Rapport d'étude

Évaluation des risques de vent et vagues extrêmes

Lot 2 - AO6 Méditerranée Zone D

Version 2.0 du 14/04/2023

- page laissée intentionnellement vide -

Documents de référence antérieurs

	Intitulé	Référence	Date	Version
DR1	Climatologie de visibilité de parcs éoliens fictifs en Méditerranée	visibilité_DGEC_Mediterranee_v2	20/01/21	2.0
DR2	Analyse du vent sur le bassin méditerranéen	VentLotPreliminaire_DGEC_AO6-Mediterranee_V20210118	18/01/21	2.0
DR3	Projet de parc éolien off shore Note technique Lots1, 2 et 3	[Chatel et al., V1, 2021]	21/05/21	1,0

Évolutions successives

Référence	Date	Version	Évolution
DGEC_AO6_Méditerranée_ZoneD_Lot2_Rapport_V1_20230308.pdf	08/03/23	V1	Création
DGEC_AO6_Méditerranée_ZoneD_Lot2_Rapport_V2.0_20230414	14/04/23	V2	*P*récisions sur les états de mer (suite email du CEREMA du 03/03/23)

Signatures

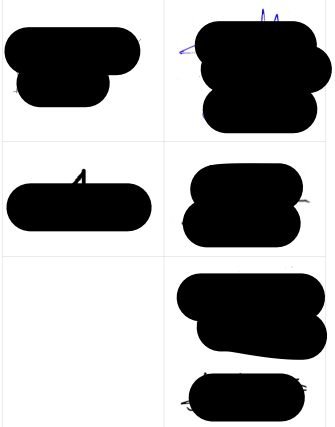
	Nom	Service	Signature
Rédacteur(s)	Alice Dalphinet Isabelle Derrien Gérard Doligez Bruno Joly Thierry Novel Nathalie Rouchy	Météo-France DIRO DIROP/MAR	
Relecteur(s)	Raphaël Legrand	Météo-France DSM/CS/DC	
Approbateur(s)	Christophe Jacolin	Météo-France D2C/DV/PRO	

Table des matières

1 Objectifs et synthèse de l'étude 7
2 Recherche de tempêtes 8
2.1 Méthodologie 8
2.1.1 Climat de la zone et typologie des vents 8
2.1.2 Données d'entrée 9
2.1.3 Critères de sélection des tempêtes et traitement des paramètres 10
2.2 Tableau des tempêtes analysées 11
2.3 Liste des 7 tempêtes retenues pour les rejeux de vagues 13
3 Rejeux de situations 14
3.1 Situation des 16 et 17/12/97 14
3.1.1 Rappel conditions météorologiques 14
3.1.2 Analyse des résultats 14
3.1.3 Caractéristiques principales 17
3.2 Situation des 3 et 4/12/03 18
3.2.1 Rappel conditions météorologiques 18
3.2.2 Analyse des résultats 18
3.2.3 Caractéristiques principales 20
3.3 Situation des 26 et 27/12/08 21
3.3.1 Rappel conditions météorologiques 21
3.3.2 Analyse des résultats 21
3.3.3 Caractéristiques principales 23
3.4 Situation du 24/01/09 24
3.4.1 Rappel conditions météorologiques 24
3.4.2 Analyse des résultats 24
3.4.3 Caractéristiques principales 26
3.5 Situation du 06/03/13 27
3.5.1 Rappel conditions météorologiques 27
3.5.2 Analyse des résultats 27
3.5.3 Caractéristiques principales 29
3.6 Situation du 06/03/17 30
3.6.1 Rappel conditions météorologiques 30
3.6.2 Analyse des résultats 30
3.6.3 Caractéristiques principales 32
3.7 Situation du 01 et 02/03/18 33
3.7.1 Rappel conditions météorologiques 33
3.7.2 Analyse des résultats 33
3.7.3 Caractéristiques principales 35
4 Principaux résultats 36
Annexes 38

Index des figures

Illustration 2.1 : Principaux régimes de vent sur le bassin méditerranéen occidental.....8
Illustration 2.2: Localisation de la zone d'étude D (zone bleue) par rapport aux points de grille des deux réanalyses : ERA5 (croix rouge) et Med-WAV (points noirs).....9
Illustration 3.1: Hauteur significative de la mer totale (Hs, en mètres) lors de la tempête des 16 et 17/12/97 (valeur maximale intégrée sur la période comprise entre le 16 déc. à 03 UTC et le 17 déc. à 15 UTC.....16
Illustration 3.2: Evolution temporelle de Hs au point de grille 43,01° N 4,63° E – tempête des 16 et 17/12/97 17
Illustration 3.3: Hauteur significative de la mer totale (Hs, en mètres) lors de la tempête des 3 et 4/12/03 (valeur maximale intégrée sur la période comprise entre le 3 déc. à 09 UTC et le 4 déc. à 21 UTC).....19
Illustration 3.4: Evolution temporelle de Hs au point de grille *43,01° N 4,63° E* – tempête des 3 et 4/12/03. .20
Illustration 3.5: Hauteur significative de la mer totale (Hs, en mètres) lors de la tempête des 26 et 27/12/08 (valeur maximale intégrée sur la période comprise entre le 26 déc. à 03 UTC et le 27 déc. à 21 UTC).....22
Illustration 3.6: Evolution temporelle de Hs au point de grille *43,01° N 4,63° E* – tempête des 26 et 27/12/08 23
Illustration 3.7: Hauteur significative de la mer totale (Hs, en mètres) lors de la tempête du 24/01/09 (valeur maximale intégrée sur la période comprise entre le 24 jan. à 03 UTC et le 25 déc. à 06 UTC).....25
Illustration 3.8: Evolution temporelle de Hs au point de grille *43,01° N 4,63° E* – tempête du 24/01/09.....26
Illustration 3.9: Hauteur significative de la mer totale (Hs, en mètres) lors de la tempête du 06/03/13 (valeur maximale intégrée sur la période comprise entre le 5 mars à 15 UTC et le 07 mars à 03 UTC).....28
Illustration 3.10: Evolution temporelle de Hs au point de grille *43,01° N 4,63° E*– tempête du 06/03/13.....29
Illustration 3.11: Hauteur significative de la mer totale (Hs, en mètres) lors de la tempête du 06/03/17 (valeur maximale intégrée sur la période comprise entre le 6 mars à 00 UTC et le 7 mars à 03 UTC).....31
Illustration 3.12: Evolution temporelle de Hs au point de grille *43,01° N 4,63° E* – tempête du 06/03/17.....32
Illustration 3.13: Hauteur significative de la mer totale (Hs, en mètres) lors de la tempête du 01 et 02/03/18 (valeur maximale intégrée sur la période comprise entre le 28 fév. à 18UTC et le 2 mars à 06 UTC).....34
Illustration 3.14: Evolution temporelle de Hs au point de grille *43,01° N 4,63° E* – tempête du 01 et 02/03/18 35

Liste des tableaux

Tableau 2.1: Liste des tempêtes analysées 12
Tableau 2.2: Liste des tempêtes sélectionnées pour être rejouées 13
Tableau 3.1: Caractéristiques principales de la situation des 16 et 17/12/97 17
Tableau 3.2: Caractéristiques principales de la situation des 3 et 4/12/03 20
Tableau 3.3: Caractéristiques principales de la situation des 26 et 27/12/08 23
Tableau 3.4: Caractéristiques principales de la situation du 24/01/09 26
Tableau 3.5: Caractéristiques principales de la situation du 06/03/13 29
Tableau 3.6: Caractéristiques principales de la situation du 06/03/17 32
Tableau 3.7: Caractéristiques principales de la situation des 01 et 02/03/18 35

1 Objectifs et synthèse de l'étude

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 au Nord-Ouest de la Méditerranée occidentale.

Pour cela, nous avons utilisé pour les paramètres atmosphériques, la réanalyse européenne ERA5 (Hersbach et al., 2018, Hersbach et al., 2020) qui fournit des estimations horaires d'un grand nombre de variables climatiques atmosphériques, terrestres et océaniques. Elles couvrent la Terre à une résolution de 0.25 degré de latitude et de longitude, soit une résolution d'une vingtaine de kilomètres en longitude sur la zone d'intérêt (28 km en latitude), pour une période allant de 1959 à aujourd'hui. ERA5 combine de grandes quantités d'observations historiques grâce à des systèmes avancés de modélisation et d'assimilation de données. ERA5 est disponible sur le Climate Data Store du programme européen Copernicus[1].

Pour les paramètres marins, les données de la réanalyse du Mediterranean Sea Waves forecasting system (Med-WAV[2]) ont été utilisées. Elles couvrent la mer Méditerranée et jusqu'à 18,125 W de longitude dans l'océan Atlantique à une résolution horizontale de 1/24°, soit une résolution de 4,6 km de latitude et d'environ 3,4 km de longitude sur la zone d'étude, sur une période de 1993 à 2020.

Plusieurs critères ont été employés pour effectuer la sélection des tempêtes. Ils sont décrits en §2.1.3.

Les tempêtes majeures ayant touché la zone sont identifiées et font l'objet d'une analyse plus approfondie via les fiches tempêtes (liste en annexe) qui accompagnent le présent rapport.

Parmi cet échantillon de tempêtes majeures, 7 tempêtes marquantes ont été sélectionnées pour être rejouées par un modèle d'état de la mer afin de fournir à la DGEC des jeux de données de vagues simulées couvrant à peu près tous les possibles sur la zone considérée. Les critères de sélection sont indiqués section 2.1.3 .

Les réanalyses utilisées permettent de représenter fidèlement les épisodes même les plus extrêmes. Les observations ont été également utilisées pour caractériser les tempêtes. On peut par exemple citer les ordres de grandeur suivant pour les violentes rafales qui ont été relevées :

- de secteur Est avec par exemple, relevés à Sète (34), 134 km/h le 16/12/1997, ou encore 116 km/h le 4/12/2003,
- en régime de Nord-Ouest (Tramontane), avec des valeurs un peu moins fortes avec par exemple 115 km/h observée au sémaphore de l'Espiguette (30) le 06/03/2017.

On observe sur la zone d'étude des hauteurs significatives (H1/3[3]) maximales pouvant dépasser les 6,5 m (jusqu'à 6,8 m mesurés à la bouée de Sète) essentiellement dans des situations d'Est à Sud-Est.

En situation de Nord-Ouest, les hauteurs significatives maximales de l'ordre de 4 m à 5 m.

1 https://cds.climate.copernicus.eu
2 https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-MED-QUID-006-012.pdf
3 H1/3 : hauteur de mer significative, moyenne des hauteurs (mesurées entre crête et creux) du tiers des plus fortes vagues.

2 Recherche de tempêtes

2.1 Méthodologie

2.1.1 Climat de la zone et typologie des vents

Le climat et la typologie des vents du bassin méditerranéen occidental sont décrits dans le lot 1 de cette même zone.

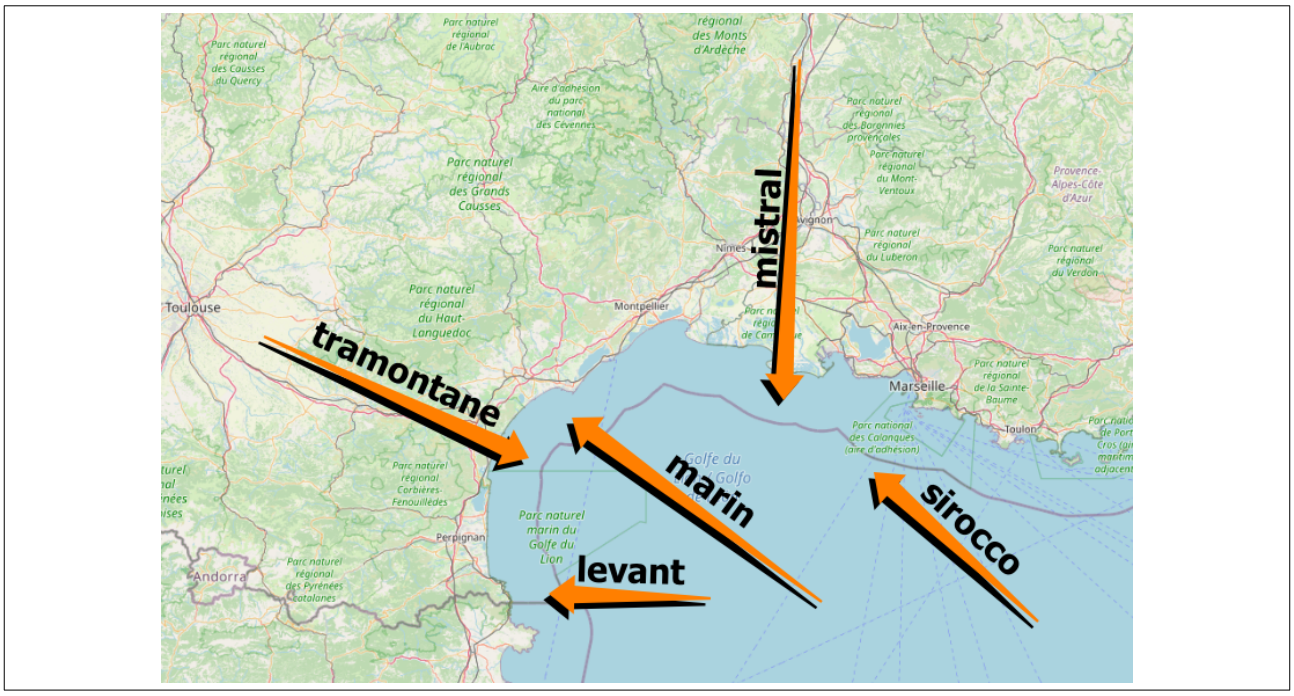


Illustration 2.1 : Principaux régimes de vent sur le bassin méditerranéen occidental

Dans la partie Nord-Ouest de la Méditerranée occidentale, les conditions de temps changent rapidement au passage des dépressions.
Les coups de vent (de Nord-Ouest à Ouest par mistral et tramontane et Sud-Est à Est par vent marin) sont fréquents dans le golfe du Lion, en particulier de novembre à avril.

Les vents forts provenant d'autres directions sont rares et de courte durée.

On peut classer les perturbations de la Méditerranée occidentale en 3 types principaux :

- passage d'une perturbation sur le Nord-Ouest du bassin avec cyclogenèse sur le golfe de Gênes
- épisode de vent d'Est sur le Nord du bassin avec cyclogenèse vers les îles Baléares
- grand flux de Sud-ouest perturbé sur le bassin occidental

Les perturbations sur le Nord-Ouest du bassin avec cyclogenèse sur le golfe de Gênes génèrent des vents violents par mistral et tramontane et des états de mer très forte à grosse, limités à l'Ouest par les Baléares et à l'Est par la Corse.

2.1.2 Données d'entrée

Les données horaires de la réanalyse du Mediterranean Sea Waves forecasting system (Med-WAV) ont été utilisées pour les paramètres marins sur la zone d'intérêt, sur une période de 1993 à 2020. Cette réanalyse d'état de mer est forcée par des vents de réanalyse ERA5 à 10 m au-dessus de la surface de la mer.

La réanalyse est disponible sur le Copernicus Marine Service du programme européen Copernicus[4].

Des données horaires de la réanalyse ERA5 ont été utilisées pour les données de vent sur la période commune de disponibilité de **1993 à 2019**. Cette période de 26 ans est assez longue pour observer des événements rares (plusieurs épisodes avec des rafales supérieures à 110 km/h et des hauteurs significatives de mer totale dépassant 6 m comme indiqué en § 1).

La zone d'étude est matérialisée par le polygone bleu. Les réanalyses ont été extraites sur une zone rectangulaire englobant la zone d'étude.

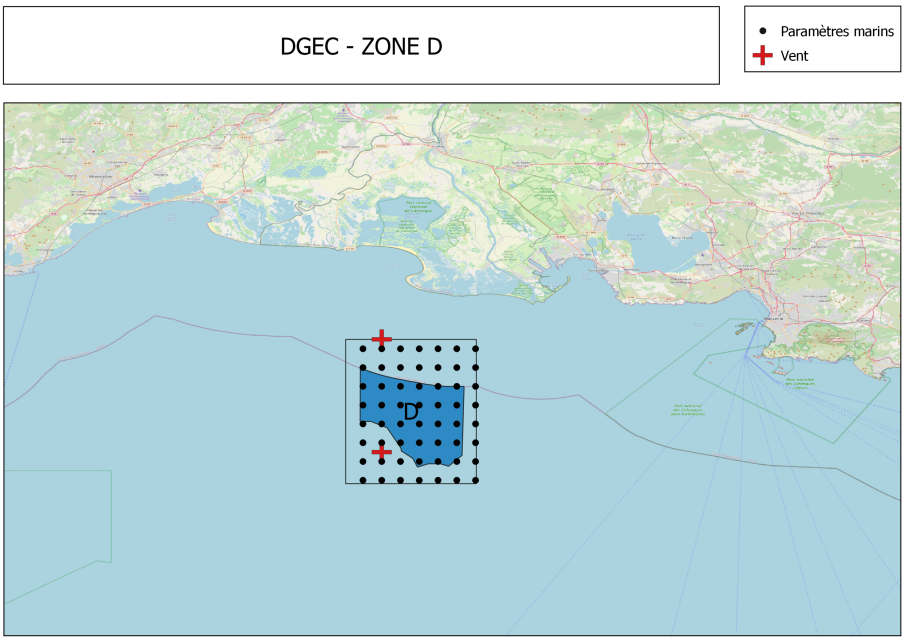


*Illustration 2.2: Localisation de la zone d'*étude D (zone bleue) par rapport aux points de grille des deux réanalyses : ERA5 (croix rouge) et Med-WAV (points noirs).

Dans le cas d'étude de la zone D, 56 points Med-WAV sont traités pour les paramètres marins et 2 points ERA5 pour le vent.

4 https://data.marine.copernicus.eu/product/MEDSEA_MULTIYEAR_WAV_006_012/description

2.1.3 Critères de sélection des tempêtes et traitement des paramètres

La méthode revient à une recherche d'extrêmes à partir d'un échantillon multi-paramètres et multi-sources.

Les tempêtes ont été sélectionnées en prenant en compte les paramètres à la fois atmosphériques et marins:

- valeur maximale quotidienne de la force du vent moyen
- valeur maximale quotidienne de la hauteur significative de la mer du vent
- valeur maximale quotidienne de la hauteur significative de la mer totale
- valeur maximale quotidienne de la hauteur significative de la houle

La sélection des tempêtes se fait au pas de temps quotidien, ce qui signifie que l'on considère la valeur maximale du paramètre sur la journée. Le calcul a également été fait au pas de temps tri-horaire. Les résultats similaires ont permis de valider la méthode quotidienne.

Les paramètres marins et atmosphériques sont traités sur un domaine englobant la zone d'étude (zone rectangulaire dans Illustration 2.2).

Les valeurs maximales sont déterminées pour chacun des paramètres d'abord sur chacun des points du domaine, puis la valeur maximale quotidienne sur l'ensemble des points du domaine est calculée au pas de temps quotidien. Ensuite, à partir de ces valeurs maximales, un classement des valeurs est calculé pour attribuer un rang à chaque épisode et pour chaque paramètre.

Dans le cas spécifique de l'AO6-Méditerranée Zone D, à partir de ces valeurs de rang, la sélection des tempêtes décrites dans ce lot 2 est déterminée selon les critères suivants :

Recherche des dates pour lesquelles :

> le rang de sévérité de la force du vent moyen était inférieur ou égal à 40
>
> OU
>
> au moins l'un des rangs de sévérité de la mer du vent, de la mer totale et de la houle totale était inférieur ou égal à 40

Les tempêtes sont choisies de manière à avoir une couverture exhaustive et variée des situations météorologiques possibles.

Cette liste de dates définies de façon plutôt objective est croisée avec d'autres inventaires de dates de tempêtes (www.tempêtes.meteo.fr ou http://fichetempete.brgm.fr/pages/), mais aussi avec une analyse de données observées (bouées du réseau CANDHIS) afin de valider, hiérarchiser et sélectionner les dates de tempêtes les plus pertinentes parmi celles issues de la méthodologie décrite ci-dessus.

Il faut noter que les valeurs de hauteur de mer significative issues des réanalyses et des H1/3 mesurées aux bouées sont souvent similaires. Néanmoins les valeurs des réanalyses sont parfois supérieures aux

observations pour certaines dates. Ceci s'explique par le fait qu'il s'agit d'une valeur maximale quotidienne sur l'ensemble de la zone.

Pour la zone en question et pour décrire au mieux la diversité des tempêtes sur la zone, il est décidé de choisir des tempêtes couvrant trois catégories de situations possibles :

- des tempêtes d'Est/Sud-Est où le vent et la mer sont majeurs. Il s'agit du cas le plus fréquent pour les tempêtes en Méditerranée.
- une tempête avec exclusivement du vent lors d'un fort épisode de tramontane, sans état de mer significatif.
- des tempêtes caractérisées par une mer croisée et des hauteurs de vagues significatives.

Les dates sélectionnées couvrent ainsi une grande partie du panel possible de tempêtes pouvant se produire sur la zone.

2.2 Tableau des tempêtes analysées

La force du vent est exprimée en Beaufort (Bf- échelle détaillée en section 8.1 de [Chatel et al. V1, 2021]).

Les directions de vent sont exprimées en secteurs d'où vient le vent : N=nord, S=sud, W=ouest, E=est.

Les vents maximaux 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.

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

Événements	Vent max. Zone		Commentaires[5]
	Dir.	Force (Bf)	
16 et 17/12/97	ESE	10	*Contraste entre un puissant anticyclone sur l'Europe centrale et une vaste dépression au large du Portugal engendrant un flux d'Est-Sud-Est très rapide. Rafale de 180 km/h enregistrée au sémaphore de Leucate (11). Mer forte à très forte aux alentours de la zone ; hauteur significative de 6,8 m avec une période de 10 s mesurées à la bouée de Sète.*

5 Les hauteurs significatives mentionnées correspondent au paramètre VHM0 (Hauteur significative pour la mer totale - mer du vent et houle) et la période VTM10 (période moyenne de la mer totale d'ordre inverse) en sortie de Med-WAV

3 et 4/12/03	E	9	*Vaste système dépressionnaire sur le Sud de la France engendrant un flux d'Est très rapide sur la partie nord de la Méditerranée occidentale. Rafale de 140 km/h enregistrée au sémaphore de Leucate (11). Mer forte à très forte autour de la zone. Hauteur significative de 8,3 m enregistrée à la bouée de Banyuls avec une période de 12 s.*
20 et 21/02/04	ESE	9	*Dépression remontant le long de la côte orientale de l'Espagne générant de forts vents d'Est à Sud-Est ; rafale à 140 km/h mesurés au sémaphore de Leucate (11). Mer forte voire très forte autour de la zone ; La bouée de Sète mesure une hauteur significative de 5,4 m avec une période de 9 s.*
26 et 27/12/08	ENE	9	*Dépression se creusant et gagnant le Sud-Est de l'Espagne ; le soir du 26, elle génère la tempête Britta caractérisée par des vents forts d'Est-Nord-Est ; rafale à 112 km/h enregistrée au sémaphore du Cap Béar (66). Mer forte à très forte, temporairement grosse, autour de la zone, avec une houle d'Est-Nord-Est marquée. Une hauteur significative de 7 m avec une période de 12 s sont relevées sur la bouée de Banyuls.*
24/01/09	NW	10-11	*Tempête Klaus : dépression très creuse traversant la France d'Ouest en Est générant une tramontane exceptionnellement forte ; rafale à 191 km/h relevée au Cap Béar (66)* *Mer forte observée autour de la zone ; houle croisée de Sud*
13/03/11	ESE	8-9	*Dépression remontant des Baléares vers les côtes catalanes ; elle engendre un flux d'Est-Sud-Est rapide sur l'Ouest de la Méditerranée. Rafale à 117 km/h mesurée au sémaphore de Leucate (11). Mer très forte autour de la zone ; hauteur significative de 4,8 m enregistrée à la bouée de Leucate avec une période de 9s.*
06/03/13	E	9-10	*Dépression sur la côte Est de l'Espagne générant un flux de secteur Est rapide sur l'ouest de la Méditerranée ; rafale à 132 km/h relevée au sémaphore de Leucate (11). Mer forte à très forte autour de la zone ; une hauteur significative de 6,1 m avec une période de 10 s sont observées à la bouée de Leucate.*
24/12/13	ESE	8	*Dépression extrêmement creuse quasi stationnaire sur l'Écosse. Elle engendre un flux de Sud à Sud-Est jusque dans le delta du Rhône et le littoral du Languedoc ; rafale à 107 km/h relevée au sémaphore de Sète (34). Mer forte à très forte autour de la zone ; hauteur significative de 4,6 m enregistrée à la bouée de l'Espiguette avec une période de 9 s.*
06 et 07/03/17	WNW	7-8	*Tempête Zeus : une dépression creuse traverse le pays selon une trajectoire Nord-Ouest/Sud-Est ; elle génère des vents tempétueux d'Ouest-Nord-Ouest sur le pourtour méditerranéen ; rafale à 149 km/h enregistrée au sémaphore du Cap Béar (66).* *Mer agitée à forte autour de la zone ; hauteur significative de 2,3 m enregistrée à la bouée de Leucate avec une période de 6 s.*
01 et 02/03/18	ESE	8-9	*Dépression se creusant sur le golfe de Valence, puis se décalant vers le golfe du Lion ; elle engendre des vents d'Est-Sud-Est soutenus ; rafale à 110 km/h observée au sémaphore de Leucate (11) . Mer forte à très forte, voire grosse, autour de la zone ; hauteur significative de 6 m mesurée à la bouée de Leucate avec une période de 10 s.*

Tableau 2.1: Liste des tempêtes analysées

Ces 10 tempêtes ont été analysées de façon plus précise : cette analyse est présentée sous forme de fiches - voir liste en annexe B.

Parmi elles, 7 tempêtes ont été retenues pour être rejouées plus finement (cf sections 2.3 et 3).

2.3 Liste des 7 tempêtes retenues pour les rejeux de vagues

Les situations retenues et listées dans le tableau figurant au chapitre précédent constituent un échantillon représentatif de tempêtes ayant touché le Nord-Ouest de la Méditerranée occidentale. Parmi cette liste, les experts de Météo France ont retenu 7 événements pour lesquels la formation des vagues est modélisée à l'aide d'une simulation numérique à mailles fines. Ces 8 événements ont été retenus pour la capacité à générer de fortes vagues ou des vagues de caractéristiques particulières sur la zone d'étude.

Les dates retenues figurent dans le tableau suivant par ordre chronologique.

Date	Direction vents sur zone	Force maximale vent sur zone
16 et 17/12/97	ESE	10
3 et 4/12/03	E	9
26 et 27/12/08	ENE	9
24/01/09	NW	11
06/03/13	E	10
06 et 07/03/17	WNW	8
01 et 02/03/18	ESE	9

Tableau 2.2: Liste des tempêtes sélectionnées pour être rejouées

A noter que les vents maximum 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 m 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. Voir l'annexe A à ce sujet).

3 Rejeux de situations

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des simulations de vagues obtenues à l'aide de modèles à mailles fines pour 7 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 atmosphériques réalistes, à fréquence horaire, et de maille horizontale la plus fine possible, mais dépendante des rejeux météorologiques disponibles. Cela doit permettre de disposer d'informations quantitatives sur les vagues probables au sein de la zone d'intérêt lors de ces événements historiques marquants.

Dans cette étude, les situations ont été rejouées avec, en entrée de modèle, les vents à 10 mètres issus de la réanalyse CERRA qui est une réanalyse paneuropéenne à très haute résolution horizontale (5,5 km – avec pour conditions aux limites latérales, la réanalyse globale ERA5)[6], disponible depuis août 2022.

Le modèle de vagues utilisé pour les rejeux est le modèle de très haute résolution WaveWatch III [Tolman, 2008]. 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 configuration utilisée a été développée conjointement avec le SHOM, dans le cadre du projet HOMONIM. La bathymétrie est issue du SHOM (résolution de 100 m, produite en 2015).

Dans les illustrations à suivre, Hs représente la hauteur significative de mer totale (mer du vent et houle) et la période correspond à la période moyenne de la mer totale d'ordre inverse en sortie de modèle WaveWatch III.

Les directions, hauteurs et périodes de houle mentionnées correspondent aux valeurs de houle primaire en sortie de modèle WaveWatch III.

3.1 Situation des 16 et 17/12/97

3.1.1 Rappel conditions météorologiques

La majeure partie de la France est sous une masse d'air froid provenant de l'anticyclone de Sibérie tandis que de l'air chaud et humide remonte de la Méditerranée ; sur le golfe du Lion, les vents basculent à l'Est-sud-Est et soufflent avec de violentes rafales, engendrant une mer forte.

3.1.2 Analyse des résultats

Avec le renforcement des vents, les vagues s'amplifient dès l'après-midi puis en soirée du 16 du nord de la Corse jusqu'à la côte catalane, ceci étant essentiellement dû à la contribution de la mer du vent ; la mer est forte à très forte sur la zone, et reste formée ensuite jusqu'au lendemain matin.

6 Voir https://climate.copernicus.eu/copernicus-regional-reanalysis-europe-cerra

La bouée de Sète mesure des vagues venant d'Est-Sud-Est avec une valeur maximale de H1/3 à 6,8 m (pour un Hmax de 10,8 m) et une période de 10 s.

Sur la carte de hauteur significative maximale intégrée sur une durée encadrant la tempête (illustration 3.1), on voit qu'elle se situe autour de 6,5 m sur la zone D.

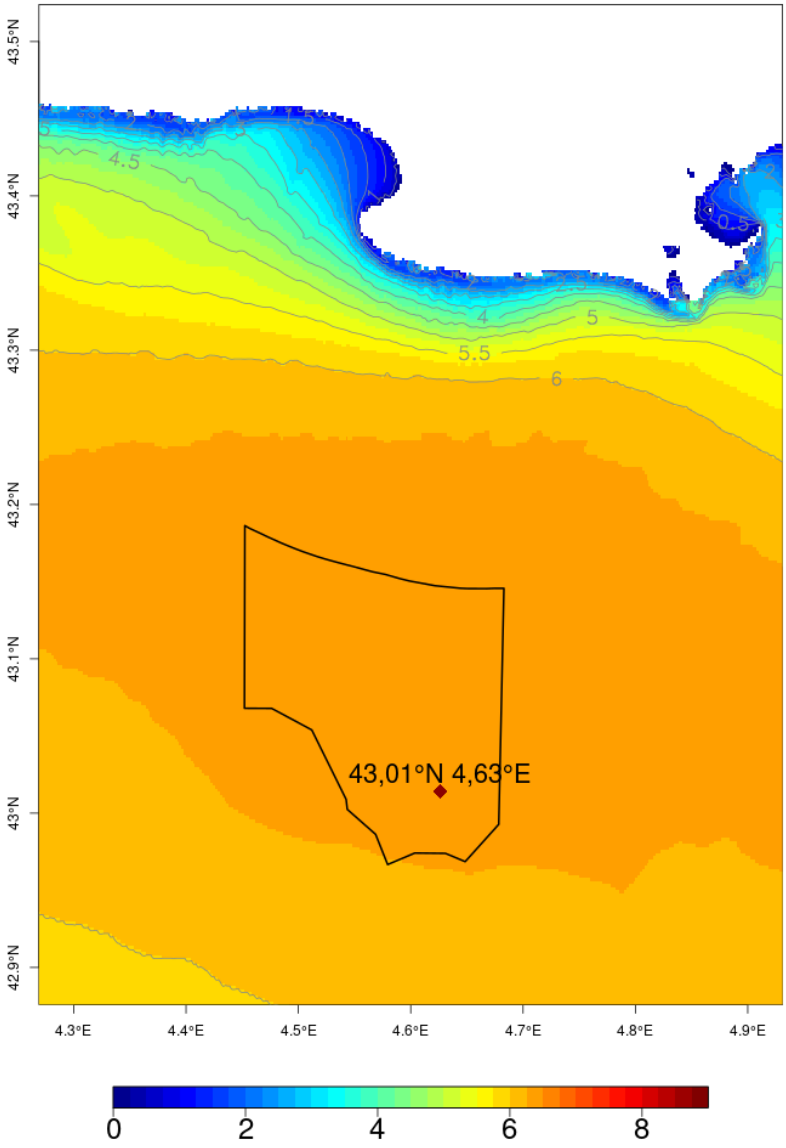


Illustration 3.1: Hauteur significative de la mer totale (Hs, en mètres) lors de la tempête des 16 et 17/12/97 (valeur maximale intégrée sur la période comprise entre le 16 déc. à 03 UTC et le 17 déc. à 15 UTC

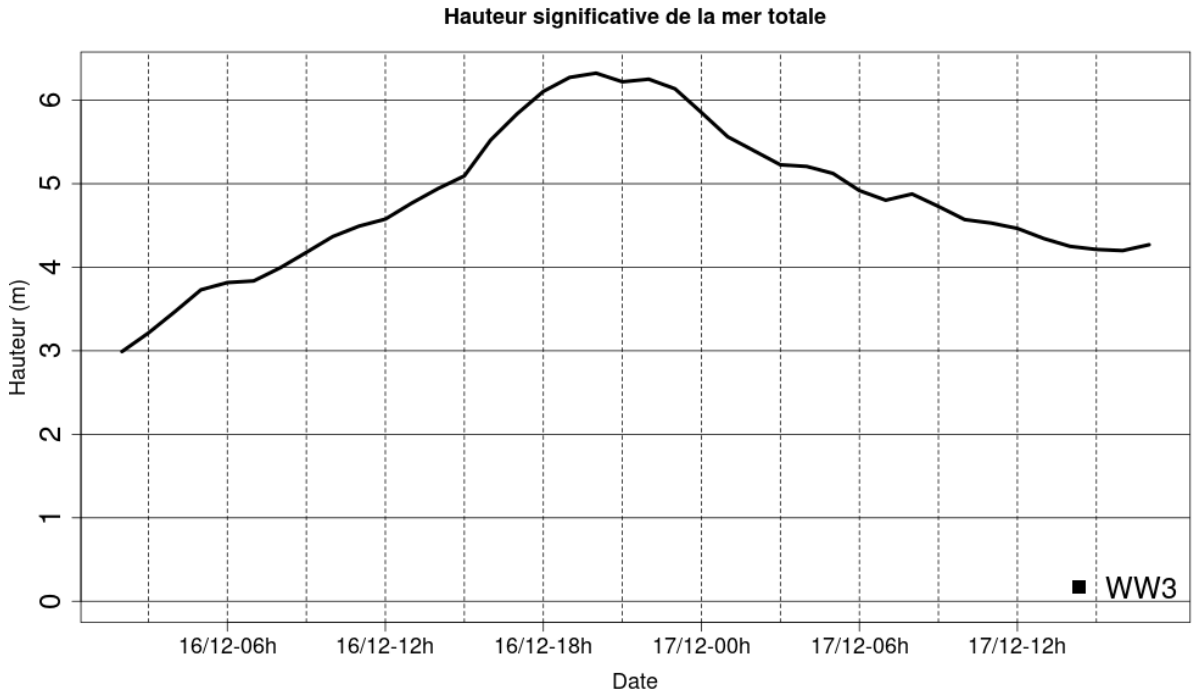


Illustration 3.2: Evolution temporelle de Hs au point de grille 43,01° N 4,63° E – tempête des 16 et 17/12/97

3.1.3 Caractéristiques principales

Situation avec croissance régulière des vagues en journée du 16 liée à la mer du vent en raison des vents violents, puis dissipation plutôt lente le 17.

	Point de grille 43,01° N 4,63° E
Hauteur maximale Hs (mer totale)	6,3 m
Date / Heure	16/12/1997 à 20 UTC
Direction	Est-Sud-Est
Contribution mer du vent/houle	La mer du vent est quasiment l'unique contributrice, la houle n'étant pas significative

Tableau 3.1: Caractéristiques principales de la situation des 16 et 17/12/97

3.2 Situation des 3 et 4/12/03

3.2.1 Rappel conditions météorologiques

Le 3 décembre, une dépression se forme sur la Tunisie et circule en Méditerranée. Elle atteint la nuit suivante le Cap Béar alors que l'axe de hautes pressions de la Vénétie aux Alpes résiste, plongeant le Languedoc-Roussillon dans la tempête : des fortes rafales de vent touchent le littoral et des pluies abondantes concernent toute la région.

3.2.2 Analyse des résultats

Avec le renforcement des vents, les vagues s'amplifient dès l'après-midi puis en soirée du 3 sur le golfe du Lion ; l'état de la mer reste important jusqu'au lendemain midi, puis décroît progressivement dans l'après-midi du 4. La mer est forte à très forte

La bouée de Sète mesure des vagues venant d'Est-Sud-Est avec une valeur maximale de H1/3 à 5,7 m (pour un Hmax de 8,7 m) et une période de 10 à 11 s.

Sur la carte de hauteur significative maximale intégrée sur une durée encadrant la tempête (illustration 3.3), on voit qu'elle se situe entre 6,5 m et 7,5 m sur la zone D avec un gradient allant du Nord vers le Sud.

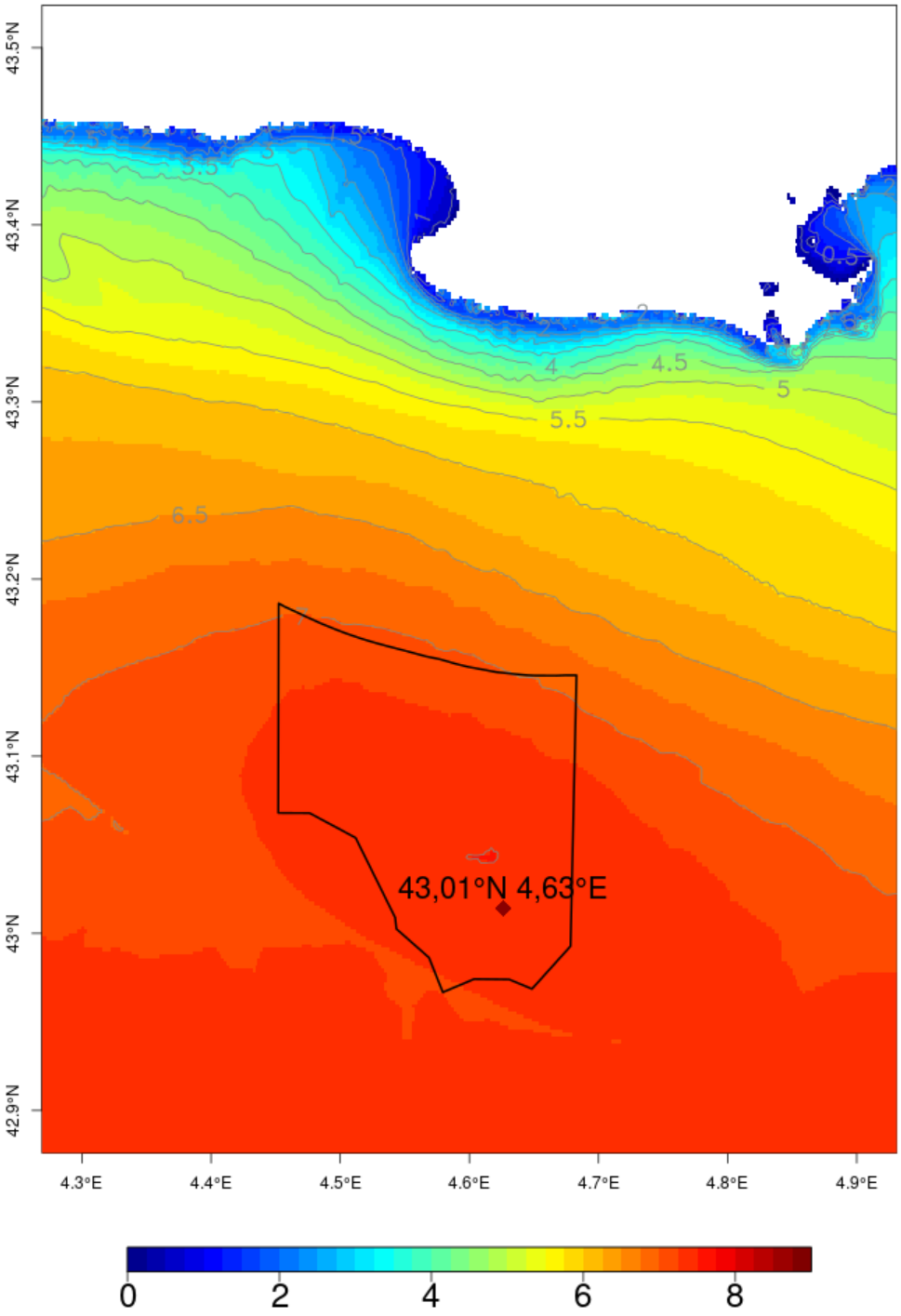


Illustration 3.3: Hauteur significative de la mer totale (Hs, en mètres) lors de la tempête des 3 et 4/12/03 (valeur maximale intégrée sur la période comprise entre le 3 déc. à 09 UTC et le 4 déc. à 21 UTC)

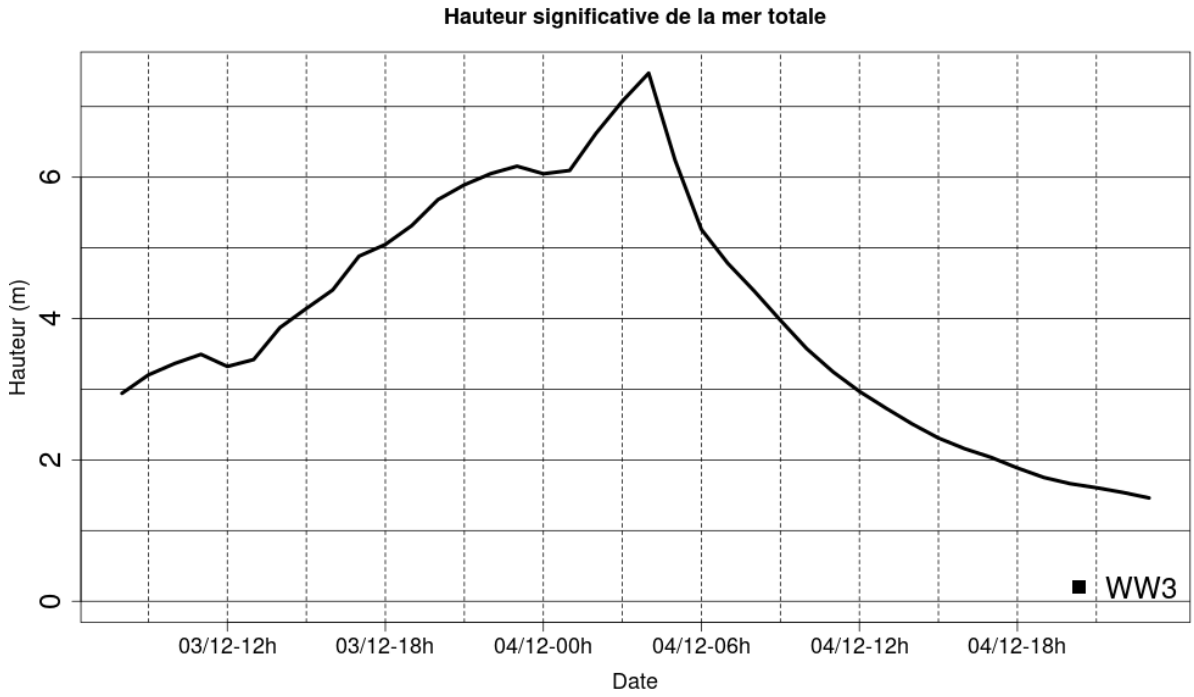


*Illustration 3.4: Evolution temporelle de Hs au point de grille **43,01° N 4,63° E** – tempête des 3 et 4/12/03*

3.2.3 Caractéristiques principales

Situation avec croissance assez rapide et régulière des vagues à partir de la mi-journée du 3 jusqu'en milieu de nuit suivante, puis dissipation plutôt rapide le 4. Ceci est dû essentiellement à la mer du vent qui se forme tant que le vent souffle puis diminue rapidement, et à une petite houle d'Est qui touche ensuite la zone mais se dissipe aussi assez rapidement.

	Point de grille 43,01° N 4,63° E
Hauteur maximale Hs (mer totale)	7,5 m
Date / Heure	04/12/2003 à 04 UTC
Direction	Est
Contribution mer du vent/houle	La mer du vent reste prédominante jusqu'au plus fort de l'épisode en fin de nuit du 3 au 4, puis une houle d'Est de hauteur jusque 3 m et de période de 9 à 10 s se met en place, et se dissipe l'après-midi du 4 en tournant au Sud-Est

Tableau 3.2: Caractéristiques principales de la situation des 3 et 4/12/03

3.3 Situation des 26 et 27/12/08

3.3.1 Rappel conditions météorologiques

Associée à une arrivée d'air froid, la tempête Britta – localement violente – frappe le littoral méditerranéen : des fortes rafales de vent touchent le littoral de PACA et du Roussillon.

3.3.2 Analyse des résultats

Avec la tempête qui prend forme, la mer du vent s'amplifie en soirée du 26, venant d'Est sur la partie centrale du golfe du Lion jusqu'au littoral des Pyrénées Orientales ; la mer qui en résulte est forte à très forte autour de la zone.

La bouée de Sète mesure le 26 un maximum de 4 m en H1/3 (7 m en Hmax).

Sur la carte de hauteur significative maximale intégrée sur une durée encadrant la tempête (illustration 3.5), on voit qu'elle se situe entre 4 m et 6,5 m sur la zone D avec un gradient allant du Nord au Sud.

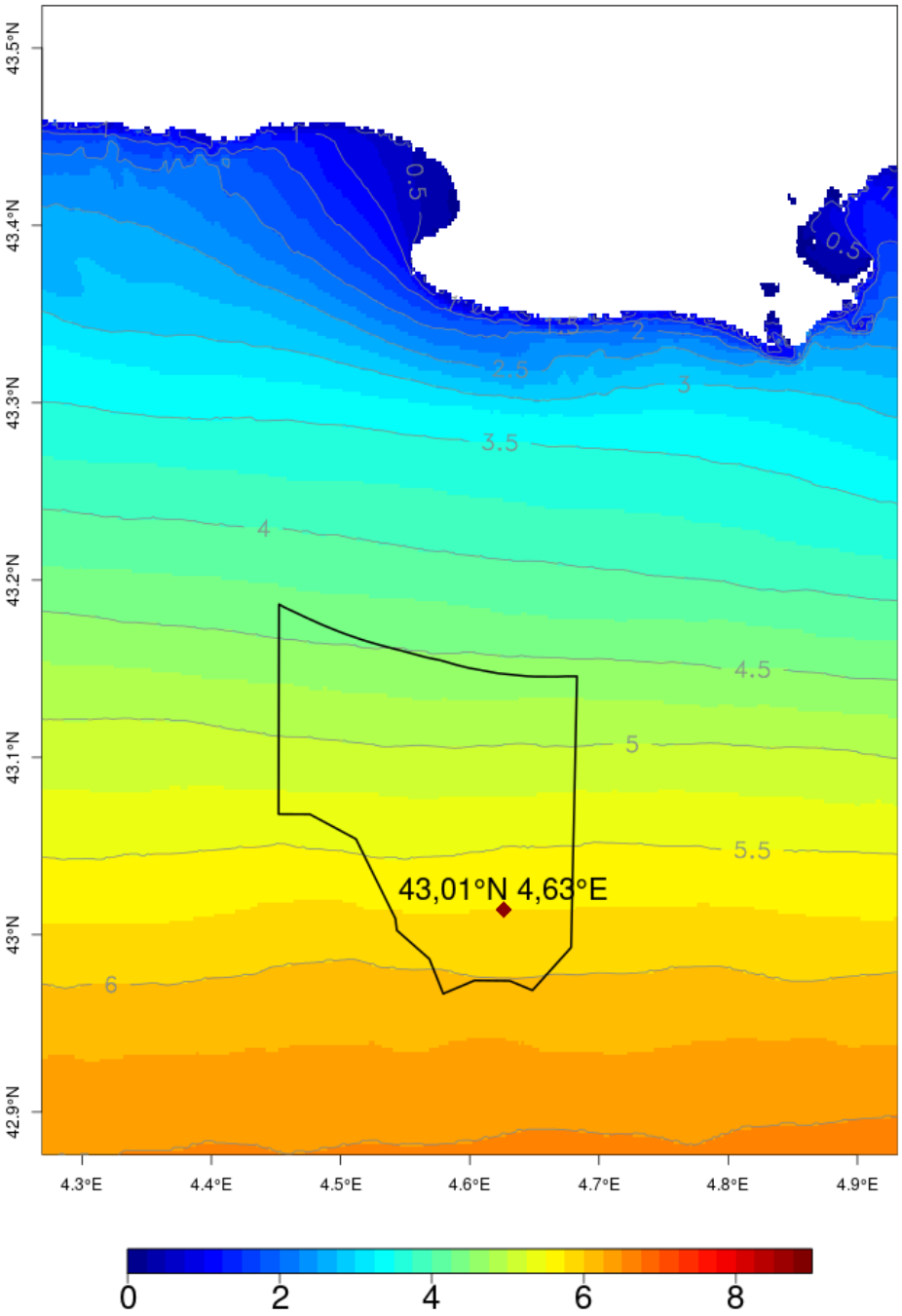


Illustration 3.5: Hauteur significative de la mer totale (Hs, en mètres) lors de la tempête des 26 et 27/12/08 (valeur maximale intégrée sur la période comprise entre le 26 déc. à 03 UTC et le 27 déc. à 21 UTC)

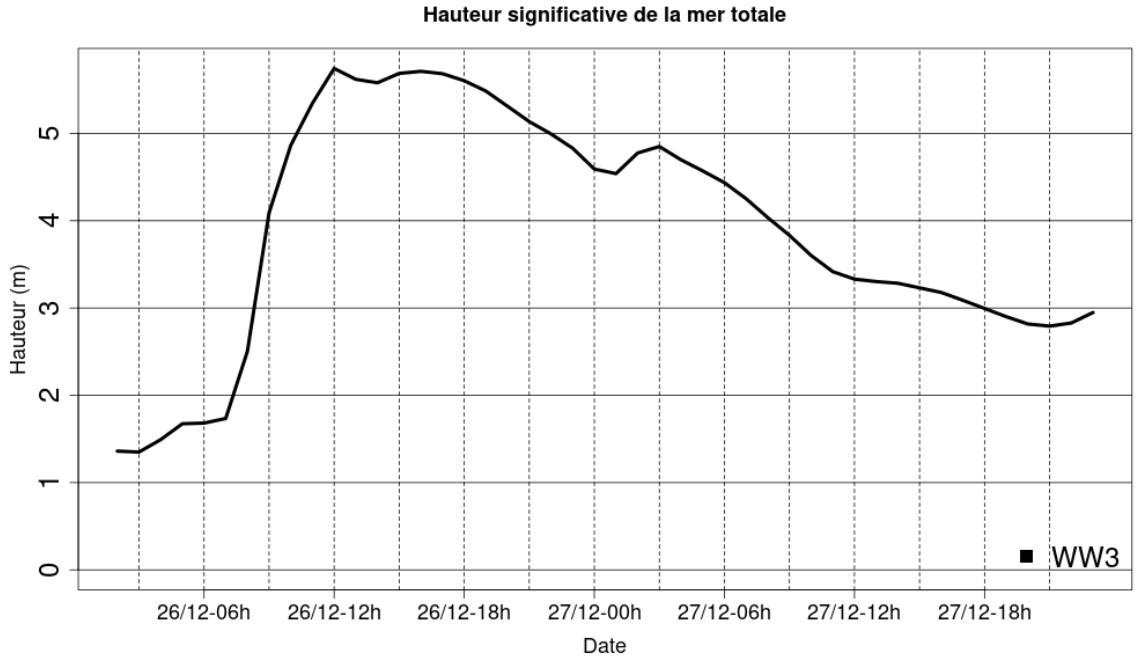


*Illustration 3.6: Evolution temporelle de Hs au point de grille **43,01° N 4,63° E** – tempête des 26 et 27/12/08*

3.3.3 Caractéristiques principales

Situation avec croissance très rapide des vagues en matinée du 26 due au vent qui se renforce ; l'après-midi la croissance est plus lente jusqu'à son paroxysme en soirée ; la mer du vent commence ensuite à décroître très lentement jusqu'en fin de journée du 27 ; une petite houle d'Est-Sud-Est est présente.

	Point de grille 43,01° N 4,63° E
Hauteur maximale Hs (mer totale)	5,7 m
Date / Heure	26/12/2008 à 12 UTC
Direction	Est
Contribution mer du vent/ houle	La mer du vent reste prédominante pendant tout l'épisode. Une houle d'Est-Sud-Est, est également présente ; sa hauteur est de 1 m à 2 m et sa période de 10 à 13 s

Tableau 3.3: Caractéristiques principales de la situation des 26 et 27/12/08

3.4 Situation du 24/01/09

3.4.1 Rappel conditions météorologiques

Le 24 janvier 2009, une dépression atlantique se creuse dans le Golfe de Gascogne. Cette tempête nommée Klaus traverse la France, de la Charente-Maritime à la région lyonnaise et à la Côte d'Azur. Elle génère des vents très violents sur le quart Sud-Ouest et une violente tramontane en Languedoc-Roussillon, battant de nombreux records locaux.

3.4.2 Analyse des résultats

Avec le vent de terre de Nord-Ouest qui se renforce et souffle violemment à partir de la mi-journée, la mer se forme au large : c'est d'abord la mer du vent qui augmente, puis une houle se propage en direction de l'Afrique. La mer est forte sur la zone.

La bouée de Leucate mesure un maximum en H1/3 de 2,3 m (4,4 m en Hmax) pour une période de 6 s.

Sur la carte de hauteur significative maximale intégrée sur une durée encadrant la tempête (illustration 3.7), on voit qu'elle se situe entre 3,5 m et 5 m sur la zone D avec un gradient allant du Nord-Ouest vers le Sud-Est.

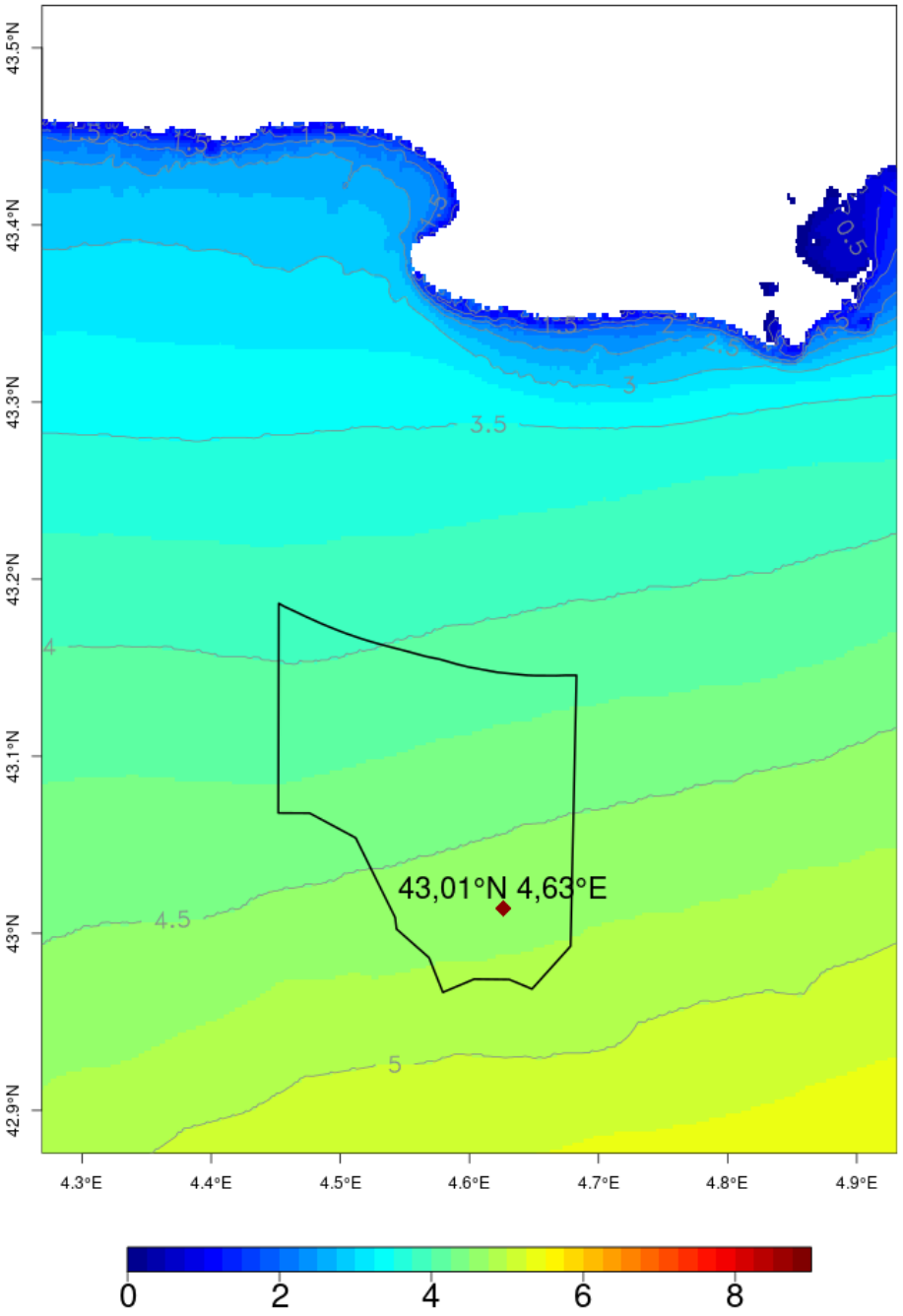


Illustration 3.7: Hauteur significative de la mer totale (Hs, en mètres) lors de la tempête du 24/01/09 (valeur maximale intégrée sur la période comprise entre le 24 jan. à 03 UTC et le 25 déc. à 06 UTC)

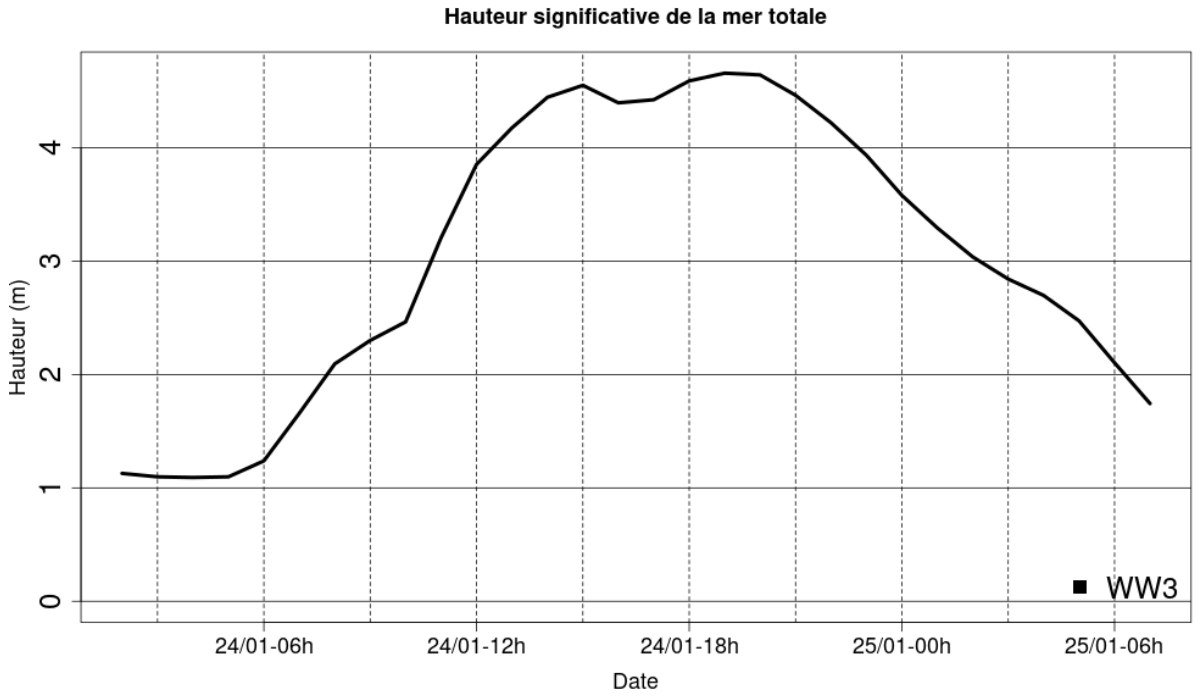


*Illustration 3.8: Evolution temporelle de Hs au point de grille **43,01° N 4,63° E** – tempête du 24/01/09*

3.4.3 Caractéristiques principales

Situation avec croissance régulière des vagues toute la journée du 24 au fur et à mesure que le vent se renforce, puis décroissance tout aussi régulière la nuit suivante avec le vent qui mollit ; une petite houle de secteur Sud-Sud-Ouest est également présente.

	Point de grille 43,01° N 4,63° E
Hauteur maximale Hs (mer totale)	4,7 m
Date / Heure	24/01/2009 à 19 UTC
Direction	Ouest-Nord-Ouest
Contribution mer du vent/ houle	La mer du vent reste prédominante pendant tout l'épisode. Néanmoins une houle de Sud-Sud-Ouest, de hauteur de 1 à 2 m et de période de de 8 à 10 s engendre une mer croisée

Tableau 3.4: Caractéristiques principales de la situation du 24/01/09

3.5 Situation du 06/03/13

3.5.1 Rappel conditions météorologiques

Une tempête d'Est touche les côtes françaises de Méditerranée le 6 mars 2013. Les valeurs de vent enregistrées sur le littoral du Roussillon sont importantes – le Languedoc restant moins touché ; en parallèle, l'état de la mer dans le golfe du Lion est lui aussi relativement conséquent.

3.5.2 Analyse des résultats

Les vents de secteur Est qui soufflent sur le golfe du Lion génèrent des vagues se propageant en direction des côtes françaises ; elles déferlent avec une énergie importante sur le littoral du Languedoc-Roussillon. La mer est forte à très forte sur la zone.

La bouée de l'Espiguette mesure un maximum en H1/3 de 3,7 m (5,9 m en Hmax) pour une période de 9 s

Sur la carte de hauteur significative maximale intégrée sur une durée encadrant la tempête (illustration 3.9), on voit qu'elle se situe entre 6 et 7 m sur la zone D avec un gradient allant du Nord-Est vers le Sud-Ouest.

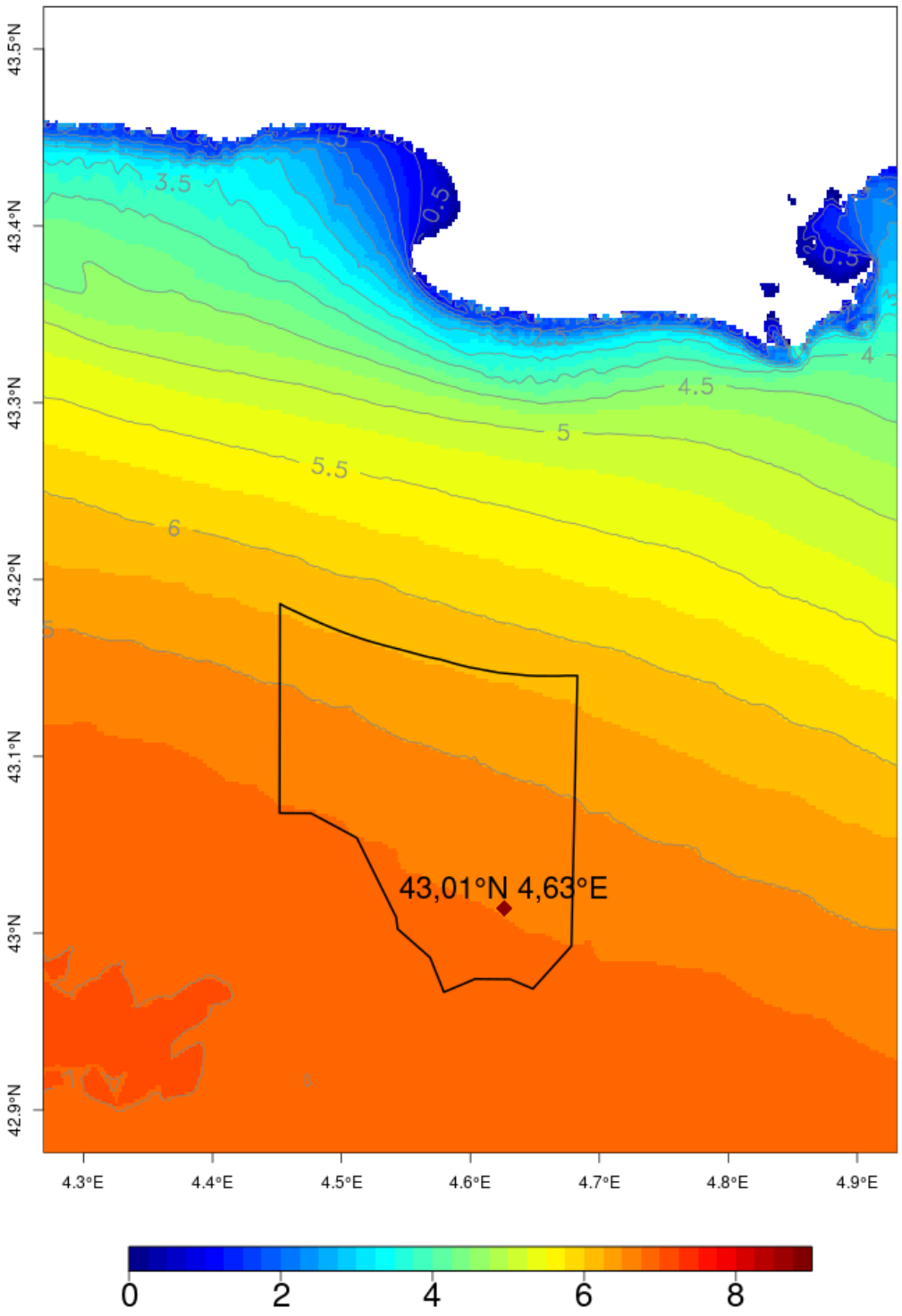


Illustration 3.9: Hauteur significative de la mer totale (Hs, en mètres) lors de la tempête du 06/03/13 (valeur maximale intégrée sur la période comprise entre le 5 mars à 15 UTC et le 07 mars à 03 UTC)

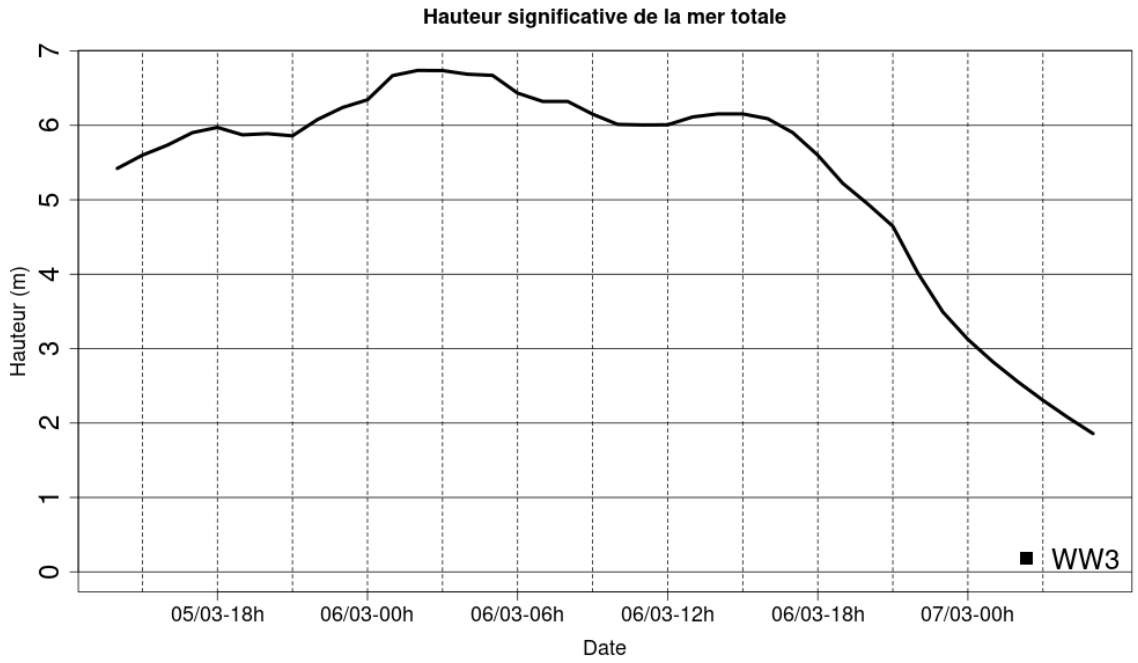


*Illustration 3.10: Evolution temporelle de Hs au point de grille **43,01° N 4,63° E**– tempête du 06/03/13*

3.5.3 Caractéristiques principales

Situation avec une mer du vent importante dès le 5 au soir jusqu'au 6 en fin de journée, les vagues générées restant de hauteur relativement stable, puis décroissance plutôt rapide et progressive jusqu'au lendemain matin ; dans le même temps, la houle au départ plutôt petite et de secteur Sud-Sud-Est devient un peu plus significative et tourne à l'Est en fin de période.

	Point de grille 43,01° N 4,63° E
Hauteur maximale Hs (mer totale)	6,7 m
Date / Heure	06/03/2013 à 02 UTC
Direction	Est-Sud-Est
Contribution mer du vent/ houle	Mer du vent prépondérante sur une bonne partie de l'événement ; petite houle d'Est-Sud-Est en journée du 6 avec une hauteur de 1 à 2 m et une période de 11 à 12 s ; en soirée elle tourne à l'Est, sa hauteur augmentant (2 m à 3 m) et sa période se réduisant (7 s à 9 s)

Tableau 3.5: Caractéristiques principales de la situation du 06/03/13

3.6 Situation du 06/03/17

3.6.1 Rappel conditions météorologiques

Une forte tempête, nommée Zeus, traverse rapidement le pays le lundi 6 mars, causant de nombreux dommages. Elle touche tous les départements au sud d'un axe Saint-Malo/Pontarlier. Le pourtour méditerranéen est touché dans l'après-midi du 6 jusqu'au 7 en fin de nuit.

3.6.2 Analyse des résultats

Avec le vent de terre de Nord-Ouest qui se renforce notablement à partir de la mi-journée, la mer se forme au large : c'est d'abord la mer du vent qui augmente, puis une houle qui se propage en direction de la Corse.

La mer est agitée à forte sur la zone.

La bouée de Leucate mesure un maximum en H1/3 de 2,3 m (4,4 m en Hmax) pour une période de 6 s.
Sur la carte de hauteur significative maximale intégrée sur une durée encadrant la tempête (illustration 3.11), on voit qu'elle se situe entre 3,5 m et 4,5 m sur la zone D avec un gradient orienté du Nord-Ouest vers le Sud-Est.

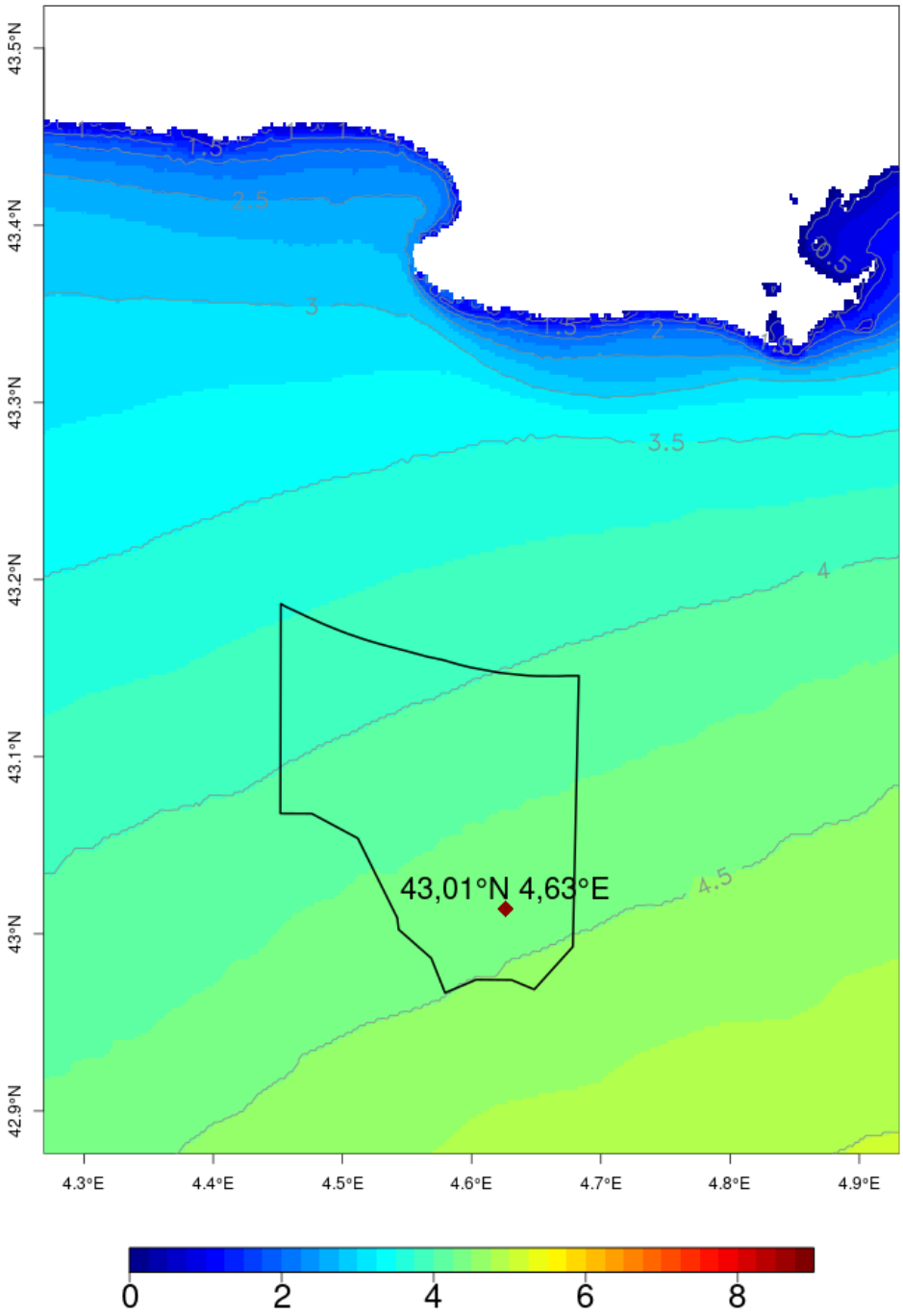


Illustration 3.11: Hauteur significative de la mer totale (Hs, en mètres) lors de la tempête du 06/03/17 (valeur maximale intégrée sur la période comprise entre le 6 mars à 00 UTC et le 7 mars à 03 UTC)

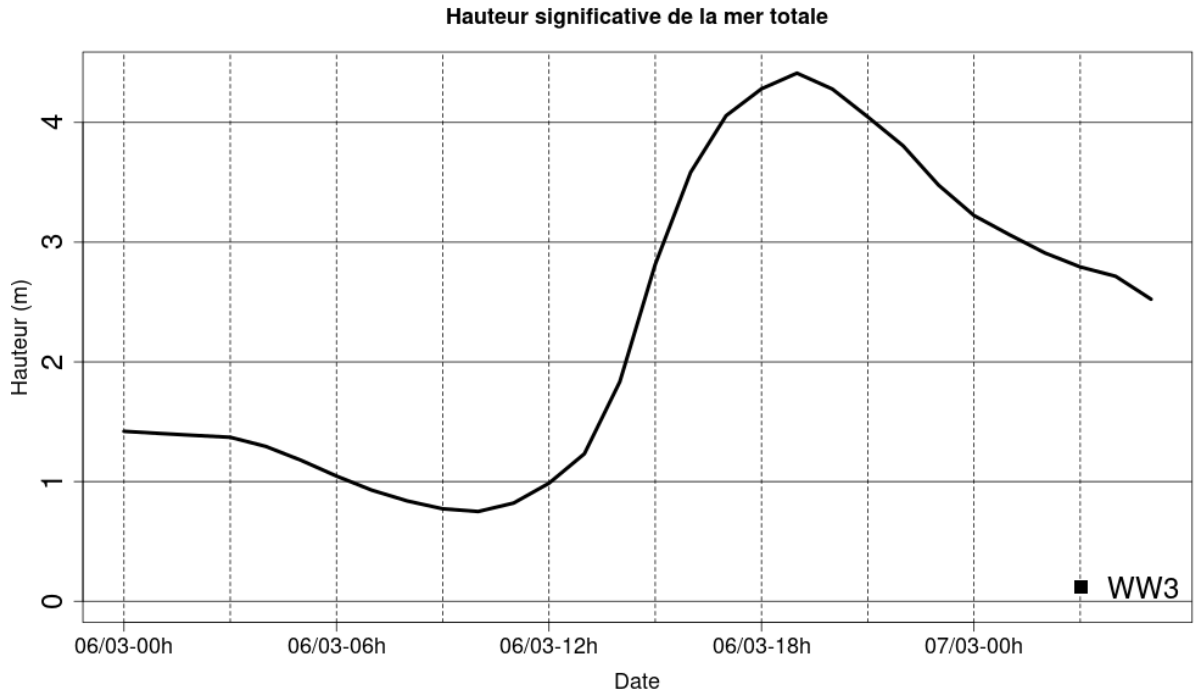


*Illustration 3.12: Evolution temporelle de Hs au point de grille **43,01° N 4,63° E** – tempête du 06/03/17*

3.6.3 Caractéristiques principales

Situation avec une mer du vent qui augmente rapidement dans l'après-midi du 6, puis décroît plus lentement la nuit suivante jusqu'au 7 en début de journée. La houle n'est pas significative sur la zone.

	Point de grille 43,01° N 4,63° E
Hauteur maximale Hs (mer totale)	4,4 m
Date / Heure	06/03/2017 à 19 UTC
Direction	Ouest-Nord-Ouest
Contribution mer du vent/ houle	Quand le vent de terre se renforce, la mer du vent devient quasiment l'unique contributrice, la houle n'étant pas significative

Tableau 3.6: Caractéristiques principales de la situation du 06/03/17

3.7 Situation du 01 et 02/03/18

3.7.1 Rappel conditions météorologiques

Une tempête d'Est-Sud-Est touche les côtes du Languedoc-Roussillon les 1er et 2 mars 2018. Elle génère des rafales de vent importantes et une mer formée sur le littoral méditerranéen.

3.7.2 Analyse des résultats

Les vents d'Est-Sud-Est qui soufflent dès le matin du 1er sur le golfe du Lion font grossir la mer du vent ; les vagues se propagent l'après-midi et la nuit suivante dans la même direction vers les côtes du Languedoc-Roussillon. La mer est forte à très forte sur la zone.

La bouée de l'Espiguette mesure un maximum en H1/3 de 4,3 m (8,1 m en Hmax) pour une période de 8 s.

Sur la carte de hauteur significative maximale intégrée sur une durée encadrant la tempête (illustration 3.13), on voit qu'elle se situe entre 5,5 m et 6,5 m sur la zone D avec un gradient allant du Nord au Sud.

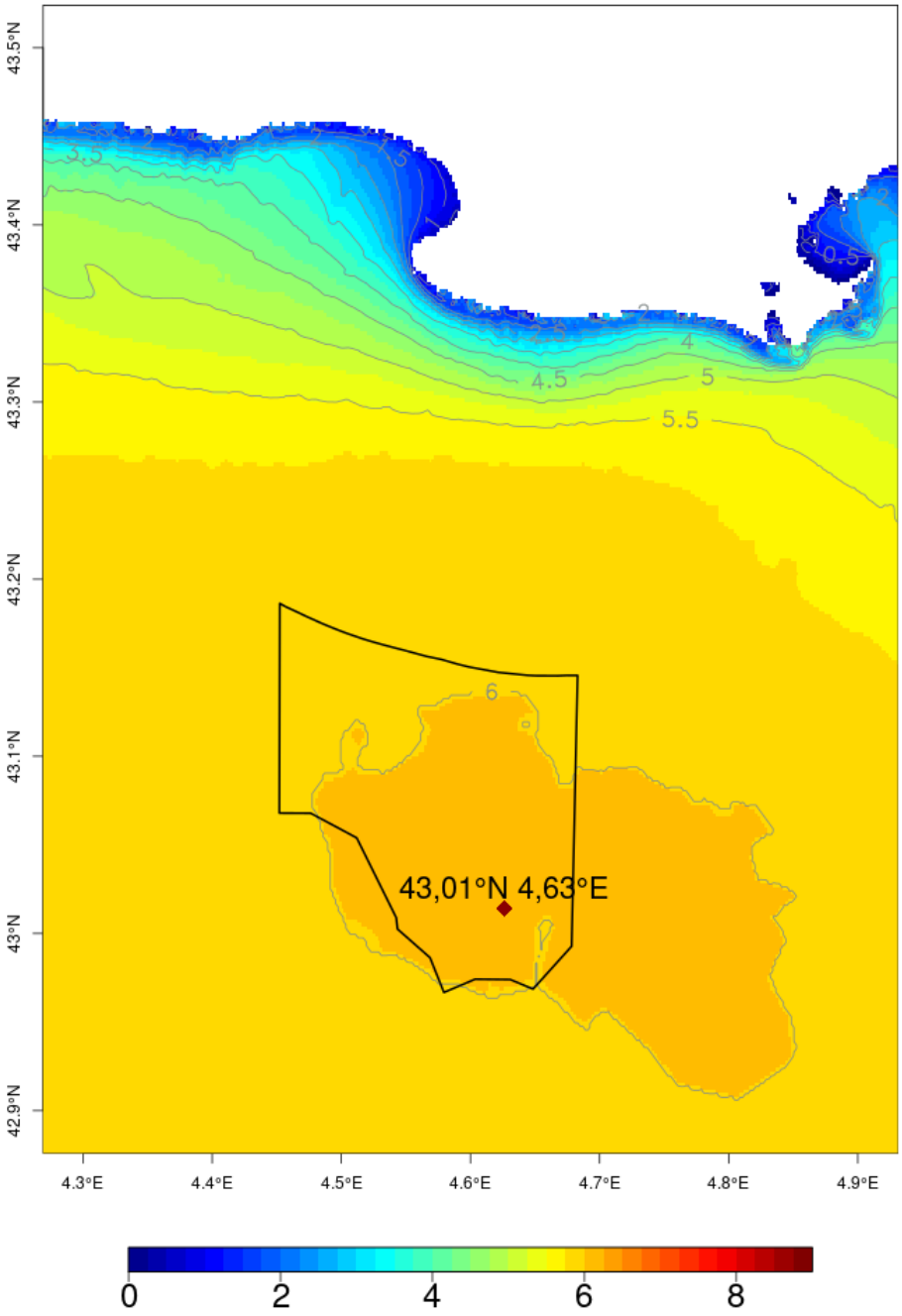


Illustration 3.13: Hauteur significative de la mer totale (Hs, en mètres) lors de la tempête du 01 et 02/03/18 (valeur maximale intégrée sur la période comprise entre le 28 fév. à 18UTC et le 2 mars à 06 UTC)

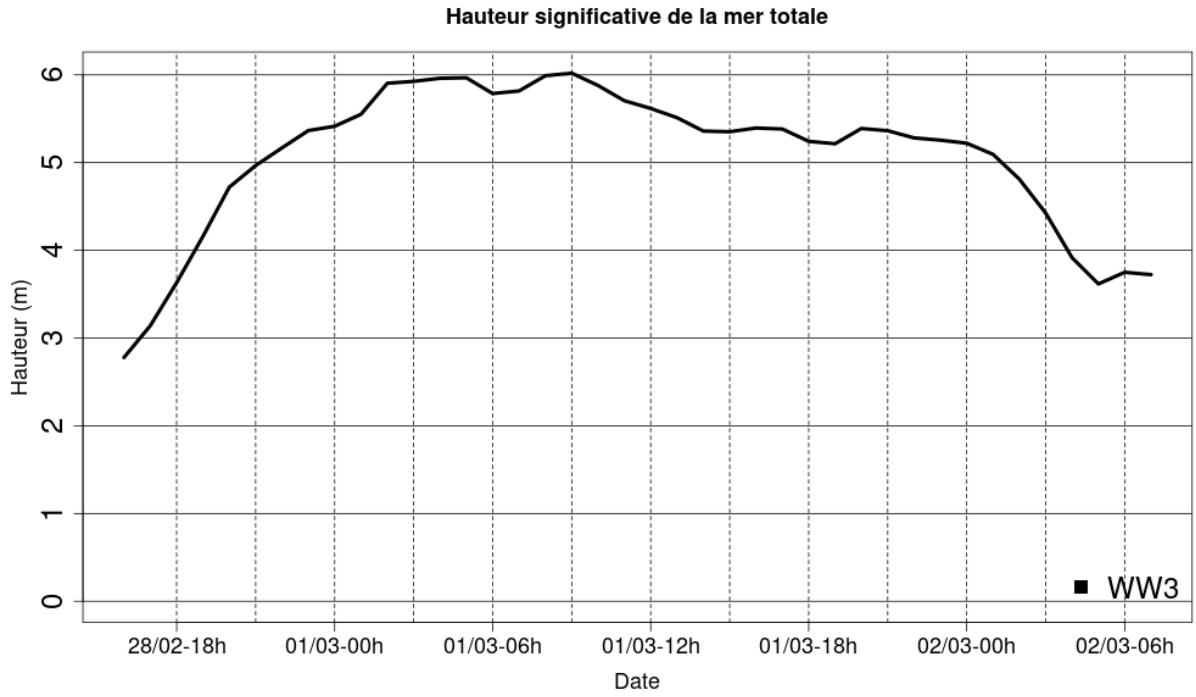


*Illustration 3.14: Evolution temporelle de Hs au point de grille **43,01° N 4,63° E** – tempête du 01 et 02/03/18*

3.7.3 Caractéristiques principales

Situation où la mer du vent est prépondérante sur tout l'épisode ; elle croît assez rapidement et régulièrement dans la nuit du 28/02 au 01/03. Elle se maintient plus ou moins au même niveau jusque la nuit suivante, et finit par décroître après minuit

	Point de grille 43,01° N 4,63° E
Hauteur maximale Hs (mer totale)	6,0 m
Date / Heure	01/03/2018 à 09 UTC
Direction	Est-Sud-Est
Contribution mer du vent/ houle	La mer du vent reste quasiment l'unique contributrice pendant tout l'épisode, la houle étant négligeable

Tableau 3.7: Caractéristiques principales de la situation des 01 et 02/03/18

4 Principaux résultats

Des rafales violentes sont parfois relevées dans des tempêtes venant du secteur Est à Sud-Est avec, par exemple, une rafale d'Est-Sud-Est à 134 km/h enregistrée au sémaphore de Sète (34) le 16/12/1997, ou encore une rafale d'Est à 116 km/h mesurée toujours au sémaphore de Sète (34) le 4/12/2003. En régime de Nord-Ouest (Tramontane), le vent est un peu moins fort sur cette zone, avec des rafales jusque 120 km/h (ex : rafale à 115 km/h observée au sémaphore de l'Espiguette (30) le 06/03/2017).

On observe sur la zone d'étude des hauteurs significatives (H1/3) maximales pouvant atteindre les 6 à 7 m (jusqu'à 6,8 m mesurés à la bouée de Sète) ; cela concerne essentiellement des situations d'Est à Sud-Est, les vagues se déplaçant alors d'Est en Ouest, ou du Sud-Est vers le Nord-Ouest. On note par ailleurs un axe privilégié pour le gradient de H1/3, toujours croissant globalement du Nord vers le Sud.

En situation de Nord-Ouest, on observe sur la zone d'étude des hauteurs significatives maximales de l'ordre de 4 à 5 m ; les vagues se propagent alors du Nord-Ouest vers le Sud-Est, et, du fait de ces vents de terre, le gradient de H1/3 est orienté également Nord-Ouest/Sud-Est.

La sélection des tempêtes et les rejeux des 7 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. L'ensemble des fichiers 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.

Bibliographie

Chatel, V., Dalphinet, A., Merle, R., Mezdour, A., Rouchy, N., Roulle, O., Pouponneau, B. et Legrand. R. : Projet de parc éolien off-shore, Note technique Lots 1, 2 et 3, Version 1, 2021

Merle, R., Analyse des risques usuels liés au vent en Méditerranée occidentale ,Lot 1 - AO6 Méditerranée, 2022

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2018): ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara S., Horányi, A., Muñoz Sabater, J, (2020) : The ERA5 global reanalysis Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 146 (730), 1999-2049

Toman H. L., 2008 : A mosaic approach to wind wave modeling. Ocean modeling, 25.

Annexes

Table des annexes

Annexe A : critiques des mesures de vent sur la bande côtière du Nord-Ouest de la Méditerranée Occidentale.....38
Annexe B : les fiches tempêtes.....39

Annexe A : critiques des mesures de vent sur la bande côtière du Nord-Ouest de la Méditerranée Occidentale

Site	Altitude du point de mesure	Qualité (représentativité /zone littorale)	Particularité locale
Sémaphores (Marine Nationale)			
Béar	82 m	4 (bon)	Mesure à 36 m de hauteur. Falaise proche. Forte accélération par effet de cap Valeur souvent bien plus forte que l'ensemble de la côte mais bien représentative de la bande littorale proche (des 2 à 3 premiers milles, quelle que soit la direction).
Leucate	42 m	4 (très bon en toutes directions)	La falaise assez proche limite cette mesure en classe 4 , mais position dominante, sur la mer, sans aucun masque à 360°). Très bonne représentativité en toute direction.
Sète	75 m	4 (mauvais à moyen)	Mat de 3 m. Valeur peu représentative du vent sur Zone littorale : complètement abrité en secteur nord-ouest (sous le vent du relief), et assez sous estimé en secteur marin (sud-est).
L'Espiguette	1 m	5 (bon)	Mesure sur le toit du sémaphore, sur une zone assez dégagée. Bonne représentativité des régimes d'est à sud-est et des fins de mistral (nord à nord-est).
Cap Couronne	27 m	4 (bon à très bon)	Capteur sur le toit de terrasse. Mesure bien représentative du vent sur zone aussi bien dans le domaine du mistral que du régime de sud-est à Est

Annexe B : les fiches tempêtes

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

Épisode sélectionné	Fichier associé
16 et 17/12/97	19971216et17-FicheTempete_DGEC_AO6_zoneABCD_Lot2
3 et 4/12/03	20031203et04-FicheTempete_DGEC_AO6_zoneABCD_Lot2
20 et 21/02/04	20040220et21-FicheTempete_DGEC_AO6_zoneABCD_Lot2
26 et 27/12/08	20081226et27-FicheTempete_DGEC_AO6_zoneABCD_Lot2
24/01/09	20090124-FicheTempete_DGEC_AO6_zoneABCD_Lot2
13/03/11	20110313-FicheTempete_DGEC_AO6_zoneABCD_Lot2
06/03/13	20130306-FicheTempete_DGEC_AO6_zoneABCD_Lot2
24/12/13	20031224-FicheTempete_DGEC_AO6_zoneD_Lot2
06 et 07/03/17	20170306et7-FicheTempete_DGEC_AO6_zoneCD_Lot2
01 et 02/03/18	20180301et02-FicheTempete_DGEC_AO6_zoneABCD_Lot2

FIN DE DOCUMENT