5 mètres et plus lors de grandes marées, pour une profondeur totale relativement faible. Les courants de surface ont une influence moindre sur la zone, mais atteignent quand même 1 m/s et davantage sur certains épisodes, ce qui a une influence non négligeable sur les états de mer. Ces courants sont principalement pilotés par la marée, mais sont aussi influencés par l'afflux de vent de surface.

1 La version barotrope d'Hycom utilisée dans l'étude est développée par le SHOM

Le champ de vent est tri-horaire, tandis que les forçages Hycom sont introduits à une fréquence de 15 minutes, du fait notamment de la variabilité rapide de ces champs avec la marée.

Les conditions aux limites sont fournies par un modèle régional MFWAM à 0,1°, lui-même forcé à ses limites par un modèle MFWAM plus large à 0,5°. Le modèle régional MFWAM à 0,1° couvre l'Europe occidentale et est forcé par les mêmes vents que WW3. Le modèle initial à 0,5° est lui forcé par des vents moins résolus, mais disponibles sur une plus large zone, comprenant l'intégralité de l'océan Atlantique Nord.

Les modèles MFWAM utilisent la bathymétrie ETOPO2 de la NOAA (~3,3 km de résolution). Ils simulent les états de mer de façon analogue à WW3 (cf partie 1), sauf en eau peu profonde, où moins de processus sont décrits et de façon plus grossière, étant donné la résolution du modèle.

Les simulations dans les modèles MFWAM débutent dix jours avant la tempête, afin de disposer des états de mer les plus réalistes possibles pendant l'événement.

Le tableau ci-dessous résume les forçages utilisés.

Situations	Forçage vent utilisé pour WW3 et MFWAM 0,1°	Utilisation des forçages Hycom pour les courants et le niveau d'eau ?	Forçage vent pour MFWAM 0,5°
Jan/fév 1953	Rejeu INCREO à 0,1°	Oui	Réanalyse Era-Clim interpolée à 0,5°
Fév 1990	Rejeu INCREO à 0,1°	Oui	Réanalyse Era-Interim interpolée à 0,5°
Fév 1996	Rejeu Arpège à 0,1°	Oui	Réanalyse Era-Interim interpolée à 0,5°
Jan 2007	Modèle Arpège à 0,1°	Oui	Modèle Arpège à 0,5°
Déc 2011	Prévision d'ensemble Arpège à 0,25°	Non	Modèle Arpège à 0,5°

Tableau 12 : forçages utilisés

INCREO est un projet européen de réanalyse d'événements météo-océaniques réalisé en 2014

Era-Clim est un jeu de données de réanalyse atmosphérique produit par le CEPMMT et couvrant la période 1900-2010

Era-Interim est un jeu de données de réanalyse atmosphérique de 1979 à aujourd'hui produit par le CEPMMT

Bibliographie

Ardhuin F., E. Rogers, A. Babanin, J.-F. Filipot, R. Magne, A. Roland, A. Van Der Westhuysen, P. Queffelec, J.-M. Lefevre, L. Aouf, F. Collard (2010) Semi-empirical dissipation source functions for ocean waves : Part 1, definition, calibration and validation. *J. Phys. Oceanogr.*, 40, 9, 1917-1941.

Ardhuin, F., Roland, A., Dumas, F., Bennis, A. C., Sentchev, A., Forget, P., ... & Benoit, M. (2012). Numerical wave modeling in conditions with strong currents: Dissipation, refraction, and relative wind. *Journal of Physical Oceanography*, 42(12), 2101-2120.

Ardhuin, F., & Roland, A. (2012). Coastal wave reflection, directional spread, and seismoacoustic noise sources. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C11).

Boudière, E., Maisondieu, C., Ardhuin, F., Accensi, M., Pineau-Guillou, L., & Lepasqueur, J. (2013). A suitable metocean hindcast database for the design of Marine energy converters. *International Journal of Marine Energy*, 3.

Janssen, P. A. (1991). Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *Journal of Physical Oceanography*, 21(11), 1631-1642.

Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., & Janssen, P. A. E. M. (1996). *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge university press.

Tolman, H. L. (1997). *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14*. Technical Note (US Department of Commerce, National Oceanographic and Atmospheric Administration, National Weather Service, National Centers for Environmental Predictions, 2009).

Annexe 4. Description des fichiers livrés

Les fichiers livrés sont regroupés dans le fichier **DGEC_Dunkerque_lot2.zip**.

Les 5 situations sont désignées par leur mois *AAAAMM* qui peut prendre les valeurs : 195301, 199002, 199602, 200701 et 201112.

Pour chaque situation sont fournis 3 types de fichiers :

- ✓ un fichier GRIB nommé *wind_AAAAMM.grb* qui contient les champs de vent (composantes U et V) utilisés pour le forçage du modèle WW3.

- ✓ un fichier *ww3_AAAAMM.zip* regroupant 13 fichiers GRIB issus du rejeu de la situation par WW3.

Ces fichiers sont nommés *ww3.NORD_0.002_paramètre.grb*

où *paramètre* a la signification suivante :

- hs = Hauteur significative de la mer totale (m)
- t0m1 = Direction moyenne de la mer totale (°)
- dir = Période moyenne de la mer totale (s)
- ptp = Période pic de la mer totale (s)

- phs0 = Hauteur significative de la mer du vent (m)
- pdir0 = Direction moyenne de la mer du vent (°)
- ptp0 = Période pic de la mer du vent (s)

- phs1 = Hauteur significative de la houle primaire (m)
- pdir1 = Direction moyenne de la houle primaire (°)
- ptp1 = Période pic de la houle primaire (s)

- phs2 = Hauteur significative de la houle secondaire (m)
- pdir2 = Direction moyenne de la houle secondaire (°)
- ptp2 = Période pic de la houle secondaire (s)

- ✓ un fichier *stats_AAAAMM.csv* comportant des statistiques horaires établies sur les points de grille du périmètre d'étude, dont les colonnes sont :
 - paramètre (mer totale, mer du vent, houle primaire, houle secondaire)
 - date (format AAAAMMJJHH)
 - 80^e centile
 - 90^e centile
 - 95^e centile
 - 99^e centile
 - maximum

Concernant les forçages de vents : tous les champs de vent modèle sont à 10 m et tri-horaires.

Situations	Forçage vent utilisé pour WW3 et MFWAM 0,1°	Domaine	Dates
Jan/fev 1953	Rejeu INCREO à 0,1°	72N à 20N 32W à 42E	29/01/1953 00h à 03/02/1953 12h
Fév 1990	Rejeu INCREO à 0,1°	72N à 20N 32W à 42E	24/02/1990 06h à 27/02/1990 15h
Fév 1996	Rejeu Arpège à 0,1°	63,5N à 31,5N 14,5W à 14,5E	05/02/1996 00h à 20/02/1996 21h
Jan 2007	Modèle Arpège à 0,1°	57N à 35N 11W à 17E	05/01/2007 00h à 20/01/2007 à 21h
Déc 2011	Prévision d'ensemble Arpège à 0,25°	61N à 35N 15W à 17E	05/12/2011 00h à 18/12/2011 06h