



Avant-propos

Cette fiche a été rédigée dans le cadre du Groupe de travail « Tempêtes et submersions historiques » et plus particulièrement au sein du sous-groupe « Types de données » réunissant plusieurs organismes, et dont l'objectif est de mutualiser les informations de tempêtes et de submersions marines historiques, capitaliser les connaissances et expertiser les données associées à des événements historiques.

Cette fiche relative aux données d'états de mer fait partie d'un catalogue de données pour accompagner et comprendre la base de données relative aux tempêtes historiques. Cet état de l'art pourrait nécessiter d'être complété en fonction de besoins ou applications particulières.

L'élaboration de cette fiche, fruit d'un travail collaboratif et pluridisciplinaire a été pilotée par Sabine Cavellec (Cerema).

Nous remercions également ici l'ensemble des personnes ayant collaboré avec leurs contributions écrites et/ou leurs relectures : Xavier Kergadallan (Cerema), Franck Mazas (Artelia), Jessie Louisor et Aurélie Maspataud (BRGM), Héloïse Michaud, Alexa Latapy et Gaël André (Shom), et Gérard Doligez (Météo-France).

Les termes suivis d'un astérisque * sont définis dans un glossaire spécifique associé au catalogue de données.

Résumé

Cette fiche propose une description et une caractérisation des états de mer, qui jouent souvent un rôle important dans les événements de submersion. Ces états de mer, caractérisés notamment par leur hauteur, leur période et leur direction, fluctuent de manière importante dans le temps et l'espace.

Après un rappel sur les définitions des états de mer, leurs moyens d'acquisitions sont présentés et notamment les observations visuelles, les mesures in situ et les mesures spatiales. Les données obtenues par modélisation et les bases de données fréquemment utilisées sont également exposées.

La combinaison de ces modèles avec des observations (assimilation de données) permettent de construire des analyses et réanalyses qui offrent une vision spatialisée du champ des vagues sur certaines situations. Les traitements qui peuvent être réalisés sur les données d'observation ou de modèle pour caractériser une climatologie des états de mer en certains points (conditions usuelles (climat de houle) et conditions extrêmes d'état de mer) sont ensuite présentés ainsi que les incertitudes et les limites des méthodes.



ETATS DE MER

Caractéristiques de la donnée

Définition

L'état de mer* représente l'état de la surface de la mer résultant de la superposition d'un ou plusieurs systèmes de vagues* : **la mer du vent*** générée par le vent et / ou **une ou plusieurs houles*** générées en-dehors de la zone d'observation et qui sont propagées jusqu'à cette zone (**Figure 1**).

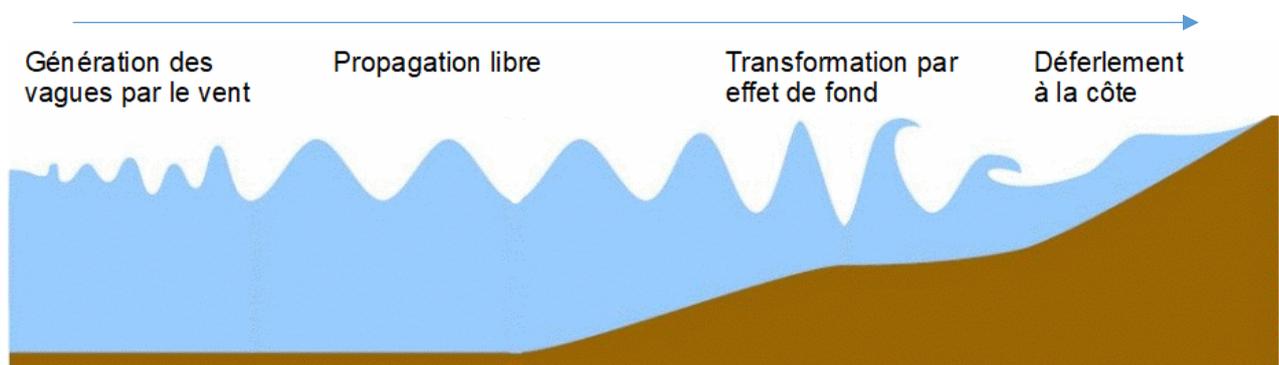


Figure 1 - Génération et propagation des vagues du large vers la côte (source : Cerema)

Les vagues* sont générées par l'énergie du vent. Elles sont irrégulières en hauteur, période et direction (aspect irrégulier et chaotique à la mer). Lors de cette phase de **génération**, il est fait référence au clapot* puis à la mer du vent* ; hauteur et période des vagues sont alors corrélées et croissent de concert (**Figure 1**). Lorsque le champ de vent qui les fait croître disparaît, ou que les vagues s'en éloignent, la génération s'interrompt et s'ensuit la phase de **propagation** pure (**Figure 1**) : les vagues prennent alors la forme d'une houle* et deviennent progressivement plus régulières. Les vagues* de faible période se dissipent, il en résulte une diminution de la hauteur et une augmentation de la période (jusqu'à 20 s). Dans les bassins océaniques, lorsque l'eau est suffisamment profonde ($d > L_0/2^1$), les vagues* n'interagissent pas avec les fonds et elles se propagent sans changer de direction.

En **zone côtière** ($d < L_0/2$), les principales caractéristiques des vagues* (amplitude, longueur d'onde et direction) sont affectées par la profondeur d'eau limitée. La célérité des vagues diminuant avec la profondeur, il en résulte un alignement progressif des vagues sur les lignes isobathes* (la crête des vagues devient parallèle à la côte) tandis que la hauteur des vagues tend à décroître : c'est le phénomène de **réfraction***. La présence d'obstacles (îles, caps...) peut également induire un phénomène de **diffraction*** distribuant directionnellement l'énergie des vagues derrière l'obstacle.

En **zone littorale** (très faible profondeur, de l'ordre de $d < L_0/10$), le ralentissement des vagues* est tel que leur profil se déforme et devient asymétrique. Du fait du manque de profondeur, la hauteur des vagues augmente : c'est le phénomène de **levée*** (*shoaling**).

¹ d étant la profondeur d'eau et L_0 , la longueur d'onde des vagues
Version février 2024



ETATS DE MER

Cette augmentation de la hauteur combinée à une diminution de la longueur d'onde accroît la cambrure de la houle : arrivée à une valeur limite, la vague « casse » en dissipant l'énergie : c'est le **déferlement bathymétrique***. Ce phénomène induit une élévation progressive du niveau de la mer entre la zone de déferlement intense et le haut de plage : c'est le *wave set-up**. Le va-et-vient des vagues sur la plage, phase terminale de la transformation des vagues, est nommée le jet de rive* (*swash**) : la combinaison du *set-up** (composante statique) et du jet de rive* (composante dynamique) forme le *run-up**.

En **zone portuaire**, les vagues interagissent avec les ouvrages : digues, quais, cales, etc. Les principaux phénomènes associés sont la **diffraction*** ainsi que la **réflexion***, une partie de l'énergie incidente des vagues étant renvoyée par la structure.

Enfin, en **zone estuarienne**, les vagues interagissent avec le débit du fleuve.

Les états de mer* sont généralement définis sur des durées allant de 20 à 30 minutes, voire jusqu'à une heure. Ces durées seront appelées « durée d'observation » dans toute cette fiche.

Pour décrire l'état de la mer*, plusieurs paramètres (hauteur, direction et période) sont utilisés selon une analyse directionnelle ou non-directionnelle, calculés sur une durée d'observation et suivant deux types d'approche tels que définis ci-dessous.

Analyse vague-à-vague (ou analyse temporelle)

L'analyse vague-à-vague s'intéresse au signal temporel de la surface libre en un point. Chaque vague est identifiée par passage du signal au niveau moyen (**Figure 2**). Des statistiques sont ensuite établies à partir des hauteurs, définies de crête à creux, et des périodes de chacune de ces vagues. Elle ne fournit pas d'information sur la direction des vagues. Les principaux paramètres d'états de mer calculés par l'analyse vague-à-vague sont les suivants :

- $H_{1/3}$ * : hauteur significative statistique, valeur moyenne du tiers supérieur des hauteurs des vagues sur la durée d'observation.
- H_{\max} * : hauteur de la plus grande vague sur la durée d'observation.
- T_{avd} * : période moyenne des vagues sur la durée d'observation.
- $T_{H_{1/3}}$ * : période significative, définie par la valeur moyenne des périodes du tiers supérieur des plus grandes vagues sur la durée d'observation.
- $T_{H_{\max}}$ * : période de la vague de la plus grande hauteur sur la durée d'observation.

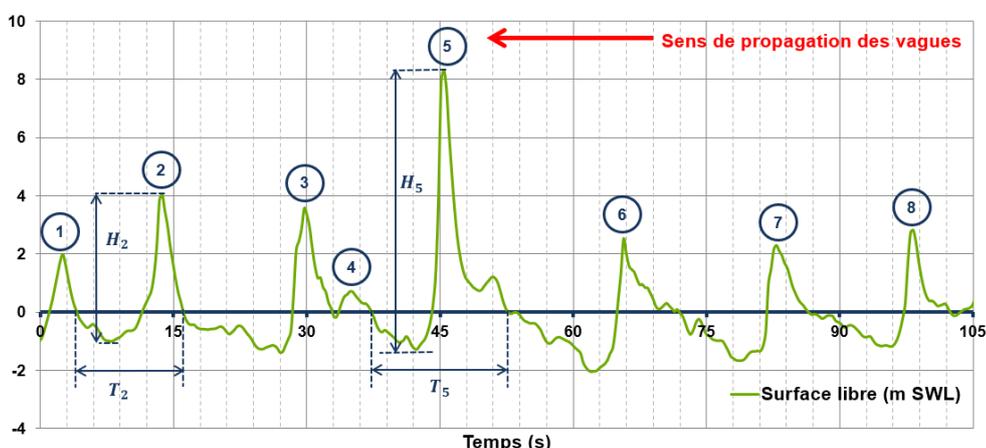


Figure 2 - Exemple d'analyse vague-à-vague (source Artelia)



ETATS DE MER

Analyse spectrale

L'analyse spectrale s'intéresse aussi au signal temporel de la surface libre en un point, mais avec un passage dans le domaine fréquentiel via une transformée de Fourier et le calcul de la densité spectrale (ou spectre de variance) (Figure 3). L'état de mer* est représenté par une superposition linéaire d'ondes sinusoïdales élémentaires.

L'analyse du spectre de variance permet de caractériser la nature des états de mer (houles, mer du vent). Différents calculs d'intégration du spectre de variance (moment d'ordre zéro ou plus) permettent d'obtenir les paramètres d'états de mer (hauteurs, périodes et directions).

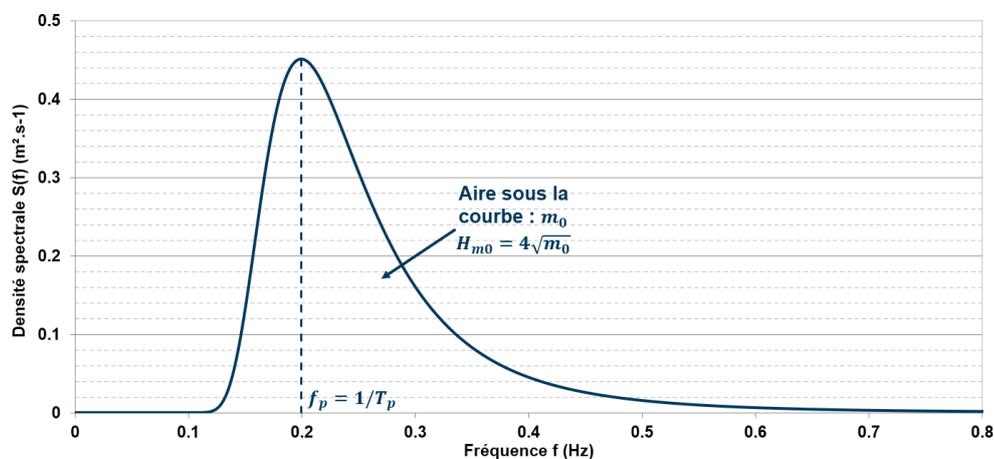


Figure 3 - Exemple d'analyse spectrale (source : Artelia)

Les principaux paramètres d'états de mer calculés par l'analyse spectrale sont les suivants :

- H_{m0}^* : estimation de la hauteur significative spectrale des vagues à partir du moment d'ordre zéro de la densité spectrale.
- T_p^* : période correspondant au pic de la densité spectrale.
- T_{02}^* : période moyenne calculée en prenant la racine carrée du rapport du moment d'ordre zéro sur le moment d'ordre deux de la densité spectrale.
- T_E^* : période énergétique définie par le rapport du moment d'ordre moins un sur le moment d'ordre zéro de la densité spectrale.
- Dir_p^* : direction de provenance des vagues au pic de la densité spectrale.
- $Etal_p^*$: largeur directionnelle, caractérise l'étalement directionnel de l'énergie autour de la direction au pic (fonction de répartition angulaire de l'énergie associée à la fréquence de pic de la densité spectrale).

Le terme H_s^* (hauteur significative*) est également utilisé pour décrire les états de mer*. Il s'agit d'un terme générique nécessitant d'être précisé. Il peut être décliné soit dans sa définition statistique ($H_{1/3}$), soit dans sa définition spectrale (H_{m0}). En grande et moyenne profondeur $H_{1/3} \approx 0,95 \times H_{m0}$. En faible profondeur, les valeurs des deux paramètres diffèrent et $H_{1/3}$ peut être 10 à 25% plus élevé.

Les directions sont généralement exprimées selon la convention nautique (origine au Nord, sens horaire, direction de provenance).

Le spectre directionnel est généralement représenté sous forme polaire (Figure 4).



ETATS DE MER

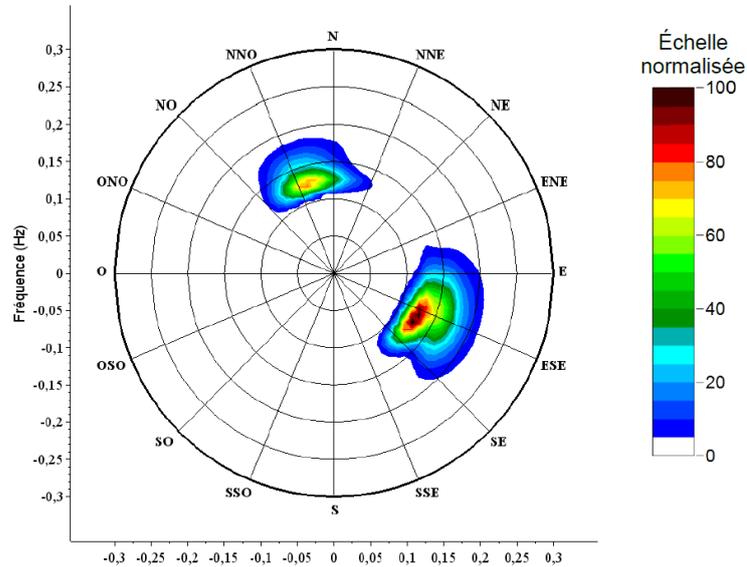


Figure 4 - Exemple de spectre directionnel de variance, cas du houlographe de Monaco le 15 mars 2015 (source : Candhis)

La définition de référence des paramètres descriptifs des états de mer se trouve dans la publication de l'AIRH et de l'AIPCN de janvier 1986 (cf. § références clés).

Moyen(s) d'acquisition

Observations visuelles

L'observation visuelle, effectuée à partir d'un point fixe en mer (depuis des navires) ou à terre (sémaphores, phares, etc.) est la méthode de mesure la plus ancienne concernant les hauteurs de vagues. Ces estimations sont très largement subjectives, car elles dépendent beaucoup de l'observateur, des conditions de visibilité, de la présence ou non d'ouvrages de référence à proximité des vagues*. Il est généralement admis que les hauteurs des vagues visuellement observées sont très voisines de la hauteur significative* des vagues, en revanche les périodes sont souvent sous-estimées. La représentativité des observations par mauvais temps est mauvaise, car les navires évitent autant que possible les tempêtes. Autre inconvénient, les observations à partir des navires sont surtout concentrées sur les routes maritimes.

Mesures in-situ

La mesure *in situ* repose sur la mise en place d'un appareil de mesure en un point afin de caractériser les états de mer. De nombreux appareils différents existent, conseillés selon l'environnement (profondeur, zone de déferlement, etc.), les conditions d'exploitation (densité du trafic, moyen pour l'entretien du matériel, présence d'un support, etc.) et le besoin (paramètres d'états de mer souhaités, temps réel, durée de la campagne, etc.).

Lorsque la profondeur est suffisante (à partir de 8 à 15 m), on utilise généralement la bouée de mesure de houle*. Pour les faibles profondeurs et particulièrement s'il y a un risque de collision du matériel en surface, il est souvent préféré des capteurs de pression (plus petits et moins chers avec une forte fréquence d'acquisition) ou encore des *acoustic Doppler current profiler* (ADCP) posés au fond de l'eau. À partir d'une structure, on peut aussi utiliser le radar filoguidé ou le sondeur à ultrason ou la perche à houle. Cette liste est non exhaustive et donne simplement quelques exemples d'instrumentation (**figure 5**).

<p>Capteurs de pression (source https://rbr-global.com/, https://www.comm-tec.com/)</p>	<p><i>Acoustic Doppler current profilers</i> (source : https://www.nortekgroup.com/, http://www.teledynemarine.com/)</p>	<p>Bouées de mesure de houle (source : https://www.aanderaa.com/, https://www.sofaroccean.com/, https://www.datawell.nl/)</p>

Figure 5 : Exemples d'instrumentations mises en place pour les mesures in situ des états de mer.

Mesures spatiales : radar et satellite

D'autres techniques permettent la mesure des états de mer sur une plus large zone. Une première approche se fait par **mesures radar de surface**. Le radar type « de navigation » peut être utilisé mais les erreurs sur les hauteurs de vagues peuvent être importantes. Le radar HF/VH donne de meilleurs résultats.

La mesure satellitaire offre l'énorme avantage de fournir une couverture globale des mers et océans. L'approche ici est différente de la mesure *in situ* puisque la mesure n'est pas effectuée deux fois de suite au même endroit. La répétitivité de la mesure varie de 3 à 35 jours en fonction du cycle du satellite. Le volume des données disponibles est très grand et augmente rapidement. Il s'agit ici d'une approche spatiale, et non temporelle, des états de mer*. Les principales techniques de mesures satellitaires sont les suivantes :

- **L'altimètre** : les hauteurs de vagues sont obtenues à partir de l'écho radar rétrodiffusé par la surface de l'océan. La mesure est globale avec une résolution spatiale de l'ordre de 7 km (pseudo-période, pente moyenne).
- **Le radar à synthèse d'ouverture (SAR) en mode vague** : une image de la surface est obtenue avec une résolution spatiale de l'ordre de 300 mètres en utilisant la variation du décalage Doppler des échos en fonction de leur position en azimut.



ETATS DE MER

- **Le radar à vague (SWIM) (Surface Waves Investigation and Monitoring)** : Le principe repose sur une haute résolution dans la direction de visée. La modulation de ce signal est reliée à des vagues se propageant dans la direction de visée, avec une moyenne sur la tache au sol du radar (quelques kilomètres) dans la direction transverse (azimut).

Modélisation numérique des états de mer

La simulation numérique des états de mer en continu dans le temps est une méthode efficace pour reconstituer des séries de données d'états de mer, en tout point d'un domaine océanique et / ou côtier et à une résolution plus dense que les points de mesure, les mesures étant cependant essentielles pour caler et valider les simulations numériques.

Le calage permet de paramétrer le modèle pour que les simulations collent au mieux avec les observations. La validation permet de quantifier l'incertitude des simulations en dehors des points de calage. La simulation permet soit de rejouer de longues durées dans le temps (*hindcast*), soit de faire des prévisions à court, moyen et long terme (*forecast*).

La modélisation numérique s'appuie sur des données de bathymétrie et de forçages météo-océaniques (voir **fiche « vents » et « pression atmosphérique »**), et sur des équations physiques. Ces équations physiques sont à adapter en fonction des phénomènes physiques prédominants dans le domaine étudié. Il existe différentes familles de modèles dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant, la liste des exemples de codes de calcul n'étant pas exhaustive.

Domaine	Profondeur	Phénomènes prépondérants	Exemples de codes fréquemment utilisés
Hauturier	Profondeur infinie	Génération par le vent et propagation	WaveWatch III (WW3) MFWAM
Côtier	Inférieure à une demi-longueur d'onde (mais sans déferlement)	Réfraction par les fonds et génération par le vent, Théorie linéaire de la houle	SWAN, TOMAWAC WaveWatch III (WW3)
Littoral	Faible profondeur	Déformation de la houle (<i>shoaling</i>) et déferlement Sur la plage : <i>set-up</i> et jet de rive Phénomènes de transformation hautement non linéaires ; équations complexes à résoudre	SWASH, X-Waves
Portuaire	Faible profondeur	Interactions houle/ouvrages : diffraction, réflexion, Équations à résolution de phase	ARTEMIS, PHAROS, REFONDE
Estuarien	Faible profondeur	Interactions avec le débit du fleuve (courant)	TELEMAC / TOMAWAC



ETATS DE MER

Modèles et bases de données fréquemment utilisés

Les codes de calculs et les bases de données évoluent rapidement dans le temps. Il existe une grande variété de modèles avec différentes emprises (spatiale et temporelle) et différentes résolutions spatiales (verticale, horizontale). Météo-France, par exemple, dispose de plusieurs modèles de prévision des états de mer (mer du vent et houles) complémentaires et emboîtés et utilisés afin d'améliorer l'anticipation des submersions marines, dans le cadre des vigilances vagues submersion (VVS) :

- **Le modèle de prévision de vagues MFWAM** : forcé en entrée par des vents à 10 m issus des modèles de prévision numérique du temps (ARPEGE, AROME et IFS), avec différentes configurations régionales ou globales et assimilation de données d'observation spatiale. La physique des vagues est prise en compte dans le but de modéliser le plus fidèlement possible les conditions de mer. Les prévisions sont régulièrement validées par comparaison à des observations indépendantes (bouées houlographiques)²
- **Le modèle de prévision de vagues à hautes résolution** : modèle co-développé par une équipe internationale dans le cadre du projet HOMONIM (historique, observation, modélisation des niveaux marins)³. Il repose sur le code de calcul WW3 et est particulièrement utilisé pour les prévisions en météorologie marine par le Shom et Météo-France dans le cadre de dispositif de Vigilance Vagues Submersions marines (VVS).

De par sa physique et la maille de sa grille de calcul, il est mieux adapté à la description de l'état de mer en zone côtière que le modèle MFWAM : intégration de différents processus côtiers (paramétrisation unifiée du déferlement des vagues du large à la côte, réflexion à la côte, réfraction due aux courants et à la bathymétrie et la friction sur le fond).

D'autres modèles existent :

- **Le projet Modélisation et Analyse pour la Recherche Côtière (MARC)**⁴, coordonné par le LOPS (Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale) de l'Ifremer et le Shom, rassemble des efforts de démonstration pré-opérationnelle de modèles numériques. Ce système s'adresse à un large public souhaitant obtenir des prévisions à court terme de l'environnement côtier.

La simulation numérique permet de constituer des bases de données dont les plus utilisées en France sont listées ci-dessous (liste non exhaustive) :

- **Resource Code Marine data base** : projet financé par ERANET dont un des objectifs est de produire une base de données des états de mer couvrant le plateau continental Européen, de Gibraltar aux îles Féroé, de 1994 à 2021 (<https://www.emec.org.uk/projects/ocean-energy-projects/tool-development/resourcecode-project/>). Ce projet prend la suite de la base de données HOMERE⁵.
- **Base de données ANEMOC** (Atlas numérique des états de mer océaniques et côtiers) le long des côtes Atlantique, Manche, Mer du Nord, Méditerranée, Réunion et Antilles sur la période 1979-2010 (<https://www.cdata.cerema.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search;jsessionid=A9AFE40E46F78DD96A3DD70543FB6835#/metadata/ef16f169-e208-4549-948b-4b01c27d1508>).

² https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=132&id_rubrique=51

³ <https://www.shom.fr/sites/default/files/2019-11/homonim.pdf>

⁴ <https://marc.ifremer.fr/>

⁵ HOMERE est une base de données de rejeu d'états de mer, réalisée à l'aide du modèle WAVEWATCH III (version 4.11) sur une grille déstructurée couvrant la zone Manche - Golfe de Gascogne (NORGAS-UG) et portant sur la période 1994 – 2016 (23 années).



ETATS DE MER

- **La base de données Bobwa-H** : conditions de vagues dans le golfe de Gascogne sur la période 1958-2002 (pas de temps infra-journalier), constituée dans le cadre d'un projet de recherche associant le BRGM et CNRM-GAME (<https://bobwa.brgm.fr/>).
- **La base de données HYWAT** : Il s'agit d'un rejeu d'états de mer qui s'étend sur une période de 40 ans (1979-2019), créé à l'occasion du Programme d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) d'intention de l'Agglomération Saint-Malo (Seyfried et al., en préparation), qui s'appuie sur le modèle spectral d'état de mer WAVEWATCH III®.

Traitements nécessaires

Les mesures in situ et les mesures à plus grandes échelles permettent de caler et valider les simulations numériques, qui elles-mêmes viennent alimenter des bases de données.

De longues séries d'états de mer sont aussi obtenues, soit issues des mesures à l'emplacement des instruments (et alors souvent incomplètes ou irrégulières), soit issues des réanalyses numériques (*hindcast*) en tout point du domaine de simulation. Ces séries peuvent alors être analysées à l'aide de traitements statistiques pour en tirer deux types de caractérisations des conditions d'états de mer* :

- Les **conditions usuelles** (ou opérationnelles), souvent appelées climats de houle, basées sur une classification des valeurs de la série temporelle ;
- Les **conditions extrêmes**, qui sortent du champ des valeurs observées ou simulées et visent à estimer, par extrapolation probabiliste, les états de mer de très faible probabilité d'occurrence.

Analyse des conditions usuelles (climat de houle)

Sur la base d'une série de paramètres d'un état de mer (hauteur significative, période de pic, période moyenne, direction prédominante des vagues, etc.) il est possible d'établir plusieurs représentations décrivant un climat de houle. Ces représentations sont établies sur des durées d'observation variables : par exemple sur plusieurs mois pour analyser les effets saisonniers, sur plusieurs années pour établir un climat moyen, ou encore sur les seules conditions de tempêtes (**Figure 6**).

Les représentations les plus courantes sont les suivantes :

- **Les histogrammes** (**Figure 7**) de hauteur significative* des vagues, période moyenne, période de pic, direction prédominante des vagues, etc. Pour chaque paramètre, un ensemble de classes de valeurs est défini et, à partir des séries mesurées d'états de mer*, le nombre d'événements par classe est estimé (et donc la probabilité empirique d'occurrence). L'analyse peut être restreinte à une période particulière de l'année (afin d'analyser les effets saisonniers par exemple), ou encore à un intervalle de directions des vagues incidentes. En complément, les histogrammes sont souvent associés à une courbe de probabilités de dépassement pour définir la valeur atteinte X % du temps (fréquences cumulées) (**Figure 7**).



ETATS DE MER

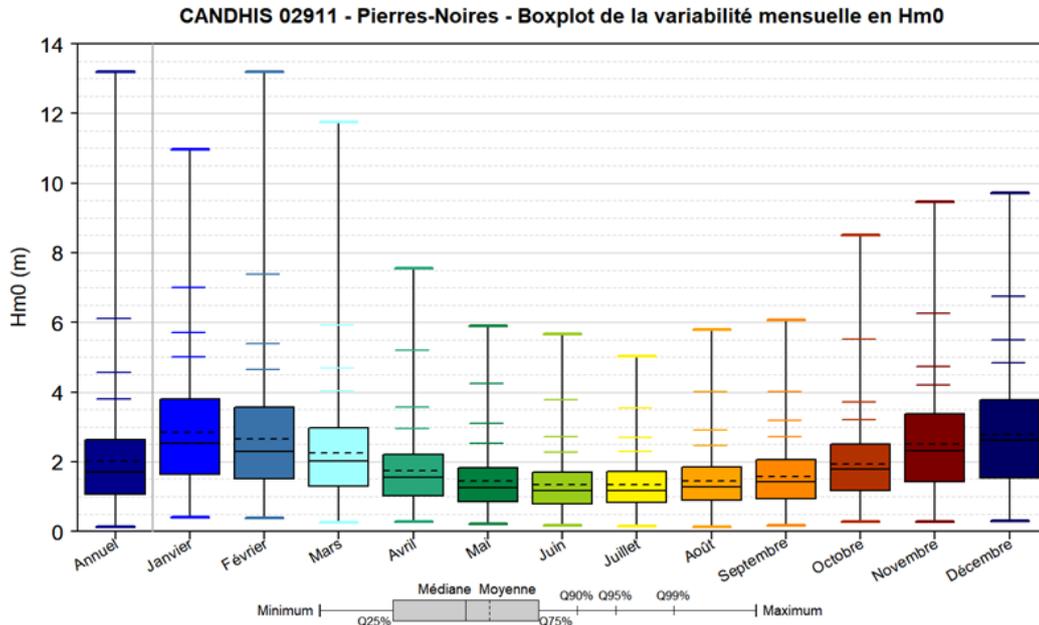


Figure 6 - Box plot de la variabilité mensuelle en Hm0 à la bouée des Pierres-Noires (source : Artelia).

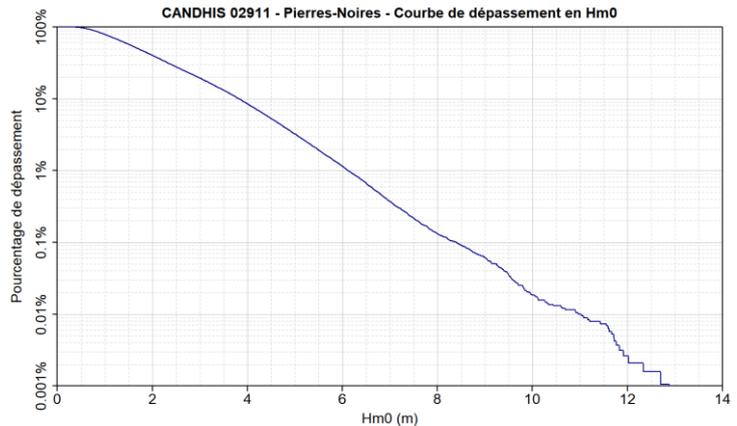
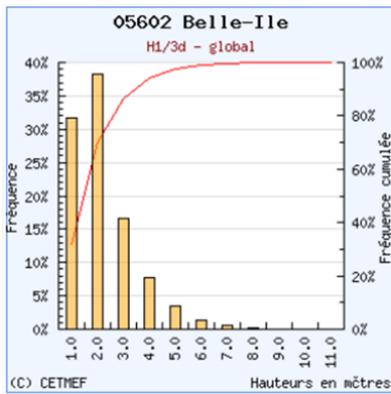


Figure 7 - Histogramme des fréquences et courbe de dépassement de la hauteur significative des vagues à Belle-Île (source : Candhis) et courbe de dépassement en H_{m0} au Pierres-Noires (source : Artelia)

- Les corrélogrammes** entre deux grandeurs (Figure 8) (typiquement la hauteur des vagues et la période) : sous forme de tableau ou de nuage de points, ils permettent de quantifier le nombre d'occurrences associées à un couple de valeurs. Comme pour les histogrammes, l'analyse peut être restreinte à une période particulière de l'année (afin d'analyser les effets saisonniers par exemple), ou encore à un intervalle de directions des vagues incidentes. Ce type de représentation permet, par exemple, de sélectionner un nombre limité de conditions d'entrée de vagues incidentes pour une étude.



ETATS DE MER

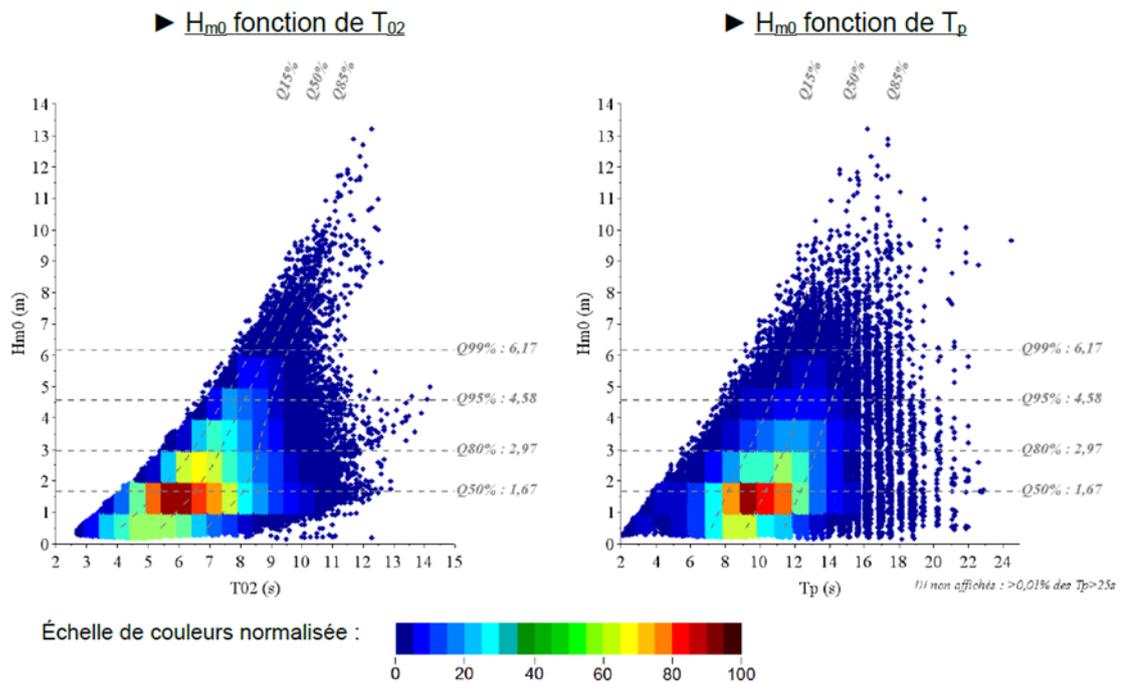


Figure 8 - Exemple de corrélogrammes sous forme de nuage de points entre la hauteur significative spectrale (H_{m0}) et respectivement la période moyenne (T_{02}) et la période pic (T_p), cas de la bouée des Pierres Noires (source : Candhis).

- Les roses des vagues (Figure 9), semblables aux roses des vents (voir *fiche « vents »*) permettent d'observer en même temps les directions les plus fréquentes et les hauteurs de vagues associées. L'analyse peut être restreinte à une période particulière de l'année. Différents systèmes de vagues peuvent alors être séparés.

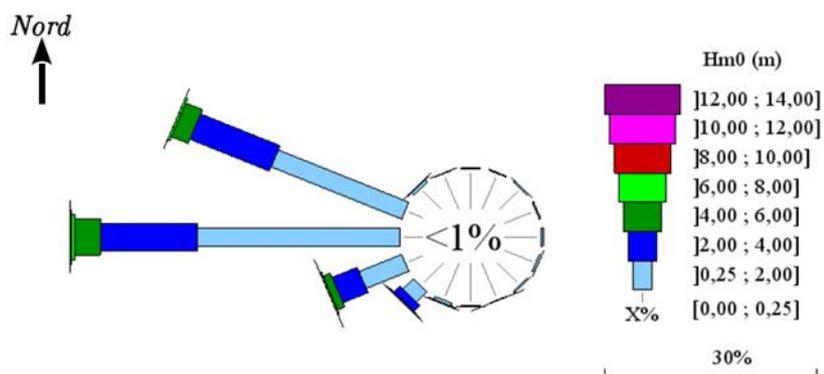


Figure 9 - Exemple de rose des vagues, cas de la bouée des Pierres Noires (source : Candhis)



Analyse des extrêmes

L'analyse des extrêmes peut se faire par un relevé des tempêtes, ou par analyse statistique.

- **Le relevé des tempêtes** vise à répertorier les évènements marquants et à les caractériser, par le suivi des paramètres d'états de mer (hauteurs, périodes et directions) autour du pic de tempête (**Figure 10**) ou encore le spectre directionnel de variance au moment du pic (**Figure 4**).

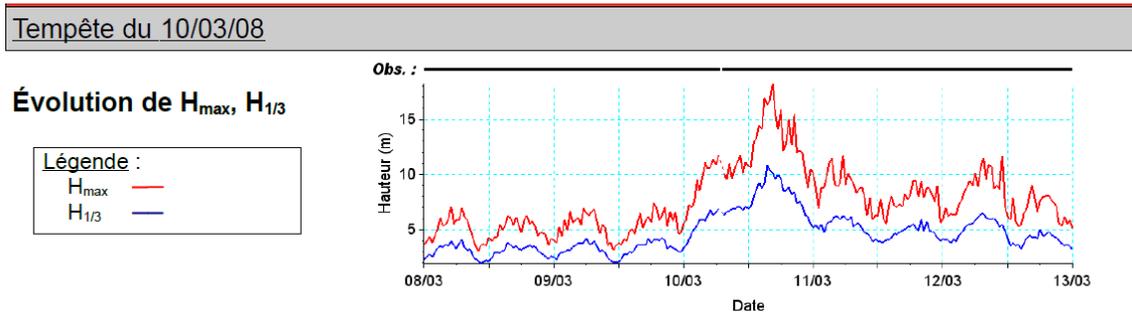


Figure 10 - Exemple d'évolution des paramètres H_{max} et $H_{1/3}$ autour d'un pic de tempête du 10 mars 2008, cas de la bouée des Pierres Noires (source : Candhis).

- **L'analyse statistique des extrêmes** (Figure 11) des données permet une extrapolation probabiliste des tempêtes. Elle repose sur la théorie des valeurs extrêmes, selon laquelle une loi de distribution théorique peut être ajustée aux observations de pics de tempête. Ainsi, la période de retour des hauteurs de vagues* (H_s typiquement), voire des périodes de vagues associées ($T_{H_{1/3}}$, T_{avg} , T_{02} , T_p , etc) sont déterminées par extrapolation. A noter que l'extrapolation peut porter sur d'autres paramètres que la hauteur des vagues, tels que l'énergie des vagues par exemple.

Niveaux de retour

Période de retour	$H_{1/3}$ (mètres)		Int. de Conf. 70% (mètres)		T_{avd} Int. Conf. 70% (secondes)	
	GPD	Loi Exp.	GPD	Loi Exp.	GPD	Loi Exp.
5 ans	10,81	10,74	10,05 à 11,43	10,27 à 11,23	11,43 à 13,62	11,39 à 13,56
10 ans	11,73	11,60	10,64 à 12,68	11,04 à 12,19	12,00 à 14,38	11,92 à 14,28
20 ans	12,65	12,47	11,16 à 13,99	11,80 à 13,15	12,57 à 15,16	12,45 à 15,00
50 ans	13,90	13,60	11,78 à 15,86	12,82 à 14,41	13,34 à 16,23	13,16 à 15,98

Ajustement statistique :

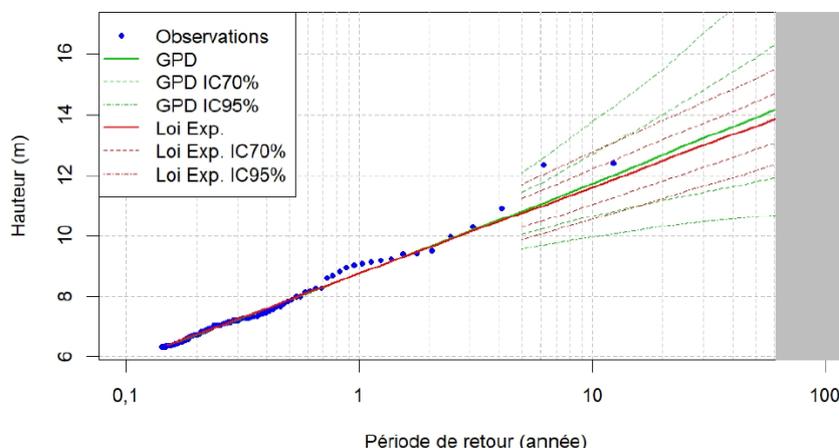


Figure 11 - Exemple d'analyse des extrêmes, cas de la bouée des Pierres Noires (source : Candhis)



ETATS DE MER

Cette analyse peut se faire tous secteurs de provenance des vagues confondus ou pour un secteur de provenance particulier. La principale limite repose sur la durée d'observation. Plusieurs années d'observation sont nécessaires pour avoir des premiers résultats représentatifs et ces derniers sont généralement admis jusqu'à des périodes de retour allant de 2 à 5 fois la durée d'observation (par exemple pour cinq ans d'observation, l'extrapolation est exploitable jusqu'aux périodes de retour 10 à 25 ans).

Incertitudes et limites

L'incertitude et les limites se retrouvent au niveau du principe de calcul des paramètres d'états de mer*, sur la mesure, sur la modélisation, sur le traitement et l'analyse de la donnée. Il n'existe pas de quantification exacte de ces incertitudes.

- **L'incertitude sur le calcul des paramètres d'état de mer*** est inversement proportionnelle à la durée d'observation limitée. On considère que cette incertitude est négligeable pour des paramètres établis à partir de 20 à 30 minutes d'élévation de la surface libre. Certains paramètres restent cependant à considérer avec précaution du fait de leur extrême variabilité : Par exemple H_{max} , très dépendant de la localisation du point de mesure et de la durée d'observation ; et T_p , très variable en présence de plusieurs systèmes de vagues en concurrence.
- **L'incertitude sur la mesure** in situ est très dépendante du capteur, de l'environnement et des états de mer. Les limites d'utilisation des matériels ne sont pas toujours clairement établies par les fabricants. Par exemple le capteur de pression (mesure uniquement de paramètres non directionnels) et l'ADCP (mesure des paramètres directionnels et non directionnels) ont une fréquence de coupure liée à la profondeur. La mesure par ADCP peut aussi facilement être perturbée par le trafic maritime ou les tempêtes (formation de bulles faisant écran).

La bouée de mesure dédiée type DATAWEL ou TRIAXYS est souvent considérée comme le matériel de référence. Mais le courant, le dimensionnement de la ligne de mouillage ou la perturbation du mode de transmission lors de tempêtes (particulièrement pour la mesure par GPS) peuvent dégrader les données.

Pour tout ce qui est instrument de mesure nécessitant un support (perche à houle, capteur acoustique, radar filoguidé...), il faut s'assurer que le support a une influence négligeable sur les vagues.

Les radars type « navigation » sont plutôt déconseillés pour avoir une information précise des états de mer. Pour les radars HF/VF, l'erreur sur les hauteurs de vagues peut atteindre 25 % et la plage de hauteurs explorée est dépendante du choix de la résolution spatiale fixée. Il peut donc être difficile d'avoir une information à la fois sur la climatologie moyenne et les extrêmes.

Concernant la mesure par satellites, pour l'altimètre, les données sont peu exploitables à proximité immédiate des côtes et la précision augmente avec les hauteurs de vagues. Le système SAR (radar à synthèse d'ouverture en mode vague) ne permet pas, quant à lui, de voir les courtes longueurs d'ondes, cette difficulté étant en partie résolue par le système SWIM (Surface Waves Investigation and Monitoring).



ETATS DE MER

L'incertitude sur les modèles comprend l'incertitude liée aux mesures (qui ont servi au calage des modèles), à la bathymétrie, aux conditions météo-océaniques (vent), et à la modélisation des processus non linéaires. L'étape de validation (comparaison entre les résultats du modèle et un point de mesure n'ayant pas servi au calage) est donc très importante pour quantifier la capacité du modèle à reproduire les états de mer. Il est admis que l'erreur des modèles est de l'ordre de 10 % sur les hauteurs et périodes pour les événements courants (plus pour les directions et étalement directionnels), et elle augmente pour les événements de tempêtes (jusqu'à des 20 ou 30%).

- **Les incertitudes liées aux traitements de la donnée** (climatologie moyenne, analyse des extrêmes), comprennent évidemment les incertitudes liées à la donnée, mais aussi l'influence des lacunes dans la donnée. L'analyse annuelle peut être faussée si une saison est plus présente qu'une autre ou si le nombre d'années disponibles est limité (en dessous 3 à 5 ans). L'analyse des extrêmes peut être faussée si tous les événements tempêtes n'ont pas été enregistrés.

Organisme(s) clés / en jeu

Données de mesures in situ des états de mer

Les données de mesure de houle *in situ* sont disponibles sur le territoire français *via* Candhis (Centre d'Archivage National des Données de Houle In Situ), l'observatoire côtier national de mesure des états de mer (<https://candhis.cerema.fr/>). L'observatoire est géré par le Cerema et regroupe une trentaine de partenaires. Les données sont disponibles en temps réel ou en temps différé (données contrôlées et validées).

Au niveau européen, les données sont centralisées par :

- Le projet européen Copernicus MEMS, dédié à l'océanographie opérationnelle avec l'assimilation de données in situ et satellites pour la mise en œuvre de modèles de prévision et de réanalyses en temps différé. Les données sont accessibles par ftp via les plateformes : <https://resources.marine.copernicus.eu/products> ou <http://www.marineinsitu.eu/>.
- Le projet européen EMODnet, plus particulièrement dédié à la surveillance en continu de l'environnement maritime (lien avec la DSCMM). L'ensemble des données, dont les données des états de mer est mis à disposition via le portail internet suivant : <https://portal.emodnet-physics.eu/>.

Au niveau international, Ocean-Ops⁶ est le service opérationnel d'observation in situ de l'OMM (Organisation météorologique mondiale) et de l'Unesco (via GOOS (Global Ocean Observing system)). Ocean-Ops se décline pour les observations de surface dans le programme DBCP (data buoy coopération panel) au niveau international et dans le programme E-SURFMAR au niveau européen. Le DBCP et E-SURFMAR coordonnent à leur échelle l'utilisation des données de bouées autonomes pour observer les conditions atmosphériques et océanographiques au-dessus des océans. Ces programmes sont portés par

⁶ <https://www.ocean-ops.org/board>
Version février 2024



ETATS DE MER

les organismes de prévision de météorologie marine. Météo-France représente la France au DBCP et à E-SURFMAR. Les données Candhis sont accessibles via le portail : <https://www.ocean-ops.org/board>.

D'autres organismes (universités, etc.) peuvent avoir installé, pour un projet de recherches ou autre, et de manière plus ou moins durable, des houlographes, par exemple à proximité de centrales nucléaires ou de plates-formes pétrolières. Il peut donc être intéressant de se rapprocher de ces organismes afin d'obtenir des données locales.

Données de modélisation des états de mer

Des organismes institutionnels produisent, développent et mettent à disposition des bases de données de jeux d'état de mer. En France, peuvent notamment être cités l'Ifremer (LOPS), le Shom, Météo-France, le Cerema, etc.

Pour des études locales et spécifiques, les modélisations numériques sont mises en œuvre par des bureaux d'étude, des laboratoires universitaires et des organismes publics.

Sources, vecteurs de diffusion/de porter à connaissance

Mesures

<https://candhis.cerema.fr/>

<https://donneespubliques.meteofrance.fr/>

<https://resources.marine.copernicus.eu/products>

<https://www.ocean-ops.org/board>

<https://portal.emodnet-physics.eu/>

Modèles numériques

<https://www.umr-lops.fr/Donnees/Vagues>

<https://polar.ncep.noaa.gov/waves/>

<https://resources.marine.copernicus.eu/products>

<https://resourcecode.ifremer.fr>

<https://www.cdata.cerema.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search;jsessionid=A9AFE40E46F78DD96A3DD70543FB6835#/metadata/ef16f169-e208-4549-948b-4b01c27d1508>

<https://marc.ifremer.fr/resultats/vagues>



Usages de la donnée

Risques d'inondation, PPRI submersion marine, Vigilance vagues submersion (VVS), Arrêté CAT NAT, suivi du trait de côte, dimensionnements portuaires, sécurité maritime, changement climatique, énergies marines renouvelables (EMR), loisirs nautiques

Références clés

AIRH / AIPCN, 1986. Paramètres des états de mer. Supplément au bulletin n°52, janvier 1986.

Fiches synthétiques de mesure des états de mer - MAJ 2021 <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/fiches-synthetiques-mesure-etats-mer-maj-2021>

Tome 1 – Mer du Nord, Manche et Atlantique

Tome 2 – Méditerranée

Tome 3 – Outre-Mer

Pour aller plus loin

Ardhuin F, 2018. « Observer les états de mer par télédétection : nouvelles techniques et applications, nouveaux satellites ». XVe JNGCGC. https://www.paralia.fr/jngcgc/15_101_ardhuin.pdf.

Goda, Y. (2010). Random seas and design of maritime structures (Vol. 33). World Scientific Publishing Company

Seyfried, L., Michaud, H., Pasquet, A., Leckler, F., Leballeur, L., Lopez, G. (en préparation): 40- years of regional Storm Surge and Wave Hindcast using ERA5 reanalysis: Application to coastal flood risks along Atlantic French coast

Fiches en lien

Fiche « Vent »

Fiche « Pression atmosphérique »



ETATS DE MER

