

# Projet de parc éolien off-shore

*Analyse de tempêtes et vagues extrêmes*

*Lot 2 – AO5 Bretagne Sud*



Version 1.0 du 18/03/2021

|   |  |   |
|---|--|---|
| <b>Client</b><br>Direction Générale de l'Énergie et<br>du Climat<br>du Ministère de la Transition<br>Écologique | @ [REDACTED]<br>① [REDACTED]   | <br>MINISTÈRE<br>DE LA TRANSITION<br>ÉCOLOGIQUE<br><i>Liberté<br/>Égalité<br/>Fraternité</i> |
| <b>Chargé d'affaire :</b><br>Météo-France D2C Toulouse  | @ <a href="mailto:christophe.jacolin@meteo.fr">christophe.jacolin@meteo.fr</a><br>① [REDACTED] |    |
| <b>Chef de projet :</b><br>Météo France DSM/CS/DC   | @ <a href="mailto:raphael.legrand@meteo.fr">raphael.legrand@meteo.fr</a><br>① [REDACTED]       |   |

- page laissée intentionnellement vide -

## Documents de référence antérieurs

|     | Intitulé   | Référence   | Date       | Version |
|-----|--|---|------------|---------|
| DR1 | Climatologie de visibilité de parcs éoliens fictifs en mer | livraison_DGEC_LotPréliminaire_Analyse_Visibilité_BretagneSud | 08/04/2020 | 2.3     |
| DR2 | Analyse du vent dans la macro-zone de Bretagne Sud         | livraison_DGEC_LotPréliminaire_Analyse_Vent_BretagneSud       | 05/03/2020 | 2.0     |

## Évolutions successives

| Référence                                | Date       | Version | Évolution |
|--|------------|---------|-----------|
| AO5_BretagneSud_Lot2_Rapport_V1_20210331 | 03:03:2021 | V1      | Création  |

## Signatures

|                | Nom        | Service     | Signature  |
|----------------|------------|-------------|------------|
| Rédacteur(s)   | [Redacted] | DIRO/PREVI  | [Redacted] |
|                | [Redacted] | DIRCE/PREVI | [Redacted] |
|                | [Redacted] | DIROP/MAR   | [Redacted] |
| Relecteur(s)   | [Redacted] | DSM/CS/DC   | [Redacted] |
| Approbateur(s) | [Redacted] | D2C/DV/PRO  | [Redacted] |



## Table des matières

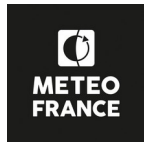
|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Objet de l'étude et méthode                             | 1  |
| 1.1   | Objet de l'étude  | 1  |
| 1.2   | Méthode   | 1  |
| 1.3   | Tableau des tempêtes analysées                          | 2  |
| 1.4   | Liste des 5 tempêtes retenues pour les rejeux de vagues | 5  |
| 2     | Rejeux de situations                                    | 6  |
| 2.1   | Situation 1 : 23 et 24 décembre 2013                    | 6  |
| 2.1.1 | Rappel conditions météorologiques                       | 6  |
| 2.1.2 | Analyse des résultats                                   | 6  |
| 2.2   | Situation 2 : 15 et 16 décembre 2011                    | 9  |
| 2.2.1 | Rappel conditions météorologiques                       | 9  |
| 2.2.2 | Analyse des résultats                                   | 9  |
| 2.3   | Situation 3 : 7 et 8 février 1996                       | 12 |
| 2.3.1 | Rappel conditions météorologiques                       | 12 |
| 2.3.2 | Analyse des résultats                                   | 12 |
| 2.4   | Situation 4 : 3 février 1990                            | 15 |
| 2.4.1 | Rappel conditions météorologiques                       | 15 |
| 2.4.2 | Analyse des résultats                                   | 15 |
| 2.5   | Situation 5 : 14 et 15 décembre 1979                    | 18 |
| 2.5.1 | Rappel conditions météorologiques                       | 18 |
| 2.5.2 | Analyse des résultats                                   | 18 |
| 2.6   | Conclusions   | 21 |
|       | Annexes   | 22 |

## Liste des illustrations

|  |    |
|--|----|
| Illustration 1: hauteur significative de la mer totale (mètres) lors de la tempête des 23-24 déc. 2013   | 7  |
| Illustration 2: évolution temporelle de la hauteur des vagues au point de grille 47,15° N et 3,60° W   | 8  |
| Illustration 3: hauteur significative de la mer totale (mètres) lors de la tempête des 15-16 déc. 2011   | 10 |
| Illustration 4: évolution temporelle de la hauteur des vagues au point de grille 47,15° N et 3,60° W   | 11 |
| Illustration 5: hauteur significative de la mer totale (mètres) lors de la tempête des 6-7 fév. 1996   | 13 |
| Illustration 6: évolution temporelle de la hauteur des vagues au point de grille 47,15° N et 3,60° W   | 14 |
| Illustration 7: hauteur significative de la mer totale (mètres) lors de la tempête du 3 février 1990   | 16 |
| Illustration 8: évolution temporelle de la hauteur des vagues au point de grille 47,15° N et 3,60° W   | 17 |
| Illustration 9: hauteur significative de la mer totale (mètres) lors de la tempête des 14-15 décembre 1979   | 19 |
| Illustration 10: évolution temporelle de la hauteur des vagues au point de grille 47,15° N et 3,60° W  | 20 |
| Illustration 11: Exemple de spectre normalisé issu d'un modèle de vagues (direction en ° et fréquence en s-1)  | 24 |
| Illustration 12: Maillage de la configuration Manche/Atlantique  | 26 |
| Illustration 13: zoom du maillage Atlantique et bathymétrie (m) sur le Morbihan.   | 27 |
| Illustration 14: Ecart quadratique moyen relatif (%) de la hauteur significative de WW3 par rapport aux bouées pour la période mai 2015 à août 2016, pour des observations supérieures à 1 m | 29 |

## Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| Tableau 1: critères employés pour caractériser la sévérité des tempêtes sélectionnées   | 2  |
| Tableau 2: Liste des tempêtes analysées   | 5  |
| Tableau 3: Liste des tempêtes retenues pour le rejeu de vagues  | 5  |
| Tableau 4: caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation Arpège sur la période comprise entre le 23 déc. à 00 UTC et le 25 déc. à 00 UTC   | 8  |
| Tableau 5: caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation Arpège sur la période comprise entre le 15 déc. à 12 UTC et le 17 déc. à 00 UTC   | 11 |
| Tableau 6: caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation Era5 sur la période comprise entre le 6 fév. à 00UTC et le 8 fév. à 00 UTC        | 14 |
| Tableau 7: caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation Era5 sur la période comprise entre le 3 fév. à 00 UTC et le 4 fév. à 00 UTC       | 17 |
| Tableau 8: caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation Era5 sur la période comprise entre le 14 déc. à 12 H UTC et le 16 déc. à 00 H UTC | 20 |



---

|   |    |
|---|----|
| Tableau 9: Échelle Beaufort – correspondances entre l'échelle Beaufort, la vitesse du vent (code OMM 1100), et l'état de la mer | 32 |
| Tableau 10: échelle d'état de la mer (code S) et hauteurs significatives des vagues   | 33 |

# 1 Objet de l'étude et méthode

L'objectif de cette étude est de sélectionner un échantillon d'épisodes de vents forts susceptibles de générer de très fortes vagues sur la zone située à l'ouest de Belle-Île. Pour cela, nous avons recensé une vingtaine de tempêtes marquantes sur la période des 100 dernières années. Le choix final des événements retenus est destiné à fournir des jeux de données de vagues simulées afin de couvrir à peu près tous les possibles sur la zone considérée.

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

- 1- La force des vents observés à Belle-Île-le Talut ainsi qu'à l'île de Groix et dans sa région (Lorient, Saint-Nazaire, Quimper 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). Pour les observations des états de mers, nous avons regardé les données produites par les sémaphores de Belle-Île-le Talut mais aussi celui de l'île de Groix, disponibles depuis janvier 1949. La caractérisation de l'état de la mer est visuelle et se base sur l'échelle de Douglas.
- 2- Indépendamment de la force du vent, nous avons retenu les événements qui ont eu un impact significatif, en mer ou à la côte. Les vagues sont mesurées par des houlographes pour la période la plus récente. Elles sont évaluées visuellement par les sémaphoristes, ou supposés tels, pour les tempêtes plus anciennes (en excluant toutefois les cas de submersions marines résultant principalement de la conjonction d'une surcote et d'une marée de vives-eaux).
- 3- Pour la mesure des hauteurs de vagues ainsi que leur période, nous sommes appuyés sur les données de différentes bouées. La bouée de Belle-Île (données disponibles du 18/10/2010 au 30/09/2019), la bouée du Plateau du Four (données disponibles du 01/04/2008 au 30/09/2019) et les bouées Brittany et Gascogne (données disponibles de 1998 à 2020). Ces deux dernières ont fourni quelques données aberrantes, que nous avons exclu de notre analyse.
- 4- Nous avons 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 au profit d'autres, possiblement moins venteux,



mais qui illustraient mieux la typologie des tempêtes pouvant se produire sur la zone d'étude.

- 5- Enfin, nous avons privilégié les tempêtes les plus récentes (typiquement celles survenues au cours de ces dernières 20 années) pour lesquelles l'information disponible en termes de mesures de vent et de vagues était plus riche. Nous n'avons toutefois pas négligé quelques tempêtes plus anciennes dans la mesure où elles permettent d'ajouter des événements atypiques à notre liste. Parmi celles-ci, les observations de sémaphores disponibles toutes les 3 heures ont permis de caractériser certaines tempêtes survenues entre 1949 et 1980. Quelques cas antérieurs à 1949 ont été sélectionnés à partir des tempêtes précédemment analysées par le projet Vimers.

## 1.1 Tableau des tempêtes analysées

Une fiche descriptive est disponible pour chacune des tempêtes figurant dans le tableau des tempêtes sélectionnées. Elles sont fournies en complément de ce rapport.

La sévérité des tempêtes recensées 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 variable de la vitesse du vent (Cs).

| Paramètre / indices   | 0                                     | +                      | +++                                    |
|---|---------------------------------------|------------------------|--|
| <i>FF (Force) : force maximale du vent sur la zone du projet</i>  | <i>Inférieur ou égal à 9 Beaufort</i> | <i>9 à 10 Beaufort</i> | <i>Supérieur ou égal à 10 Beaufort</i> |
| <i>Du (Durée) : durée pendant laquelle la force du vent a dépassé 18 m/s à Groix ou Belle-Île (évaluation parfois subjective en cas de données modérément fiables ou incomplètes)</i> | <i>6 heures et moins</i>              | <i>6 à 18 heures</i>   | <i>Plus de 18 heures</i>               |
| <i>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</i>                         | <i>Faible</i>                         | <i>Modéré</i>          | <i>Fort</i>                            |

Tableau 1: critères employés pour caractériser la sévérité des tempêtes sélectionnées

La force du vent est exprimée en Beaufort (échelle détaillée en annexe) et l'état de mer est décrit par les sémaphoristes à l'aide de l'échelle de Douglas (également détaillée en annexe.)

La sélection des tempêtes historiques figure dans le tableau ci-après.

## 1 Objet de l'étude et méthode



| Événements | Vent max. Zone |            | Rejeu Vent   | Commentaire   |
|------------|----------------|------------|--------------|---|
|            | Dir.           | Force (Bf) |              |   |
| 2020-10-01 | WSW            | 11         | ARP/CEP/ARO- | Tempête « Alex » associée à une petite dépression circulant rapidement. Belle-Île enregistre un record de vent à 186 km/h. Le coup de vent a été relativement bref et a généré une mer croisée 5/6.   |
| 2017-03-06 | W puis NW      | 11         | ARP/CEP/ARO  | Tempête « Zeus ». État de mer 5/6 avec une houle venant du nord-ouest.  |
| 2014-02-05 | S puis SW      | 8          | ARP/CEP/ARO  | Tempête de moyenne intensité, provoquant cependant de très grosses vagues : état de mer 7 à Lorient, Hmax de 15 à 18 mètres avec des périodes de 18 secondes relevées à la bouée de Belle-Île.  |
| 2013-12-23 | SW             | 10         | ARP/CEP/ARO  | Tempête « Dirk ». État de mer 6/7 sur l'île de Groix. Hmax atteignant les 17/18 mètres à la bouée de Belle-Île.   |
| 2012-04-25 | S puis SW      | 9          | ARP/CEP      | Tempête de moyenne intensité, provoquant cependant de grosses vagues : état de mer 6/7. Hauteur de vagues max observé de 12 mètres à la bouée de Belle-Île avec un H1/3 de 7 mètres et une période de 10 à 12 secondes. Vagues venant du sud-ouest.   |
| 2011-12-16 | W à NW         | 9          | ARP/CEP      | Tempête « Joachim », état de mer de 6/7. Hauteur de vagues max observé de 17 à 19 mètres à la bouée de Belle-Île avec un pic de H1/3 de 10 mètres en milieu de nuit. Houle très énergétique (12/14 secondes de période) venant de l'ouest-sud-ouest (autour du 250° puis s'orientant au 280° en cours d'après midi). Un cargo s'est échoué sur la plage de Kerminihy à Erdeven. |
| 2008-03-10 | SSW puis W     | 10         | ARP/CEP      | Tempête « Johanna », ayant provoqué de fortes submersions, notamment sur la presqu'île de Gâvres. Hauteur de vague de 13 mètres très énergétique (12/13 secondes de période). État de mer 6/7 avec une houle venant d'ouest.  |
| 1999-12-28 | NW             | 10         | ERA5         | Tempête marquante « Martin », se déplaçant très rapidement. État de mer 5 avec une houle venant d'ouest.  |
| 1999-12-26 | SW puis W      | 10         | ERA5         | Tempête marquante « Lothar ». État de mer 6 avec une houle venant d'ouest.  |
| 1996-02-07 | W puis NNW     | 11         | ERA5         | État de mer 5-6 puis 7 au plus fort de la tempête, avec une houle venant de l'ouest.  |

|                   |                   |    |      |  |
|-------------------|-------------------|----|------|--|
| 1991-11-20        | NNE               | 8  | ERA5 | Coup de vent de nord-est, affectant essentiellement le littoral. État de mer 5.  |
| 1990-02-03        | SSW puis NW       | 11 | ERA5 | Tempête majeure « Herta », à l'origine de nombreuses victimes causées par la force du vent. État de mer 6-7 avec une houle venant du sud-ouest.  |
| 1987-10-15/16     | SW                | 11 | ERA5 | Tempête inscrite dans les mémoires comme « l'Ouragan de 1987 ». Le plus fort de la tempête touche surtout le Finistère. État de mer 5-6 avec une houle venant d'ouest à Groix et Belle-Île.  |
| 1982-12-9 et 10   | W puis NW         | 10 | ERA5 | Dépression 970 hPa circulant du cap Finistère à l'Angleterre et présentant des similitudes avec celle du 15/10/1987. État de mer 6 à Groix et Belle-Île.   |
| 1980-10-11        | NW à N            | 9  | ERA5 | Dépression 980 hPa circulant de l'Irlande vers le nord-est de la France. État de mer 5 à 6 à Groix et Belle-Île.   |
| 1979-12-14 et 15  | SW puis W/NW      | 10 | ERA5 | Dépression 960 hPa circulant de l'Irlande au Danemark. État de mer 6 à 7 à Groix et Belle-Île.   |
| 1978-01-27 au 29  | SW puis W puis NW | 9  | ERA5 | Dépression 970 hPa circulant de l'Irlande vers le Benelux. État de mer 5 à 6 à Groix et Belle-Île.   |
| 1972-02-13        | SW puis W/NW      | 10 | Non  | Dépression 970 hPa venant de l'ouest et rentrant sur terre au niveau du Golfe du Morbihan. État de mer 5 à 6 à Groix et Belle-Île.   |
| 1963-01-17 et 18. | NE                | 10 | Non  | Puissant anticyclone calé sur le nord de l'Europe et dirigeant un air glacial sur le pays tandis que des dépressions se succèdent à la latitude de l'Espagne. Rapide courant de nord-est persistant plusieurs jours. État de mer 4, avec des vagues venant d'est-nord-est (entre 50 et 70°). |
| 1935-02-22 et 23  | SW puis W         | 10 | Non  | Passage de deux dépressions musclées sur le nord de la France, dans un flux d'ouest. Situation présentant des similitudes avec celle des 26 et 28 décembre 1999. Peu d'informations exploitables issues des observations des sémaphores.   |
| 1928-11-15 au 17  | SW à W            | 10 | Non  | Plusieurs dépressions musclées circulent d'ouest en est ; des Îles Britanniques au Danemark. Peu d'informations exploitables issues des observations des sémaphores.   |
| 1924-10-8         | O puis NW         | 10 | Non  | Dépression 990 hPa circulant en Manche. Peu d'informations exploitables issues des observations des sémaphores.  |

|                |              |   |     |  |
|----------------|--------------|---|-----|--|
| 1924-01-8 et 9 | SW puis W/NW | 9 | Non | Dépression 965 hPa circulant du sud de l'Irlande vers la région parisienne et traversant la Bretagne sur terre près de la côte sud. Trajectoire de la dépression présentant des similitudes avec celle du 28/12/1999 mais avec des vents a priori moins forts. Peu d'informations exploitables issues des observations des sémaphores. |
|----------------|--------------|---|-----|--|

Tableau 2: Liste des tempêtes analysées

## 1.2 Liste des 5 tempêtes retenues pour les rejeux de vagues

Les situations retenues et listées dans le tableau figurant au chapitre précédent constituent un échantillon représentatif de 20 tempêtes ayant touchées l'ouest de Belle-Île. Parmi cette liste, les experts de Météo France ont retenu 5 événements pour lesquels la formation des vagues sera modélisée à l'aide d'une simulation numérique à mailles fines. Ces 5 événements ont été retenus pour la capacité à générer de fortes vagues ou des vagues de caractéristiques particulières sur la zone d'étude. Nous avons volontairement privilégié les dates récentes (moins de 20 ans) pour lesquelles des mesures de vagues existent à proximité de la zone d'étude et pour lesquelles des simulations météorologiques à mailles fines sont envisageables (modèles Arpège, voire Arome pour les 10 dernières années). Les dates retenues figurent dans le tableau suivant par ordre chronologique décroissant. Les vents maxims indiqués sont des vents moyens établis, au cours de plusieurs heures, et exprimés en force Beaufort. Les rafales sont données à titre indicatif. La hauteur de référence pour les mesures de vent est de 10 mètres au dessus du sol (rappelons qu'aucune mesure de rafale n'est disponible sur la zone d'étude et que les valeurs des rafales maximales enregistrées par les sémaphores peuvent être influencées par un environnement de mesure divergeant de la norme prescrite : l'anémomètre peut être placé à une hauteur inadéquate ou l'emplacement du sémaphore, parfois en bord de falaise, peut entraîner des turbulences parasitant la mesure du vent.)

| Date                   | Direction vents sur zone        | Force maximale vent sur zone   |
|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 23 et 24 décembre 2013 | sud-ouest                       | 10 Bf (rafales 150 km/h)       |
| 16 décembre 2011       | ouest à nord-ouest              | 9 Bf (rafales 130 km/h)        |
| 7 et 8 février 1996    | ouest puis nord/nord-ouest      | 11 Bf (rafales 180 km/h)       |
| 3 février 1990         | sud-sud-ouest puis nord-ouest   | 11 Bf (rafales 150 à 180 km/h) |
| 14 et 15 décembre 1979 | sud-ouest puis ouest/nord-ouest | 10 Bf (rafales 150 km/h)       |

Tableau 3: Liste des tempêtes retenues pour le rejeux de vagues

## 2 Rejeux de situations

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des simulations de vagues obtenues à l'aide de modèles à mailles fines pour 5 épisodes de vents forts sélectionnés sur la base des éléments décrits précédemment. Rappelons qu'un rejeu de situation est une simulation, la plus proche possible de la réalité, réalisée en forçant un modèle de vagues à partir de champs de vent réalistes, à fréquence horaire, et de maille horizontale la plus fine possible, mais dépendante des rejeux météorologiques disponibles. Cela doit permettre d'avoir des informations quantitatives sur les vagues probables au sein de la zone d'intérêt lors de ces événements historiques marquants.

Le modèle de vagues utilisé pour les rejeux est le modèle de très haute résolution WaveWatch III. Une présentation détaillée est fournie en annexe 1. C'est un modèle à maille irrégulière, adapté au profil parfois tourmenté du trait de côte, avec une résolution qui s'accroît pour atteindre parfois 200 m au plus près des côtes. 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 ont été sélectionnés par Météo France pour chaque situation parmi les modèles disponibles, après analyse de la validité de ceux-ci et en fonction de la meilleure résolution horizontale disponible.

### 2.1 Situation 1 : 23 et 24 décembre 2013

#### 2.1.1 Rappel conditions météorologiques

Une dépression à la fois étendue et profonde évolue très lentement au nord des Îles Britanniques. Elle génère des vents de sud-ouest puis ouest à la fois forts et durables (ces vents s'exercent pendant près de 36h sur le sud de la Bretagne.)

#### 2.1.2 Analyse des résultats

Pour cette tempête, la hauteur de mer totale croît régulièrement à partir de 08UTC le 23 décembre 2013, pour atteindre son ampleur maximale vers 03 h UTC le 24 décembre 2013 (la H 1/3 de la mer totale est un peu supérieure à 10 m sur la zone.)

En raison de vents durablement forts s'exerçant sur une vaste surface océanique, la tempête des 23-24 décembre 2013 est à l'origine d'une grande houle énergétique (la H 1/3 de la houle primaire atteint près de 7 m le 24 décembre vers 03 UTC et sa période avoisine 15 s). Cette houle contribue de manière prépondérante à la mer totale.

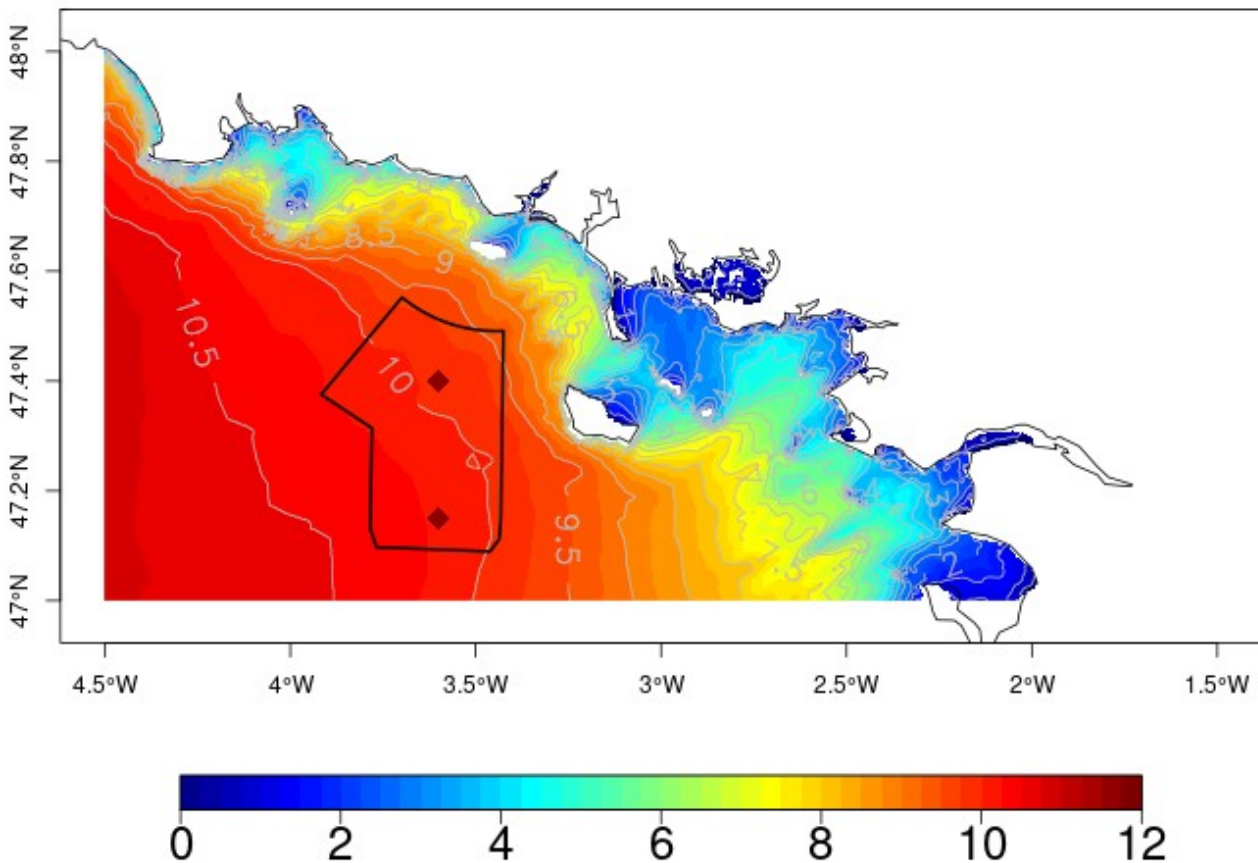


Illustration 1: hauteur significative de la mer totale (mètres) lors de la tempête des 23-24 déc. 2013  
(valeur maximale intégrée sur la période comprise entre le 23 déc. à 00UTC et le 25 déc. à 00 UTC)

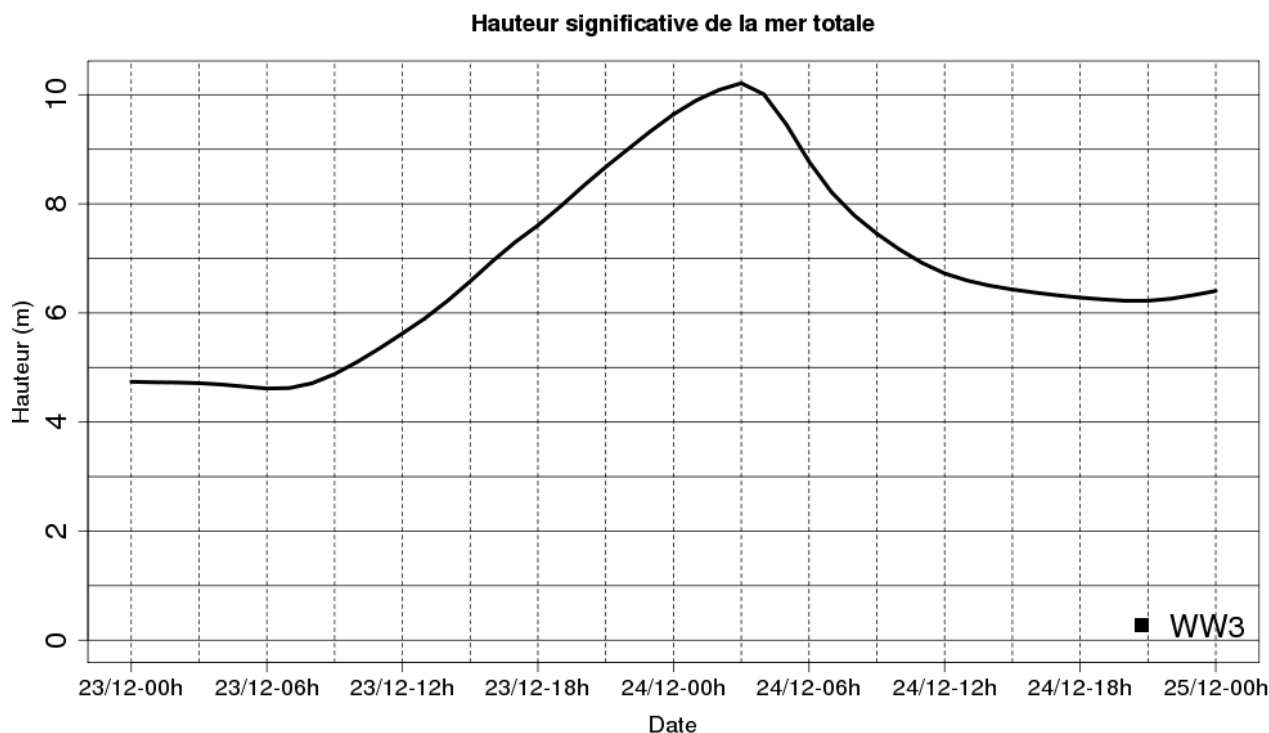


Illustration 2: évolution temporelle de la hauteur des vagues au point de grille 47,15° N et 3,60° W

**Caractéristiques principales :**

Phénomène durable avec houle majoritaire de grande période.

|   | <i>Point Nord</i>   | <i>Point sud</i>    |
|---|---|---------------------|
| <b>Hauteur maximale H1/3 mer totale</b> | 9,9 m   | 10,2 m              |
| <b>Date / Heure</b>                     | 24/12/2013 vers 03 H UTC  | 24/12/2013 03 H UTC |
| <b>Direction</b>                        | Ouest   |                     |
| <b>Contribution mer du vent/houle</b>   | Houle de 7 m, très énergétique, prédominante sur la mer du vent |                     |

Tableau 4: caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation Arpège sur la période comprise entre le 23 déc. à 00 UTC et le 25 déc. à 00 UTC

---

## 2.2 Situation 2 : 15 et 16 décembre 2011

### 2.2.1 Rappel conditions météorologiques

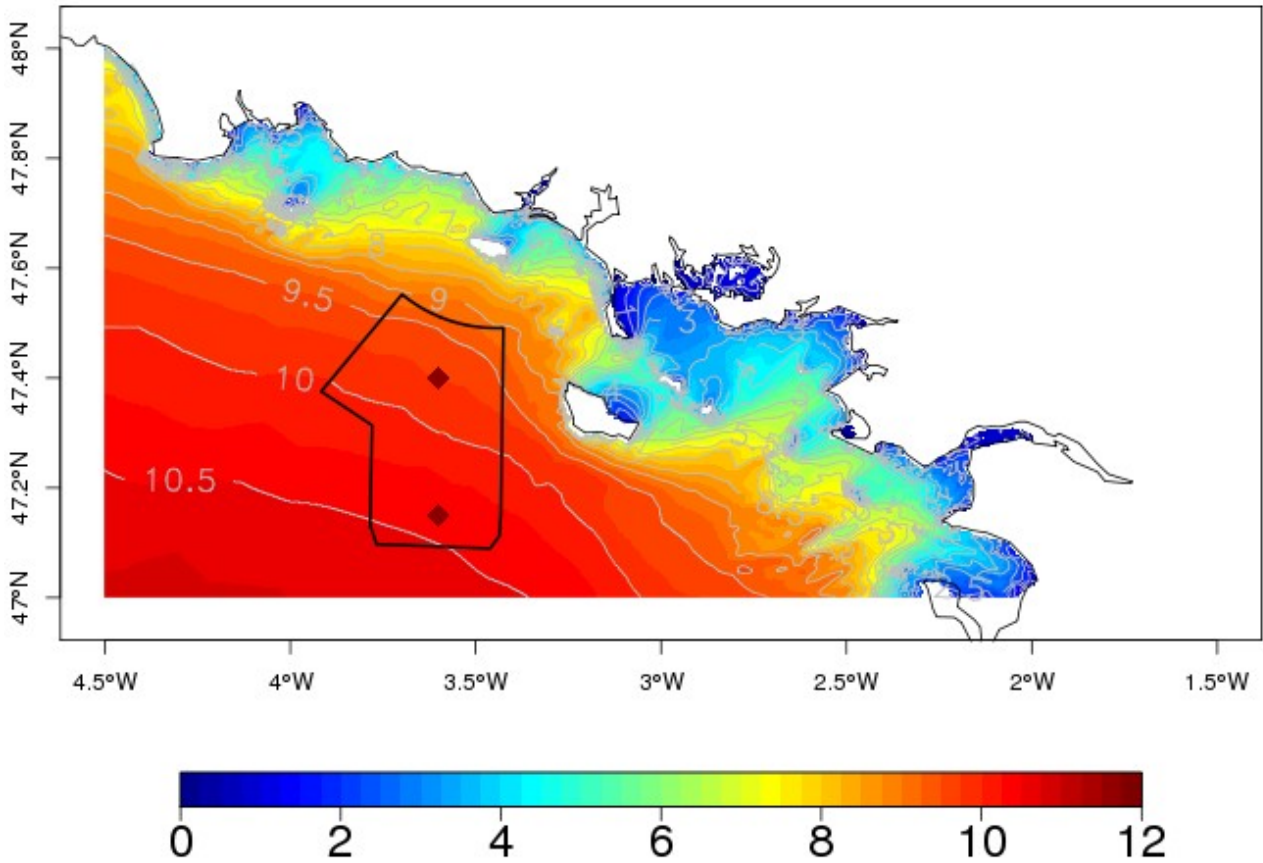
Au sein d'un courant perturbé d'ouest assez actif, une dépression très creuse 970 hPa s'isole au large de l'Irlande puis circule en Manche dans la nuit du 15 au 16 décembre 2011. Elle s'évacue ensuite vers le Danemark.

### 2.2.2 Analyse des résultats

Depuis plusieurs jours un fort courant d'ouest sévit sur l'Atlantique. La mer est formée quand a lieu la tempête « Joachim ». La mer totale croît passant de 7 à 10 m entre le 15 décembre à 12 UTC et le 16 décembre à 03 UTC.

Pour cette tempête, la mer du vent se superpose a une houle prédominante de près de 7m.





*Illustration 3: hauteur significative de la mer totale (mètres) lors de la tempête des 15-16 déc. 2011  
(valeur maximale intégrée sur la période comprise entre le 15 déc. à 12 UTC et le 17 déc. à 00 UTC)*

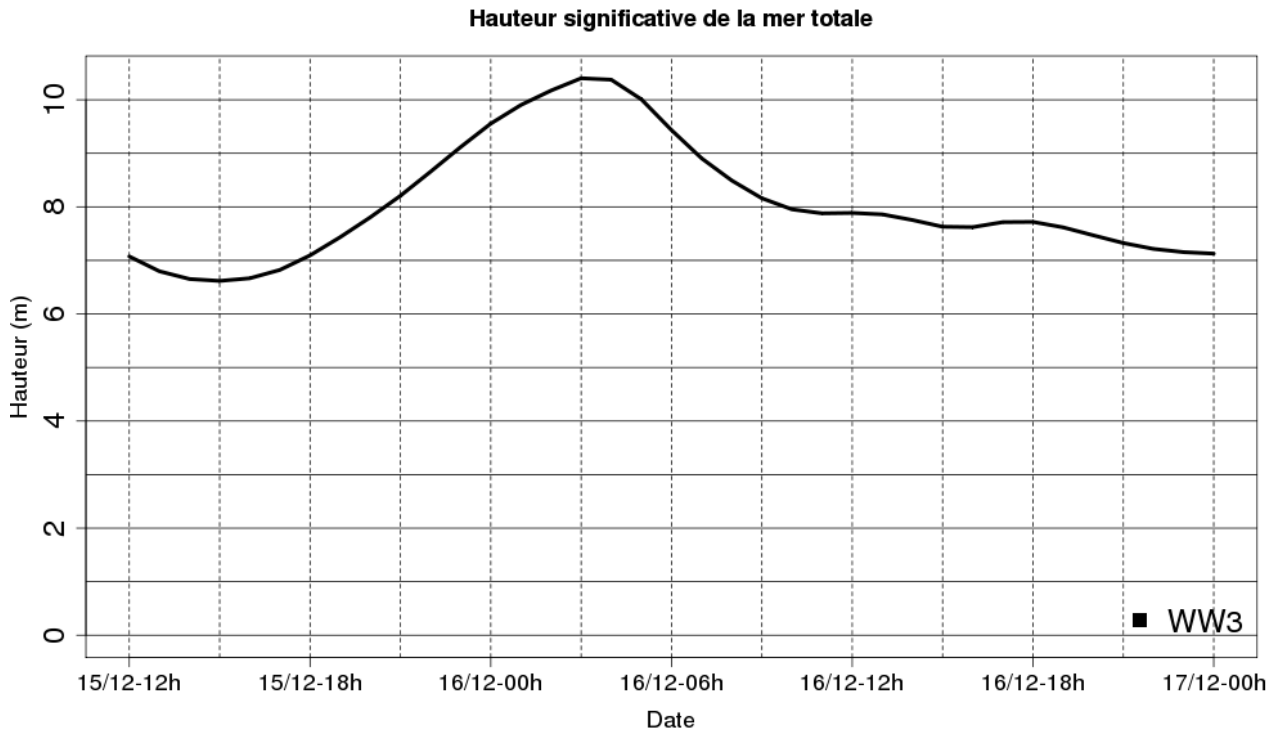


Illustration 4: évolution temporelle de la hauteur des vagues au point de grille 47,15° N et 3,60° W

### Caractéristiques principales :

Phénomène durable avec houle majoritaire. Le travail de sappe engendré par la houle a par endroits fortement modifié le faciès du littoral atlantique avec des reculs du trait de côte de 6 à 8 m. Avec un train de vagues orienté parallèlement aux isobathes, le relèvement du plancher océanique contribue à une sensible différence de hauteurs de mer totale entre les deux points de la zone d'étude.

La houle est prépondérante dans la formation de la mer totale.

|                                       | <i>Point Nord</i>                             | <i>Point sud</i>         |
|---------------------------------------|---|--------------------------|
| <b>Hauteur maximale H1/3</b>          | 9,8 m   | 10,4 m                   |
| <b>Heure</b>                          | 16/12/2011 vers 04 H UTC                      | 16/12/2011 vers 03 H UTC |
| <b>Direction</b>                      | Ouest à sud-ouest                             |                          |
| <b>Contribution mer du vent/houle</b> | Houle de 7 m, prédominante sur la mer du vent |                          |

Tableau 5: caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation Arpège sur la période comprise entre le 15 déc. à 12 UTC et le 17 déc. à 00 UTC

## 2.3 Situation 3 : 7 et 8 février 1996

### 2.3.1 Rappel conditions météorologiques

Au sein d'un courant perturbé actif, dépression 975 hPa en entrée de Manche le 7 février au matin se décalant rapidement vers les Alpes. Elle génère des vents d'Ouest puis Nord-Ouest puissants et durables.

### 2.3.2 Analyse des résultats

La tempête des 7-8 février a été précédée par un premier coup de vent lors de la journée du 6. En réaction à ce coup de vent, on observe une première élévation de la mer totale le 6 à la mi-journée. Le 7, le brutal renforcement du vent lié à la tempête proprement dite entraîne une vive réaction de l'état de la mer avec des hauteurs significatives des vagues de la mer totale qui passent de 4 à 9 m en l'espace d'une douzaine d'heures. Avec un train de vagues orienté parallèlement aux isobathes, le relèvement du plancher océanique contribue à une sensible différence de hauteurs de mer totale entre les deux points de la zone d'étude.

Pour cette tempête, la mer du vent joue un rôle significatif même si elle vient s'ajouter à une mer déjà agitée par une houle modérée de longue période.

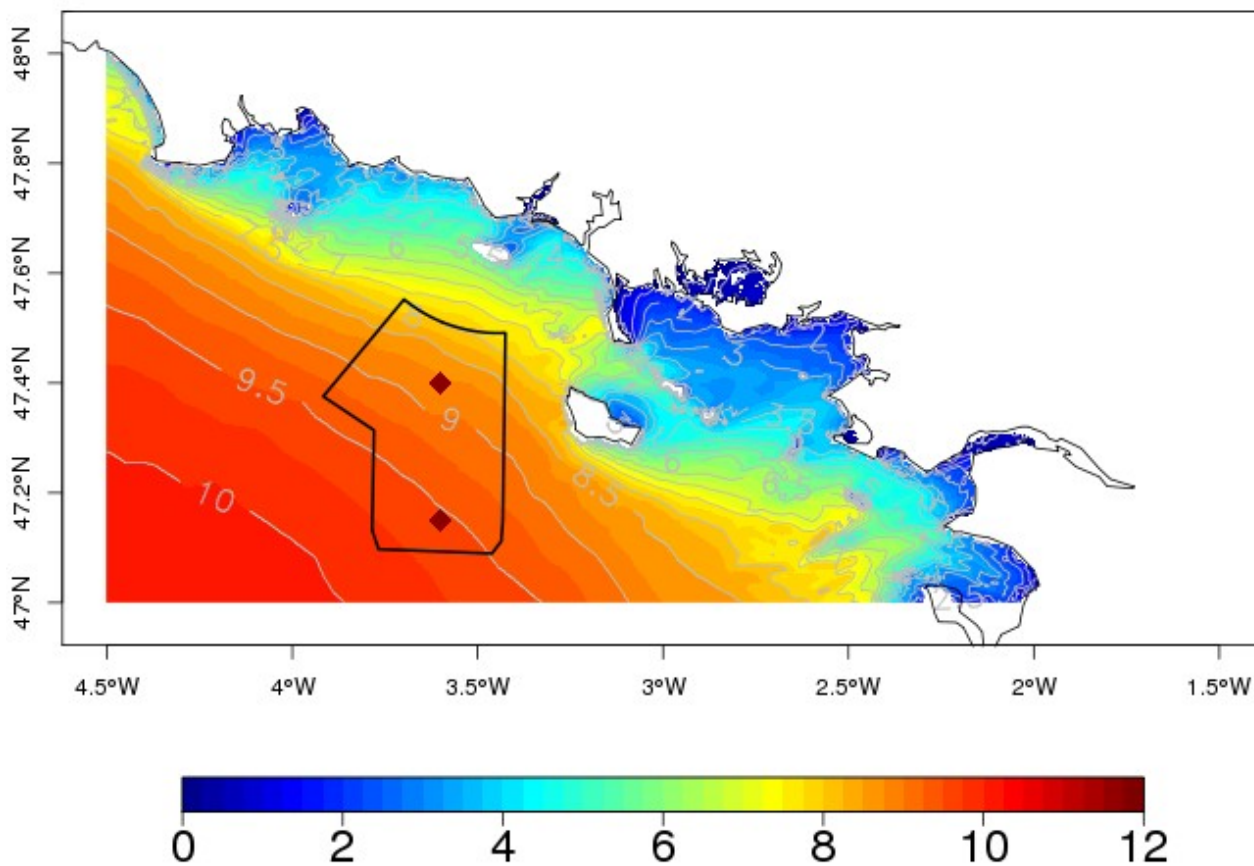


Illustration 5: hauteur significative de la mer totale (mètres) lors de la tempête des 6-7 fév. 1996  
(valeur maximale intégrée sur la période comprise entre le 6 fév. à 0 UTC et le 8 fév. à 00 UTC)

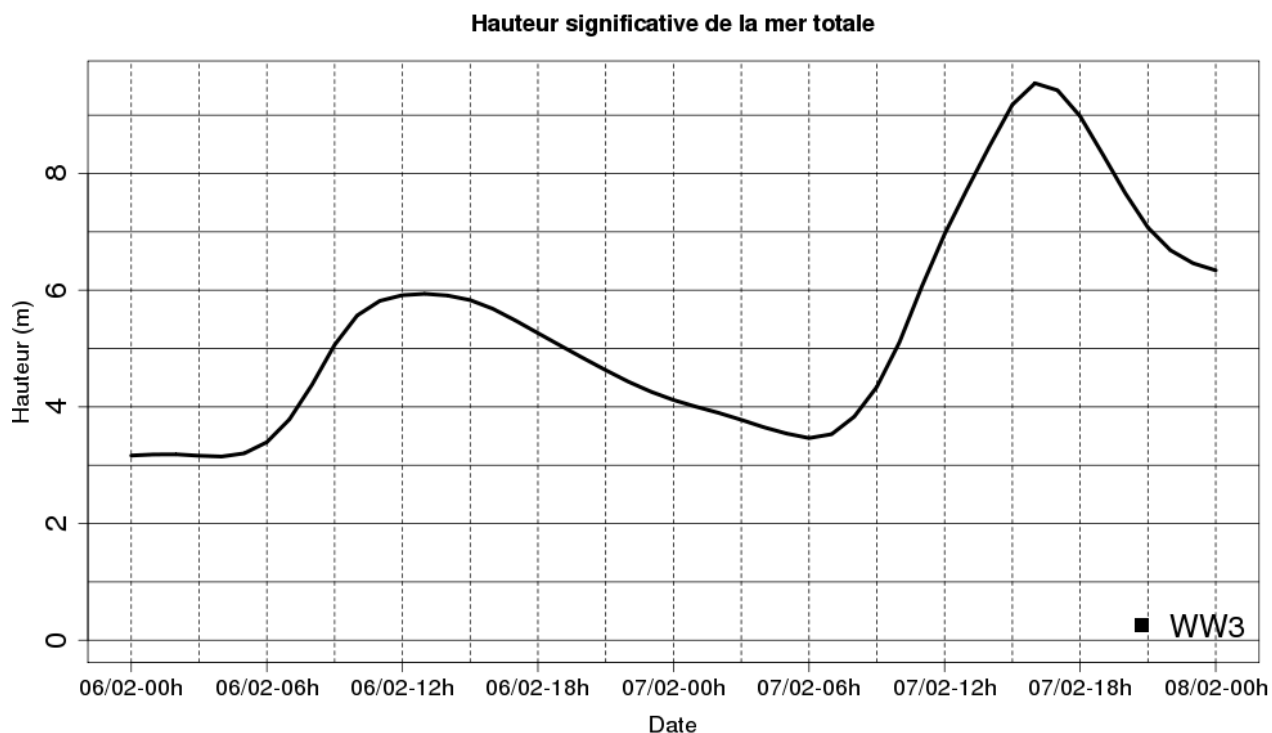


Illustration 6: évolution temporelle de la hauteur des vagues au point de grille 47,15° N et 3,60° W

**Caractéristiques principales :**

Fort relèvement de la hauteur des vagues de la mer du vent en réaction aux vents violents associés au passage de la dépression alors que la mer est déjà agitée.

|                                       | <i>Point Nord</i>                       | <i>Point sud</i>         |
|---------------------------------------|---|--------------------------|
| <b>Hauteur maximale H1/3</b>          | 8,8 m                                   | 9,5 m                    |
| <b>Heure</b>                          | 07/02/1996 vers 16 H UTC                | 07/02/1996 vers 16 H UTC |
| <b>Direction</b>                      | <i>Ouest à sud-ouest</i>                |                          |
| <b>Contribution mer du vent/houle</b> | <i>La mer du vent est prépondérante</i> |                          |

Tableau 6: caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation Era5 sur la période comprise entre le 6 fév. à 00UTC et le 8 fév. à 00 UTC

## 2.4 Situation 4 : 3 février 1990

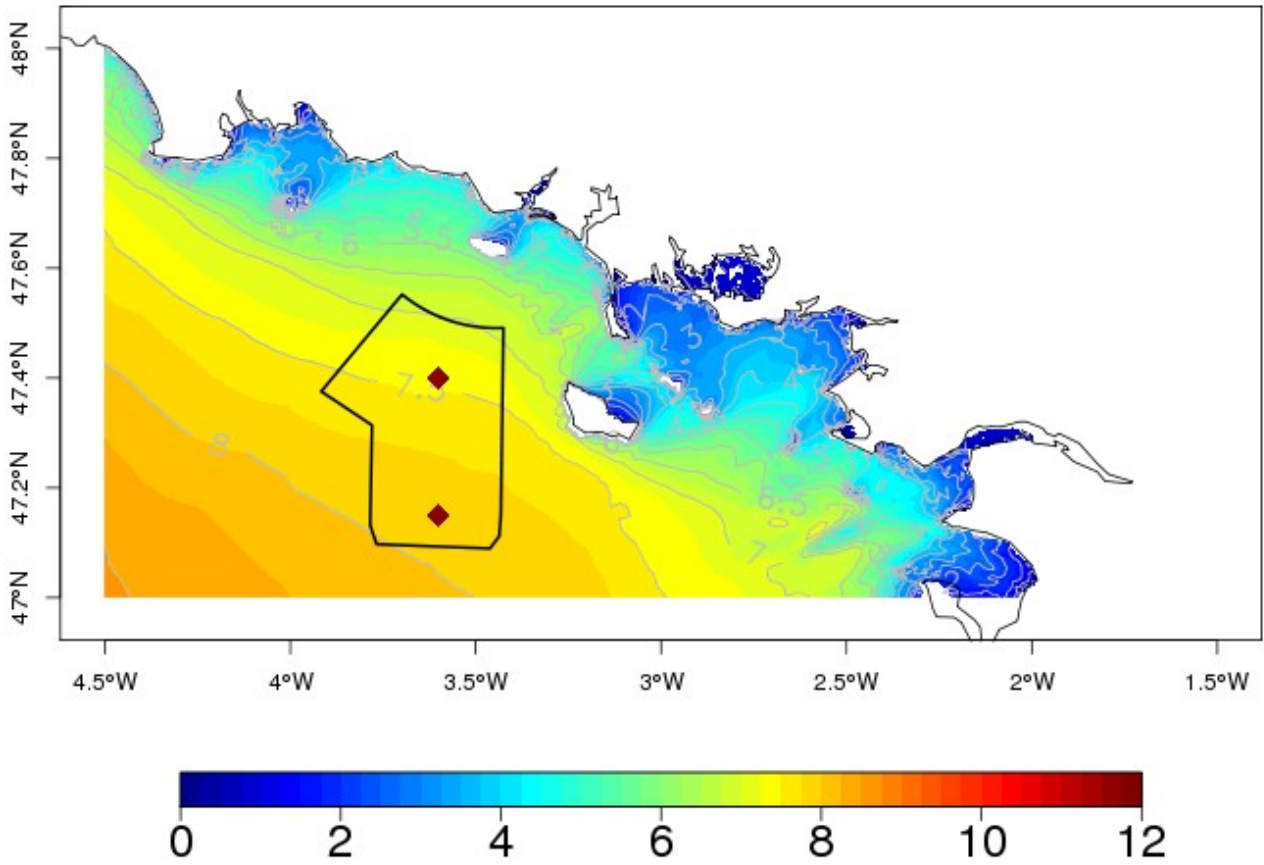
### 2.4.1 Rappel conditions météorologiques

Succession de dépressions sur le proche Atlantique au cours des mois de janvier et février 1990. Une dépression de petite dimension aborde la pointe bretonne le 3 février au matin et se décale très vite vers l'est. Elle génère des vents violents de sud-ouest puis nord-ouest.

### 2.4.2 Analyse des résultats

En raison du temps déjà profondément perturbé les jours qui précèdent, la mer au voisinage des côtes du sud Bretagne est déjà parcouru par une houle modérée de 4 à 5 m quand survient la tempête du 3 février 1990. Cette tempête a généré des vents remarquablement violents mais pendant une période de temps assez brève. On observe une nette réaction de la surface océanique avec une mer qui s'amplifie entre 06 H UTC et 11 H UTC sans atteindre une mer pleinement formée en raison d'une durée d'action insuffisante (la H 1/3 de la mer totale est au plus fort un peu inférieure à 8 m sur la zone.)

La contribution de la houle est modérée.



*Illustration 7: hauteur significative de la mer totale (mètres) lors de la tempête du 3 février 1990  
(valeur maximale intégrée sur la période comprise entre 00 et 24 H UTC)*

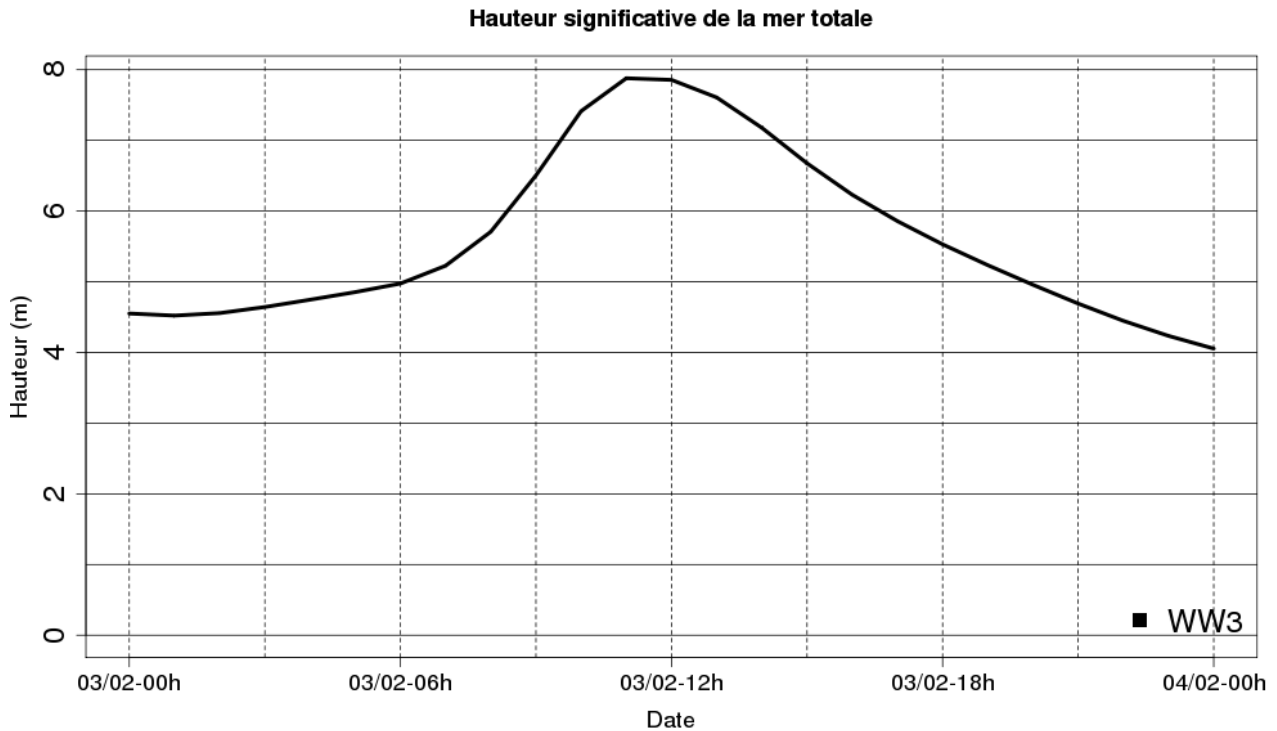


Illustration 8: évolution temporelle de la hauteur des vagues au point de grille 47,15° N et 3,60° W

### Caractéristiques principales :

Très violent coup de vent ayant entraîné une rapide amplification de l'état de mer qui est restée toutefois d'ampleur limitée en raison du rapide éloignement de la dépression tempétueuse.

|                                       | <i>Point Nord</i>        | <i>Point sud</i>         |
|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <b>Hauteur maximale H1/3</b>          | 7,4 m                    | 7,8 m                    |
| <b>Heure</b>                          | 03/02/1990 vers 11 H UTC | 03/02/1990 vers 11 H UTC |
| <b>Direction</b>                      | Sud-ouest                |                          |
| <b>Contribution mer du vent/houle</b> | Mer du vent prédominante |                          |

Tableau 7: caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation Era5 sur la période comprise entre le 3 fév. à 00 UTC et le 4 fév. à 00 UTC



## 2.5 Situation 5 : 14 et 15 décembre 1979

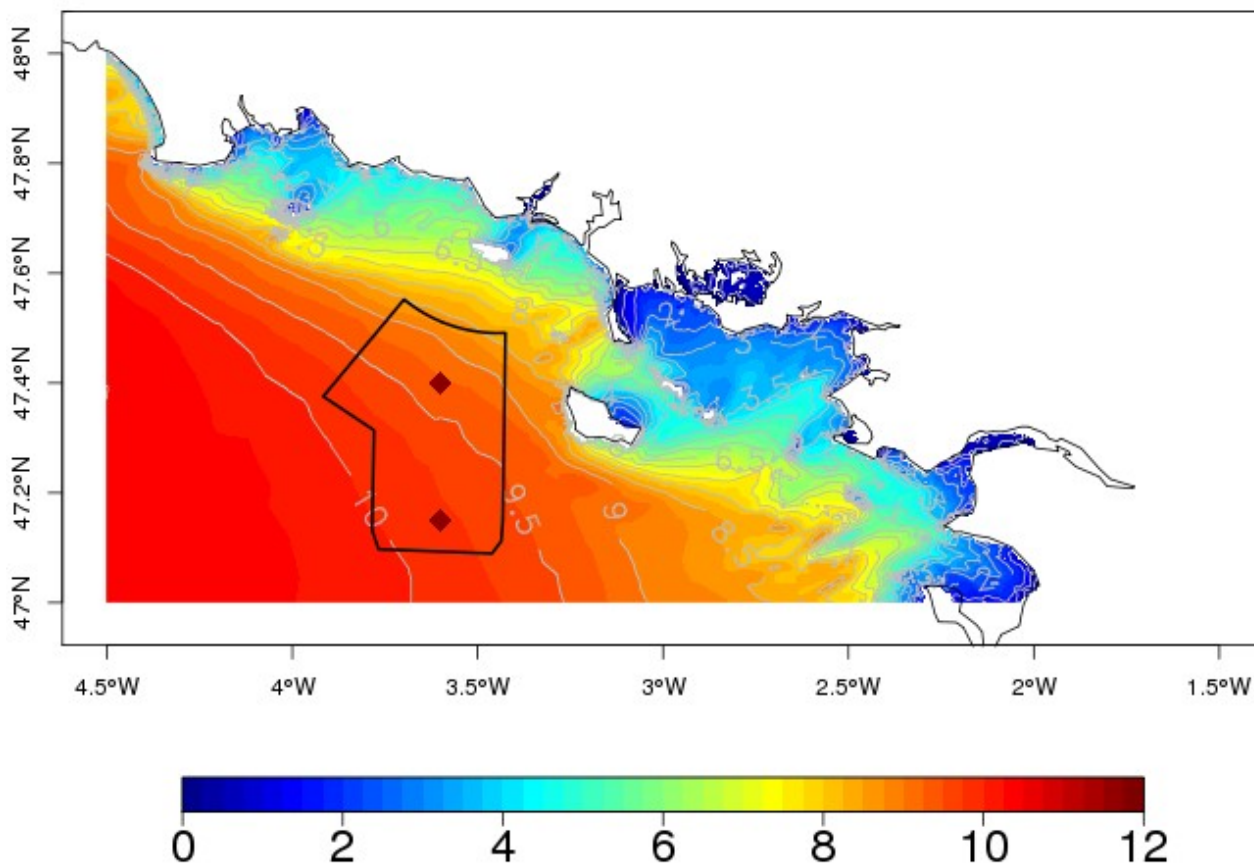
### 2.5.1 Rappel conditions météorologiques

Vaste dépression circulant assez lentement de l'Irlande vers le Danemark. Elle génère de puissant et durables vents de sud-ouest puis d'ouest et enfin nord-ouest sur le sud de la Bretagne.

### 2.5.2 Analyse des résultats

La mer est déjà fortement agitée quand intervient la tempête des 14-15 décembre. La tempête agit longuement sur la surface océanique pour aboutir à une mer pleinement formée. La croissance de la hauteur des vagues de la mer totale est lente passant de 7 à 10 m entre le 14 décembre à 12 H UTC et le 15 décembre à 09 H UTC.

La contribution de la houle est essentielle.



*Illustration 9: hauteur significative de la mer totale (mètres) lors de la tempête des 14-15 décembre 1979  
(valeur maximale intégrée sur la période comprise entre le 14 à 12 H UTC et le 15 à 24 H UTC)*

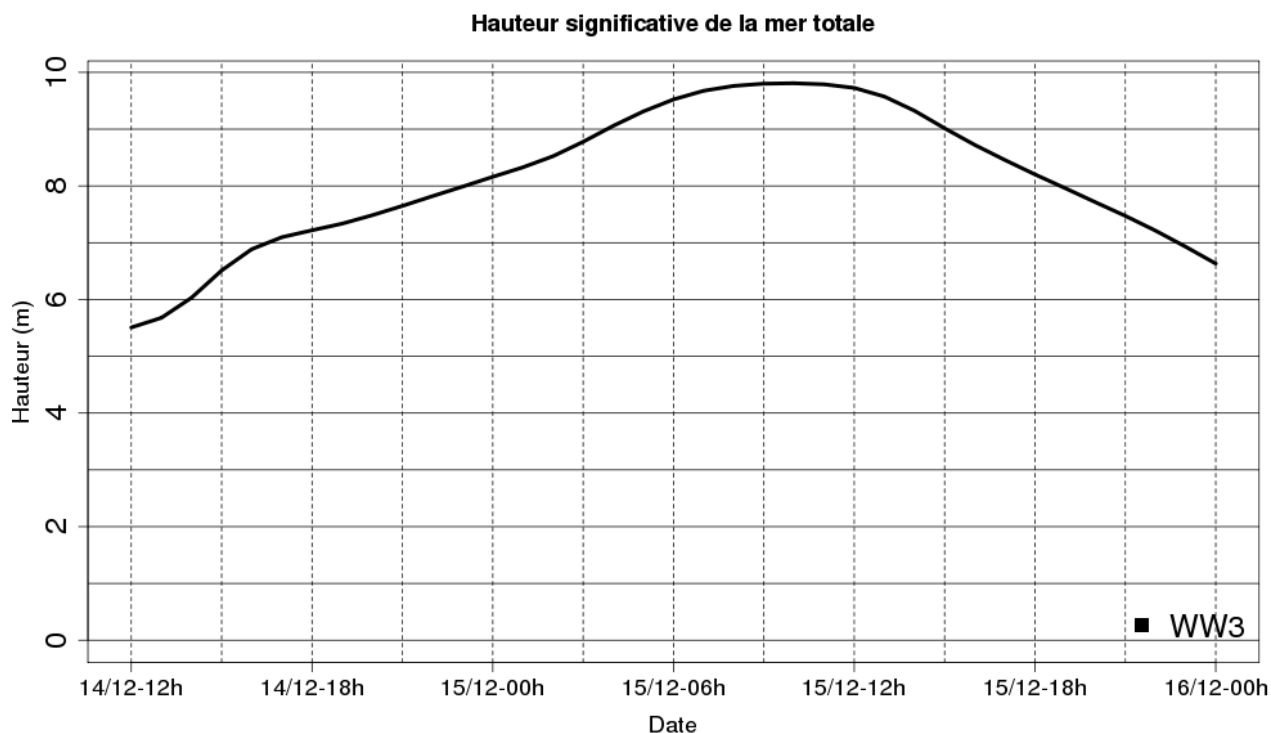


Illustration 10: évolution temporelle de la hauteur des vagues au point de grille 47,15° N et 3,60° W

### Caractéristiques principales :

Cet épisode a généré une grande houle, très énergétique, remarquablement persistante.

|                                       | <i>Point Nord</i>         | <i>Point sud</i>         |
|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| <b>Hauteur maximale H1/3</b>          | 9,3 m                     | 9,8 m                    |
| <b>Heure</b>                          | 15/12/1979 vers 12 H UTC  | 15/12/1979 vers 10 H UTC |
| <b>Direction</b>                      | <i>Ouest à sud-ouest</i>  |                          |
| <b>Contribution mer du vent/houle</b> | <i>Houle prédominante</i> |                          |

Tableau 8: caractéristiques des vagues les plus fortes de la simulation Era5 sur la période comprise entre le 14 déc. à 12 H UTC et le 16 déc. à 00 H UTC

## 2.6 Conclusions

A l'échelle de la France, la zone d'étude est particulièrement exposée aux tempêtes en raison de son positionnement proche de la trajectoire préférentielle adoptée par les perturbations des latitudes moyennes. Aucune surface terrestre ne vient atténuer, les dépressions tempétueuses qui prennent naissance au-dessus de l'Atlantique. On dénombre ainsi à Belle-Île, une quinzaine de jours par an où le vent atteint ou dépasse les 100 km/h.

Dans une très large mesure, ces tempêtes ont lieu en automne et en hiver.

Le vent peut s'exercer sans frein sur une vaste surface océanique. Plusieurs des cas étudiés ont donné lieu à des mers formées. Toutefois en raison du relèvement du fond marin et des phénomènes d'amortissement associés à la proximité de la côte, on observe sur la zone d'étude, à l'ouest de Belle-Île, dans les pires cas étudiés, des hauteurs de vagues H1/3 proches de 10 m, se déplaçant globalement d'ouest en est (voire du sud-ouest vers le nord-est). Dans cette configuration, la hauteur des vagues maximales peut atteindre 20 m. Cette hauteur théorique est proche des 17 à 19 m relevés par la bouée située près de Belle-Île lors de la tempête « Joachim » du 16 décembre 2011, entre autres exemples.

Sur la zone d'étude, on observe un gradient sud-ouest/nord-est avec des vagues généralement plus hautes au sud de la zone. Une différence qu'on peut attribuer aux écarts de profondeur et de distance à la côte.

La sélection des tempêtes et les rejeux des 5 événements récents les plus marquants décrits dans ce document, peuvent être considérés comme étant des exemples de situations de vagues extrêmes sur les zones considérées. On rappelle que l'ensemble des fichiers grib des vagues générées lors de ces simulations sont annexées à ce rapport et permettront aux porteurs de projet une analyse plus fine de l'impact de ces vagues extrêmes sur les infrastructures.

**FIN DE DOCUMENT**

## Annexes

### Table des annexes

|   |    |
|---|----|
| Annexe 1 : Configuration du modèle WW3 à Météo-France.....                                  | 22 |
| Présentation du modèle WW3.....   | 22 |
| Les modèles numériques de vagues.....   | 22 |
| Paramètres de sortie.....   | 24 |
| Particularités de WW3.....  | 25 |
| Maillage non structuré.....   | 25 |
| Forçages et conditions aux limites.....   | 27 |
| Bibliographie.....  | 30 |
| Annexe 2 : critiques des mesures de vent des sémaphores des îles de Belle-Île et Groix..... | 31 |
| Annexe 3 : Échelle de Beaufort.....   | 32 |
| Annexe 4 : Échelle de Douglas.....  | 33 |
| Annexe 5 : les fiches tempêtes.....   | 34 |

### Annexe 1 : Configuration du modèle 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 sur les façades atlantique et méditerranéenne de la métropole en 2015, 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.

#### Présentation du modèle WW3

WAVEWATCH III est un modèle de 3<sup>e</sup> 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, Metoffice,...).

La version mise en place est la version 4.18.

#### Les modèles numériques de vagues

Un modèle de vagues de 3<sup>e</sup> 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 :

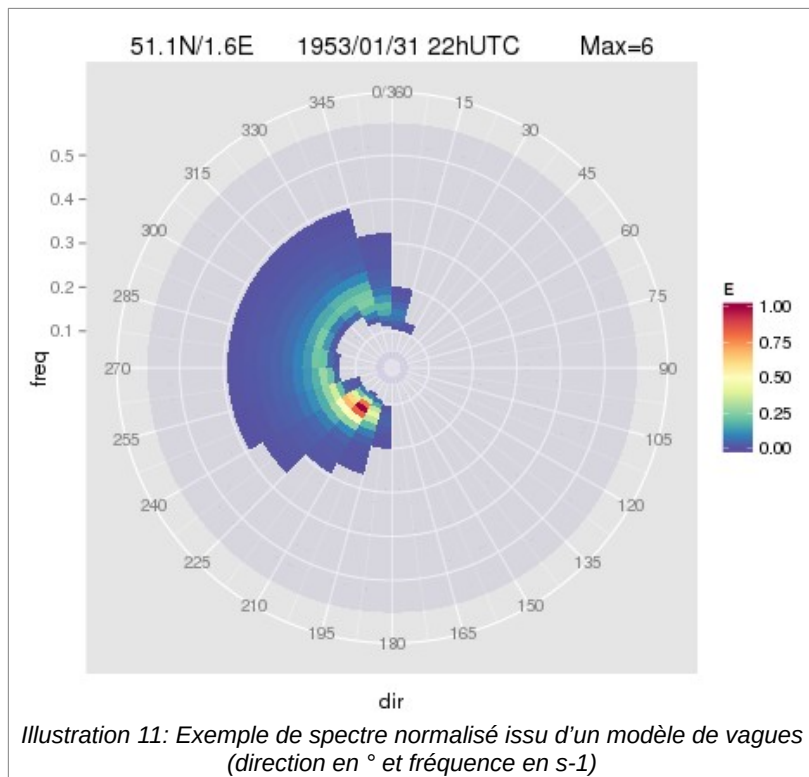
$$\begin{array}{l} \text{Evolution de N dans} \\ \text{l'espace} \\ \text{le temps} \\ \text{les directions} \\ \text{les fréquences} \end{array} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bf} + S_{db} + S_{ref}$$

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 source 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 à Météo-France entre le modèle global, MFWAM, et les configurations côtières WW3.

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.

### 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-ensemble :
- **houle primaire**, train de vagues (défini par une direction et une fréquence restreinte) de la houle le plus énergétique ;

- **houle secondaire**, train de vagues de la houle le 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 (°)

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

Où F représente le spectre d'énergie, f la fréquence et  $\theta$  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,...).

### 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.

### 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'Homonim. 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.

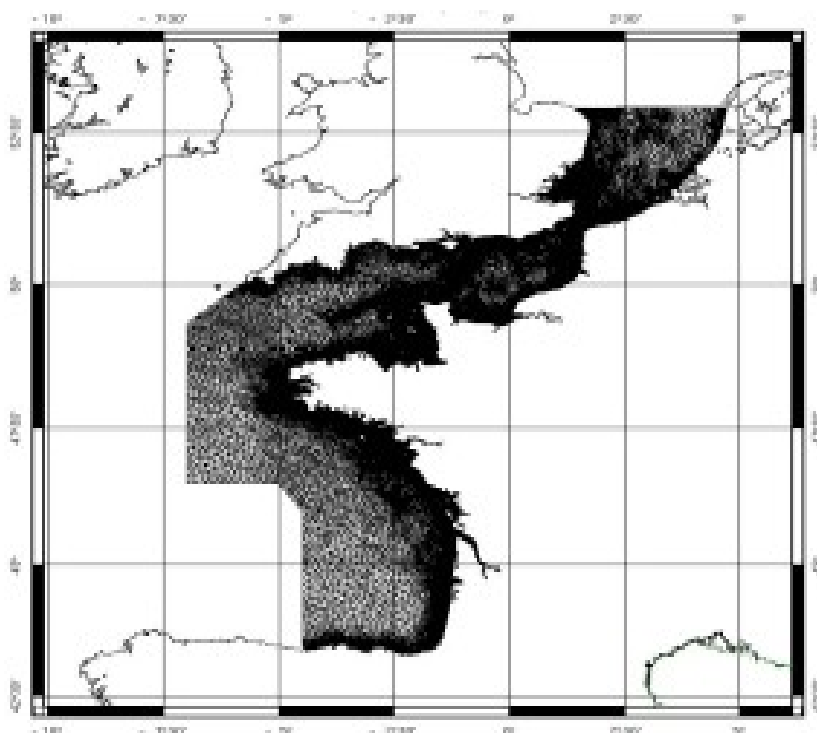


Illustration 12: Maillage de la configuration Manche/Atlantique

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.

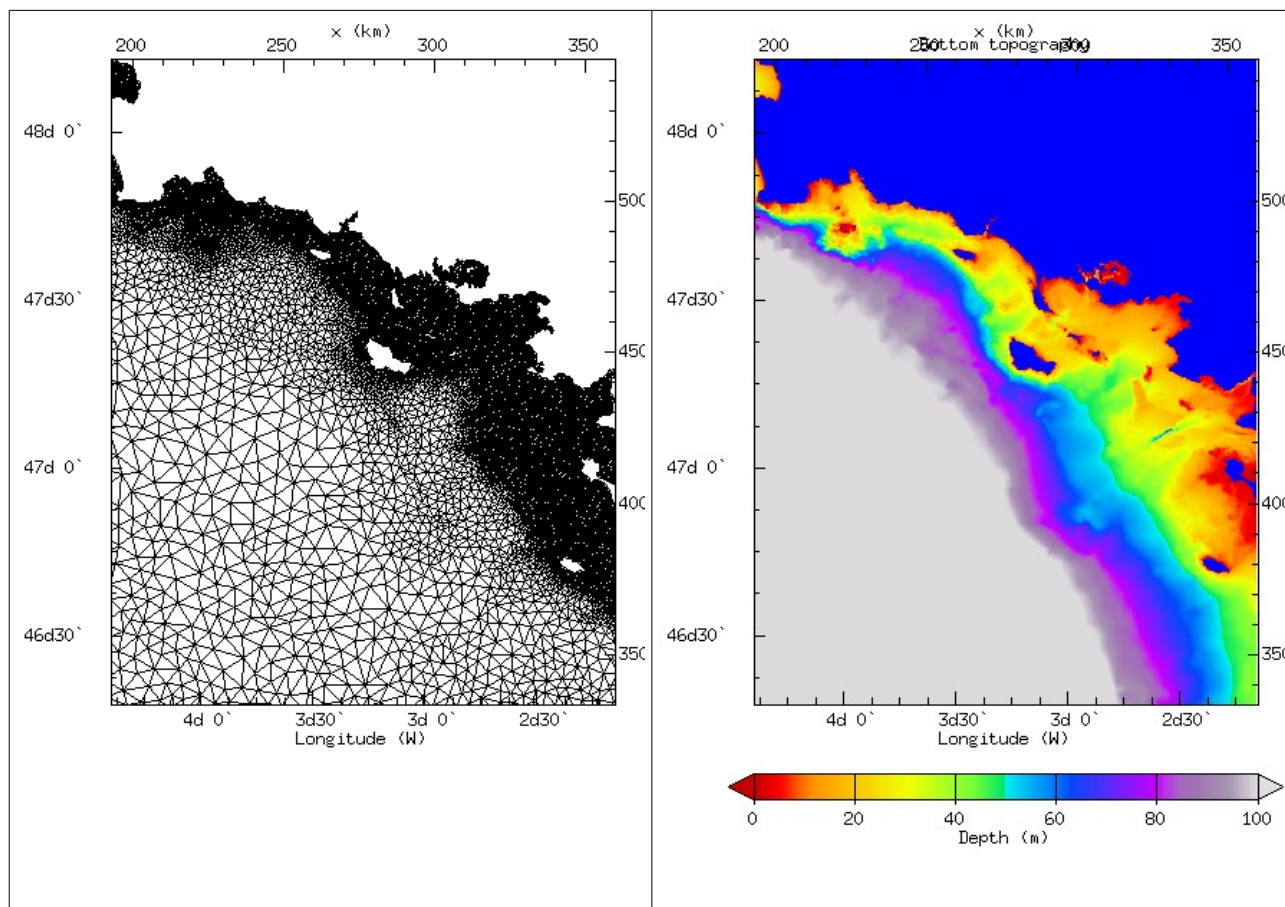


Illustration 13: zoom du maillage Atlantique et bathymétrie (m) sur le Morbihan.

Le maillage resserré près du littoral français visible sur le zoom sur le Morbihan (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.

### Forçages et conditions aux limites

Dans le cadre de la présente étude, les meilleurs forçages de vent disponibles ont été utilisés. Des forçages de courants de surface et de niveau d'eau issus du modèle de circulation barotrope Hycom<sup>1</sup> 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

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

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.

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.

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, sauf en eau peu profonde, où moins de processus sont décrits et de façon plus grossière, étant donné la résolution du modèle.

### **Validation des modèles**

Le modèle MFWAM, utilisé pour forcer WW3, correspond au modèle global mis à disposition dans Copernicus Marine (<https://marine.copernicus.eu/>). La qualité des données est documentée sur le site de Copernicus (Aouf L. 2018).

La configuration WW3 utilisée a été validée de mai 2015 à août 2016 avec les observations de hauteur de vagues aux bouées du réseau Céréma et Météo-France.

La carte ci-dessous donne l'écart quadratique moyen relatif (%) de la hauteur significative de WW3 par rapport aux bouées<sup>2</sup> pour la période mai 2015 à août 2016, pour des observations supérieures à 1 m.

---

<sup>2</sup> Cette étude a utilisé des résultats extraits de la base de données nationale de houle in situ CANDHIS.

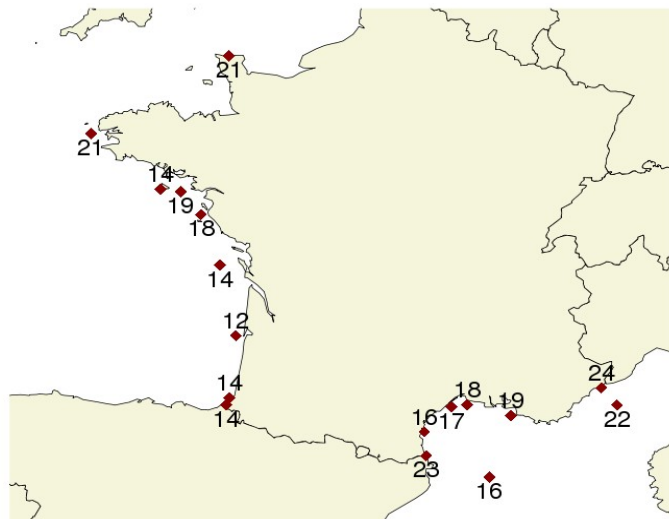


Illustration 14: Ecart quadratique moyen relatif (%) de la hauteur significative de WW3 par rapport aux bouées pour la période mai 2015 à août 2016, pour des observations supérieures à 1 m

L'erreur quadratique moyenne sur la hauteur significative est pour la plupart des bouées comprise entre 15 et 20 %. Cette erreur est légèrement supérieure à celle par rapport à des bouées large des modèles de grande échelle, comme MFWAM (14%). Ce résultat est attendu étant donné la variabilité spatiale et temporelle et la complexité des phénomènes en côtier.

La validation aux bouées montre que la qualité du modèle WW3 est à l'état de l'art pour un modèle côtier.

La configuration utilisée a par ailleurs fait l'objet de communication scientifique (Michaud H. et al 2015).

L'erreur quadratique moyenne sur la hauteur significative est pour la plupart des bouées comprise entre 15 et 20 %. Cette erreur est légèrement supérieure à celle au large des modèles de grande échelle, comme MFWAM (14%). Ce résultat est attendu étant donné la variabilité spatiale et temporelle et la complexité des phénomènes en côtier.

La validation aux bouées montre que la qualité du modèle WW3 est à l'état de l'art pour un modèle côtier.

La configuration utilisée a par ailleurs fait l'objet de communication scientifique (Michaud H. et al 2015).

## **Bibliographie**

Aouf L. (2018) Quality information document for global ocean waves analysis and forecasting product. <https://resources.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-027.pdf>

Ardhuin F., E. Rogers, A. Babanin, J.-F. Filipot, R. Magne, A. Roland, A. Van Der Westhuysen, P. Queffeulou, 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., & Lepesqueur, 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.

Michaud H., Pasquet A., Baraille R., Leckler F., Aouf L., Dalphineta A. (2015) Implementation of the new french operational coastal wave forecasting system and application to a wave-current interaction study. *Waves workshop proceedings*.

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 2 : critiques des mesures de vent des sémaphores des îles de Belle-Île et Groix

| Site                        | Point de mesure   | Qualité   | Particularité locale   |
|-----------------------------|---|---|--|
| <b>BELLE-ILE - LE TALUT</b> | Le sémaphore est situé sur la côte sud de Belle-Île, à 100- 150 m en retrait de la mer, sur une falaise d'une trentaine de mètres de haut . Les mesures de vent sont situées à 10,5 m du sol de la terrasse du sémaphore. | Plutôt bon (classe B lors de la dernière évaluation en 2007). Par rapport aux vents qui soufflent du large, il est vraisemblable que dans certaines situations la présence de la falaise entraîne des turbulences et que les mesures de la vitesse du vent en soit affecté dans le sens d'un renforcement de l'intensité des rafales. | Le sémaphore est situé sur une portion de côte parmi les plus exposées aux tempêtes. |
| <b>GROIX - BEG MELEN</b>    | Le sémaphore est situé au nord-ouest de l'île, 50 à 100 m en retrait de la mer, sur une falaise d'une quarantaine de mètres de haut . Les mesures de vent sont situées à 15 m du sol de la terrasse du sémaphore.         | Plutôt bon (classe B lors de la dernière évaluation en 2007). Par rapport aux vents qui soufflent du large, il est vraisemblable que dans certaines situations la présence de la falaise entraîne des turbulences et que les mesures de la vitesse du vent en soit affecté dans le sens d'un renforcement de l'intensité des rafales. | Le sémaphore est situé sur une portion de côte parmi les plus exposées aux tempêtes. |

### Annexe 3 : Échelle de Beaufort

On rappelle que cette échelle internationale, bien connue dans le monde maritime, est relative à des vents moyens établis (pendant plusieurs heures) soufflant au-dessus de la mer à une hauteur de l'ordre de 10 mètres au-dessus des flots. Elle servira de référence pour notre analyse des tempêtes.

| Degré Beaufort (Bf) | 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 9: Échelle Beaufort – correspondances entre l'échelle Beaufort, la vitesse du vent (code OMM 1100), et l'état de la mer

## Annexe 4 : Échelle de Douglas

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.

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

Tableau 10: échelle d'état de la mer (code S) et hauteurs significatives des vagues



## Annexe 5 : les fiches tempêtes

Les 23 tempêtes identifiées dans la liste suivante font l'objet de fiches descriptives distinctes, accompagnant ce rapport.

| Épisode sélectionné | Fichier associé    |
|---------------------|--------------------|
| 08/01/1924          | tempête_1924_01_08 |
| 08/10/1924          | tempête_1924_10_08 |
| 15/11/1928          | tempête_1928_11_15 |
| 22/02/1935          | tempête_1935_02_22 |
| 17/01/1963          | tempête_1963_01_17 |
| 13/02/1972          | tempête_1972_02_13 |
| 27/01/1978          | tempête_1978_01_27 |
| 15/12/1979          | tempête_1979_12_15 |
| 11/10/1980          | tempête_1980_10_11 |
| 09/12/1982          | tempête_1982_12_09 |
| 15/10/1987          | tempête_1987_10_15 |
| 03/02/1990          | tempête_1990_02_03 |
| 19/11/1991          | tempête_1991_11_19 |
| 07/02/1996          | tempête_1996_02_07 |
| 26/12/1999          | tempête_1999_12_26 |
| 27/12/1999          | tempête_1999_12_27 |
| 10/03/2008          | tempête_2008_03_10 |
| 16/12/2011          | tempête_2011_12_16 |
| 23/04/2012          | tempête_2012_04_23 |
| 24/12/2013          | tempête_2013_12_24 |
| 05/02/2014          | tempête_2014_02_05 |
| 06/03/2017          | tempête_2017_03_06 |
| 01/10/2020          | tempête_2020_10_01 |