

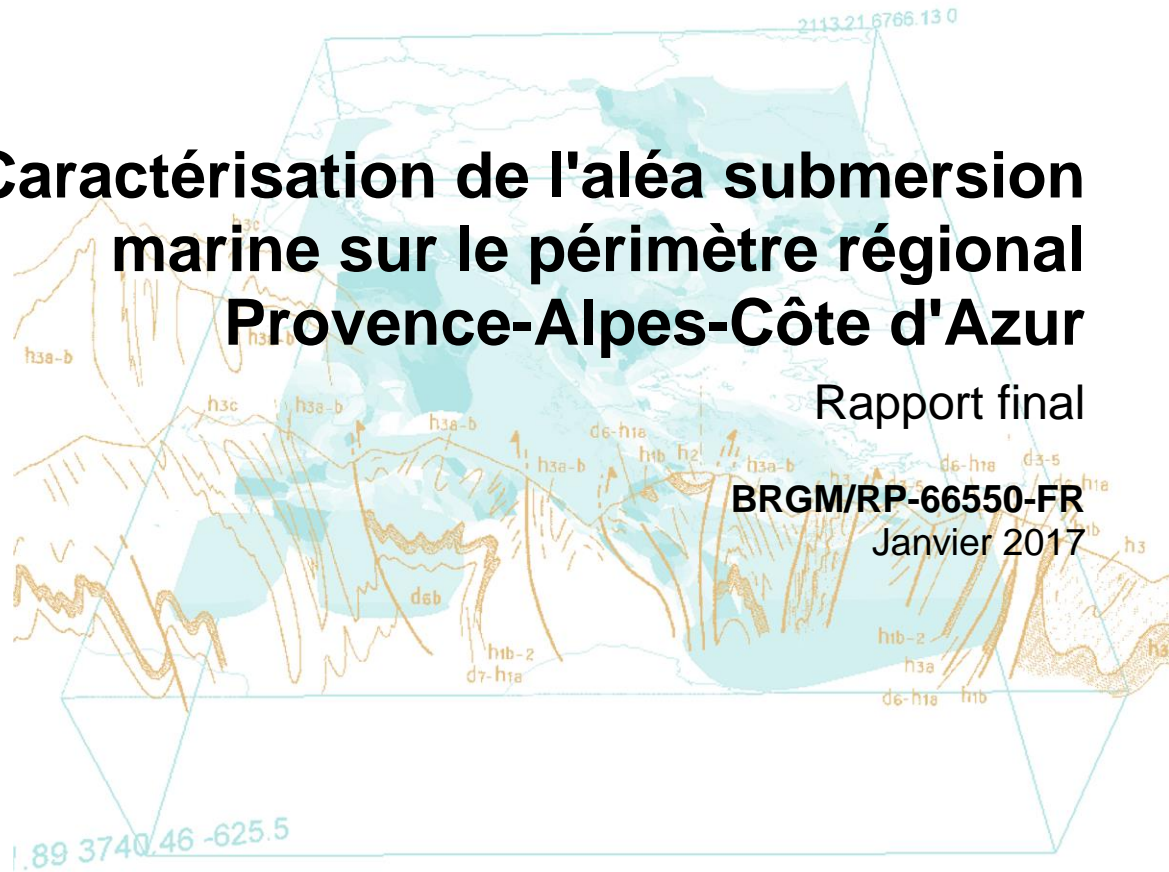


Caractérisation de l'aléa submersion marine sur le périmètre régional Provence-Alpes-Côte d'Azur

Rapport final

BRGM/RP-66550-FR

Janvier 2017



Caractérisation de l'aléa submersion marine sur le périmètre régional Provence-Alpes-Côte d'Azur

Rapport final

BRGM/RP-66550-FR
Janvier 2017

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2016-RIS-24

A. Stépanian, J. Louisor, avec la participation de S. Lecacheux, A. Nicolae-Lerma, et R. Pedreros

Vérificateur :

Nom : Idier Déborah

Le 23/03/2017



Approbateur :

Nom : Claire Arnal

Le : 03/04/2017



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Avertissement

Les cartographies produites dans le cadre de cette étude sont basées sur une méthodologie et des hypothèses définies dans le présent rapport. Elles ne peuvent être agrandies à une échelle plus fine et elles sont indissociables du support sur lequel elles ont été réalisées. Enfin, la méthode de cartographie ne prend pas en compte les processus de franchissements de paquets de mer au-dessus des cordons sédimentaires littoraux et des ouvrages de front de mer, de défense contre la mer ou des ouvrages portuaires.

Mots-clés : submersion marine, risque naturel, milieu littoral, tempête, Bouches-du-Rhône, Var, Alpes-Maritimes, Provence-Alpes-Côte d'Azur

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Stepanian A., Louisor J., Lecacheux S., Nicolae-Lerma A., et Pedreros R. (2017) – Caractérisation de l'aléa submersion marine sur le périmètre régional Provence-Alpes-Côte d'Azur. Rapport final. BRGM/RP-66550-FR, 74 p., 58 ill., 9 ann., 1 CD.

© BRGM, 2017, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Pour affiner la compréhension des dynamiques de submersion sur la partie rocheuse du littoral de la région PACA, la DREAL PACA souhaite produire un document de Porté à Connaissance de l'aléa submersion marine sur le périmètre régional. Ces données alimenteront aussi les Stratégies Locales de Gestion des Risques d'Inondations (SLGRI) des Territoires à Risques Importants d'Inondation (TRI) en matière d'amélioration de la connaissance du risque.

La présente étude est relative à la submersion marine sur le littoral rocheux et est réalisée par le BRGM en partenariat avec la DREAL PACA, dans le cadre de l'Observatoire Régional des Risques Majeurs en région PACA¹. L'objectif est de produire une cartographie homogène des zones soumises à l'aléa submersion marine sur l'ensemble du littoral allant de Fos-sur-Mer à la frontière italienne.

La méthodologie retenue consiste à calculer de manière empirique les niveaux d'eaux à la côte atteints par la mer par une approche probabiliste en déterminant les événements en fonction de leur période de retour, et ce pour chaque « unité homogène » du littoral, comme par exemple les plages, les grandes baies ou les cellules sédimentaires.

La base de données de vagues réalisée dans le cadre du projet sur le SCoT Provence-Méditerranée a été utilisée pour disposer de données régionalisées des vagues au niveau de chaque grande baie. Les séries de données obtenues par modélisation sont suffisamment longues pour des calculs statistiques robustes de période de retour des hauteurs de vagues. Ces statistiques des vagues sont ainsi déterminées pour chacun des grands secteurs du littoral.

Par la suite, un calcul des différentes composantes du niveau marin à la côte (marée, surcote atmosphérique et surcote liée à l'action des vagues sur les portions de plage) a été effectué pour chaque secteur du littoral.

Ces valeurs de niveaux sont alors projetées sur le Modèle Numérique de Terrain Litto3D de manière statique.

Une cartographie des zones potentiellement affectées par un aléa de submersion marine d'occurrence centennale est ainsi produite à l'échelle du territoire pour deux scénarios :

- un scénario, avec une élévation de +0,20 m du niveau marin actuel, défini comme « événement moyen » ;
- un scénario à échéance 2100, avec une élévation de +0,60 m du niveau marin actuel, défini comme « événement moyen avec prise en compte du changement climatique ».

Un atlas cartographique des zones soumises à l'aléa submersion marine à l'échelle 1/25 000 est fourni pour chacun de ces deux scénarios.

¹ observatoire-regional-risques-paca.fr/

Sommaire

1. Introduction.....	11
1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE	11
1.1.1 Exposition de la région PACA à la submersion marine	11
1.1.2 Cartographie de la Directive Inondation	11
1.2 OBJECTIF DE L'ETUDE	12
1.3 ORGANISATION DU RAPPORT	14
2. Méthodologie	15
2.1 DEFINITIONS	15
2.1.1 Phénomène de submersion marine	15
2.1.2 Processus physiques	15
2.2 METHODOLOGIE DE CARTOGRAPHIE DES ZONES SOUMISES A LA SUBMERSION MARINE	16
2.2.1 Principes généraux	16
2.2.2 Méthode générale de détermination du niveau marin pour la zone d'étude.....	18
2.2.3 Période de retour de l'évènement de référence	21
2.3 DETERMINATION DES DIFFERENTES COMPOSANTES DES NIVEAUX EXTREMES	22
2.3.1 Niveaux statiques sans la contribution des vagues	22
2.3.2 Elévations locales liées au déferlement : le <i>set-up</i>	23
2.4 SYNTHESE	28
2.4.1 Sectorisation du littoral régional PACA.....	28
2.4.2 Incertitudes	30
3. Reconstitution des chroniques de vague	31
3.1 METHODE	31
3.1.1 Description du modèle	31
3.1.2 Données d'entrée.....	32
3.1.3 Données obtenues en sortie de modèle.....	33
3.2 DESCRIPTION DES DONNEES	34
3.2.1 Données bathymétriques	34
3.2.2 Données de vents vagues.....	38
3.2.3 Données de validation	38
3.3 VALIDATION	38
3.3.1 Méthode de calcul des erreurs statistiques (d'après Bulteau <i>et al.</i> , 2013)	38

3.3.2 Validation des données d'entrée sur la bouée Golfe du Lion	39
3.3.3 Validation des simulations en zone côtière	41
4. Analyse statistique sur les vagues	55
4.1 LOCALISATION DES POINTS DES « BOUEES VIRTUELLES »	55
4.2 EXPOSITION DU LITTORAL	56
4.2.1 De Fos-sur-mer à Cassis	57
4.2.2 De La Ciotat à Saint-Raphaël	58
4.2.3 De Saint-Raphaël à Menton	60
5. Cartographie de la submersion marine	61
5.1 RAPPELS	61
5.2 DONNEES TOPOGRAPHIQUES	61
5.3 CARTOGRAPHIES PRODUITES	63
5.3.1 Prise en compte des études existantes	63
5.4 PRINCIPAUX RESULTATS	63
5.4.1 Tableaux récapitulatifs et cartes des niveaux d'eaux	63
5.4.2 Atlas cartographiques	68
5.4.3 Données produites	68
5.4.4 Vulnérabilité des littoraux PACA à la submersion marine	69
6. Conclusions.....	71
7. Bibliographie	73

Liste des illustrations

Illustration 1 - Processus physiques en action lors d'une tempête : agitation et surélévation du plan d'eau (Source BRGM).....	16
Illustration 2 - Principe de cartographie des zones soumises à la submersion marine dans les Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) et dans le cadre de la mise en place de la Directive Inondation sur les Territoires à Risques d'inondation (TRI). Source : MEDDE, 2014.	17
Illustration 3 - Hypothèses retenues d'ampleur de l'élévation de la mer en raison du changement climatique global (ONERC, 2010).....	18
Illustration 4 - Principe de calcul de l'aléa submersion marine sur un littoral mixte avec des secteurs de plage, de côte rocheuse et de zones portuaires. Exemple du littoral du Lavandou - Bormes-les-Mimosas (Var). Les calculs sur les différentes secteurs qui se superposent (zones en vert) seront agrégés dans le résultat final par moyenne des hauteurs d'eau.	19
Illustration 5 – Principe méthodologique pour une évaluation de la submersion marine en zone côtière lors des tempêtes marines.	21

Illustration 6 - Valeurs de référence de la marée astronomique à Marseille, Toulon, et Nice (Source : SHOM,2013, pour PHMA, NM et PBMA, et DREAL LR / CETE pour PMVE). .	23
Illustration 7 - Estimation des surcotes horaires de période de retour 100 ans (T100) au marégraphes de Marseille, Toulon et Nice (d'après CETMEF, 2013b).....	23
Illustration 8 – Utilisation du levé Lidar pour le calcul des variables morphologiques : a) extrait du modèle numérique de terrain ; b) discrétisation du littoral tous les 50 m et ; c) variables morphologiques utilisées (Balouin et al., 2011).	25
Illustration 9 - Calcul des pentes sur le profil des plages (MNT Litto3D) et formulation d'Hallermeier (1981) – Exemple de la plage des Sablettes (La Seyne-sur-mer).	26
Illustration 10 - Limite externe des profils pour le calcul de la pente. a) cas des plages à deux pentes, b) cas des plages à barres sous-marines.....	27
Illustration 11 - Sectorisation du littoral régional et niveaux statiques sans la contribution des vagues retenus pour la « situation actuelle » et pour la situation 2100 (actuelle / 2100).29	
Illustration 12 - Tableau de synthèse des composantes des niveaux d'eau statique pour les échéances actuel et 2100. A ces valeurs, doit être rajoutée la contribution du set-up lié au déferlement des vagues sur les zones où il peut être calculé. (Formulation de Stockdon et al. (2006) pour les zones de plage Stockdon et al. (2006))......	29
Illustration 13 – Emprise du modèle SWAN. Les emprises R0, R1 et R2 sont définies par les cadres rouges. Les points rouges correspondent aux points de forçage aux conditions limites de R0. La grille noire correspond à la grille des réanalyses de vents CFSR de résolution 0.5°. La grille grise correspond à la grille des données de vagues NOAA-CFSR-med_10m.	32
Illustration 14 - Synthèse des données mise en entrée du modèle SWAN et données houlographiques validant le modèle.	32
Illustration 15 - Points d'extraction du Rang 0. Les points rouges correspondent aux positions de bouées. Les isobathes correspondent aux profondeurs 20 m, 30 m, 50 m et 100 m.	34
Illustration 16 - Points d'extraction aux Rangs 1 et 2 (points blancs). Les points rouges correspondent aux positions de bouées. Les isobathes correspondent aux profondeurs 20 m, 30 m, 50 m et 100 m.	34
Illustration 17 - Ensemble des sondes bathymétriques contenues dans les dalles Histolitt des côtes méditerranéennes françaises (en rouge), et couverture des données IFREMER à 250 m (en bleu).....	35
Illustration 18 - Distribution des erreurs de l'interpolation obtenues par validation croisée (histogrammes). La courbe rouge correspond aux fréquences cumulées (associées à l'axe des ordonnées à droite).	37
Illustration 19 - Localisation des zones dépourvues de bathymétrie haute résolution (A). MNT construit en utilisant les données GEBCO dans les zones de lacunes (B).	37
Illustration 20 - Position des bouées Golfe du Lion et Côte d'Azur. Image extraite du site NDBC.40	
Illustration 21 - Erreurs statistiques sur les hauteurs significatives (Hs, en mètres) et l'intensité du vent (Wnd en noeuds)	40
Illustration 22 - Performances sur les hauteurs significatives des données NOAA-CFSR-MED_10m (gauche) et l'intensité du vent du modèle CFSR (droite) à la bouée Golfe du Lion : Diagramme de dispersion (gris) superposé à la tendance linéaire des quantiles de vagues (rouge).	41
Illustration 23 - Performances sur les hauteurs significatives des données NOAA-CFSR-MED_10m (gauche) et l'intensité du vent du modèle CFSR (droite) à la bouée Côte d'Azur : Diagramme de dispersion (gris) superposé à la tendance linéaire des quantiles de vagues (rouge).	41

Illustration 24 - Performances sur les hauteurs significatives des données simulées à la bouée Porquerolles (à Gauche) et à la bouée Nice (à droite): Diagramme de dispersion (gris) superposé à la tendance linéaire des quantiles de vagues (rouge).	43
Illustration 25 - Performances sur les hauteurs significatives des données simulées à la bouée Leucate (à gauche) et à la bouée Sète (à droite): Diagramme de dispersion (gris) superposé à la tendance linéaire des quantiles de vagues (rouge).	43
Illustration 26 - Erreurs statistiques sur les hauteurs significatives (Hs, unité en mètre).	43
Illustration 27 - Sélection des tempêtes pour la phase de validation	44
Illustration 28 -Tempête du 16 au 18 décembre 1997 à la bouée Marseillan. Haut : Hs, Bas : Tp. Les données observées sont représentées en gris et les simulations en bleu.	46
Illustration 29. Tempête du 2 février 2009 aux bouées Espiguette et Porquerolles. Les données observées sont représentées en gris et les simulations en bleu.	47
Illustration 30. Tempête du 2 au 6 janvier 2008 aux bouées Nice et Porquerolles. Les données observées sont représentées en gris et les simulations en bleu.	48
Illustration 31. Tempête du 21 au 23 mars 2008 aux bouées Nice et Porquerolles. Les données observées sont représentées en gris et les simulations en bleu.	49
Illustration 32. Tempête du 28 novembre au 1 décembre 2008 aux bouées Nice et Porquerolles. Les données observées sont représentées en gris et les simulations en bleu.	50
Illustration 33. Tempête du 14 au 16 décembre 2008 aux bouées Nice et Porquerolles. Les données observées sont représentées en gris et les simulations en bleu.	51
Illustration 34. Tempête du 27 décembre 2008 aux bouées Leucate et Espiguette. Les données observées sont représentées en gris et les simulations en bleu.	52
Illustration 35 - Implantation des bouées virtuelles. En bleu, les données utilisées au large du SCoT Provence-Méditerranée. En rouge, celles utilisées en complément dans le cadre de cette étude.	55
Illustration 36 - Exemple de corrélogramme Hs/Tp simulé à la bouée virtuelle Nice, et détermination de la période de pic centennale $T_{p,100}$ en fonction de la hauteur significative centennale $H_{s,100}$	56
Illustration 37 - Synthèse des statistiques des vagues sur les points « bouées virtuelles » de Fos-sur-mer à Cassis.	57
Illustration 38 - Exposition du littoral en fonction des bouées virtuelles pour le département des Bouches-du-Rhône. Les polygones rouges correspondent à la zone d'affectation des statistiques des vagues	57
Illustration 39 - Synthèse des statistiques des vagues sur les points « bouées virtuelles » de La Ciotat à Saint-Raphaël.	58
Illustration 40 - Exposition du littoral en fonction des bouées virtuelles pour l'Ouest du département du Var. Les polygones rouges correspondent à la zone d'affectation des statistiques des vagues	59
Illustration 41 - Exposition du littoral en fonction des bouées virtuelles pour l'Ouest du département du Var. Les polygones rouges correspondent à la zone d'affectation des statistiques des vagues	59
Illustration 42 - Synthèse des statistiques des vagues sur les points « bouées virtuelles ».	60
Illustration 43 - Exposition du littoral en fonction des bouées virtuelles pour l'Ouest du département du Var. Les polygones rouges correspondent à la zone d'affectation des statistiques des vagues	60
Illustration 44 - Données Litto3D sur le secteur de Toulon (Orthlittorale V2, 2011, ©MEDDE, en arrière plan).	62

Illustration 45 - Données Litto3D sur le secteur de Hyères (Orthlittorale V2, 2011, ©MEDDE, en arrière plan).....	62
Illustration 46 - Tableau de synthèse des niveaux pour les plages des Bouches-du-Rhône	64
Illustration 47 - Tableau de synthèse des niveaux pour les plages des Bouches-du-Rhône	66
Illustration 48 - Tableau de synthèse des niveaux pour les plages des Bouches-du-Rhône	68
Illustration 49 - Classification de l'aléa submersion marine en fonction de la hauteur d'eau dans chaque maille.....	69
Illustration 50 – Analyse statistique des surcotes au marégraphe de Marseille (CETMEF, 2013b).	81
Illustration 51 – Analyses statistique des surcotes au marégraphe de Toulon (CETMEF, 2013b).	82
Illustration 52 – Analyse statistique des surcotes au marégraphe de Nice (CETMEF, 2013b). .	83
Illustration 53 - Rose des vagues. Gauche: Bouée virtuelle P_48 « Les Goudes ». Droite: Bouée de Nice. La fréquence d'occurrence des couple (Hs,Dp) se lit sur l'axe radial, avec une discrétisation de 10° pour Dp et 50cm pour Hs	88
Illustration 54 - Exemple d'échantillonnage par la méthode d'excès supérieurs à un seuil (POT, pour Peak Over Threshold).Le seuil u_1 est représenté par la ligne en pointillé rouge et les pics de H_s sont entourés en rouge.Un critère de séparation temporel entre 2 événements est appliqués, il est pris égal à 36 heures.....	89
Illustration 55 - Arbre de décision illustrant la méthode d'identification du seuil u_2 . u_{max} est pris comme le seuil correspondant à 1 événement par an en moyenne. (Rapport BRGM/RP-63949-FR, Stépanian et al., 2014).	90
Illustration 56 - Recherche du seuil avec la propriété 1 au point Nice.Test de $u_1=1,7m$. Les intervalles de confiance à plus et moins 95% sont représentés respectivement en vert et rouge.....	91
Illustration 57 - Evolution des paramètres σ^* et ξ en fonction du seuil. Exemple du point Nice.	91
Illustration 58 - Evolution de la p-valeur du χ^2 (p-valeur >0,1) en fonction du seuil. Identification des seuils envisageables pour les p-valeur maximales. Exemple du point Nice.	92
Illustration 59 - Evolution des $H_{s,100}$ en fonction du seuil. Les points bleus correspondent aux estimations de $H_{s,100}$ par la méthode des moments (MOM) et les points rouges et verts correspondent respectivement aux estimations par méthode des moments pondérés (PWM) et du maximum de vraisemblance (ML).	92
Illustration 60: Exemple de l'ajustement d'une loi GPD au point de bouée Nice. Les paramètres de cette loi sont estimés par la méthode des moments MOM et la distribution de probabilité empirique des données est calculée avec la formule de Hazen : $P_{emp}(H_s \leq H_s^i) = i - 0,5n$	93

Liste des annexes

Annexe 1 - Composition du Comité Technique.....	75
Annexe 2 - Analyses statistiques des surcotes aux marégraphes de Marseille, Toulon et Nice, d'après CETMEF (2013b).....	79
Annexe 3 - Méthode statistique de calcul des périodes de retour des vagues au large.....	85
Annexe 4 - Fiches statistiques des climats de houle	95
Annexe 5 - Cartographie des zones de calcul du wave set-up.....	123

Annexe 6 - Atlas cartographiques à 1/25 000 – Niveau de référence de l'évènement moyen.....	131
Annexe 7 - Atlas cartographiques à 1/25 000 – Niveau de référence de l'évènement moyen avec prise en compte du changement climatique	135
Annexe 8- Atlas cartographiques à 1/25 000 – Scénario « Evènement moyen"	139
Annexe 9 - Atlas cartographiques à 1/25 000 – Scénario « Evènement moyen avec prise en compte du changement climatique »	143

1. Introduction

1.1 Contexte de l'étude

1.1.1 Exposition de la région PACA à la submersion marine

Outre l'aléa d'inondation par débordement de cours d'eau, la région Provence-Alpes-Côte d'Azur est exposée au risque de submersion marine du fait de son importante façade littorale et de ses caractéristiques géomorphologiques.

Ainsi, les zones basses sableuses sont particulièrement concernées, et tout particulièrement le delta du Rhône du fait de la topographie locale plane et des nombreuses connexions hydrauliques entre la mer et les étangs camarguais.

Cependant, en dehors de la Camargue, et des grandes plaines alluviales du Gapeau, de l'Argens et des embouchures des fleuves côtiers de moindre importance (Siagne, Loup, Môle...), le profil principalement rocheux des côtes de la région et la topographie associée limitent fortement les territoires exposés à la submersion marine.

La détermination et la cartographie de ces territoires soumis à un aléa submersion marine nécessite une évaluation des niveaux marins de référence, qui peuvent être atteints lors d'une tempête marine et être à l'origine d'une submersion.

1.1.2 Cartographie de la Directive Inondation

Dans le cadre de la mise en œuvre de la Directive Inondation en 2013², un premier travail d'harmonisation des niveaux marins de référence et extrême à l'échelle de la façade méditerranéenne a été réalisé par la DREAL Languedoc-Roussillon et le CEREMA avec l'accord de la DREAL Provence-Alpes-Côte-D'azur, sur la base des informations disponibles sur le Languedoc-Roussillon.

Les Territoires à Risques d'Inondation (TRI) proposés aux Commissions Inondation de Bassin et Commissions Territoriales de Bassin au printemps 2012 ont été approuvés par le Préfet en décembre 2012.

La méthode retenue pour la cartographie au titre de la Directive inondation est identique à celle retenue sur les autres TRI de la façade méditerranéenne, à savoir la superposition d'un niveau marin statique à la topographie, suivant les hypothèses suivantes :

- En Méditerranée, façade caractérisée par un régime micro-tidal³, cette méthodologie est retenue dans la mesure où les niveaux marins restent forts plusieurs jours contrairement aux façades macro-tidales, où le temps d'attaque des vagues sur le profil de plage est contraint par le balancement des marées.

² MEDDTL/DGPR/SNRH/BRM - Circulaire du 5 juillet 2011 relative à la mise en œuvre de la politique de gestion des risques d'inondation NOR : DEVP1114677C.

http://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/fiches/BO201115/met_20110015_0100_0020.pdf

³ Microtidal : régime de marée avec un marnage (différence de niveau en pleine mer et basse mer) inférieure à 2 m.

- Pour effectuer cette superposition et obtenir des classes de hauteur d'eau, le Modèle Numérique de Terrain LITTO3D (SHOM/IGN) est utilisé pour les données de la partie terrestre après un traitement simple de lissage des pixels.
- Au niveau des fleuves côtiers, des zones inondables par submersion marine peuvent remonter vers l'amont de quelques kilomètres. Ces zones sont limitées aux berges des cours d'eau et n'ont volontairement pas été retirées de l'emprise submersion marine car elles renseignent sur l'influence de la condition aval (niveau marin).
- De plus, aucun ouvrage de protection contre la submersion marine n'a été pris en compte.

Pour chaque événement (fréquent, moyen et extrême) un niveau marin a été retenu, de manière homogène sur toute la façade méditerranéenne :

- Cartographie de l'événement fréquent : il correspond à l'événement historique, ou causant les premiers dommages, de période de retour comprise entre 10 et 30 ans. Un niveau marin de +1,30 m NGF a été retenu pour l'événement fréquent. Comme pour les autres scénarios moyens et extrêmes, il est identique à ceux des TRI de Languedoc-Roussillon.
- Cartographie de l'événement moyen : il correspond à l'événement historique de période de retour comprise entre 100 et 300 ans. Un niveau marin de +2 m NGF a été retenu pour l'événement moyen, il correspond à celui du niveau marin centennal recommandé dans la doctrine PPRL du Languedoc-Roussillon.
- Cartographie de l'événement moyen tenant compte du changement climatique : une augmentation de 40 cm est appliquée au niveau marin de l'événement moyen [conformément à la circulaire du 27 juillet 2011 relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux qui préconise la prise en compte du scénario moyen de l'ONERC (2010)]. Le niveau marin pour un événement moyen avec prise en compte du changement climatique est alors de +2,40 m NGF.
- Cartographie de l'événement extrême : il correspond à l'événement historique de période de retour supérieure à 1000 ans. Un niveau marin de +2,80 m NGF a été retenu pour l'événement extrême. Il n'existe pas de données historiques permettant de comparer les emprises obtenues pour des événements de cette période de retour.

Ces cartographies sont disponibles en ligne et ont été diffusées aux communes incluses dans le TRI par les services de l'Etat :

<http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/>

Cependant, la généralisation de cette méthode sur la façade méditerranéenne rocheuse a soulevé des questionnements locaux car les conditions de houle et les caractéristiques de la côte et des fonds marins entre les côtes sableuses du Golfe du Lion, y compris le linéaire camarguais et les côtes rocheuses provençales et maralpines sont très différentes. Elle a ainsi pu conduire parfois à des estimations forfaitaires des niveaux de submersion considérés.

1.2 Objectif de l'étude

Pour affiner la compréhension des dynamiques de submersion sur la partie rocheuse du littoral de la région PACA, la DREAL PACA souhaite aujourd'hui produire un document de Porté à Connaissance de l'aléa submersion marine sur le périmètre régional. Ces données alimenteront aussi les Stratégies Locales de Gestion des Risques d'Inondations (SLGRI) des Territoires à Risques Importants d'Inondation (TRI) en matière d'amélioration de la connaissance du risque.

Pour cela, il est proposé de mener en premier lieu une étude de caractérisation de l'aléa submersion marine sur le littoral rocheux régional, à travers une cartographie des zones potentiellement soumises à une inondation par la mer dans le cas d'un phénomène de submersion lié à une surélévation temporaire du niveau moyen de la mer lors d'une tempête. Les caractéristiques de cette tempête sont définies en fonction des conditions de marée et de la période de retour des surcotes et des vagues.

Depuis 2013, le BRGM a réalisé dans le cadre de sa mission d'appui aux politiques publiques une série d'études de caractérisation de l'aléa submersion marine sur le périmètre régional :

- entre Saint-Cyr-sur-Mer et le Lavandou, en partenariat avec le Syndicat Mixte du SCoT Provence-Méditerranée et les communes littorales concernées par l'élaboration du SCoT (Stépanian *et al.*, 2014 ; BRGM RP-63949-FR) ;
- sur le littoral de la plaine du Ceinturon, en partenariat avec la commune d'Hyères-les-Palmiers (Le Roy *et al.*, 2014 ; BRGM RP-63945-FR), dans le cadre de l'appel à projet du MEDDE sur la « relocalisation des activités et des biens » ;
- sur le littoral de la Camargue, en partenariat avec la DDTM13 (BRGM RP-65241-FR – phase 2 en cours).

La présente étude relative à la submersion marine sur le littoral rocheux est ainsi réalisée par le BRGM en partenariat avec la DREAL PACA, dans le cadre de l'Observatoire Régional des Risques Majeurs en région PACA⁴.

L'objectif est de produire une cartographie homogène des zones soumises à l'aléa submersion marine sur l'ensemble du littoral allant de Fos-sur-Mer à la frontière italienne, selon la méthodologie employée par le BRGM sur le périmètre du SCoT Provence Méditerranée (Stépanian *et al.*, 2014) :

- Le scénario de référence retenu est l'aléa submersion marine pour une période de retour de 100 ans pour deux situations du niveau marin :
 - o Une situation actuelle avec un niveau marin proche de sa position actuelle (il est néanmoins augmenté d'un forfait de +0,20 cm) ; il correspond au scénario d'« évènement moyen » au sens de la Directive Inondation.
 - o Une situation à échéance 2100, avec un niveau marin intégrant l'impact du changement climatique avec une surélévation du niveau de la mer de +0.60 cm ; il correspond au scénario « évènement moyen avec prise en compte du changement climatique » au sens de la Directive Inondation.
- La méthode s'appuie sur :
 - o Un calcul de manière semi-empirique des niveaux d'eaux à la côte atteints par la mer par une approche probabiliste en déterminant les évènements en fonction de leur période de retour, et ce pour chaque « unité homogène » du littoral, comme par exemple les plages, les grandes baies ou les cellules sédimentaires.
 - o L'utilisation de la cote du niveau d'eau ainsi obtenue pour caractériser les zones potentiellement soumises à une inondation par la mer est ainsi déterminée pour chaque grand secteur du littoral.
 - o Une modélisation des climats de vagues au large du littoral sur la période 1979-2009 (pas de temps horaire) pour disposer de données régionalisées des vagues au niveau de chaque grande baie. Les séries de données obtenues par modélisation sont suffisamment longues pour des calculs statistiques robustes de période de retour des hauteurs de vagues.

⁴ observatoire-regional-risques-paca.fr/

Les résultats de cette étude et les cartographies produites seront portés à la connaissance des décideurs locaux pour prise en compte dans l'urbanisme.

Outre la production de références locales et une amélioration de la connaissance sur l'ensemble du littoral rocheux, ils permettront d'identifier les zones où les modalités de la submersion (franchissement ou débordement) nécessiteront des évaluations plus fines au travers des études complémentaires, notamment par l'emploi de modélisations dynamiques qui prennent en compte l'ensemble des processus hydrodynamiques de la submersion marine.

1.3 Organisation du rapport

Le rapport présente les actions réalisées dans le cadre de cette opération. Il est constitué des parties suivantes :

- Présentation de la méthodologie de cartographie de l'aléa submersion marine ;
- Protocole de génération de la base de données de vagues (1979-2009) ;
- Analyse statistique des périodes de retour des évènements ;
- Présentation des cartographies de l'aléa submersion marine.

Un atlas de cartes des zones soumises à un événement de submersion marine de période de retour centennale est réalisé à l'échelle 1/25 000, et est fourni en annexes 4 et 5 pour les deux situations :

- situation « actuelle » définie comme « évènement moyen » ;
- situation à l'horizon 2100, définie comme « évènement moyen avec prise en compte du changement climatique ».

2. Méthodologie

2.1 Définitions

2.1.1 Phénomène de submersion marine

La submersion marine est définie comme « une inondation temporaire de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et marégraphiques sévères » (MEEDAT, 1997). Les submersions envahissent généralement les terrains situés en dessous du niveau des plus hautes mers mais atteignent aussi parfois des altitudes supérieures si des projections d'eaux marines franchissent des ouvrages de protection et/ou la crête des cordons littoraux.

Elles peuvent se produire lorsqu'il y a :

- rupture d'un cordon sédimentaire (plage, dunes, cordon de galets) suite à une forte érosion ;
- débordement ou rupture de digues et d'ouvrages de protection ;
- franchissements exceptionnels de ces ouvrages par des « paquets de mer ».

Les franchissements des ouvrages par les paquets de mer peuvent s'accompagner sur les plages à galets de projections de volumes très importants de galets ayant un fort impact destructif.

2.1.2 Processus physiques

Les processus physiques mis en jeu lors des phénomènes de tempêtes sont liés principalement à l'action de la pression atmosphérique et du vent sur le plan d'eau (Illustration 1) :

- la chute de la pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d'eau. C'est le phénomène de baromètre inverse. Une diminution de 1hPa équivaut approximativement à une élévation de 1 cm du plan d'eau ;
- le vent a un double effet sur le plan d'eau :
 - o il est à l'origine de l'agitation du plan d'eau et de la formation des vagues dont les caractéristiques, hauteur, période, secteur de provenance, sont directement liées à celles du vent et au fetch⁵ du bassin maritime ;
 - o il exerce une contrainte à la surface de l'eau en générant une modification du niveau du plan d'eau statique (surcote ou décote) et des courants.

Les vagues, générées au large par le vent, se propagent vers la côte. Lorsqu'elles déferlent au niveau du littoral, elles transfèrent leur énergie sur la colonne d'eau, ce qui provoque une surélévation moyenne du niveau de la mer (le « *wave set-up* », ou *set-up*, ou surcote liée aux vagues) pouvant s'élever à plusieurs dizaines de centimètres.

Ainsi, dans ces conditions de tempête, le niveau d'eau à la côte est alors déterminé par (Illustration 1) :

⁵ Fetch : distance en mer ou sur un plan d'eau au-dessus de laquelle souffle un vent donné sans rencontrer d'obstacle.

- le niveau de la marée : il reste faible dans le contexte méditerranéen mais avec un marnage pouvant atteindre environ 0,5 m au maximum, il peut se cumuler à la surcote et ainsi favoriser la pénétration des eaux marines sur les terres émergées ;
- l'importance de la « surcote atmosphérique » ou « surcote de tempête » qui résulte de l'effet baromètre inverse et de l'élévation du niveau du plan d'eau sous l'effet du vent ;
- le niveau de surcote liée au déferlement des vagues (*wave set-up*) ;
- le niveau maximal atteint par la mer, qui est défini comme la limite du « jet-de-rive » (*swash*). On appelle *run-up*, le niveau maximal atteint par le jet-de-rive par rapport au niveau marin au repos.

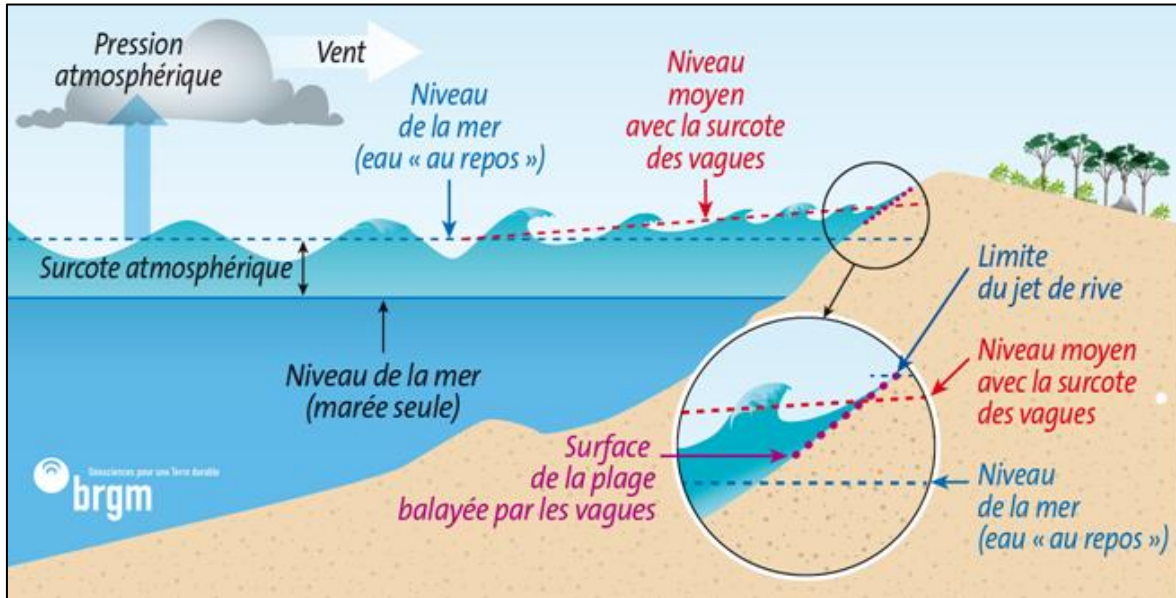


Illustration 1 - Processus physiques en action lors d'une tempête : agitation et surélévation du plan d'eau (Source BRGM).

C'est la détermination de l'ensemble de ces composantes (marée, surcote, *wave set-up*, *run-up*), et leur addition qui permet de calculer les niveaux de référence du niveau marin pour la caractérisation d'un aléa « submersion marine » pour une période de retour et une échéance donnée.

2.2 Méthodologie de cartographie des zones soumises à la submersion marine

2.2.1 Principes généraux

a) Comparaison des niveaux marins avec la topographie côtière

La méthodologie repose avant tout sur l'estimation du niveau marin atteint lors des tempêtes et par la suite consiste à croiser les données topographiques avec les niveaux d'eaux extrêmes obtenus par la combinaison de modèles physiques et analytiques (Illustration 2).

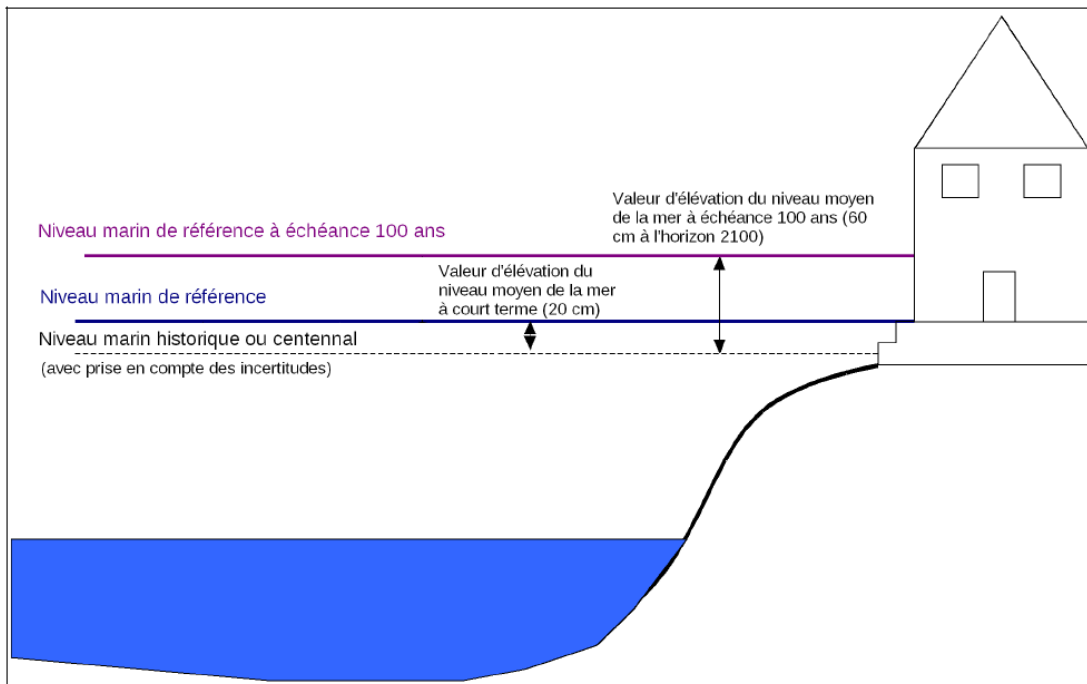


Illustration 2 - Principe de cartographie des zones soumises à la submersion marine dans les Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) et dans le cadre de la mise en place de la Directive Inondation sur les Territoires à Risques d'inondation (TRI). Source : MEDDE, 2014.

Une fois le niveau de référence déterminé pour un secteur littoral, ce niveau est comparé à la topographie locale, et les zones situées en-dessous du niveau de référence sont alors considérées comme inondables par submersion marine. Ce type d'approche permet de caractériser l'inondation du haut de plage, ou de l'arrière-cordon, et les points éventuels de franchissement dunaire. D'autre part elle permet la caractérisation de la hauteur de la tranche d'eau atteinte dans les zones inondées.

Cette projection à l'infini de la submersion ne tient pas compte des processus d'écoulements à terre et des effets des ouvrages qui peuvent contrôler les écoulements, mais elle présente l'avantage de pouvoir être employée sur de larges territoires.

En effet, des études plus précises en termes de description des processus physiques de la submersion marine nécessitent des moyens de modélisation numérique plus importants (Le Roy *et al.*, 2014 ; Paris *et al.*, 2016).

b) Prise en compte du changement climatique

Pour évaluer l'aléa submersion marine dans une situation future, on ajoute à la cote du niveau marin moyen actuel une composante « élévation future du niveau marin », liée au changement climatique global, dont l'amplitude varie en fonction de l'échéance retenue et les différentes hypothèses de vitesse de remontée du niveau marin.

Au niveau national, en raison de la dynamique importante des recherches portant sur ce sujet, l'ONERC⁶ (MEDDE) a publié en 2010 une synthèse des études issues du 4^{ème} rapport du GIEC⁷ (2007) pour établir des scénarios d'élévation du niveau de la mer à différentes échéances temporelles, dans l'objectif de fournir une doctrine aux différentes politiques publiques. Ainsi, les hypothèses d'ampleur de remontée du niveau marin retenues sont les suivantes pour les différentes échéances (Illustration 3) :

Hypothèse	2030	2050	2100
Optimiste	+0,1 m	+0,17 m	+0,40 m
Pessimiste	+ 0,14 m	+0,25 m	+0,60 m
Extrême	+ 0,22 m	+0,41 m	+1,00 m

Illustration 3 - Hypothèses retenues d'ampleur de l'élévation de la mer en raison du changement climatique global (ONERC, 2010).

Suivant les recommandations de l'ONERC, les valeurs utilisées pour l'évaluation des aléas submersion marine dans les Plans de Prévention des Risques Littoraux pour les cartographies des aléas à échéance 2100, correspondent au scénario pessimiste (MEDDE, 2014).

De plus, dans le cadre des démarches de prévention des risques littoraux, la prise en compte de l'effet du changement climatique sur l'élévation du niveau de la mer est réalisée via l'addition de forfaits au niveau marin de référence :

- un forfait de +0,20 m pour un scénario à une échéance actuelle ;
- un forfait de +0,60 m pour un scénario à échéance 2100.

2.2.2 Méthode générale de détermination du niveau marin pour la zone d'étude

La détermination du niveau marin passe par l'évaluation et/ou le calcul de ses différentes composantes, qui sont :

- le niveau statique qui est fonction :
 - o du niveau de marée,
 - o de la surcote atmosphérique,
 - o de la surcote liée aux vagues (*wave set-up*);
- le niveau instantané maximal atteint par le jet de rive sur la plage (*wave run-up*).

a) Sectorisation des calculs

Cette détermination est fonction de la nature des environnements littoraux, plages ouvertes, linéaire rocheux et domaine portuaire (Illustration 4).

⁶ Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique. Direction Générale de l'Energie et du Climat. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.

⁷ Groupe d'experts Inter-gouvernemental d'Etude du Climat.

En effet, les effets des vagues (*wave set-up* et *wave run-up*) ne sont calculés que sur les zones de plages, à l'aide d'une formulation empirique.

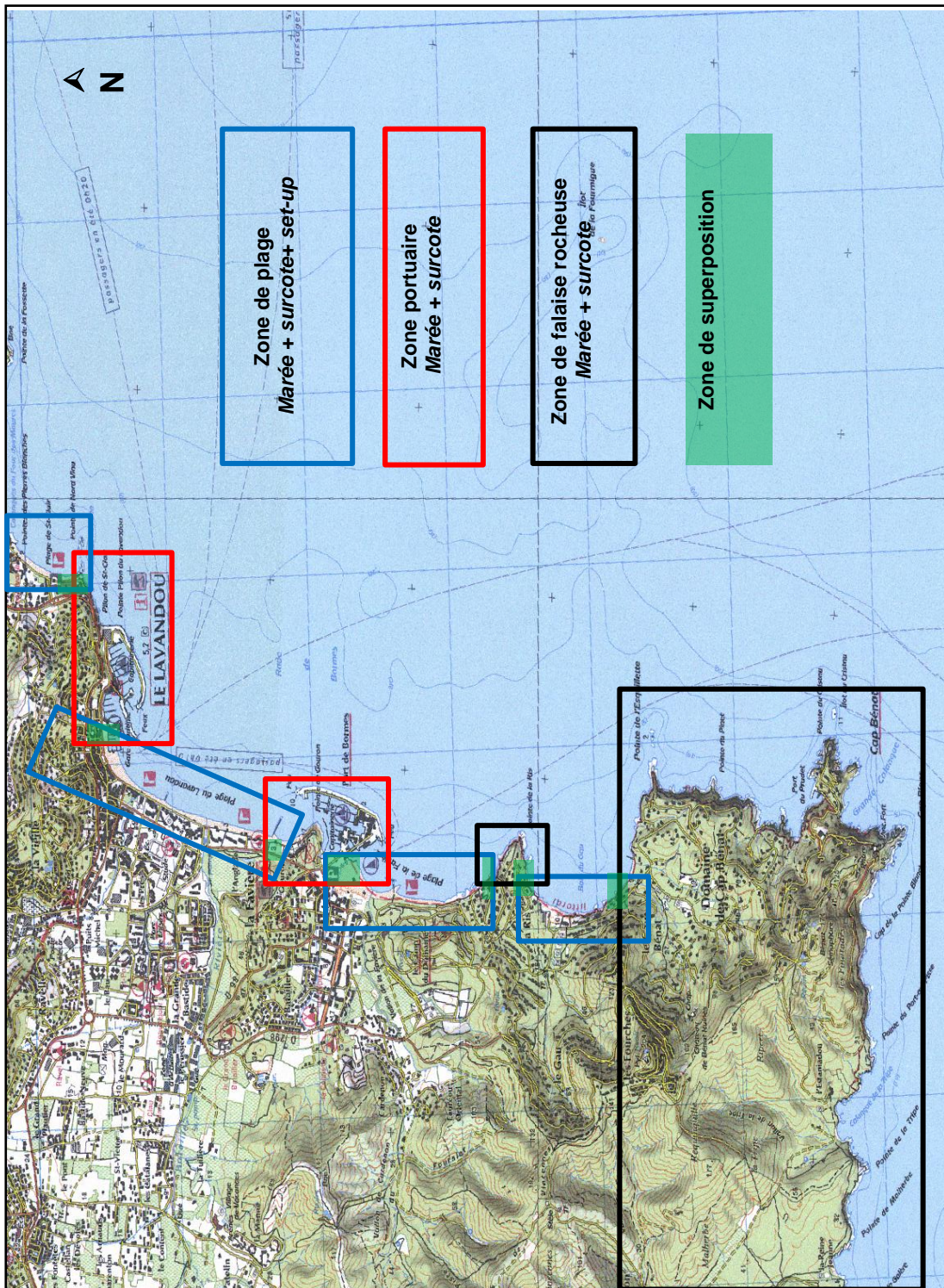


Illustration 4 - Principe de calcul de l'aléa submersion marine sur un littoral mixte avec des secteurs de plage, de côte rocheuse et de zones portuaires. Exemple du littoral du Lavandou - Bormes-les-Mimosas (Var). Les calculs sur les différents secteurs qui se superposent (zones en vert) seront agrégés dans le résultat final par moyenne des hauteurs d'eau.

Pour les zones de falaises rocheuses et pour les zones portuaires, il ne sera pas ajouté de composante liée aux vagues :

- en raison de la remontée rapide de l'altitude des falaises rocheuses et par conséquent de leur faible vulnérabilité à la submersion marine;
- dans les zones portuaires, l'utilisation des formulations empiriques est inappropriée (hors cadre d'application), et l'évaluation du *set-up* nécessite des modélisations d'agitation portuaires spécifiques.

Les calculs des hauteurs d'eau dans les zones exposées à la submersion marine s'effectuent sur les différents secteurs de manière séparée, mais avec des zones de superposition entre les secteurs voisins (Illustration 4).

Les résultats par secteur contiguës homogènes (plage, falaise, ports) sont par la suite agrégés dans une couche d'information des hauteurs d'eau. Pour obtenir un continuum progressif des valeurs le long du littoral, une moyenne des hauteurs d'eau sera réalisée au niveau des zones de superposition entre deux zones contiguës plage/falaise ou plage/zone portuaire.

b) Cas des falaises et des ports

Pour les zones portuaires et de falaises, c'est la cote du niveau statique sans la contribution des vagues qui est retenue, elle sera déterminée par addition :

- du niveau de marée du marégraphe de référence du secteur ;
- de la valeur de la surcote centennale déterminée au même marégraphe.

c) Cas des plages

Dans le cas des plages, la cote retenue est celle du niveau statique additionnée de l'effet des vagues (*wave set-up*), qui est calculée par l'utilisation de formules empiriques qui dépendent des caractéristiques de la houle au large et des caractéristiques de la topographie littorale.

Les différentes étapes de la méthodologie retenue pour le calcul sur ces secteurs sont résumées dans l'illustration 5, ci-dessous.

Dans le cadre de cette étude, la composante du *run-up* ne sera pas prise en compte en raison des incertitudes qui pèsent sur son estimation dans le cadre de cette étude à portée régionale. En effet, la grande diversité des aménagements du haut de plage (murs, falaises, perrés) conditionnent fortement la propagation des submersions par franchissement et l'extension maximale du *run-up* calculé n'est donc pas représentative des phénomènes.

D'une part, sur des secteurs fortement aménagés, cette valeur théorique ne correspondrait pas à la réalité, et d'autre part, les choix faits précédemment sont des choix conservatifs.

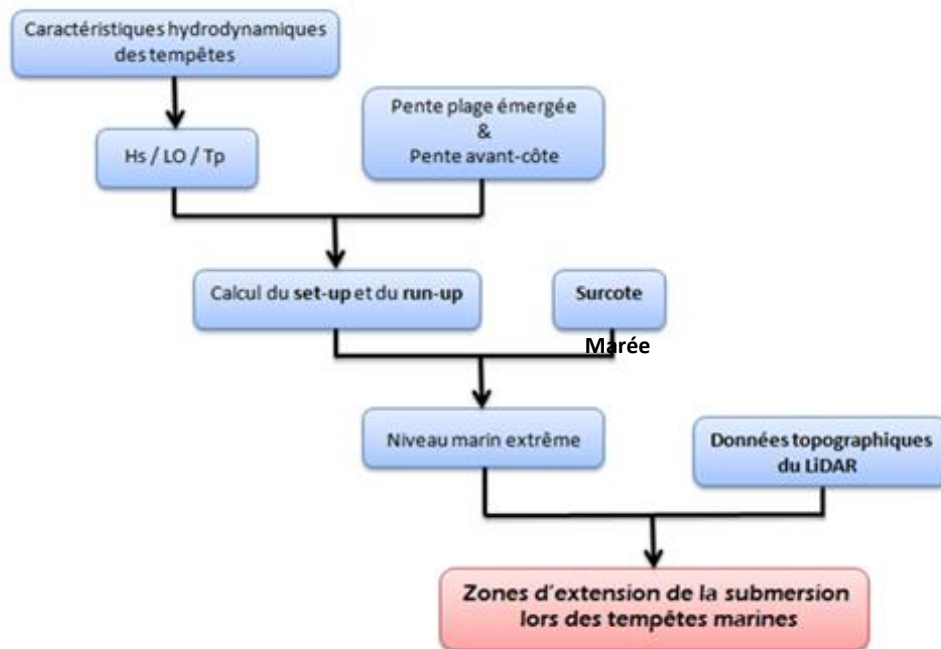


Illustration 5 – Principe méthodologique pour une évaluation de la submersion marine en zone côtière lors des tempêtes marines.

Les différentes composantes retenues et les méthodes utilisées pour leur estimation sont détaillées dans les paragraphes suivants.

2.2.3 Période de retour de l'évènement de référence

En termes de forçages hydrodynamiques (marée, surcote, vagues), les différentes composantes constituant les niveaux de référence sont ainsi estimées à l'occurrence centennale.

A la différence des côtes de la façade atlantique et de la Manche (SHOM/CETMEF, 2012 et CETMEF, 2013a), il n'existe pas d'études de référence des niveaux extrêmes atteints par la mer en Méditerranée.

Aussi, la cote centennale du niveau d'eau sera déterminée par addition :

- d'une composante de marée déterminée sur la base des données marégraphiques à Marseille, Toulon, et Nice (SHOM, 2013) ;
- d'une composante liée à la surcote centennale calculée par analyse statistique des données marégraphiques à Marseille, Toulon, et Nice (CETMEF, 2013b) ;
- d'une composante liée à la surcote liée aux vagues (*set-up*) pour une tempête d'occurrence centennale (définie par la hauteur significative de la houle centennale et la période de pic associée).

La détermination des différentes composantes et les niveaux retenus dans le cadre du présent rapport sont détaillés ci-après.

Il est utile de rappeler qu'en contexte méditerranéen, les phénomènes de surcote atmosphérique et de tempêtes marines, sont très généralement concomitants (dépression atmosphérique, vents de secteur marins et vagues fortes).

Ainsi les conditions de forçages traitées (croisement de valeurs de retour centennales pour les surcotes et les vagues) représentent une situation théorique de période de retour de dépassement conjoint probablement supérieure à un événement de période de retour centennale.

Ce choix méthodologique permet de garantir de ne pas sous-estimer les niveaux marins susceptibles d'être atteints à la côte lors d'un événement centennal.

2.3 Détermination des différentes composantes des niveaux extrêmes

2.3.1 Niveaux statiques sans la contribution des vagues

a) La marée

La marée astronomique est faible en Méditerranée. Le marnage maximal mesuré est de (SHOM, 2013) :

- 0,43 m à Marseille ;
- 0,47 m à Toulon ;
- 0,49 m à Nice.

Le niveau des Plus Hautes Marées Astronomiques (PHMA), le niveau des Pleines Mers de Vive-Eau (PMVE, marée de coefficient 95-100), le niveau moyen (NM) et le niveau des Plus Basses Marées Astronomiques (PBMA), sont indiqués pour ces trois marégraphes dans l'illustration 6.

Après validation du comité technique, les valeurs de référence de la composante de marée retenues dans le cadre de cette étude, correspondent à une cote de pleine mer pour une marée moyenne de vives eaux (PMVE).

Ce choix est en cohérence avec les démarches conduites dans l'élaboration de la première étape de la Directive Inondation en 2013 (DREAL LR et CETE, 2013).

	Cote en m NGF/IGN69			
	PHMA	PMVE	NM	PBMA
Marseille	+0,37	+ 0,25	+0,16	-0,06
Toulon	+0,39	+ 0,24	+0,17	-0,08
Nice	+0,36	+ 0,24	+0,13	-0,13

Illustration 6 - Valeurs de référence de la marée astronomique à Marseille, Toulon, et Nice (Source : SHOM,2013, pour PHMA, NM et PBMA, et DREAL LR / CETE pour PMVE).

b) Surcotes

Une estimation des surcotes extrêmes jusqu'à une période de retour de 1000 ans a été réalisée par le CETMEF (2013b). Ces estimations ont été faites pour les sites métropolitains disposant d'au moins 10 ans d'observations marégraphiques et ont été établies par une méthode d'analyse statistique des extrêmes. Les graphiques des ajustements statistiques et les estimations des périodes de retour des surcotes pour ces 3 marégraphes sont rassemblées dans l'Annexe 2.

L'illustration 7 rassemble les valeurs des surcotes horaires centennales pour les trois marégraphes principaux de la région PACA.

	Surcote T100 m
Marseille	1,11
Toulon	0,64
Nice	0,65

Illustration 7 - Estimation des surcotes horaires de période de retour 100 ans (T100) au marégraphes de Marseille, Toulon et Nice (d'après CETMEF, 2013b).

On note une forte différence entre les surcotes à Marseille et celles à Toulon et Nice. Cette estimation très supérieure est liée à la position du marégraphe de Marseille qui est installé dans une situation très exposée aux vagues du large. En effet, d'une part l'enregistrement des niveaux instantanés est fortement perturbé par les trains de vagues, d'autre part le marégraphe de Marseille présente un fonctionnement incertain (DREAL LR et CETE, 2013).

En accord avec le Comité Technique, il est convenu de ne pas tenir compte des valeurs de surcote à Marseille, mais d'appliquer pour le secteur de Fos/Mer à Cassis, les valeurs de surcotes définies à Toulon, soit 0,64 m de surcote centennale.

2.3.2 Elévations locales liées au déferlement : le *set-up*

Le phénomène de *set-up* est une surélévation du niveau de la mer due au déferlement des vagues. Cette surélévation est localisée entre le point de déferlement et la côte et peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres. La surface concernée va alors s'étendre sur la partie

maritime comprise entre la zone de déferlement et la ligne d'eau, la valeur maximale se situant proche de la ligne d'eau (cf. Illustration 1).

Les processus en jeu dans la zone de jet de rive sont particulièrement complexes, et la modélisation physique de ces phénomènes ne peut pas, à l'heure actuelle, être réalisée à des échelles régionales.

Les études ayant abordé la physique de la zone de jet de rive s'appliquent sur des zones d'étude allant de quelques centaines de m à quelques km, avec des moyens et des temps de calculs importants. Pour exemple, dans le cas du projet de modélisation de la submersion marine sur le littoral du Ceinturon (Leroy *et al.*, 2014), le temps de simulation sur modèle SWASH est de 2 jours de calculs pour une simulation d'une période de 10h 30 minutes (calculs réalisés sur 48 processeurs), pour un domaine de 1,1 km² (grille de 961 X 1271 mailles de 1 m).

a) Formulations empiriques

Plusieurs auteurs ont toutefois développé des méthodes semi-empiriques permettant de relier les hauteurs de *run-up* et de *set-up* aux conditions météo-marines au large. C'est le cas de Stockdon *et al.* (2006), qui ont pu obtenir de bons résultats en comparant leur prévision à l'aide de données au large avec des observations vidéo de ces niveaux sur la plage.

Stockdon *et al.* (2006) calculent les valeurs de *set-up* et *run-up* via la relation :

$$R_{max} = Setup + Runup = 1.1 \left(\underbrace{0.35\beta_f(H_0L_0)^{1/2}}_{\text{Estimation du set-up avec la pente de l'avant-côte}} + \underbrace{\frac{[H_0L_0(0.563\beta_f^2+0.004)]^{1/2}}{2}}_{\text{Estimation du run-up avec la pente de la plage émergée}} \right)$$

avec :

- L_0 : la longueur d'onde des vagues au large définie comme étant une fonction de la période des vagues $L_0 = \frac{gT_0^2}{2\pi}$;
- T_0 : la période des vagues (constante quelle que soit la profondeur) ;
- H_0 : la hauteur significative des vagues de la houle au large ;
- β_f : paramètre de pente de la plage et de l'avant-côte.

Cette formulation a été validée par des observations de terrain dans des environnements où la houle est plus ou moins normale à la côte et pour des valeurs de hauteur de vagues moyennes au large comprises entre 0,4 et 4 m (Stockdon *et al.*, 2006).

Dans ces formules, les caractéristiques géomorphologiques du littoral sont prises en compte par le calcul des pentes de la plage émergée et immergée.

b) Détermination de la pente des plages

Grâce à la haute résolution de données topo-bathymétriques de bonne précision (Litto3D), on peut extraire les données morphologiques nécessaires à l'application du modèle de Stockdon *et al.* (2006) et calculer ainsi le *set-up* et par conséquent le niveau d'eau moyen au niveau de la côte au cours d'une tempête.

La discrétisation du littoral en profils espacés régulièrement est réalisée à l'aide du logiciel DSAS (Digital Shoreline Analysis System) développé par l'USGS (US Geological Survey), et qui fonctionne avec ArcGIS (© 2009 ESRI).

Ce logiciel, conçu pour déterminer le recul du trait de côte entre deux ou plusieurs dates distinctes permet de concevoir les profils perpendiculaires au trait de côte et de calculer la distance comprise entre deux courbes de niveaux afin de déterminer une pente. Les pentes utilisées pour le calcul des niveaux d'eau sont la pente de l'avant-côte et la pente de la plage active (Illustration 8).



Illustration 8 – Utilisation du levé Lidar pour le calcul des variables morphologiques : a) extrait du modèle numérique de terrain ; b) discrétisation du littoral tous les 50 m et ; c) variables morphologiques utilisées (Balouin et al., 2011).

Ce paramètre varie d'une portion du littoral à l'autre. Ainsi, sur chaque plage on détermine la zone de plage active, sur laquelle est réalisé le calcul des pentes à partir de l'analyse de données topo-bathymétriques.

Afin de prendre en compte les variabilités locales des effets des houles de tempêtes, les hauteurs de surcote liées aux vagues (*set-up*) sont calculées tous les 50 m.

La pente est alors calculée de manière automatique suivant des profils sériés sur la plage émergée et sur l'avant-côte, au niveau de la plage sous-marine.

Pour la partie sous-marine, le calcul de la pente est effectué sur la limite de la plage émergée qui est définie au cas-par-cas (cf. exemple sur la plage des Sablettes à l'illustration 9) :

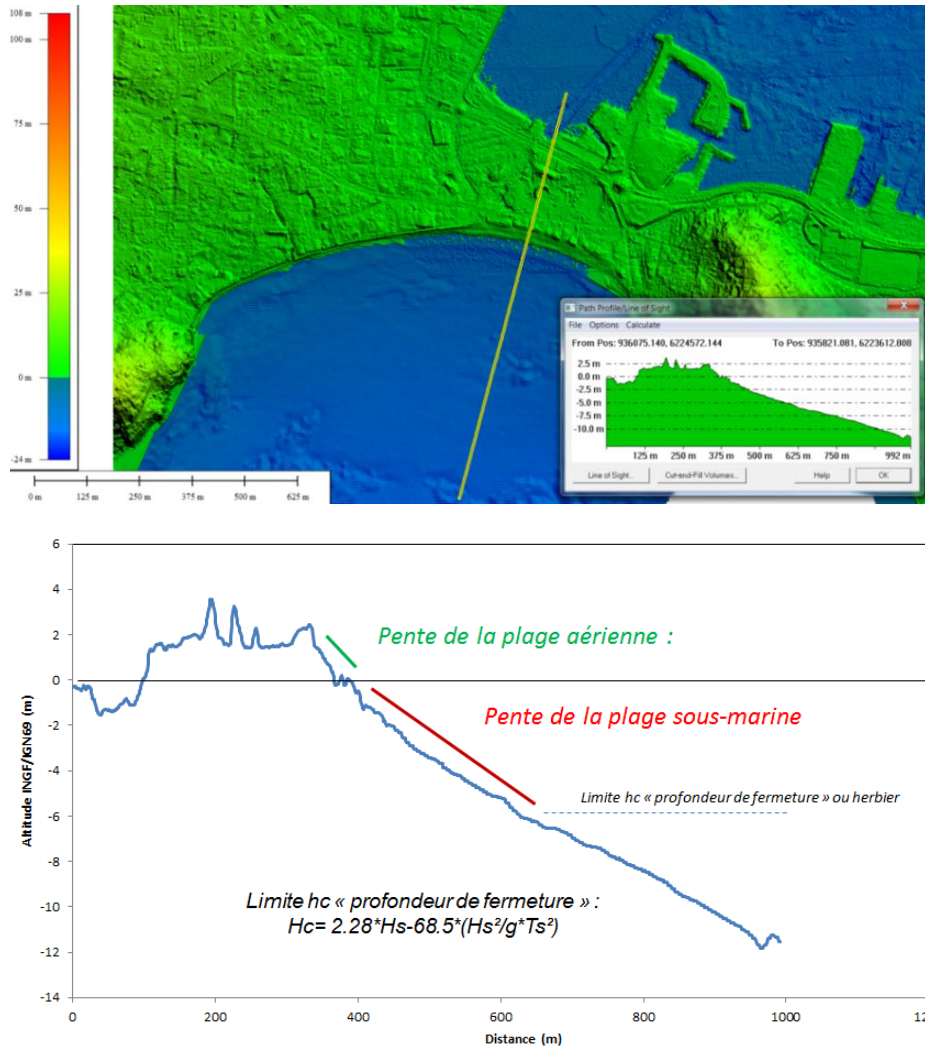


Illustration 9 - Calcul des pentes sur le profil des plages (MNT Litto3D) et formulation d'Hallermeier (1981) – Exemple de la plage des Sablettes (La Seyne-sur-mer).

- Pour la limite supérieure :
 - o au niveau de la cote 0 NGF quand la pente sous-marine est régulière ;
 - o soit au niveau de la cote du talus de collision (changement brutal de pente au niveau de la ligne de rivage) dans les faibles profondeurs d'eau, situé généralement entre la cote -0,25 et -0,5 m NGF en fonction des plages ;
- Pour la limite inférieure :
 - o au niveau de la profondeur de fermeture hc^8 ;
 - o ou à la limite supérieure de l'herbier de posidonies si celui-ci est présent avant la profondeur de fermeture.
 - o ou à une profondeur plus importante, fixée localement en fonction des caractéristiques du profil de plage et des données bathymétriques disponibles suivant la profondeur, dans le cas où le profil présente des profils

⁸ Profondeur de fermeture : profondeur limite de remaniement des sédiments par les agents hydrodynamiques (vagues) entraînant une évolution morphologique résiduelle. Cette profondeur, que l'on peut observer sur des séries temporelles de profils bathymétriques, est fonction des caractéristiques des vagues et des sédiments et des facteurs locaux. Elle est ici calculée par la formule théorique d'Hallermeier (1981).

à deux pentes (Villeneuve-Loubet, Nice) ou des barres sableuses (Pampelonne) (Illustration 10).

La profondeur de fermeture h_c est calculée en utilisant la formule suivante (Hallermeier, 1981) :

$$h_c = 2,28 \times H_s - 68,5 \left(\frac{H_s^2}{g} \right) \times T_s^2$$

avec :

- H_s : Hauteur significative de la houle au large (m), dépassée 12 h/t ;
- T_s : période de la houle associée ;
- g : accélération de la gravité.
- T : période ou échelle temporelle d'intérêt en fonction des phénomènes étudiés ; ici $t=1$ an.

Dans le cadre de ce travail, pour le calcul de la profondeur de fermeture, nous retiendrons la valeur de la houle de période de retour centennale au large et la période associée. Cette partie du profil correspond à la partie active de la plage sous-marine, qui présente une évolution morphologique, et qui est de fait la plus dynamique, et sur laquelle se dissipe l'énergie des vagues lors de leur propagation à la côte.

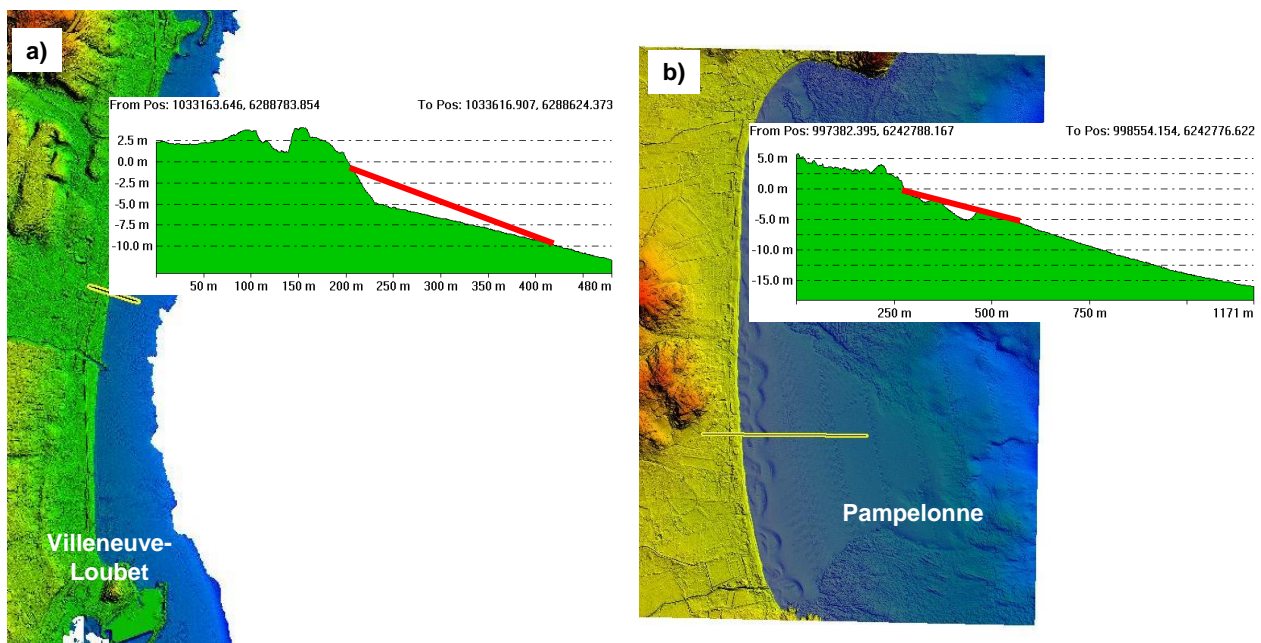


Illustration 10 - Limite externe des profils pour le calcul de la pente. a) cas des plages à deux pentes, b) cas des plages à barres sous-marines.

Dans le cas des profils à deux pentes (un talus fort et un replat à pente douce), la limite externe pour le calcul de la pente moyenne est considérée aux alentours de -10 m. Au-delà, sur les plages des Alpes Maritimes, une rupture bathymétrique avec un approfondissement rapide est souvent présente.

Pour les plages à barres sous-marines, plus ou moins parallèles au littoral ou en forme de croissants (Pampelonne), la limite inférieure est située au niveau de la profondeur de fermeture

du côté du revers marin de la barre sous-marine. C'est sur cette morphologie que se concentre la dissipation de l'énergie des vagues.

2.4 Synthèse

2.4.1 Sectorisation du littoral régional PACA

Afin de prendre en compte la variabilité des niveaux marins le long du littoral régional, le calcul des niveaux marins statiques (sans *wave set-up*) est réalisé en sectorisant le trait de côte en trois grands tronçons.

Chaque tronçon est affecté à un marégraphe de référence à partir duquel le niveau statique (cote du niveau d'eau permanente lors d'une tempête) à appliquer à l'ensemble du tronçon est calculé par addition :

- du niveau de marée (PMVE) ;
- de la valeur de la surcote centennale (T100).

L'illustration 11 montre la sectorisation retenue par le Comité Technique et les valeurs de niveaux associés, ainsi :

- les valeurs du marégraphe de Marseille s'appliquent de port de Bouc jusqu'aux falaises du Cap Canaille, entre Cassis et La Ciotat ;
- celles du marégraphe de Toulon s'appliquent de La Ciotat au Cap Taillat entre la Croix-Valmer et Ramatuelle ;
- enfin, celles du marégraphe de Nice s'appliquent de Ramatuelle à Menton et la frontière franco-italienne.

La décomposition de ces niveaux est expliquée dans **l'Erreur ! Source du renvoi introuvable..**

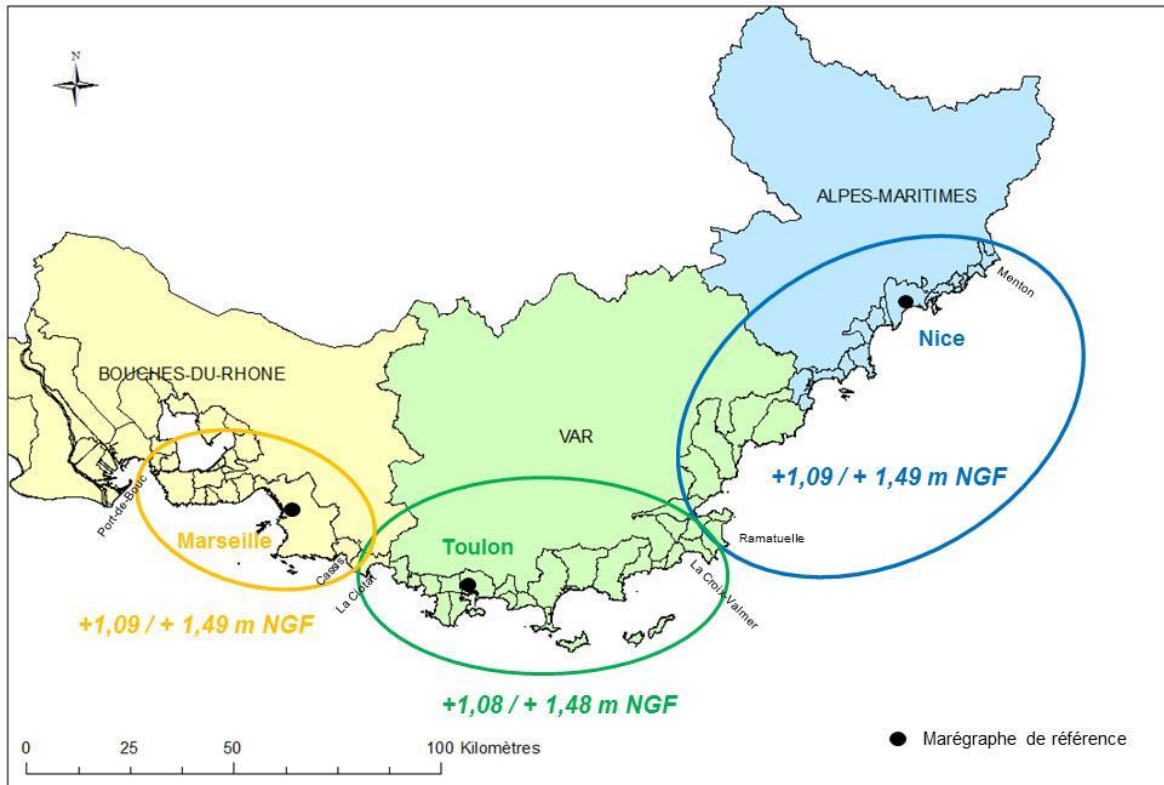


Illustration 11 - Sectorisation du littoral régional et niveaux statiques sans la contribution des vagues retenus pour la « situation actuelle » et pour la situation 2100 (actuelle / 2100).

	PMVE	Surcote centennale T₁₀₀	Niveau marin centennal NM T₁₀₀	Aléa actuel NMT₁₀₀ + 0,2 m	Aléa 2100 NM T₁₀₀ + 0,6 m
	m NGF/IGN69	m	m NGF/IGN69	m NGF/IGN69	m NGF/IGN69
Marseille	+ 0,25	0,64	+ 0,89	+ 1,09	+ 1,49
Toulon	+ 0,24	0,64	+ 0,88	+ 1,08	+ 1,48
Nice	+ 0,24	0,65	+0,89	+1,09	+ 1,49

Illustration 12 - Tableau de synthèse des composantes des niveaux d'eau statique pour les échéances actuel et 2100. A ces valeurs, doit être rajoutée la contribution du set-up lié au déferlement des vagues sur les zones où il peut être calculé. (Formulation de Stockdon et al. (2006) pour les zones de plage Stockdon et al. (2006).

2.4.2 Incertitudes

Cette méthodologie présente cependant quelques incertitudes liées tout d'abord à l'exploitation des formules empiriques :

- L'utilisation des formulations de Stockdon *et al.* (2006) est validée sur des plages ouvertes avec une houle frontale, et une gamme de hauteur de vagues au large entre 0,4 et 4 m. Il sera donc fait comme hypothèse que les vagues sont frontales au littoral pendant l'évènement de tempête, et ceci pour l'ensemble du littoral.
- Un paramètre essentiel pour le calcul des niveaux marins à la côte est la valeur de la pente de plage considérée. Il est possible de calculer cette pente à partir d'un profil transversal de plage. Or un tel profil est un instantané et il est nécessaire de s'assurer qu'il est représentatif des conditions morphologiques courantes de la plage étudiée. La mise en place de la méthodologie de calcul des pentes selon des profils sériés, permet de prendre en compte un critère de pente moyen à l'échelle de la plage.
- En raison de la grande diversité des aménagements du haut de plage (murs, falaises, perrés), les calculs de propagation du jet-de rive ne sont pas intégrés (*run-up*). De plus, en raison du caractère intermittent de ces processus dynamiques, la superficie des zones inondées seraient surestimées et peu corrélables à la réalité des processus.

Par ailleurs, le croisement du niveau d'eau statique avec le MNT peut induire des incertitudes dans les zones basses, en particulier autour des étangs et salins. L'hypothèse est faite que la surélévation du niveau se propage dans les étangs par les embouchures, inondant leurs rives, ce qui est partiellement exact mais mériterait une simulation plus précise de la propagation dans les lagunes.

Les incertitudes liées aux données topographiques elles-mêmes, sont de l'ordre de +/- 0,15 m à +/- 0,20 m (à 95%) selon les spécifications techniques de Litto3D⁹ sur les parties terrestres (IGN-SHOM).

Enfin, en raison de l'impossibilité scientifique de prévoir avec précision la géomorphologie littorale à ces échelles de temps, et en particulier sa capacité de résilience vis-à-vis de l'érosion et de la remontée du niveau marin, la cartographie future sera effectuée sur le modèle Litto3D actuel.

⁹ <http://professionnels.ign.fr/litto3d>

Spécifications techniques Litto3D ® : http://professionnels.ign.fr/sites/default/files/DC_Litto3D.pdf

3. Reconstitution des chroniques de vague

Afin de prendre en compte la géométrie complexe du littoral de PACA en calculant par secteur l'exposition du littoral aux vagues, une simulation des états de mer au large du littoral a été réalisée par le BRGM dans le cadre d'un projet réalisé en partenariat avec le SCoT Provence Méditerranée sur son territoire (Stépanian *et al.*, 2014).

L'analyse statistique des extrêmes (hauteur significative des vagues) a été menée sur les données de la base numérique d'états de mer constituées.

Les principales étapes de la constitution de cette base de données sont rappelées ici :

- Description de la méthodologie de la simulation ;
- Description détaillée des données utilisées ;
- Analyse et validation des simulations.

3.1 Méthode

3.1.1 Description du modèle

La simulation des vagues a été réalisée avec le code spectral d'états de mer SWAN (Simulating WAVes Nearshore) développé par l'Université de Technologie de Delft (Pays-Bas). Ce modèle permet de calculer les paramètres décrivant la houle en zones côtières, des lacs et d'estuaires. Une description détaillée du modèle est faite dans Booij *et al.* (2004).

Le modèle SWAN simule la propagation en espace et en temps du spectre d'action d'onde des vagues sous l'influence des interactions entre l'océan et l'atmosphère, la bathymétrie et les courants. Ainsi, les simulations spectrales d'états de mer réalisées par SWAN prennent en compte les phénomènes physiques suivants :

- La génération des vagues par le vent ;
- La dissipation de l'énergie par moutonnement ;
- Les interactions non-linéaires vague-vague (triplet et quadruplets de fréquences) ;
- La dissipation de l'énergie par déferlement bathymétrique ;
- La dissipation de l'énergie par frottement sur le fond.

Pour la construction de cette base, les simulations furent réalisées en utilisant une méthode de descente d'échelle dynamique sur trois domaines emboîtés (Illustration 13)). Le premier, dit de rang 0, couvre la côte française méditerranéenne entre 42°N et 48°N et 2°E et 8°E, et inclue deux emprises régionales de plus petites dimensions et de résolution spatiale égale à 100 m.

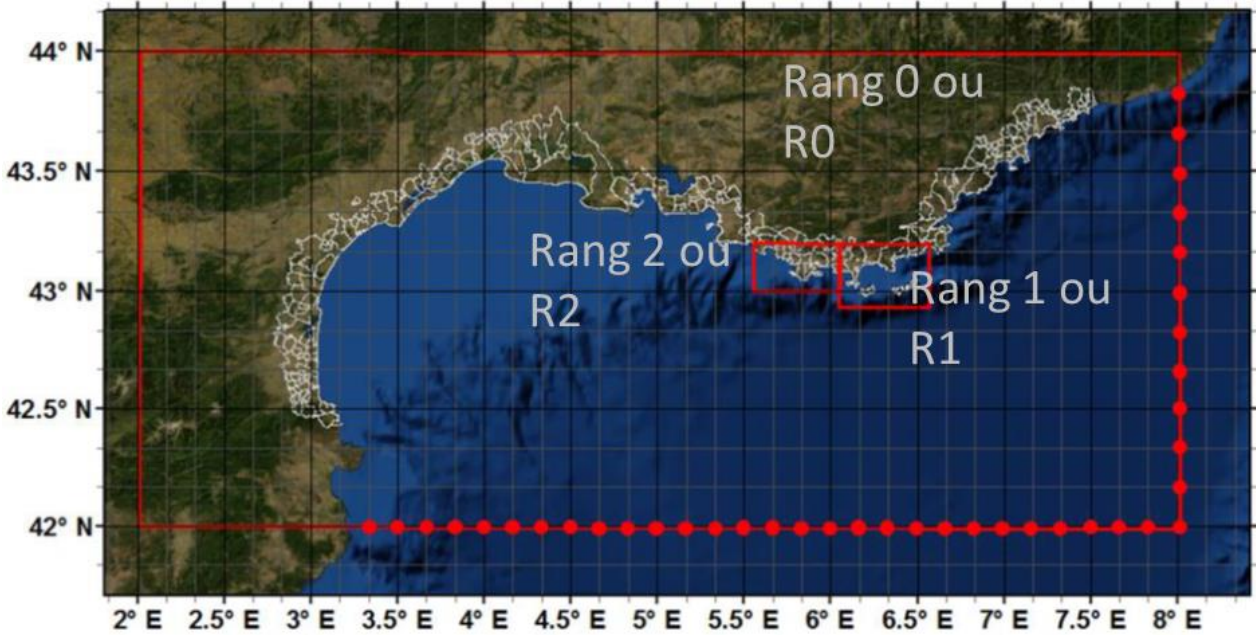


Illustration 13 – Emprise du modèle SWAN. Les emprises R0, R1 et R2 sont définies par les cadres rouges. Les points rouges correspondent aux points de forçage aux conditions limites de R0. La grille noire correspond à la grille des réanalyses de vents CFSR de résolution 0.5°. La grille grise correspond à la grille des données de vagues NOAA-CFSR-med_10m.

3.1.2 Données d'entrée

Les simulations d'états de mer, en particulier la génération des vagues par le vent, nécessitent des champs de vent non-stationnaires comme forçages atmosphériques en entrée du modèle SWAN. En complément, les données bathymétriques à échelle globale (www.gebco.net) et régionale (IFREMER, et SHOM) sont utilisées pour construire les domaines emboîtés. Des données de vagues mesurées au niveau des bouées ont ensuite été utilisées afin de valider le modèle. Les différentes sources de données employées lors de la construction de la base sont renseignées dans l'illustration 14.







	Organisme	Données	Usage
Bathymétrie	SHOM 	HISTOLITT (25 m à la côte)	R0,R1,R2
	GEBCO 	GEBCO One Minute Grid (1' x 1')	R0,R1,R2
	IFREMER 	MNT (1km x 1km) Sondes (250 m de résolution pour profondeur > 180 m)	R0,R1,R2
Vagues 1979-2009	NCEP 	NOAA-CFSR-med_10m (1' x 1', 3h)	forçage R0
Vents 1979-2009		CFSR (0,5° x 0,5,3h)	forçage R0, R1, R2
Bouées hauturières	Météo France 	Vitesse et direction du vent	Validation vents CFSR
		Hauteur et période de vagues	Validation simulations vagues
Houlographes	CANDHIS 	Hauteur et période de vagues	Validation simulations vagues

Illustration 14 - Synthèse des données mise en entrée du modèle SWAN et données houlographiques validant le modèle.

Les données d'entrée utilisées sont détaillées dans le chapitre 3.1.2.

3.1.3 Données obtenues en sortie de modèle

a) Paramètres

Les sorties de la base numérique d'états de mer correspondent aux séries temporelles de résolution horaire de différents paramètres en une sélection de points le long de la côte.

Ainsi, les paramètres d'états de mer conservés sont les suivants :

- la hauteur significative de vagues H_s (m) ;
- la période de pic des vagues T_p (s) ;
- la direction de pic des vagues D_p (°).

De plus, les séries temporelles des paramètres H_s , T_p et D_p sont également archivées toutes les 3 heures pour chaque point de grille.

b) Points d'extraction

Les points d'extraction ont été choisis selon les critères suivant :

- ✓ Au Rang 0 (Illustration 15) :
 - Toutes les bouées du réseau CANDHIS¹⁰ ;
 - Pour la région du Languedoc-Roussillon, où les pentes sont douces et les isobathes espacées, une sélection de points sur les isobathes 20, 30 et 50 m.
 - Pour la région Provence-Alpes-Côte-D'azur, où les pentes sont plus fortes, une sélection de points sur les isobathes 20 et 50 m pouvant servir de conditions limites pour des simulations ultérieures ainsi que des points dans les principales baies.
- ✓ Au Rangs 1 et 2 (Illustration 16),
 - La bouée Porquerolles
 - Une sélection de points dont la profondeur est comprise entre 20 m et 100 m dans les principales baies.

¹⁰ Centre d'Archivage National de Données de Houle In Situ

<http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>

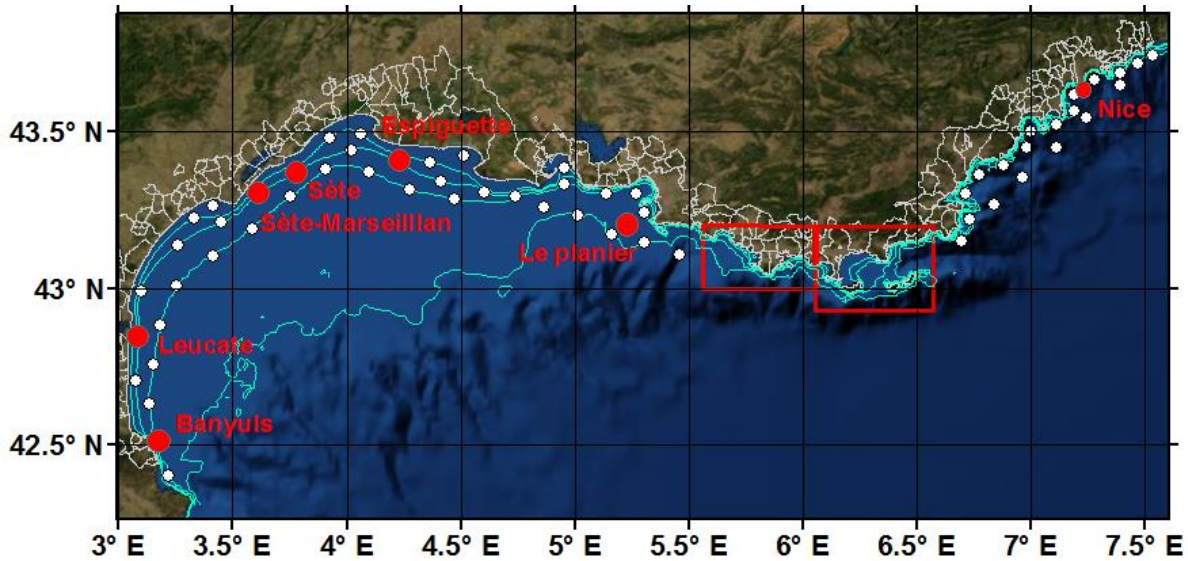


Illustration 15 - Points d'extraction du Rang 0. Les points rouges correspondent aux positions de bouées. Les isobathes correspondent aux profondeurs 20 m, 30 m, 50 m et 100 m.

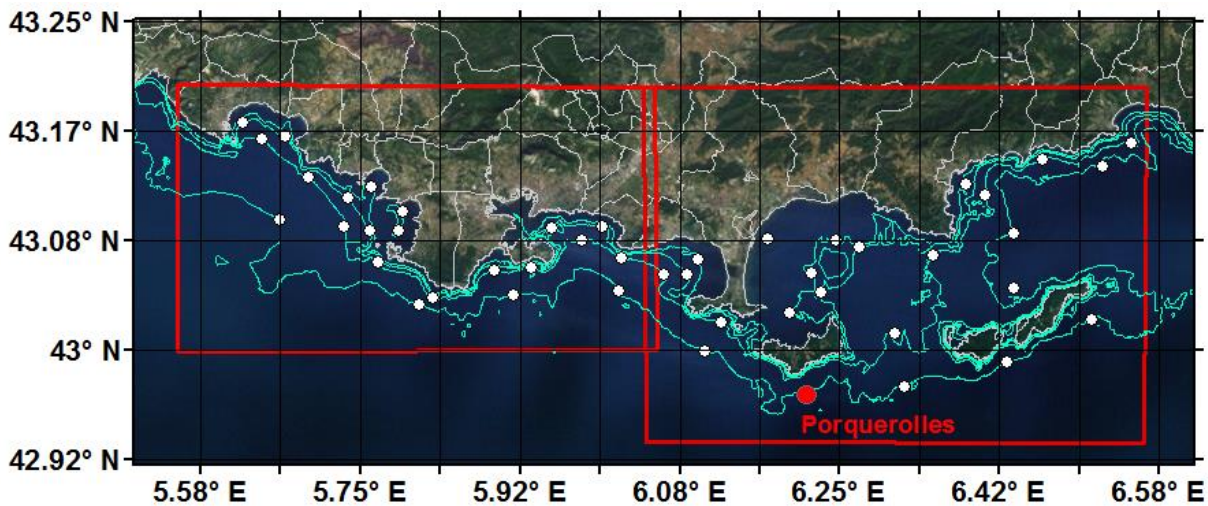


Illustration 16 - Points d'extraction aux Rangs 1 et 2 (points blancs). Les points rouges correspondent aux positions de bouées. Les isobathes correspondent aux profondeurs 20 m, 30 m, 50 m et 100 m.

3.2 Description des données

3.2.1 Données bathymétriques

Les données bathymétriques utilisées proviennent du SHOM, d'IFREMER et de la base de données internationale GEBCO. Les modèles numériques de terrain ont été construits par Pedreros et Poisson (2007).

- **Données du SHOM (HISTOLITT)**

HISTOLITT est un produit numérique organisé en dalles de 1° x 1° contenant les sondes bathymétriques réalisées (et qualifiées) par le SHOM. Les informations extraites sont issues de la base du SHOM mise à jour le 8 février 2006. Ces données concernent le plateau continental Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Corse (sondes en rouge dans

l'illustration 17). La résolution spatiale maximale de ces sondes est de l'ordre de 25 m près de la côte. D'une façon générale la densité de ces données est bonne pour des profondeurs allant de 10 m jusqu'en bordure du plateau continental (100 – 200 m).

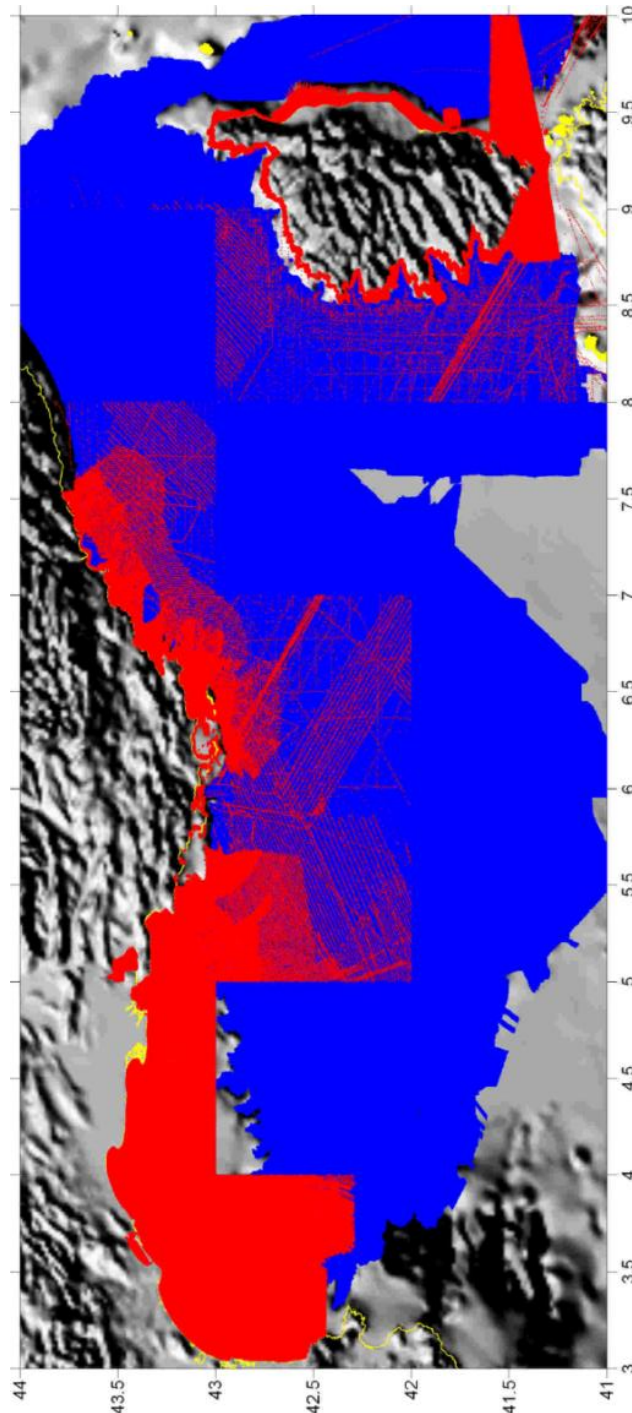


Illustration 17 - Ensemble des sondes bathymétriques contenues dans les dalles Histolitt des côtes méditerranéennes françaises (en rouge), et couverture des données IFREMER à 250 m (en bleu).

• **Données IFREMER**

Les données bathymétriques IFREMER sont maillées à une résolution spatiale de 250 m du domaine marin au large de la côte française (sondes en bleu dans l'illustration 17). Les données couvrent les profondeurs supérieures à 180 mètres.

En outre, dans le cadre d'un projet coopératif associant des instituts de recherche, océanographiques et hydrographiques et le comité Géosciences Marines de la CIESM, l'IFREMER a réalisé un MNT échantillonné au pas de 1 km des bassins occidental et oriental de la Méditerranée. Ce fichier est disponible auprès de l'IFREMER depuis mi-2006. Il a été mis à disposition du BRGM.

• **GEBCO** (General Bathymetric Chart of the Oceans) est soutenu par l'organisation hydrographique internationale (IHO), par les Nations Unies (UNESCO), ainsi que par la commission océanographique intergouvernementale (IOC). Les informations bathymétriques contenues dans GEBCO résultent d'une compilation à l'échelle du globe de sondages bathymétriques et de données issues de l'altimétrie satellitale. Elles sont délivrées gratuitement auprès de <http://www.gebco.net/>. La maille des pixels est 1'x1'. Une extraction a été réalisée pour le domaine couvrant l'ensemble du bassin méditerranéen occidental.

Les différentes sources de données bathymétriques ont été utilisées pour construire les MNT R0 (résolution 1000 m) et R1, R2 (résolution 100 m).

Les données provenant de sources de données hétérogènes, des procédures de vérification de corrections des erreurs ont été réalisées notamment par validation croisée afin d'obtenir une distribution des erreurs centrée sur 0. Ces traitements sont détaillés dans Pedreros et Poisson (2007) : ils montrent que les erreurs les plus fréquentes se situent entre -0,5 m et + 0,5 m. Pour 85 % des données, l'erreur est comprise entre -2 et +2 m.

Le calcul des statistiques sur les résidus indiquent que l'erreur moyenne de l'interpolation est de 1 cm avec un écart type de +/- 1,5 m (Illustration 18).

Pour le secteur d'étude compris entre La Ciotat et la Baie de Cavalaire, certaines parties sont dépourvues de toute information bathymétrique haute résolution (SHOM et IFREMER) : au large de la Ciotat, à l'est de Toulon et au niveau de la Rade d'Hyères (Illustration 19).

Pour pallier ces lacunes, les données GEBCO (mailles d'environ 1,9 km x 1,3 km à cette latitude) présentes dans ces secteurs ont été utilisées dans la construction des MNT haute résolution (Illustration 18). Les erreurs introduites par l'utilisation de ces données grossières dans l'interpolation correspondent aux valeurs extrêmes de l'illustration 18 (proches des bornes -5 et +5 m).

En tout état de cause, les données utilisées par la suite notamment pour les calculs statistiques d'extrêmes sont localisées à des profondeurs importantes où les erreurs potentielles en termes de bathymétrie n'auront qu'une influence négligeable sur les caractéristiques des vagues en surface.

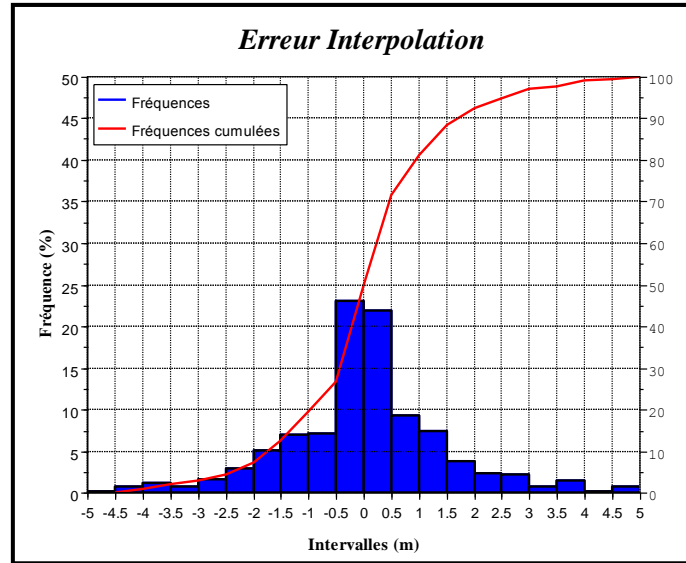


Illustration 18 - Distribution des erreurs de l'interpolation obtenues par validation croisée (histogrammes). La courbe rouge correspond aux fréquences cumulées (associées à l'axe des ordonnées à droite).

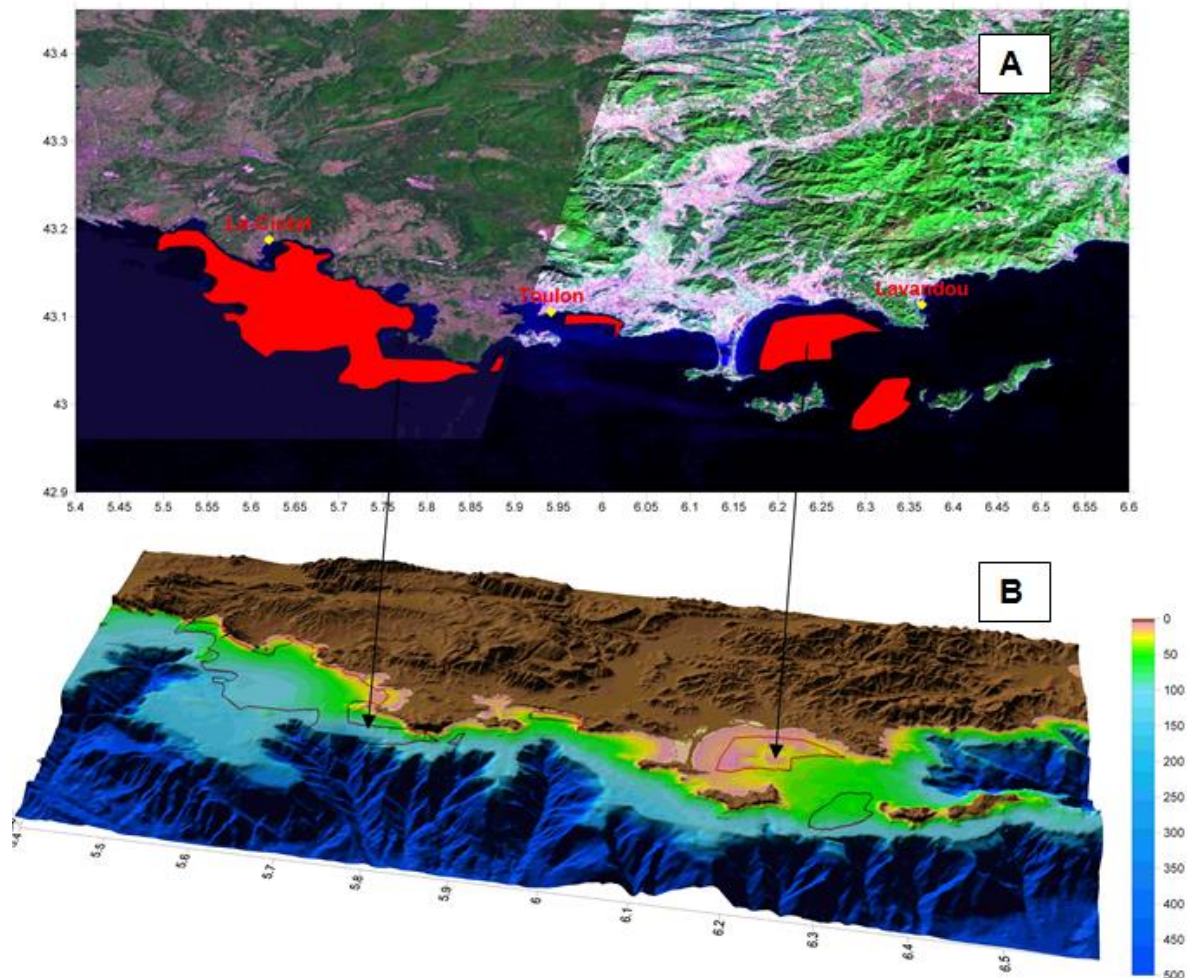


Illustration 19 - Localisation des zones dépourvues de bathymétrie haute résolution (A). MNT construit en utilisant les données GEBCO dans les zones de lacunes (B).

3.2.2 Données de vents vagues

Le modèle SWAN est forcé par des données de vents issue de la base de données NOAA-CFSR (Chawla *et al.*, 2012) qui fournit au niveau mondial des séries temporelles des vents (vitesse, direction) et pression toutes les 3 heures à une résolution de 0.5° sur la période 1979-2009 (soit 30 ans). Pour la grille Méditerranée (30°S-48°N/7°W-43°E, grille appelée NOAA-CFSR-med_10m), les données de vent/pression sont disponibles à une résolution de 10' (1/6°) au pas de temps de 3h.

Le modèle SWAN est constituée de 3 rangs de modélisation (cf. Illustration 13, Illustration 15 et Illustration 16). Le premier, dit de rang 0, couvre la côte française méditerranéenne entre 42°N et 48°N et 2°E et 8°E, et inclue deux emprises régionales de plus petites dimensions et de résolution spatiale égale à 100 m.

Le Rang 0 est forcé aux conditions limites avec les paramètres de vagues NOAA-CFSR-med_10m (1/6°) ainsi qu'avec les vents CFSR (Saha *et al.*, 2010) disponibles sur une grille de résolution 0.5° au pas de temps horaire.

Les Rangs 1 et 2 sont forcés aux limites avec les résultats du Rang 0 ainsi qu'avec les mêmes vents que pour le Rang 0.

3.2.3 Données de validation

Pour la validation des données d'entrée et des simulations, des données de bouées en domaine hauturier et côtier ont été utilisées :

- Les chroniques horaires des données des bouées du réseau CANDHIS Banyuls, Leucate, Sète-Marseillan, Sète, Espiguette, Le Planier et Nice (vagues uniquement) ont été mises à disposition par le CETMEF (Illustration 15).
- Les chroniques horaires des données des bouées Golfe du Lion et Côte d'Azur (vitesse et direction du vent, hauteur et période des vagues) pour les années 2008 et 2009 ont été achetées auprès de Météo-France.

3.3 Validation

Pour la validation des simulations de vagues, on analyse successivement :

- La qualité des données d'entrée de vent (CFSR) et de vagues (NOAA-CFSR-med_10m) dans le Golfe du Lion ;
- La qualité de la régionalisation de vagues réalisée dans la présente étude à la fois dans la région Provence-Alpes-Côte-D'azur et la région Languedoc-Roussillon, à l'échelle de la façade méditerranéenne.

3.3.1 Méthode de calcul des erreurs statistiques (d'après Bulteau *et al.*, 2013)

Pour chaque bouée, les observations (O) et les simulations (S) sont comparées à l'aide des statistiques suivantes :

- **le biais** : il donne une mesure de surestimation ou de sous-estimation systématique du modèle par rapport aux observations. Cependant, cette statistique peut induire en erreur lorsque les valeurs négatives sont compensées par les valeurs positives ;

$$biais = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Si - Oi)$$

- **le coefficient de corrélation** (R^2): il exprime le degré d'ajustement entre le modèle et les mesures : $R^2=0$ indique une absence de relation entre simulations et données alors que $R^2=1$ indique une corrélation parfaite ;

$$R^2 = \frac{\sum (Si - \bar{O})^2}{\sum (Oi - \bar{O})^2}$$

- **l'erreur quadratique** (RMSE, *Root Mean Square Error*) : cet indice permet d'estimer l'amplitude des erreurs. Plus le modèle se rapproche des observations, plus faible est l'erreur quadratique ;

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1,n} (Si - Oi)^2}$$

- **l'indice de dispersion** (*Scatter Index SI*) : il donne la dispersion du modèle par rapport à la mesure. Plus il est fort, plus la dispersion est importante ;

$$SI = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1,n} [(Si - Oi) - biais]^2} / \bar{O}$$

- **l'écart-type** (standard deviation) : il sert à mesurer la dispersion d'un ensemble de données. Plus il est faible, plus les valeurs sont regroupées autour de la moyenne.

3.3.2 Validation des données d'entrée sur la bouée Golfe du Lion

Une validation initiale des données de vent CFSR et des simulations de vagues NOAA-CFSR est présentée dans les notes techniques de Spindler *et al.* (2011) et Chawla *et al.* (2011). Celle-ci a été effectuée à l'aide de données altimétriques de l'IFREMER et des bouées du National Data Buoy Center (NDBC) sur la période de juin à décembre 2005.

Cependant les résultats, qui sont présentés à l'échelle mondiale ou sur les bouées situées dans les océans Atlantique et Pacifique ne fournissent pas d'indication sur les performances du modèle en Méditerranée. Ainsi, afin d'estimer les erreurs des données d'entrée dans le Golfe du Lion, les hauteurs significatives des vagues NOAA-CFSR-10_med et l'intensité du vent CFSR sont comparés aux enregistrements des bouées Golfe du Lion (42.102N/4.703E) et Côte d'Azur (43.400N/7.800E) qui sont situées en bordure du rang 0 de la régionalisation (Illustration 20).



Illustration 20 - Position des bouées Golfe du Lion et Côte d'Azur. Image extraite du site NDBC.

Les résultats (coefficient de corrélation, biais, RMSE, Scatter Index) sont synthétisés dans l'illustration 21.

	Coefficient de corrélation (R^2)		Biais		RMSE		Scatter index	
	Hs	Wnd	Hs	Wnd	Hs	Wnd	Hs	Wnd
Bouée Golfe du Lion	0,93	0,90	-0,21	0,39	0,42	0,46	0,31	0,28
Bouée Côte d'Azur	0,89	0,79	-0,22	-0,32	0,56	0,61	0,37	0,45

Illustration 21 - Erreurs statistiques sur les hauteurs significatives (Hs, en mètres) et l'intensité du vent (Wnd en noeuds)

Les Illustration 22 et Illustration 23 présentent les diagrammes quantiles-quantiles superposés aux diagrammes de dispersion des données de vagues et de vent respectivement pour la bouée Golfe du Lion et la bouée Côte d'Azur. Ces graphiques permettent d'analyser le comportement des différents quantiles des paramètres de vagues (en rouge) comparés aux observations (trait continu noir). La superposition des données (scatter data) permet d'avoir une idée de la dispersion des modèles. Les traits noir pointillés indiquent les intervalles d'erreur à 5 %, 10 % et 20 % par rapport aux observations.

Au niveau des deux bouées, on note une sous-estimation des hauteurs significatives pour tous les quantiles de vagues. Cette sous-estimation est du même ordre de grandeur pour les deux bouées (entre 10% et 20%) avec un biais de l'ordre -0.2 m. Néanmoins, le modèle NOAA-CFSR-10_med montre une dispersion et des erreurs plus faibles sur les hauteurs de vagues au niveau de la bouée Golfe du Lion ($R^2=0.93$, $RMSE=0.418$) qu'au niveau de la bouée Côte d'Azur ($R^2=0.885$, $RMSE=0.56$).

Contrairement aux hauteurs significatives, on ne note pas de biais commun sur l'intensité du vent entre les deux bouées. Alors que celui-ci tend à être surestimé de l'ordre de 10% au niveau de la bouée Golfe du Lion, il est plutôt sous-estimé (entre 10% et 20%) au niveau de la bouée Cote d'Azur. De même pour les vagues, les performances du modèle CFSR sont

meilleures au niveau de la bouée Golfe du Lion ($R^2=0.896$, $RMSE=0.458$) qu'au niveau de la bouée Côte d'Azur ($R^2=0.794$, $RMSE=0.615$).

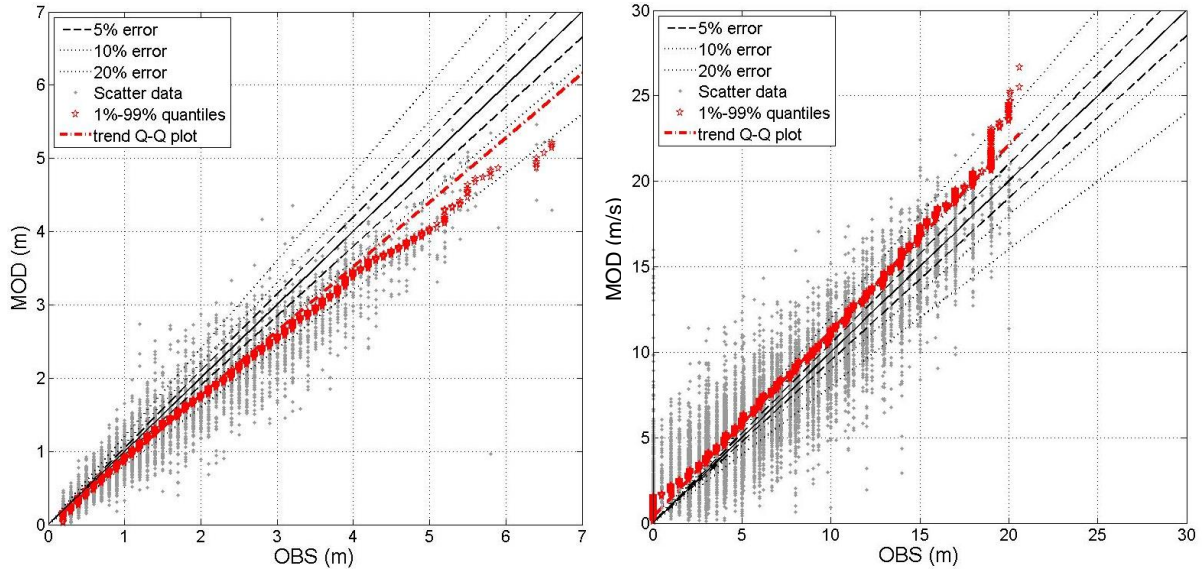


Illustration 22 - Performances sur les hauteurs significatives des données NOAA-CFSR-MED_10m (gauche) et l'intensité du vent du modèle CFSR (droite) à la bouée Golfe du Lion : Diagramme de dispersion (gris) superposé à la tendance linéaire des quantiles de vagues (rouge).

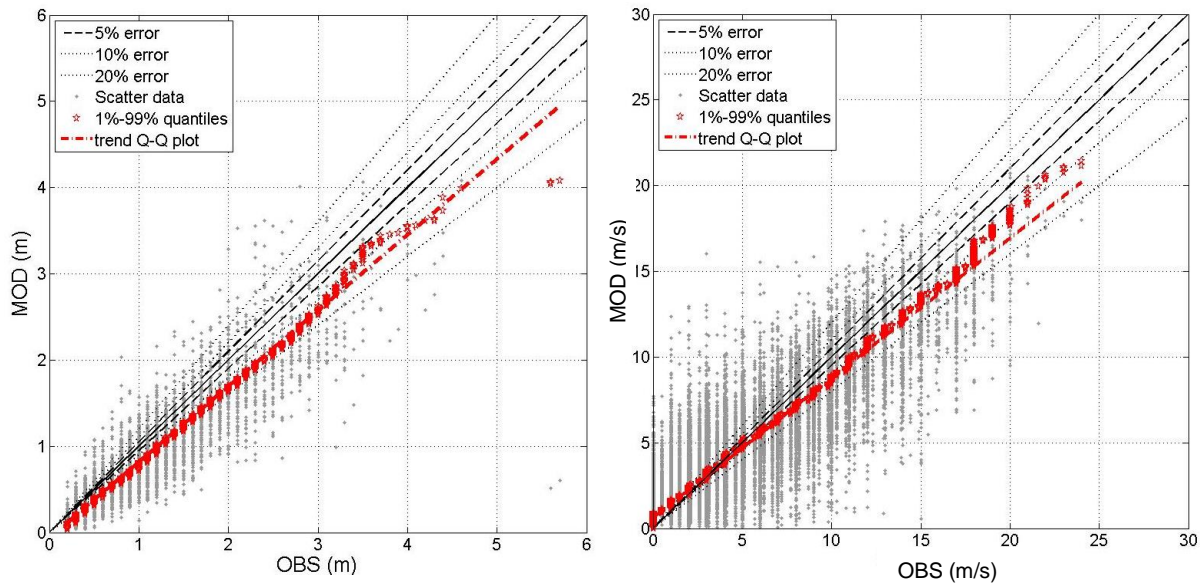


Illustration 23 - Performances sur les hauteurs significatives des données NOAA-CFSR-MED_10m (gauche) et l'intensité du vent du modèle CFSR (droite) à la bouée Côte d'Azur : Diagramme de dispersion (gris) superposé à la tendance linéaire des quantiles de vagues (rouge).

3.3.3 Validation des simulations en zone côtière

La validation de la régionalisation réalisée avec le modèle SWAN est articulée autour de deux parties :

- Le calcul des erreurs statistiques au niveau de quatre bouées du réseau CANDHIS : Nice et Porquerolles en région PACA ainsi que Leucate et Sète pour la région LRO.
- La comparaison des simulations avec les observations des bouées du réseau CANDHIS sur une sélection de tempêtes.

a) Calcul des erreurs statistiques

Les simulations de hauteur significative sont comparées aux enregistrements des bouées Porquerolles, Nice, Leucate et Sète sur la période 2006-2009. Les diagrammes quantile-quantile sont présentés sur l'illustration 24 (Porquerolles et Nice) et l'illustration 25 (Leucate et Sète).

Le tableau (Illustration 26) synthétise les erreurs statistiques calculées sur les 4 bouées avec la méthode décrite en Annexe 1.

De manière générale, les erreurs statistiques sont plus importantes sur les quatre stations côtières que sur les deux stations hauturières. L'indice de dispersion varie de 0,39 (Sète) à 0,49 (Porquerolles) alors qu'il ne dépasse pas 0,37 au niveau des bouées hauturières.

De même, les coefficients de corrélation sont un peu plus faibles sur les stations côtières avec un maximum de 0,9 à Sète. On remarque que, comme pour les stations hauturières, les résultats sont globalement meilleurs sur les stations côtières situées dans la région Languedoc-Roussillon (Sète et Leucate) pour lesquelles les coefficients de corrélation sont notamment plus élevés (resp. 0,9 et 0,86 à Leucate et Sète) que ceux des stations de la région PACA (resp. 0,84 et 0,82 à Porquerolles et Nice).

Quoiqu'il en soit, de même que pour les stations hauturières, on note plutôt une sous-estimation générale des hauteurs significatives, particulièrement au niveau de la bouée Porquerolles dont le biais atteint -0,45 m alors qu'il reste inférieur à -0,11 m pour les stations Nice, Leucate et Sète. Porquerolles est la station pour laquelle les erreurs sont les plus élevées avec une RMSE de 0,67.

Les erreurs maximales sur le paramètre Hs sont de l'ordre de 20% et n'atteignent 30% que pour les vagues de moyennes intensités à Porquerolles.

Au regard des particularités de génération des vagues dans le Golfe du Lion (courtes zones de fetch, extension limitée et intensification rapide des systèmes météorologiques) ces résultats apparaissent donc comme satisfaisants. En comparaison, les jeux de données existants comme ANEMOC présentent pour la Méditerranée des erreurs de l'ordre de 40 % avant et 30 % après corrections (Morellato et Benoit, 2010).

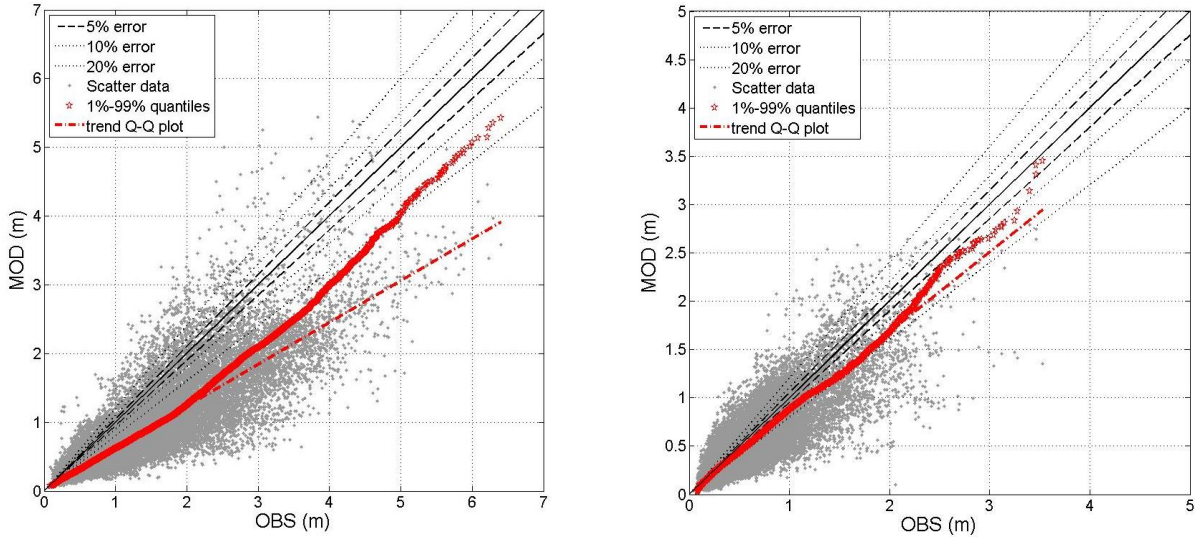


Illustration 24 - Performances sur les hauteurs significatives des données simulées à la bouée Porquerolles (à Gauche) et à la bouée Nice (à droite): Diagramme de dispersion (gris) superposé à la tendance linéaire des quantiles de vagues (rouge).

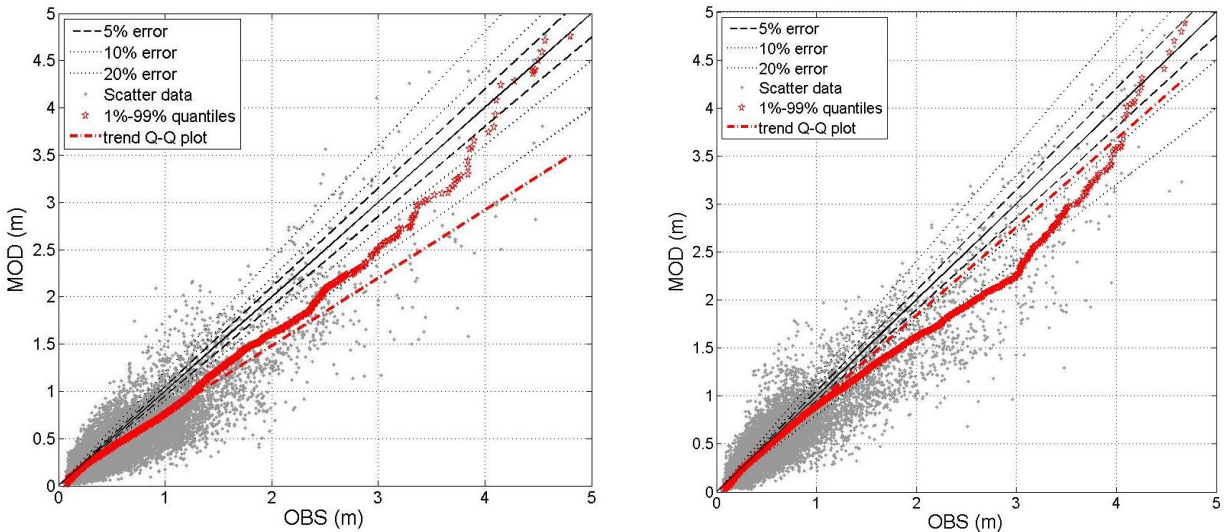


Illustration 25 - Performances sur les hauteurs significatives des données simulées à la bouée Leucate (à gauche) et à la bouée Sète (à droite): Diagramme de dispersion (gris) superposé à la tendance linéaire des quantiles de vagues (rouge).

	Coefficient de corrélation (R^2)	Biais	RMSE	Scatter index
Bouée Porquerolles	0,85	-0,46	0,68	0,49
Bouée Nice	0,83	-0,06	0,22	0,41
Bouée Leucate	0,86	-0,12	0,26	0,44
Bouée Sète	0,90	-0,06	0,23	0,39

Illustration 26 - Erreurs statistiques sur les hauteurs significatives (H_s , unité en mètre).

On ajoutera que la base de données a pour objet de réaliser des calculs statistiques d'extrêmes. Les statistiques sont réalisés sur un échantillon de vague représentant les situations les plus intenses, il est donc important d'observer la qualité des simulations pour les valeurs les plus fortes des vagues observées.

Pour les situations les plus intenses de chaque série, on constate que ce type de vagues est bien, voire très bien, reproduit :

- Pour les stations Leucate et Sète (Illustration 28), le biais de sous-estimation est inférieur à 20 % pour les vagues supérieures à 3 m et il n'y a pas de sous-estimation pour les valeurs les plus fortes (supérieures à 4 m).
- Pour la station Nice (Illustration 25), le biais de sous-estimation pour les valeurs les plus fortes (supérieures à 2 m) est de l'ordre de 10 %, ce qui est particulièrement satisfaisant.
- Pour la station Porquerolles le biais de sous-estimation est égal ou inférieur à 20% pour les vagues supérieures à 4 m. Pour les valeurs extrêmes, il se situe plutôt autour de 15%. La sous-estimation du modèle pour ces valeurs de vague est de l'ordre d'1 m.

Compte tenu des résultats différenciés au niveau des stations étudiées, il n'a pas été envisagé de correction particulière des données, une correction simple et uniforme n'étant pas justifiée.

Par ailleurs, il est important de rappeler que les résultats moins bons à la Bouée Porquerolles ne sont pas forcément significatifs des erreurs pour le reste de la côte étudiée (R1 et R2). Certes, on pourra s'attendre à une sous-estimation des valeurs en général (de l'ordre d'un mètre), mais une analyse directionnelle est nécessaire pour chaque point étudié, afin d'évaluer si l'ensemble des vagues sont sous-évaluées ou si les sous-estimations ne concernent qu'un seul secteur directionnel.

En fonction du point étudié, cette différence peut être importante étant donné le caractère très découpé de la côte et le fait que les grandes baies sont peu ou pas exposées à certains secteurs directionnels.

c) Comparaison sur quelques évènements de tempête

Les résultats des simulations ont été comparés aux enregistrements des bouées pour une sélection de tempêtes récentes ayant affecté soit la région PACA (comparaison avec les bouées Porquerolles et Nice) soit la région LRO (comparaison avec les bouées Leucate, Espiguette, Sète, Sète-Marseillan ou Banyuls) et pour lesquelles les données de bouées sont disponibles (Illustration 27).

Date de la tempête	Région affectée	Données de bouées disponibles dans la région
16-18/12/1997	PACA + LRO	Sète-Marseillan
27-01 au 06/02/2009	PACA + LRO	Leucate + Espiguette + Sète + Banyuls + Porquerolles + Nice
02-04/01/2008	PACA	Nice + Porquerolles
20-22/03/2008	PACA	Nice + Porquerolles
28/11/2008	PACA	Nice + Porquerolles
13 au 15/12/2008	PACA	Nice + Porquerolles
25-30/12/2008	LRO	Leucate + Espiguette + Sète + Banyuls

Illustration 27 - Sélection des tempêtes pour la phase de validation

Les résultats sont présentés de l'illustration 31 à l'illustration 34. Ils sont difficilement interprétables car la qualité des simulations est très variable d'une tempête à l'autre et d'une station à l'autre.

On ne note pas de biais systématique sur la reproduction des pics de tempête qui peuvent être surestimés ou sous-estimés. Un échantillon d'évènements plus important serait nécessaire afin

de faire une typologie et d'analyser le type de tempête et les directions de vent les moins bien reproduits.

On remarque quand même que, dans l'échantillon étudié ici, les fortes tempêtes d'est ou du sud-est semblent plutôt bien reproduites.

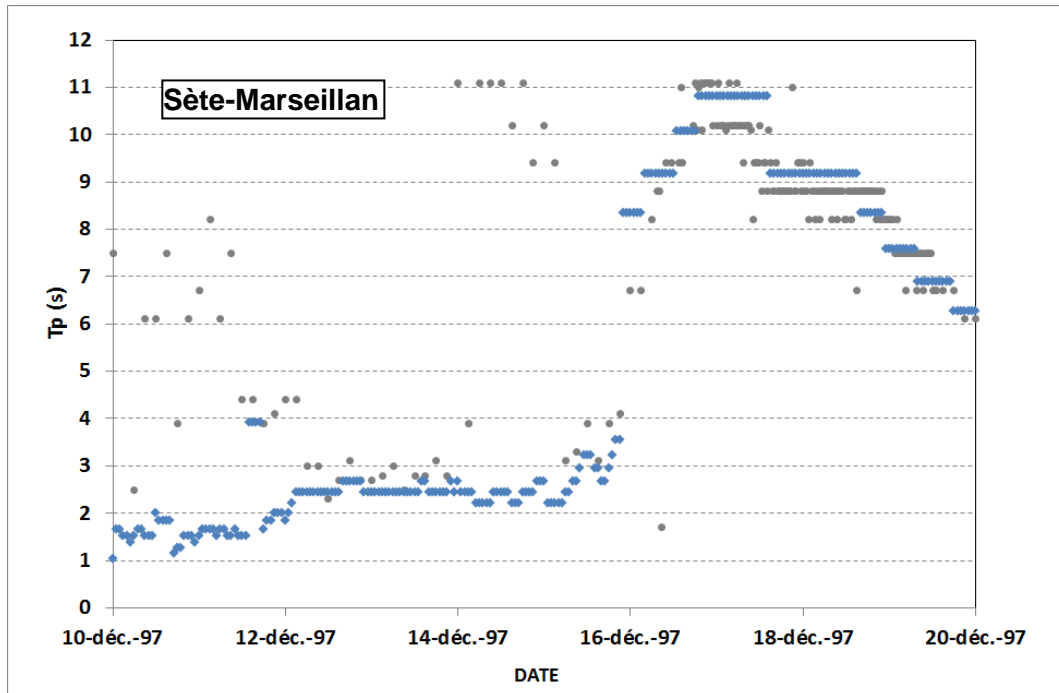
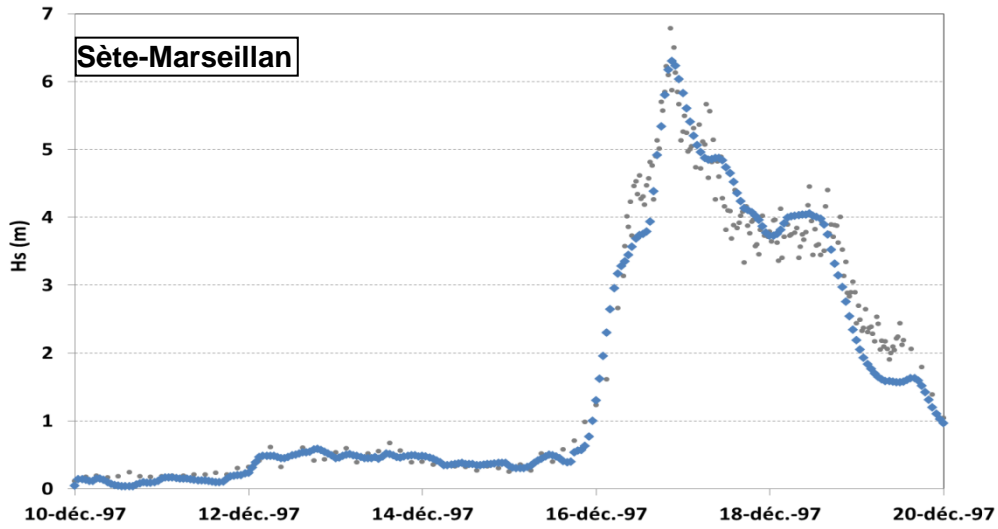
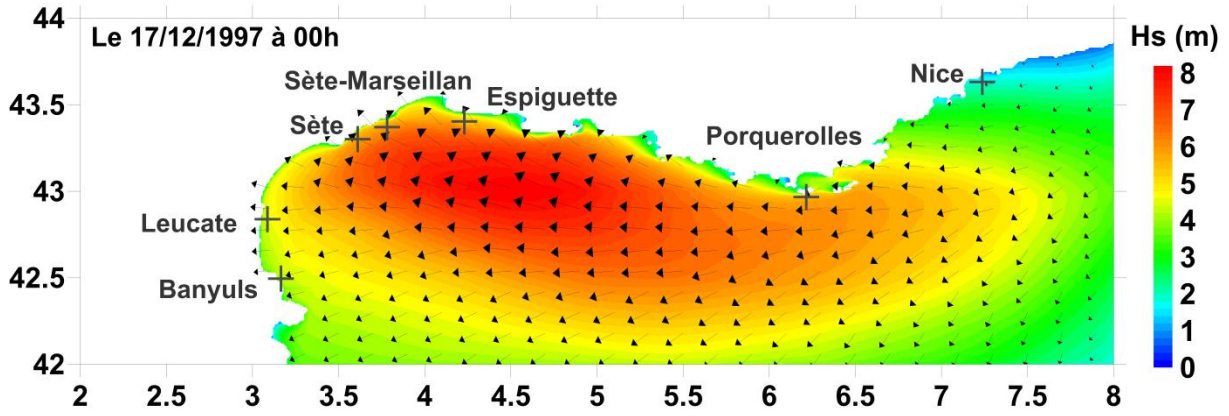


Illustration 28 -Tempête du 16 au 18 décembre 1997 à la bouée Marzéillan. Haut : Hs, Bas : Tp. Les données observées sont représentées en gris et les simulations en bleu.

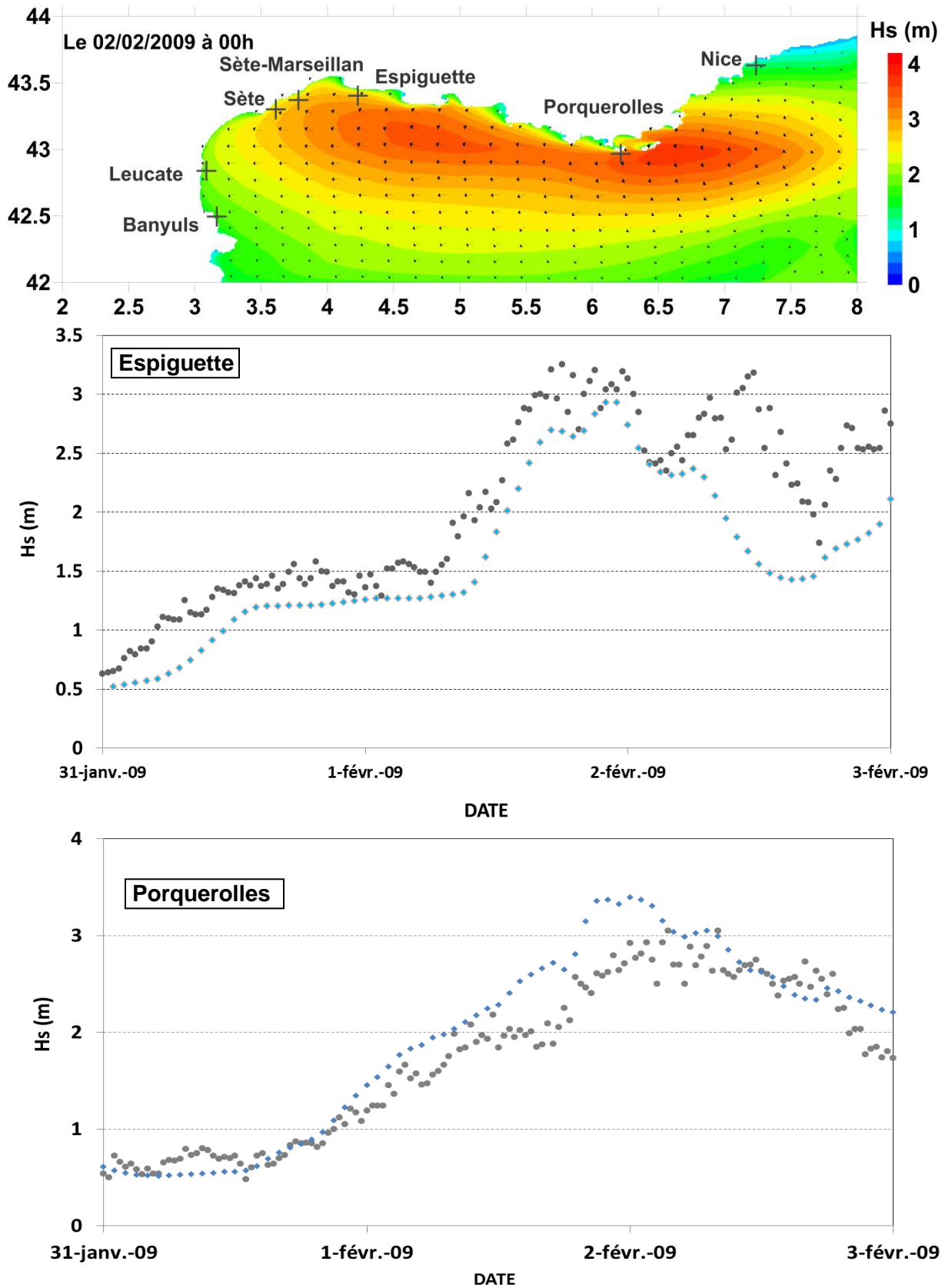


Illustration 29. Tempête du 2 février 2009 aux bouées Espiguette et Porquerolles. Les données observées sont représentées en gris et les simulations en bleu.

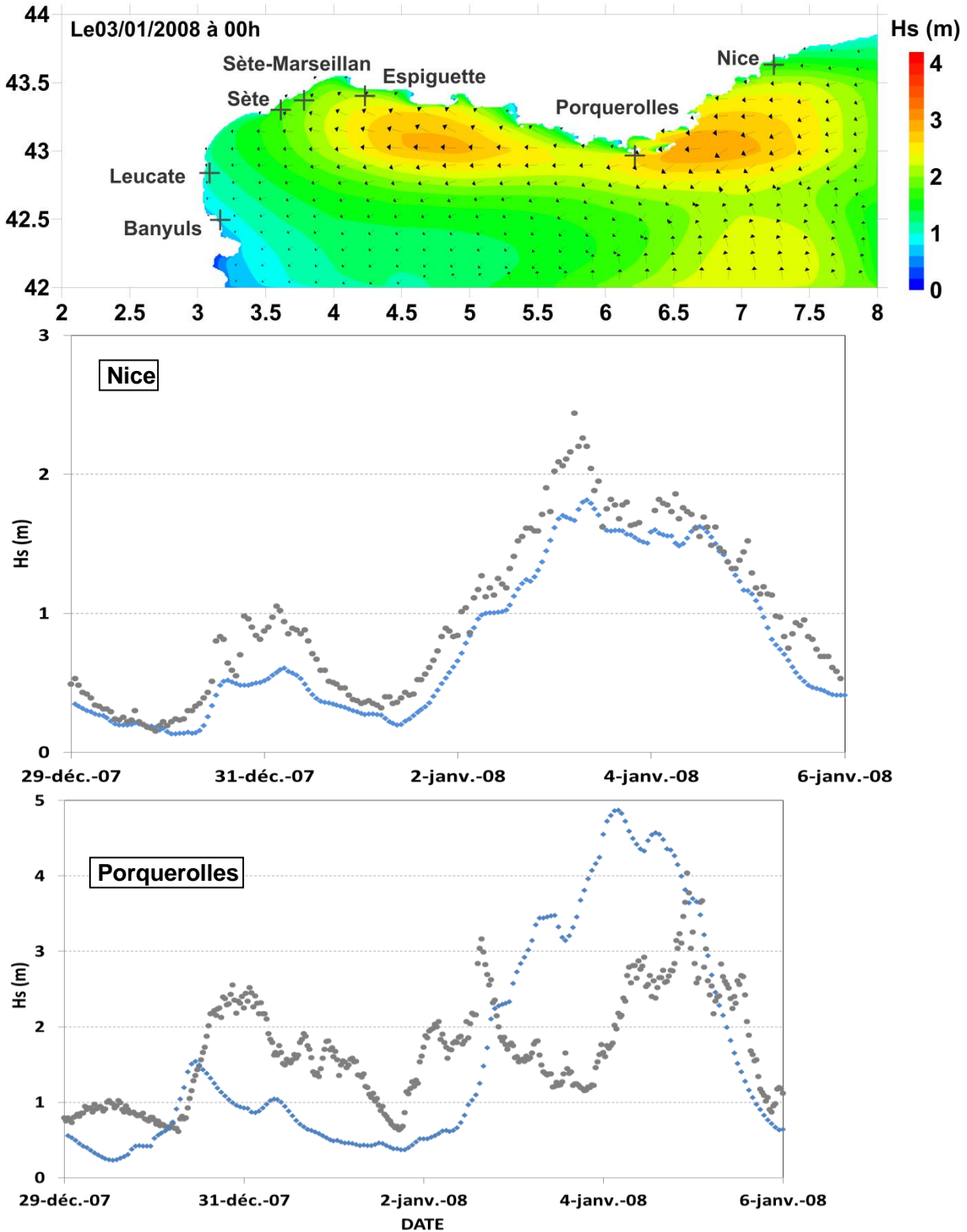


Illustration 30. Tempête du 2 au 6 janvier 2008 aux bouées Nice et Porquerolles. Les données observées sont représentées en gris et les simulations en bleu.

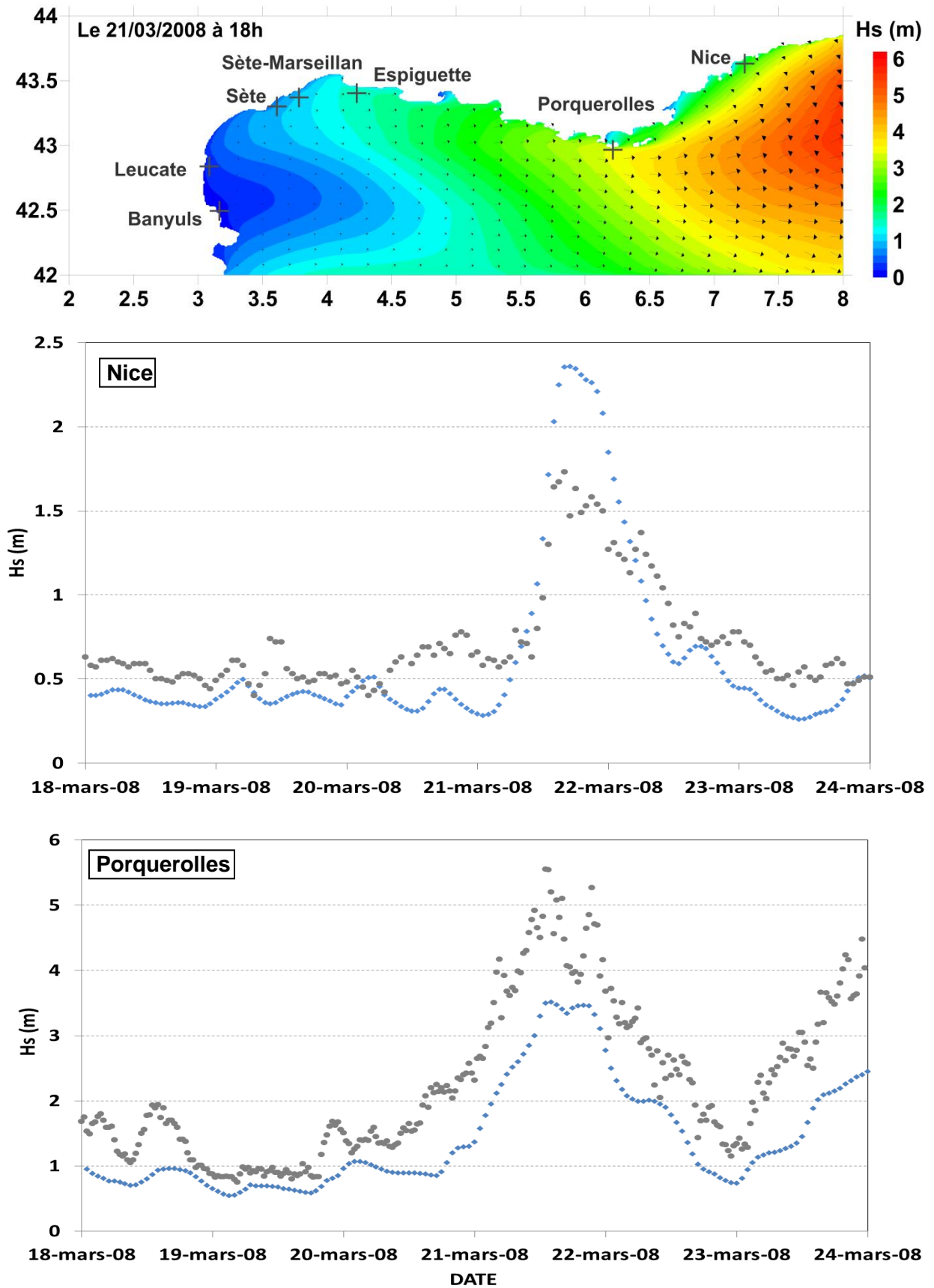


Illustration 31. Tempête du 21 au 23 mars 2008 aux bouées Nice et Porquerolles. Les données observées sont représentées en gris et les simulations en bleu.

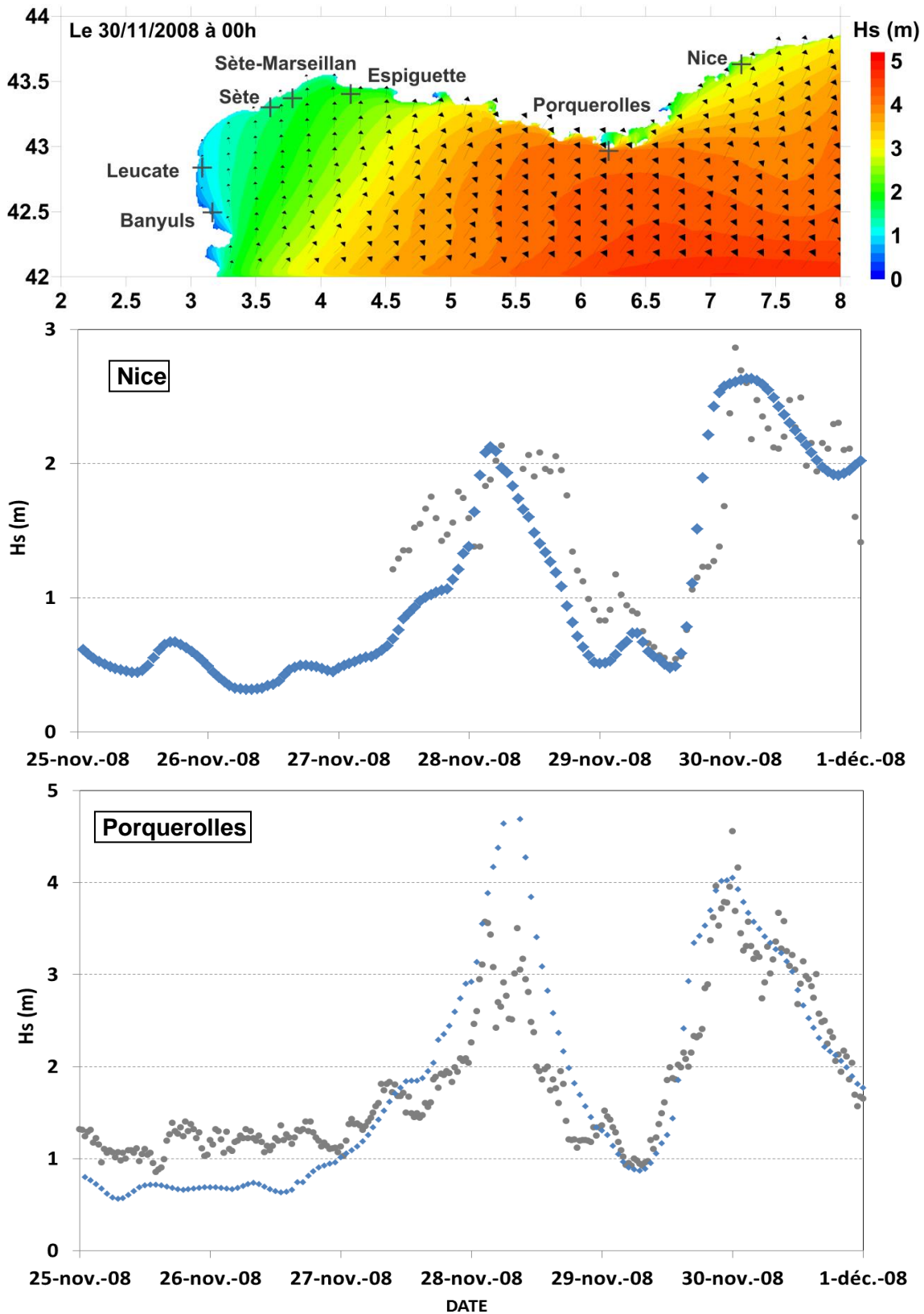


Illustration 32. Tempête du 28 novembre au 1 décembre 2008 aux bouées Nice et Porquerolles. Les données observées sont représentées en gris et les simulations en bleu.

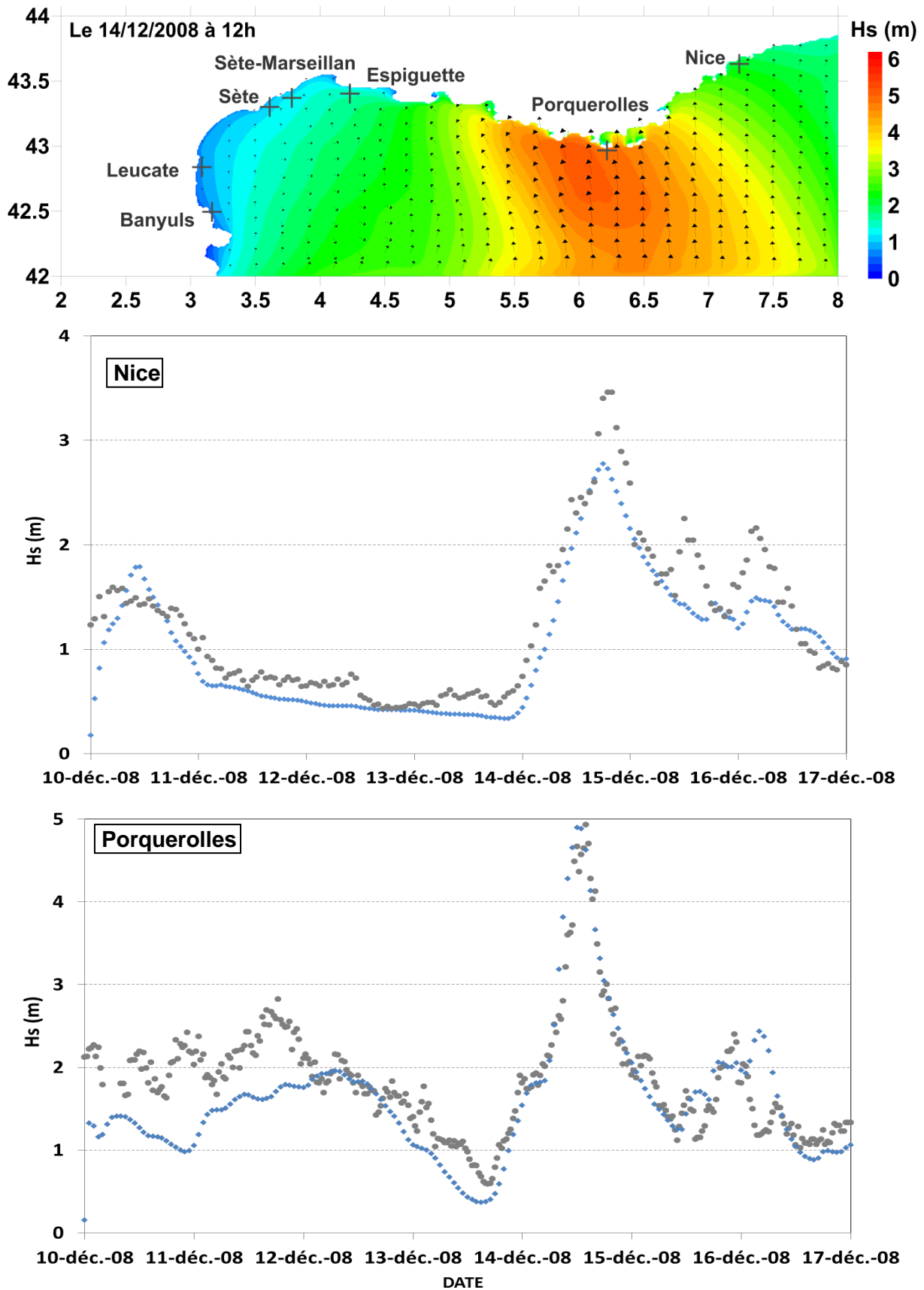


Illustration 33. Tempête du 14 au 16 décembre 2008 aux bouées Nice et Porquerolles. Les données observées sont représentées en gris et les simulations en bleu.

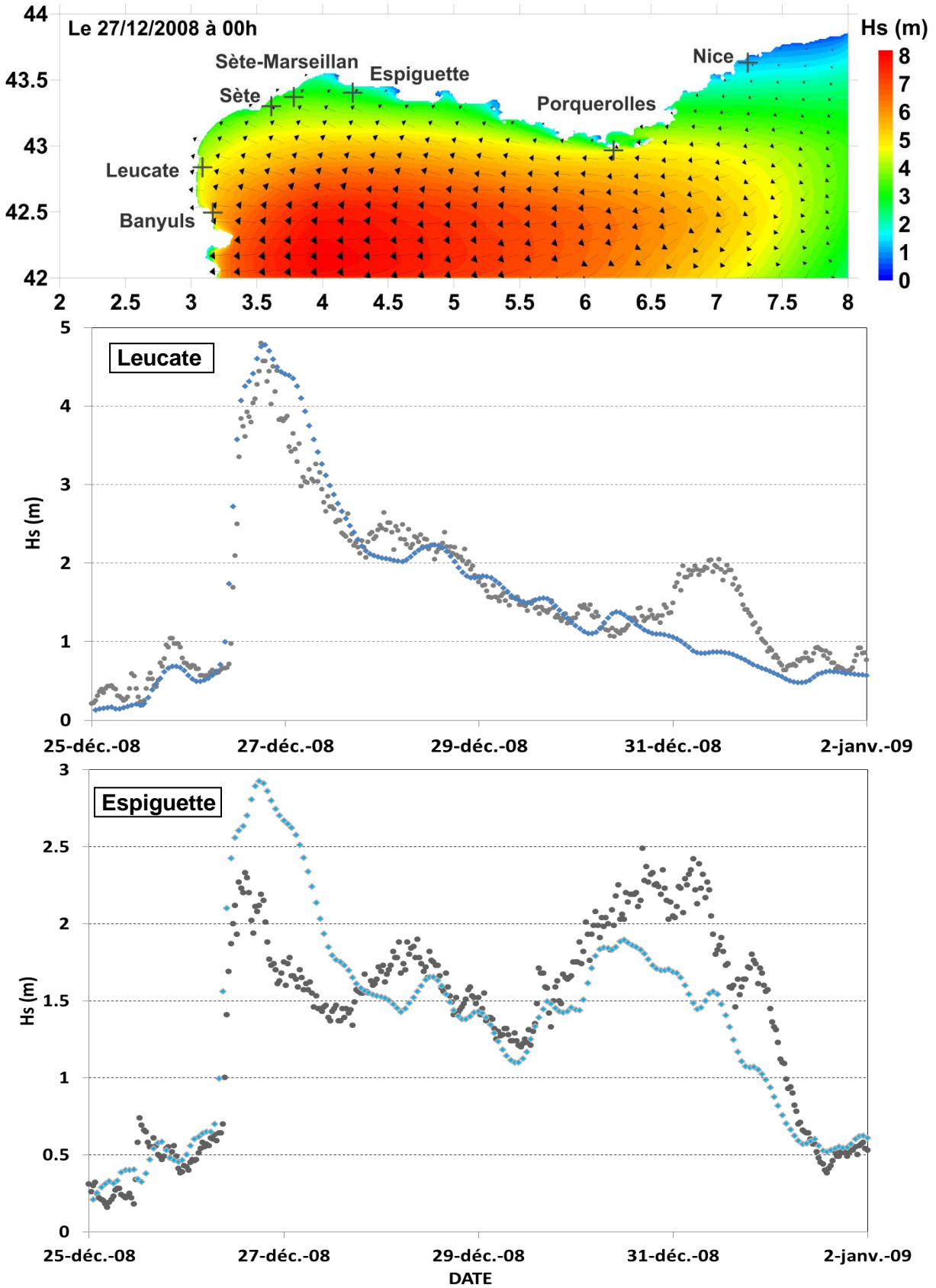


Illustration 34. Tempête du 27 décembre 2008 aux bouées Leucate et Espiguette. Les données observées sont représentées en gris et les simulations en bleu.

4. Analyse statistique sur les vagues

La méthode utilisée dans cette étude pour le calcul des valeurs extrêmes et les périodes de retour des vagues, mise en place par Bulteau *et al.* (2013), est détaillée en Annexe 3 et les fiches des statistiques des vagues sont rassemblées en Annexe 4.

4.1 Localisation des points des « bouées virtuelles »

Au sein de la base de données de vagues créée par modélisation, 19 points ont été traités afin de connaître les conditions de vagues (paramètre Hs, Tp, Ts) pour des événements de temps de retour, 10, 20, 50, 100 ans au large du littoral (Illustration 35) :

- 11 points ont été traités dans l'étude précédente sur le SCoT Provence-Méditerranée afin de disposer de caractéristiques d'extrêmes pour chaque grande baie du littoral entre La Ciotat et le Lavandou.
- 8 nouveaux points ont été traités dans le cadre cette étude :
 - o 1 au large des Bouches-du-Rhône ;
 - o 7 entre Cavalaire (P_94) et la frontière italienne.

Cette répartition est choisie pour disposer de valeurs statistiques des vagues au large de chaque grand secteur du littoral de la région PACA. La densité plus importante des points sur le secteur de la Ciotat au Lavandou est fonction de la géomorphologie complexe du littoral et par conséquent de son exposition aux vagues.

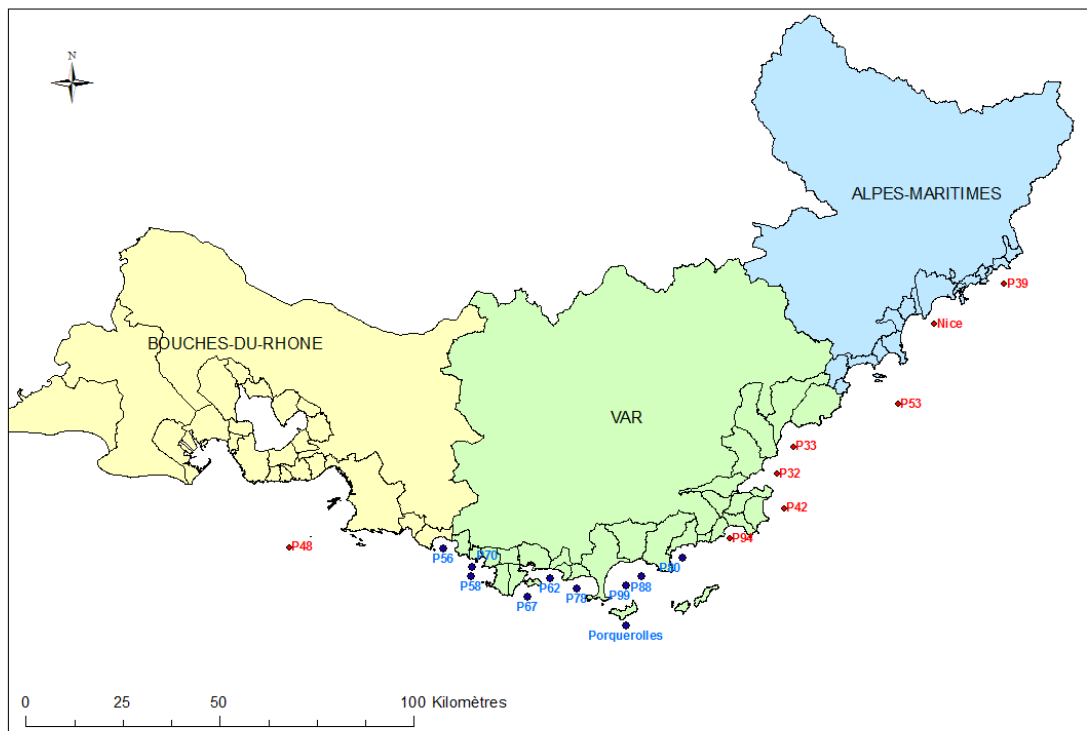


Illustration 35 - Implantation des bouées virtuelles. En bleu, les données utilisées au large du SCoT Provence-Méditerranée. En rouge, celles utilisées en complément dans le cadre de cette étude.

4.2 Exposition du littoral

La sectorisation du littoral en fonction des bouées virtuelles et le linéaire côtier qui leur est affecté est détaillée dans ce paragraphe. L'ensemble du littoral est ainsi couvert par des données locales de la houle au large.

Sur chaque secteur, les conditions d'agitation locales sont ainsi différentes, et ces données sont utilisées pour calculer les surcotes liées aux vagues (*wave setup*) dans les endroits où les calculs sont possibles.

Les tableaux suivants rassemblent les paramètres des vagues calculés pour chacun des points et pour chaque secteur littoral considéré par cette exposition :

- $H_{s0,max}$: Hauteur significative maximale des vagues simulées sur la période 1979-2009;
- $H_{s,moy}$: Hauteur significative moyenne des vagues simulées sur la période 1979-2009 ;
- $H_{s,100}$: Hauteur significative des vagues simulées pour une période de retour centennale ;
- $T_{p,100}$: Période de pic des vagues associée à $H_{s,100}$.

Les périodes de pic associées à la hauteur significative $H_{s,100}$ est estimée par analyse graphique des diagrammes bivariés H_s/T_p pour chaque bouée virtuelle (exemple du point Nice sur l'illustration 36).

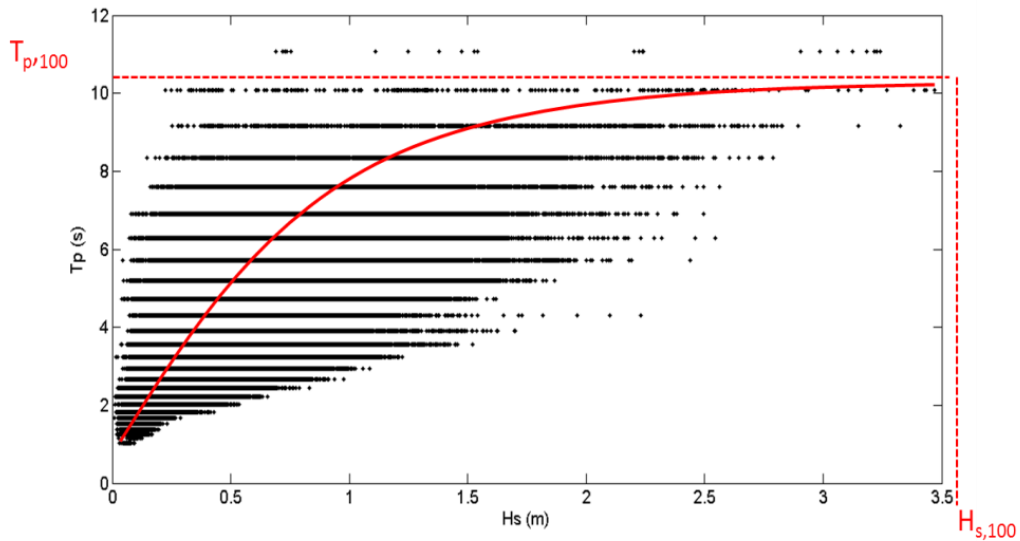


Illustration 36 - Exemple de corrélogramme H_s/T_p simulé à la bouée virtuelle Nice, et détermination de la période de pic centennale $T_{p,100}$ en fonction de la hauteur significative centennale $H_{s,100}$.

4.2.1 De Fos-sur-mer à Cassis

Référence (n° point)	Profondeur (m)	Secteur	$H_{s,max}$ (m)	$H_{s,moy}$ (m)	$H_{s,100}$ (m)	$T_{p,100}$ (s)
P48	100	Fos-sur-mer – Cassis	6,27	0,82	6,83	11

Illustration 37 - Synthèse des statistiques des vagues sur les points « bouées virtuelles » de Fos-sur-mer à Cassis.

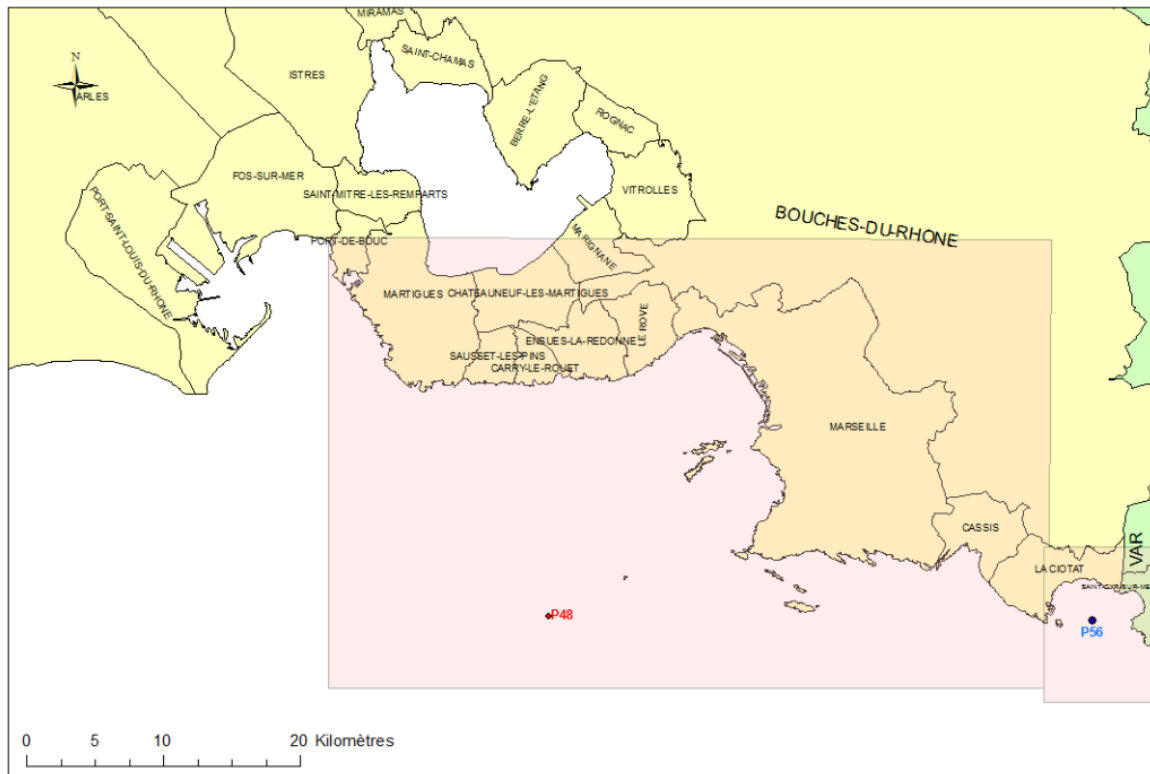


Illustration 38 - Exposition du littoral en fonction des bouées virtuelles pour le département des Bouches-du-Rhône. Les polygones rouges correspondent à la zone d'affectation des statistiques des vagues

4.2.2 De La Ciotat à Saint-Raphaël

Référence (n° point)	Profondeur (m)	Secteur	$H_{s,0,max}$ (m)	$H_{s,moy}$ (m)	$H_{s,100}$ (m)	$T_{p,100}$ (s)
P56	50	Baie de La Ciotat - Saint-Cyr-sur-mer	4,13	0,58	5	10
P70	30	Littoral de Bandol – Sanary-sur-mer	4,57	0,66	4,53	9
P58	50	Sanary – Six-Fours	4,98	0,73	4,98	10
P67	100	Saint-Mandrier	4,97	0,74	5,48	10,5
P62	50	Rade de Toulon, La Seyne-sur-mer, le Pradet	4,59	0,51	4,91	10
P78	50	Carqueiranne, Hyères ouest du tombolo	4,48	0,64	4,76	9,5
P99	20	Porquerolles-Nord	3,55	0,49	3,74	9
Porquerolles	105	Conditions large Porquerolles	5,57	0,90	6,33	11
P88	30	Hyères est du tombolo - La Londe-les-maures, Bormes-les-Mimosas	3,76	0,51	3,89	9
P80	50	Bormes-les-Mimosas, le Lavandou	4,75	0,50	5,18	9,5
P94	50	Cap-Negre – Cap Lardier	3,95	0,53	4,28	11
P42	150	Cap Lardier – Cap de Saint-Tropez	4,68	0,60	5,13	10
P32	320	Cap de Saint-Tropez – Les Issambres	4,25	0,66	4,75	9
P33	290	Les Issambres – Cap du Dramont	3,73	0,48	3,98	10

Illustration 39 - Synthèse des statistiques des vagues sur les points « bouées virtuelles » de La Ciotat à Saint-Raphaël.

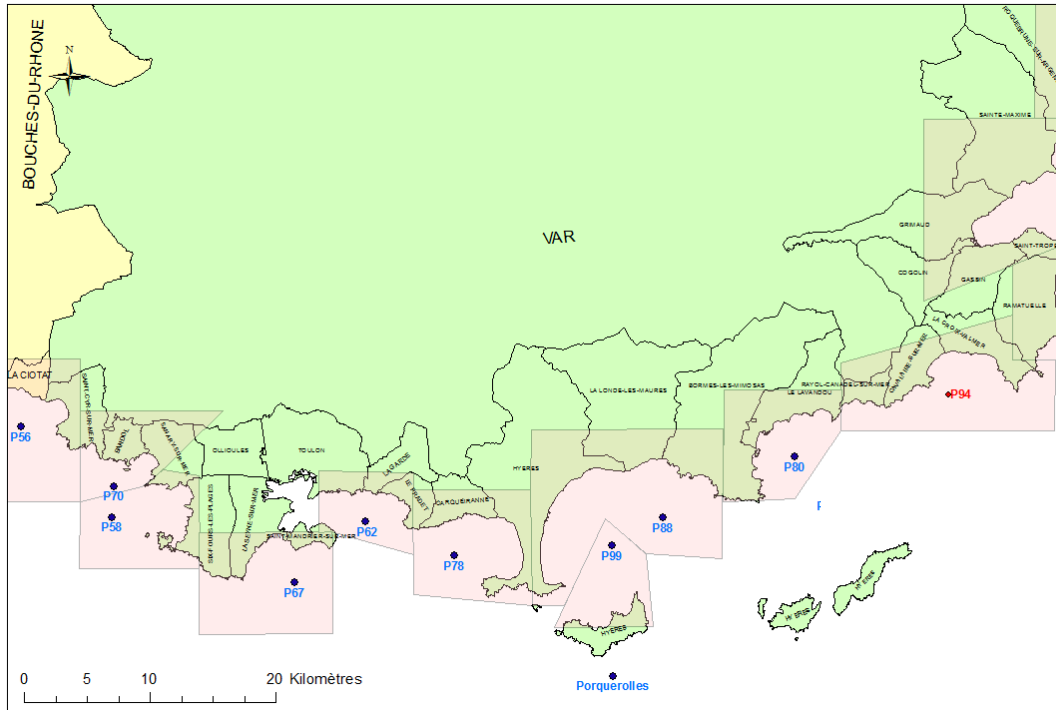


Illustration 40 - Exposition du littoral en fonction des bouées virtuelles pour l'Ouest du département du Var. Les polygones rouges correspondent à la zone d'affectation des statistiques des vagues

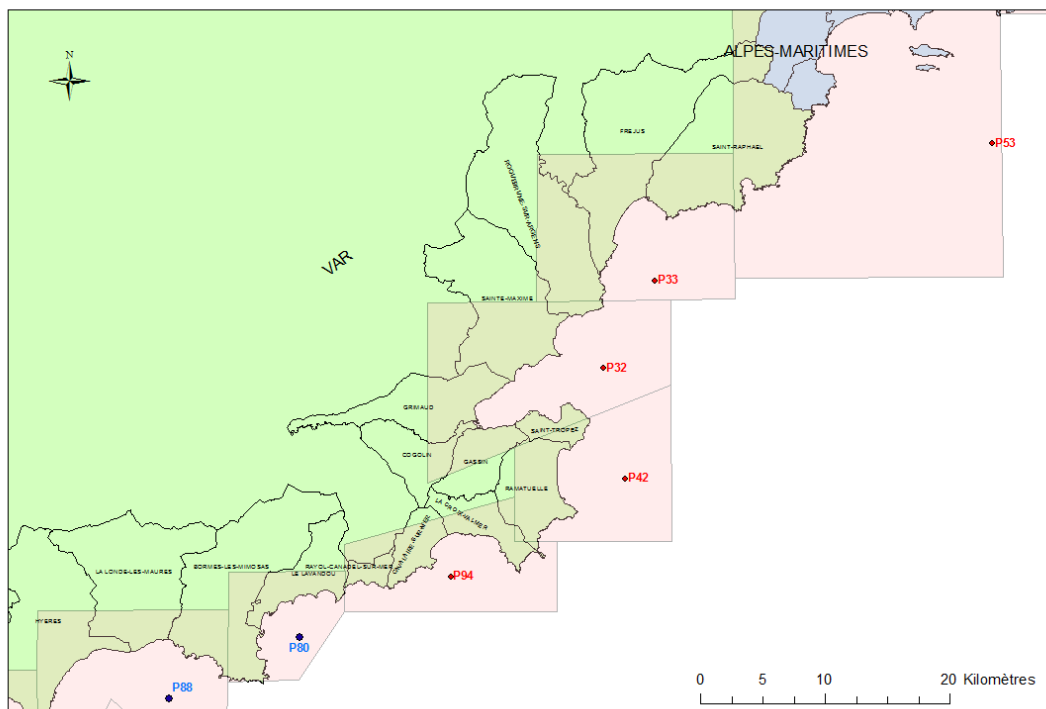


Illustration 41 - Exposition du littoral en fonction des bouées virtuelles pour l'Ouest du département du Var. Les polygones rouges correspondent à la zone d'affectation des statistiques des vagues

4.2.3 De Saint-Raphaël à Menton

Référence (n° point)	Profondeur (m)	Secteur	$H_{s,0,max}$ (m)	$H_{s,moy}$ (m)	$H_{s,100}$ (m)	$T_{p,100}$ (s)
P53	1000	Cap du Dramont – Cap d'Antibes	3,61	0,59	3,73	10,5
Nice	400	Cap d'Antibes – Cap Ferrat	3,47	0,48	3,55	9,5
P39	260	Cap Ferrat - Menton	3,84	0,49	3,91	10,5

Illustration 42 - Synthèse des statistiques des vagues sur les points « bouées virtuelles ».

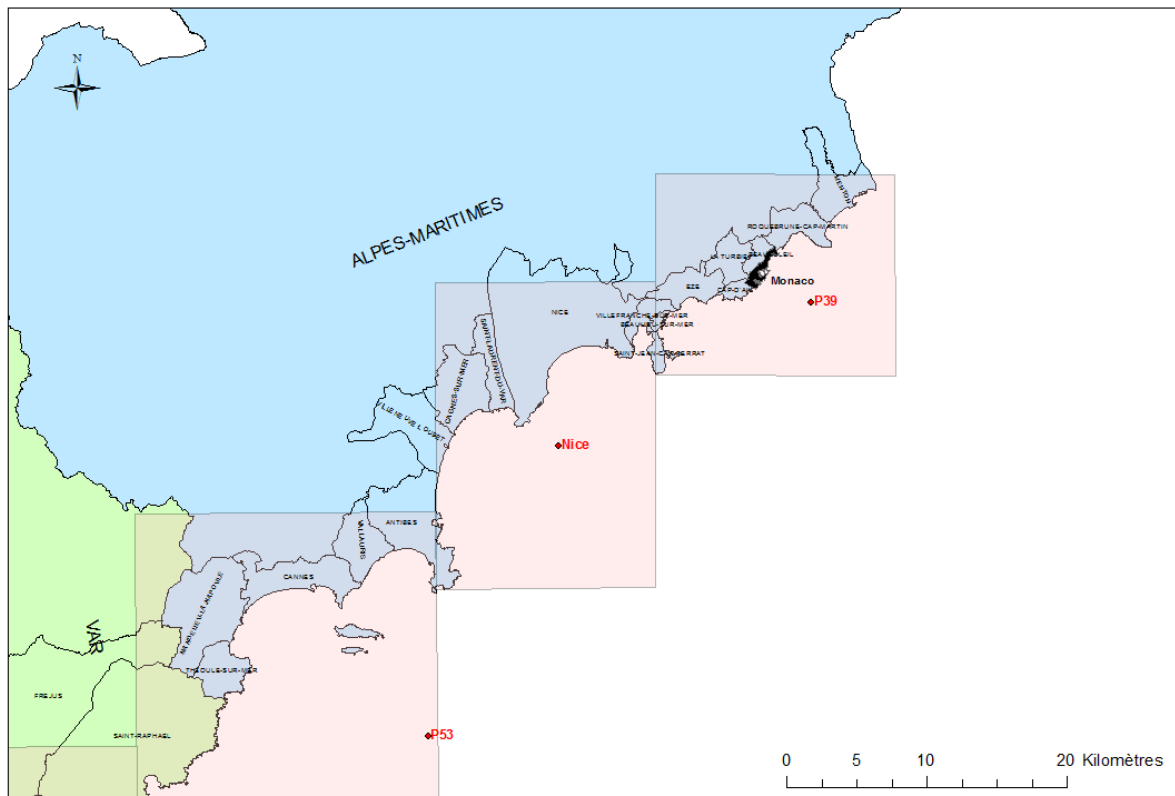


Illustration 43 - Exposition du littoral en fonction des bouées virtuelles pour l'Ouest du département du Var. Les polygones rouges correspondent à la zone d'affectation des statistiques des vagues.

5. Cartographie de la submersion marine

5.1 Rappels

Les zones littorales soumises à un phénomène de submersion marine générée par un évènement d'occurrence centennale (période de retour 100 ans) sont déterminées pour deux scénarios :

- un scénario « évènement moyen », qui correspond à un niveau actuel, comprenant une élévation de +0,20 m d'élévation du niveau de la mer ;
- un scénario « évènement moyen avec prise en compte du changement climatique » qui correspond à un niveau échéance 2100, avec +0,60 m élévation du niveau de la mer.

Les niveaux retenus sont définis par grand secteurs du littoral en fonction de la présence des marégraphes locaux qui permettent de déterminer la composante marégraphique et de surcote centennale.

Au niveau des zones de plages, à ces niveaux s'ajoute une composante de *set-up*, liée à l'action des vagues (déferlement). Le *set-up* est calculé par les formulations de Stockdon *et al.* (2006), qui tiennent compte des caractéristiques de la houle au large et de la pente de la plage. En revanche, la composante de *run-up* (niveau maximal atteint par la mer en tempête, délimitant la submersion temporaire « dynamique ») n'est pas retenue dans le calcul de niveau marin, car sa méthode d'évaluation, à l'échelle de restitution de l'étude, est considérée comme trop imprécise.

Au niveau des secteurs rocheux et des zones portuaires, il n'est pas réalisé de calculs de *set-up*, dans la mesure où sur les premiers, les conséquences en termes d'extension de la submersion marine sont limitées en raison des pentes fortes, et sur les seconds, dans la mesure où les infrastructures portuaires cassent l'énergie des vagues avant le littoral. Sur ces secteurs sont donc retenues les valeurs du niveau statique sans la contribution des vagues.

Enfin, les zones de transition entre les secteurs rocheux et les zones sableuses, font l'objet d'un lissage progressif des hauteurs d'inondation.

5.2 Données topographiques

Les calculs ont été réalisés sur les Modèles Numériques de Terrain (MNT) issus du modèle Litto3D terre-mer (données lidar topographique à 5 m de résolution) disponible sur la quasi-totalité du littoral régional¹¹.

Pour les secteurs de plage, les données utilisées dans les calculs sont les données à 1 m de résolution. Elles sont par la suite ré-échantillonnées à 5 m lors de l'agrégation des différents calculs.

¹¹ Spécifications techniques Litto3D® : http://professionnels.ign.fr/sites/default/files/DC_Litto3D.pdf

Des zones sur le territoire de Toulon-Provence-Méditerranée ne sont pas couvertes par les données topo-bathymétriques Litto3D (données classifiées secret Défense) :

- La zone de l'Arsenal de Toulon ;
- Des secteurs militaires sur la presqu'île de Saint-Mandrier (Illustration 44) ;
- La zone de l'aéroport et la base aéro-navale de Hyères (Illustration 45).

Des zones bathymétriques dans la grande rade de Toulon ne sont pas non plus couvertes. Sur ces secteurs, les calculs de *set-up* ne sont pas possibles.

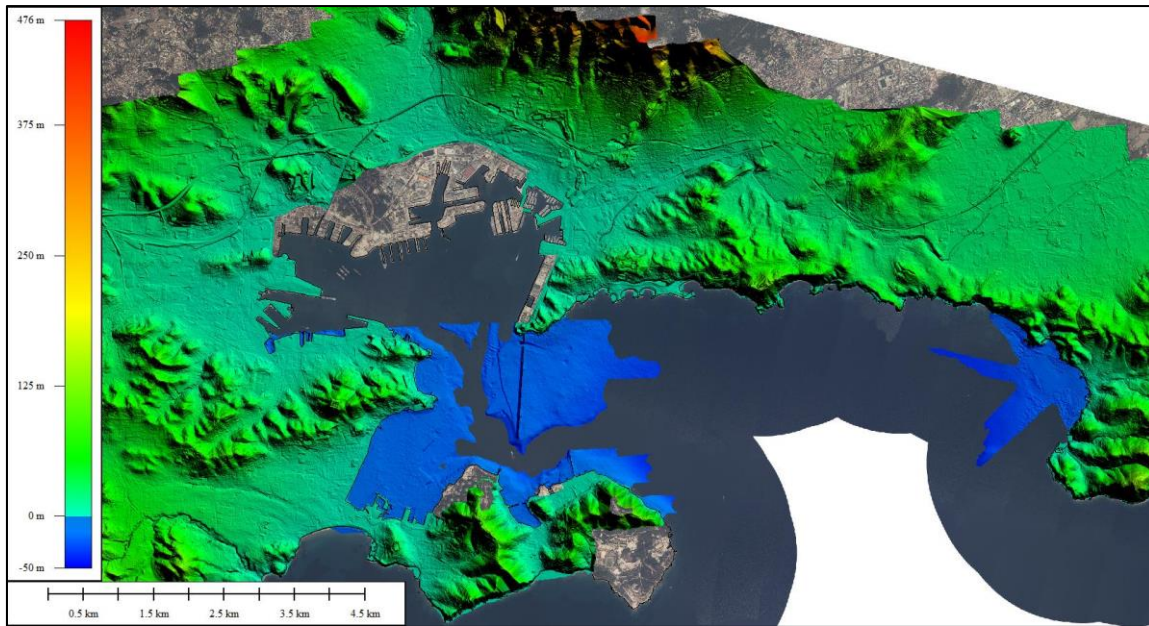


Illustration 44 - Données Litto3D sur le secteur de Toulon (Orthlittorale V2, 2011, ©MEDDE, en arrière plan).

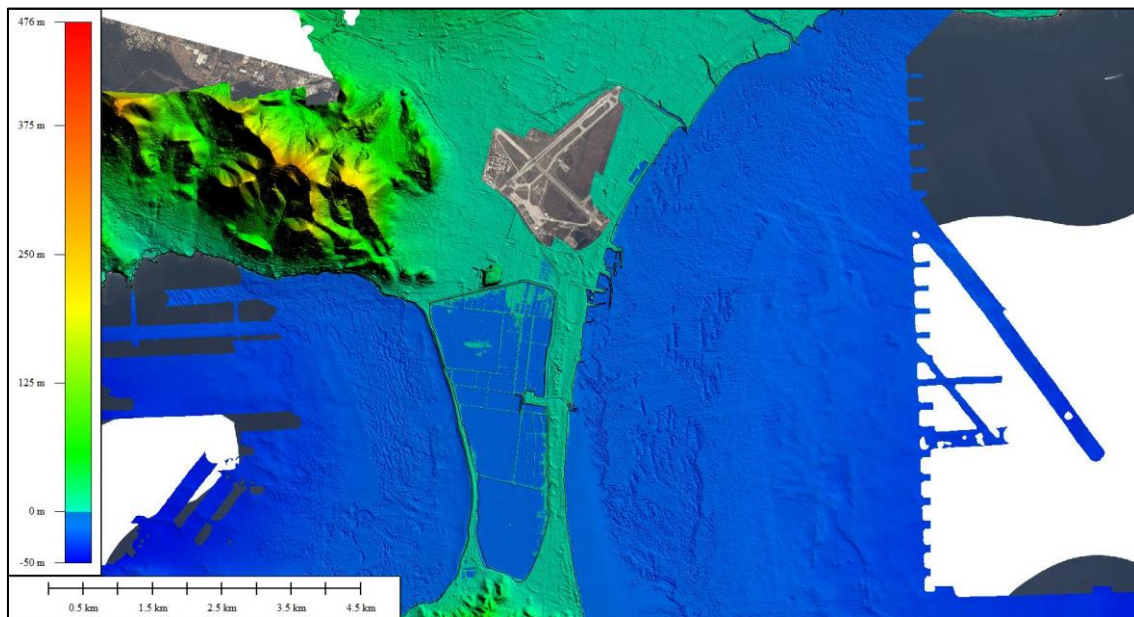


Illustration 45 - Données Litto3D sur le secteur de Hyères (Orthlittorale V2, 2011, ©MEDDE, en arrière plan).

5.3 Cartographies produites

5.3.1 Prise en compte des études existantes

L'étude de l'aléa submersion marine portant sur le périmètre du SCoT Provence-Méditerranée (Stépanian *et al.*, 2014) est intégrée dans la cartographie présente avec des modifications des hauteurs d'eau (niveau d'aléa) dans la mesure où les choix retenus pour le calcul des niveaux statiques et pour la prise en compte du changement climatique sont différents.

- Il est ici retenu le niveau de marée de Pleine Mer de moyenne vive eau (PMVE) au lieu du niveau des Plus Hautes Mers Astronomiques (PHMA), soit une baisse de niveau d'eau (hauteur de submersion) -0,15 m à Toulon pour les deux scénarios actuel et 2100.
- Il est ici incorporé pour le scénario actuel un forfait de +0,2 m lié au changement climatique.

Il en résulte pour le secteur de Saint-Cyr-sur-Mer au Lavandou, couvert par l'étude BRGM/SCoT Provence-Méditerranée :

- une augmentation du niveau d'eau de +5 cm pour les zones exposées à un l'aléa centennal pour la situation actuelle ;
- une baisse du niveau d'eau de -15 cm pour les zones exposées à un l'aléa centennal pour la situation en 2100.

Au regard de ces incertitudes topographiques des données LITto3D sur les parties terrestres (+/- 15-20 cm), les conséquences en termes de cartographies sont très limitées.

5.4 Principaux résultats

Les cartographies produites mettent en évidence les grands secteurs du littoral régional qui sont potentiellement exposés à un phénomène de submersion marine.

5.4.1 Tableaux récapitulatifs et cartes des niveaux d'eaux

Les tableaux dans les pages suivantes (Illustration 46 à Illustration 48) rassemblent les valeurs significatives des différentes composantes des niveaux d'eaux pour chacune des zones de plages où la contribution du set-up a été calculée. Ils mettent en évidence la diversité des niveaux potentiellement atteints en fonction de de leur exposition aux houles et des caractéristiques de la pente de la plage.

Les composantes sont :

- Marée de vive-eau (m) ;
- Surcote centennale (m)
- Valeur moyenne du set-up (m)
- Niveau de référence de l'évènement moyen (m NGF/IGN69) ;
- Niveau de référence de l'évènement moyen avec prise en compte du changement climatique à échéance 2100 (m NGF/IGN69) ;
- Ecart-type (m) : il traduit la variabilité des valeurs de set-up à l'échelle de la plage.

Les plages sont définies par un code et leur positionnement respectif sur fond cartographique est disponible en Annexe 5.

a) Plages des Bouches du Rhône

Code	Nom	Marée	Surcote	Setup moyen	Evènement moyen	Evènement moyen 2100	Ecart-type
13_01	Carro_Verdon	0.25	0.64	0.23	1.32	1.72	0.02
13_02	Sausset	0.25	0.64	0.32	1.41	1.81	0.05
13_03	Carry	0.25	0.64	0.25	1.34	1.74	0.02
13_04	Marseille_Borely	0.25	0.64	0.28	1.37	1.77	0.08
13_05	Marseille_Sormiou	0.25	0.64	0.31	1.40	1.80	0.01
13_06	Cassis	0.25	0.64	0.44	1.53	1.93	0.06
13_07	La_Ciotat	0.24	0.64	0.20	1.28	1.68	0.03

*Illustration 46 - Tableau de synthèse des niveaux pour les plages des Bouches-du-Rhône***b) Plages du Var**

Code	Nom	Marée	Surcote	Setup moyen	Evènement moyen	Evènement moyen 2100	Ecart-type
83W_01	Saint_Cyr_Lecques	0.24	0.64	0.20	1.28	1.68	0.01
83W_02	Bandol_Renecros	0.24	0.64	0.12	1.20	1.60	0.01
83W_03	Bandol_Centrale	0.24	0.64	0.17	1.25	1.65	0.00
83W_04	Bandol_Casino	0.24	0.64	0.17	1.25	1.65	0.00
83W_05	Bandol_Grand_Vallat	0.24	0.64	0.12	1.20	1.60	0.00
83W_06	Sanary_Lido	0.24	0.64	0.12	1.20	1.60	0.01
83W_07	Sanary_Portissol	0.24	0.64	0.26	1.34	1.74	0.02
83W_08	Six_Fours_Bonnegrace_A1	0.24	0.64	0.26	1.34	1.74	0.02
83W_09	Six_Fours_Bonnegrace_A2_A3	0.24	0.64	0.14	1.22	1.62	0.01
83W_10	Six_Fours_Cap_Negre	0.24	0.64	0.14	1.22	1.62	0.01
83W_11	Six_Fours_Coudouliere	0.24	0.64	0.12	1.20	1.60	0.01
83W_12	Six_Fours_Rayolet	0.24	0.64	0.13	1.21	1.61	0.00
83W_13	Six_Fours_Cros	0.24	0.64	0.12	1.20	1.60	0.01
83W_14	La_Seyne_Sablettes	0.24	0.64	0.25	1.33	1.73	0.02
83W_15	Pradet_Pin_de_Galle	0.24	0.64	0.30	1.38	1.78	0.07

Caractérisation de l'aléa submersion marine sur le périmètre régional PACA

Code	Nom	Marée	Surcote	Setup moyen	Evènement moyen	Evènement moyen 2100	Ecart-type
83W_16	Pradet_Monaco	0.24	0.64	0.36	1.44	1.84	0.10
83W_17	Pradet_Bonnettes	0.24	0.64	0.15	1.23	1.63	0.02
83W_18	Pradet_Garonne	0.24	0.64	0.22	1.30	1.70	0.01
83W_19	Pradet_Garonne_2	0.24	0.64	0.27	1.35	1.75	0.03
83W_20	Pradet_Oursinieres	0.24	0.64	0.38	1.46	1.86	0.08
83W_21	Hyeres_Auberge	0.24	0.64	0.23	1.31	1.71	0.06
83W_22	Hyeres_Tombolo_Ouest	0.24	0.64	0.10	1.18	1.58	0.05
83W_23	Hyeres_Bergerie	0.24	0.64	0.10	1.18	1.58	0.01
83W_24	Hyeres_Capte	0.24	0.64	0.11	1.19	1.59	0.02
83W_25	Hyeres_Pesquiers	0.24	0.64	0.08	1.16	1.56	0.01
83W_26	Hyeres_Potiniere	0.24	0.64	0.10	1.18	1.58	0.01
83W_27	Hyeres_Ceinturon	0.24	0.64	0.20	1.28	1.68	0.10
83W_28	Hyeres_Gapeau_nord	0.24	0.64	0.17	1.25	1.65	0.04
83W_29	Hyeres_Vieux_Salins	0.24	0.64	0.15	1.23	1.63	0.03
83W_30	La_Londe_Est	0.24	0.64	0.19	1.27	1.67	0.06
83W_31	Bormes_Pellegrin	0.24	0.64	0.13	1.21	1.61	0.05
83W_32	Bormes_Leoube	0.24	0.64	0.20	1.28	1.68	0.04
83W_33	Bormes_Estagnol	0.24	0.64	0.17	1.25	1.65	0.02
83W_34	Bormes_Grand_Jardin	0.24	0.64	0.18	1.26	1.66	0.07
83W_35	Bormes_Cabasson	0.24	0.64	0.26	1.34	1.74	0.03
83W_36	Bormes_Bregançon	0.24	0.64	0.34	1.42	1.82	0.04
83W_37	Bormes_Gaou	0.24	0.64	0.29	1.37	1.77	0.08
83W_38	Bormes_Faviere_Sud	0.24	0.64	0.18	1.26	1.66	0.03
83W_39	Lavandou_Anglade	0.24	0.64	0.30	1.38	1.78	0.06
83W_40	Lavandou_Centre	0.24	0.64	0.40	1.48	1.88	0.09
83W_41	Lavandou_Saint_Clair	0.24	0.64	0.27	1.35	1.75	0.04
83W_42	Lavandou_Fossette	0.24	0.64	0.32	1.40	1.80	0.07
83W_43	Lavandou_Aiguebelle	0.24	0.64	0.48	1.56	1.96	0.12
83W_44	Lavandou_Jean_Blanc	0.24	0.64	0.31	1.39	1.79	0.02

Code	Nom	Marée	Surcote	Setup moyen	Evènement moyen	Evènement moyen 2100	Ecart-type
83W_45	Lavandou_Cavaliere	0.24	0.64	0.43	1.51	1.91	0.08
83W_46	Lavandou_Pramousquier	0.24	0.64	0.27	1.35	1.75	0.04
83W_47	Porquerolles_Argent	0.24	0.64	0.31	1.39	1.79	0.04
83E_01	Canadel	0.24	0.64	0.28	1.36	1.76	0.02
83E_02	Rayol	0.24	0.64	0.28	1.36	1.76	0.01
83E_03	Cavalaire	0.24	0.64	0.29	1.37	1.77	0.03
83E_04	Gigaro	0.24	0.64	0.31	1.39	1.79	0.05
83E_05	Briande	0.24	0.64	0.47	1.55	1.95	0.08
83E_06	Ramatuelle_Bonne_Terrasse	0.24	0.65	0.26	1.35	1.75	0.09
83E_07	Pampelonne	0.24	0.65	0.26	1.35	1.75	0.10
83E_08	Ramatuelle_Salins	0.24	0.65	0.20	1.29	1.69	0.06
83E_09	Ramatuelle_Canebiers	0.24	0.65	0.26	1.35	1.75	0.10
83E_10	Saint_Tropez	0.24	0.65	0.34	1.43	1.83	0.10
83E_11	Gassin	0.24	0.65	0.36	1.45	1.85	0.09
83E_12	Cogolin	0.24	0.65	0.29	1.38	1.78	0.11
83E_13	Port_Grimaud	0.24	0.65	0.26	1.35	1.75	0.06
83E_14	Grimaud	0.24	0.65	0.21	1.30	1.70	0.12
83E_15	Sainte_Maxime	0.24	0.65	0.25	1.34	1.74	0.07
83E_16	Nartelle	0.24	0.65	0.26	1.35	1.75	0.09
83E_17	Gaillarde	0.24	0.65	0.25	1.34	1.74	0.06
83E_18	Argens	0.24	0.65	0.21	1.30	1.70	0.07
83E_19	Frejus	0.24	0.65	0.46	1.55	1.95	0.04
83E_20	Saint_Raphael	0.24	0.65	0.59	1.68	2.08	0.10
83E_21	Debarquement	0.24	0.65	0.40	1.49	1.89	0.12
83E_22	Agay	0.24	0.65	0.33	1.42	1.82	0.14

Illustration 47 - Tableau de synthèse des niveaux pour les plages des Bouches-du-Rhône

c) Plages des Alpes-Maritimes

Code	Nom	Marée	Surcote	Setup moyen	Evènement moyen	Evènement moyen 2100	Ecart-type
06_01	Figueirette	0.24	0.65	0.39	1.48	1.88	0.05
06_02	Theoule	0.24	0.65	0.54	1.63	2.03	0.19
06_03	Theoule_Rague	0.24	0.65	0.51	1.60	2.00	0.18
06_04	Cannes_Bocca	0.24	0.65	0.43	1.52	1.92	0.07
06_05	Cannes_Croisette	0.24	0.65	0.31	1.40	1.80	0.08
06_06	Cannes_Bijou	0.24	0.65	0.17	1.26	1.66	0.06
06_07	Cannes_Gazanière	0.24	0.65	0.15	1.24	1.64	0.04
06_08	Lerins	0.24	0.65	0.15	1.24	1.64	0.15
06_09	Vallauris	0.24	0.65	0.21	1.30	1.70	0.06
06_10	Cannes_Juan	0.24	0.65	0.39	1.48	1.88	0.08
06_11	Juan	0.24	0.65	0.15	1.24	1.64	0.05
06_12	Juan-Garoupe	0.24	0.65	0.23	1.32	1.72	0.05
06_13	Antibes	0.24	0.65	0.31	1.40	1.80	0.09
06_14	Villeneuve-Loubet	0.24	0.65	0.32	1.41	1.81	0.07
06_15	Cagnes	0.24	0.65	0.34	1.43	1.83	0.08
06_16	Saint-Laurent_Var	0.24	0.65	0.29	1.38	1.78	0.09
06_17	Nice	0.24	0.65	0.68	1.77	2.17	0.16
06_18	Villefranche	0.24	0.65	0.46	1.55	1.95	0.11
06_19	CapFerrat_Fosse	0.24	0.65	0.31	1.40	1.80	0.12
06_20	CapFerrat_Fossette	0.24	0.65	0.47	1.56	1.96	0.12
06_21	CapFerrat_StHospice	0.24	0.65	0.34	1.43	1.83	0.06
06_22	CapFerrat_Fontettes	0.24	0.65	0.64	1.73	2.13	0.09
06_23	Beaulieu_Fourmis	0.24	0.65	0.13	1.22	1.62	0.02
06_24	Beaulieu_rade	0.24	0.65	0.42	1.51	1.91	0.19
06_25	Eze	0.24	0.65	0.42	1.51	1.91	0.07
06_26	St_Laurent_Pissarelles	0.24	0.65	0.61	1.70	2.10	0.08
06_27	St_Laurent_Mala	0.24	0.65	0.47	1.56	1.96	0.13

06_28	Cap_Ail	0.24	0.65	0.51	1.60	2.00	0.11
06_29	Roquebrune	0.24	0.65	0.26	1.35	1.75	0.04
06_30	Cap_Martin	0.24	0.65	0.23	1.32	1.72	0.09
06_31	Menton	0.24	0.65	0.42	1.51	1.91	0.07
06_32	Menton_Sablettes	0.24	0.65	0.26	1.35	1.75	0.03
06_33	Menton_Corniche	0.24	0.65	0.28	1.37	1.77	0.06

Illustration 48 - Tableau de synthèse des niveaux pour les plages des Bouches-du-Rhône

5.4.2 Atlas cartographiques

Deux atlas cartographiques sont fournis :

a) Atlas des niveaux marins

Un atlas des niveaux marins de référence, au niveau des zones où la contribution des vagues à la submersion marine a été calculée est fourni en Annexe 6 et 7 pour les deux scénarios retenus.

b) Atlas de l'aléa submersion marine

Un atlas cartographique des zones soumises à un aléa submersion marine à 1/25 000 est fourni en Annexe 8 et 9 pour chacun des scénarios.

5.4.3 Données produites

Les données d'aléa submersion sont des données de type « rasters » de 5 m de maille avec une valeur de hauteur d'inondation (valeur réelle).

Le passage à des données de type « polygones » au format .shp s'est effectué selon 3 étapes successives :

1. Reclassification selon la hauteur d'eau calculée au sein de chaque maille (Illustration 49) ;
2. Transformation en polygones (.shp) sans lissage, filtrage ou simplification des polygones. La forme des polygones correspond donc à la forme initiale des données de type rasters (maille 5X5 m) ;
3. Elimination manuelle des polygones aberrants et des zones éloignées du littoral sans connexion hydraulique possible, avec la mer. Cette élimination s'est faite en fonction de la connaissance locale des zones soumises à la submersion marine et validée en concertation avec les trois DDTM des départements littoraux de la région PACA.

Les données SIG produites dans le cadre de cette étude sont au format ESRI .shp dans le système de projection légal Lambert-93.

Au regard de la méthodologie employée et des données topographiques sources, leur échelle de validité minimale est le 1/10 000.

Hauteur d'eau	Classe d'aléa
0 - 0,5 m	Faible
0,5 - 1 m	Moyen
1 - 2 m	Fort
> 2 m	Fort

Illustration 49 - Classification de l'aléa submersion marine en fonction de la hauteur d'eau dans chaque maille.

5.4.4 Vulnérabilité des littoraux PACA à la submersion marine

a) Plages de la côte rocheuse

Sur la plupart des plages de la côte rocheuse, les extensions des zones d'aléa sont vite limitées par la topographie qui remonte rapidement. En revanche, sur des secteurs urbains, les impacts des vagues lors des tempêtes, non quantifiés dans cette étude, peuvent en revanche être importants en termes d'impacts physiques sur les infrastructures et également en termes de franchissement de paquets de mer et de submersion associée en arrière de la crête du cordon littoral (ouvrage, mur de front de mer, route, etc...).

En revanche, le fait qu'elles soient quasi-totalement recouvertes pour le scénario « évènement moyen avec prise en compte du changement climatique » laisse augurer de leur plus faible résilience vis-à-vis de l'augmentation du niveau marin au cours du siècle en cours, à la différence des plages sableuses basses plus à même de s'adapter.

b) Plaines alluviales

Les plaines alluviales et les embouchures des fleuves côtiers sont de par leur altimétrie basse les plus exposées à ce phénomène, et c'est sur ces secteurs que les emprises d'aléa sont les plus importantes.

A l'exception de la Camargue, dans les Bouches-du-Rhône, l'embouchure de l'Huveaune à Marseille est un secteur potentiellement exposé mais les zones en arrière sont cependant protégées en raison de la construction et de l'entretien des plages du Prado qui conservent une hauteur importante, en raison de cet entretien régulier (rechargement, reprofilage).

Dans le département du Var, on retient en particulier :

- le double tombolo de Giens, qui est particulièrement exposé au coup de mer et à la submersion marine en cas d'attaque du cordon dunaire par les vagues sur le côté Ouest au niveau de la plage de l'Almanarre et de la route du sel entre Hyères la Presqu'île de Giens (le dernier évènement date de janvier 2016) ;

- la Plaine du Ceinturon à Hyères au niveau de l'embouchure du Gapeau ;
- le littoral des Vieux-Salins entre Hyères et La Londe-les-Maures, avec un cordon dunaire très étroit en érosion chronique, et un herbier de posidonies frangeant, qui protègent des anciens salins à l'altimétrie basse;
- le fond du Golfe de Saint-Tropez au niveau de Cogolin et Port-Grimaud (embouchure de la Giscle)
- la plaine d'embouchure de l'Argens y compris la ville de Fréjus caractérisée par une topographie relativement basse.
- et dans une moindre mesure au niveau de la rade d'Agay à Saint-Raphaël.

Dans les Alpes-Maritimes, les zones les plus exposées en termes de superficie se concentrent au niveau de la plaine d'embouchure de la Siagne, entre la Napoule et Cannes, et sur la route de Villeneuve-Loubet à Nice.

Il faut souligner que la plupart de ces secteurs sont exposés à un risque inondation par débordement du cours d'eau avec un cadre réglementaire défini (PPRI, PAPI).

c) Zones portuaires

Les zones portuaires sont caractérisées dans leur quasi-totalité par des emprises d'aléa submersion marine en bordure des bassins, en particulier pour « l'évènement moyen avec prise en compte du changement climatique ». Sur ces secteurs, la surélévation du niveau marin par les vagues (*set-up*) n'est pas prise en compte en raison de la difficulté de son estimation sur et dans les bassins portuaires. Une prise en compte de ce processus sur ces environnements conduirait à une augmentation du niveau d'aléa.

6. Conclusions

Pour affiner la compréhension des dynamiques de submersion sur la partie rocheuse du littoral de la région PACA, la DREAL PACA souhaite produire un document de Porté à Connaissance de l'aléa submersion marine sur le périmètre régional.

La présente étude relative à la submersion marine sur le littoral rocheux réalisée par le BRGM en partenariat avec la DREAL PACA, dans le cadre de l'Observatoire Régional des Risques Majeurs en région PACA¹², a permis de produire une cartographie homogène des zones soumises à l'aléa submersion marine sur l'ensemble du littoral allant de Fos-sur-Mer à la frontière italienne.

La méthodologie utilisée consiste à calculer de manière semi-empirique les niveaux d'eaux à la côte atteints par la mer par une approche probabiliste en déterminant les événements en fonction de leur période de retour, et ce pour chaque « unité homogène » du littoral, comme par exemple les plages, les grandes baies ou les cellules sédimentaires.

La base de données de vagues réalisée dans le cadre du projet sur le SCoT Provence-Méditerranée a été utilisée pour disposer de données régionalisées des vagues au niveau de chaque grande baie. Les séries de données obtenues par modélisation sont suffisamment longues pour des calculs statistiques robustes de période de retour des hauteurs de vagues (période 1979-2009, pas de temps horaire). Ces statistiques des vagues sont ainsi déterminées pour chacun des grands secteurs du littoral. Puis un calcul des différentes composantes du niveau marin à la côte (marée, surcote atmosphérique et surcote liée à l'action des vagues sur les portions de plage) a été effectué pour chaque secteur du littoral.

Ces valeurs de niveaux sont alors projetées sur le Modèle Numérique de Terrain Litto3D de manière statique. Une cartographie des zones potentiellement affectées par un aléa de submersion marine d'occurrence centennale est ainsi produite à l'échelle du territoire pour deux scénarios:

- Une situation actuelle avec un niveau marin proche de sa position actuelle (il est néanmoins augmenté d'un forfait de +0,20 cm); il correspond au scénario d'« événement moyen » au sens de la Directive Inondation.
- Une situation à échéance 2100, avec un niveau marin intégrant l'impact du changement climatique avec une surélévation du niveau de la mer de +0.60 cm ; il correspond au scénario « événement moyen avec prise en compte du changement climatique » au sens de la Directive Inondation.

Un atlas cartographique à l'échelle 1/25 000 est fourni pour chacun de ces deux scénarios.

L'exposition du littoral au phénomène de submersion marine est ainsi qualifiée à l'échelle régionale. Il ressort de cette analyse la grande diversité de l'exposition des différents secteurs face à ce phénomène en raison de la topographie particulière de ce littoral :

- Les zones les plus affectées sont très logiquement situées au niveau des plaines alluviales des fleuves côtiers (Huveaune, Gapeau, Argens, Siagne, etc...), à la

¹² observatoire-regional-risques-paca.fr/

topographie basse et plane, et où interagissent des phénomènes d'inondation et de submersion marine.

- Les plages accolées aux falaises (plages de poche) ou les plages urbaines avec un ouvrage de protection (front de mer) sont également exposées mais avec des superficies d'inondation réduites en arrière. Ces plages sont toutefois exposées aux franchissements de paquets de mer (submersion par franchissement), phénomène non pris en compte dans cette étude. En revanche, le fait qu'elles soient quasi-totalement recouvertes pour le scénario « évènement moyen avec prise en compte du changement climatique » laisse augurer de leur plus faible résilience vis-à-vis de l'augmentation du niveau marin au cours du siècle en cours, à la différence des plages sableuses basses plus à même de s'adapter.
- Les zones portuaires sont caractérisées dans leur quasi-totalité par des emprises d'aléa submersion marine en bordure des bassins, en particulier pour « l'évènement moyen avec prise en compte du changement climatique ». Sur ces secteurs, la surélévation du niveau marin par les vagues (*set-up*) n'est pas prise en compte en raison de la difficulté de son estimation sur et dans les bassins portuaires. Une prise en compte de ce processus, dont la méthodologie reste à déterminer, sur ces environnements conduirait à une augmentation du niveau d'aléa.

Ces données viendront alimenter les Stratégies Locales de Gestion des Risques d'Inondations (SLGRI) des Territoires à Risques Importants d'Inondation (TRI) en matière d'amélioration de la connaissance du risque.

7. Bibliographie

- Balouin, Y., Belon, R., Lamy, M. et Bodéré, G.** (2011). ROL : Etude complémentaire sur l'impact des tempêtes sur le littoral de la Plaine Orientale de Corse. Cartographie de la submersion marine, de la sensibilité à l'érosion côtière et de l'exposition des enjeux. RP-59724-FR, 39p + volume cartographique
- Booij N., Haagsma Ij.G., Holthuijsen L.H., Kieftenburg At.M.M, Ris R.C., Van Der Westhuysen A.J., Zijlema M.** (2004). Swan Cycle III version 40.41, User's Manual, 115 p.
- Bulteau T., Nicolae Lerma A., Lecacheux S.** (2013) – Projet Climats de houle - Phase 2 : Analyse des valeurs extrêmes de vagues le long de la côte Atlantique et en Manche. Rapport final. BRGM/RP-62730-FR, 49 p., 26 fig., 3 ann
- Chawla A., Spindler D., and Tolman H.** (2011). WAVEWATCH III R Hindcasts with Re-analysis winds. Initial report on model setup. Technical note, April 2011.
- Chawla A., Spindler D., and Tolman** (2102). 30 Year Wave Hindcasts using WAVEWATCH III R with CFSR winds. Phase 1. Technical note, November 2012.
- CETMEF** (2012). Fiches synthétiques de mesure des états de mer. Rapport CETMEF, 294 p.
- CETMEF** (2013a). Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes – Environnements maritimes et estuariens. Rapport CETMEF, 180 p.
- CETMEF** (2013b). Analyse des surcotes extrêmes de long du littoral métropolitain. Rapport CETMEF, 130 p.
- Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., & Dorazio, P.** (2001). An introduction to statistical modeling of extreme values (Vol. 208). London: Springer.
- DREAL LR et CETE (2013).** *Note de définition de l'événement extrême sur le bassin Rhône-Méditerranée.* Note technique DREAL Languedoc-Roussillon – CETE Méditerranée, 11 p.
- Hawkes, P.J., Gonzales-Marco, D., Sánchez-Arcilla, A. and Prinos, Panayotis** (2008). Best practice for the estimation of extremes: A review, *Journal of Hydraulic Research*, 46 (2), 324-332.
- Le Roy S., Stepanian A., Pedreros R., Bulteau T., Nicolae-Lerma A. et Balouin Y.** (2014). Modélisation de la submersion marine sur la Plaine du Ceinturon (Hyères-les-Palmiers). Rapport final. BRGM/RP-63945-FR, 98 p., 80 ill., 6 ann., 8 cartes hors-texte.
- Li, F., Bicknell, C., Lowry, R. and Li, Y.** (2012). A comparison of extreme wave analysis methods with 1994-2010 offshore Perth dataset, *Coastal Engineering*, 69, 1-11. doi:10.1016/j.coastaleng.2012.05.006.
- Mackay, E.B.L., Challenor, P.G. and Bahaj, A.S.** (2011). A comparison of estimators for the generalised Pareto distribution, *Ocean Engineering*, 38, 1338-1346.
- Mazas, F. and Hamm, L.** (2011). A multi-distribution approach to POT methods for determining extreme wave heights, *Coastal Engineering*, 58, 385-394.

MEDDE (2014). Guide méthodologique : plan de prévention des risques littoraux. MEDDE/DGPR, 169 p.

MEEDAT (1997). Plans de prévention des risques littoraux. Guide méthodologique. Ed. La documentation française, 49 p.

Morellato D., Benoit M. (2010). *Constitution d'une base de données d'états de mer le long des côtes françaises méditerranéennes par simulations rétrospectives couvrant la période 1979-2008*. Revue Paralia, Vol. 3, pp 5.1–5.12. DOI:10.5150/revue-paralia.2010.005

Pedrerros R. et Poisson B. (2007). Etude de cas au niveau de la côte méditerranéenne : modélisation numérique des tsunamis. BRGM/RP-55760-FR, 176 p., 123 fig., 27 tabl., 2 ann.

Saha, S., S. Moorthi, H. Pan, X. Wu, J. Wang, S. Nadiga, P. Tripp, R. Kistler, J. Wollen, D. Behringer, H. Liu, D. Stokes, R. Grumbine, G. Gayno, J. Wang, Y. Hou, H. Chuang, H. Juang, J. Sela, M. Iredell, R. Treadon, D. Kleist, P. VanDelst, D. Keyser, J. Derber, M. Ek, J. Meng, H. Wei, R. Yang, S. Lord, H. van den Dool, A. Kumar, W. Wang, C. Long, M. Chelliah, Y. Xue, B. Huang, J. Schemm, W. Ebisuzaki, R. Lin, P. Xie, M. Chen, S. Zhou, W. Higgins, C. Zou, Q. Liu, Y. Chen, Y. Han, L. Cucurull, R. Reynolds, G. Rutledge and M. Goldberg (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. Bull. Am. Meteor. Soc., 91, 1015–1057.

SHOM (2013). RAM 2013. Références Altimétriques Maritimes. Rapport SHOM, 116 p.

SHOM/CETMEF (2012). Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France - Manche et Atlantique. Rapport SHOM/CETMEF, 160 p.

Spindler D., Chawla A., and Tolman (2011). An initial look at the CFSR Reanalysis winds for wave modeling. Technical note, March 2011.

Stépanian A., Lecacheux S., Nicolae-Lerma A., et Pedrerros R. (2014) – Evaluation des Risques Naturels Littoraux sur le territoire du SCoT Provence- Méditerranée – Caractérisation de l'aléa submersion marine. Rapport final. BRGM/RP-63949-FR, 119 p., 65 ill., 5 ann., 1 CD.

Annexe 1

Composition du Comité Technique

Le comité technique est composé de représentants :

- du BRGM
- de la DREAL Paca
- du Service Mer et Service territorial ouest de la DDTM des Alpes-Maritimes
- du Service Mer et Service Risque de la DDTM des Bouches du Rhône
- du Service Mer et Service Risque de la DDTM du Var
- du CEREMA

Annexe 2

Analyses statistiques des surcotes aux marégraphes de Marseille, Toulon et Nice, d'après CETMEF (2013b)

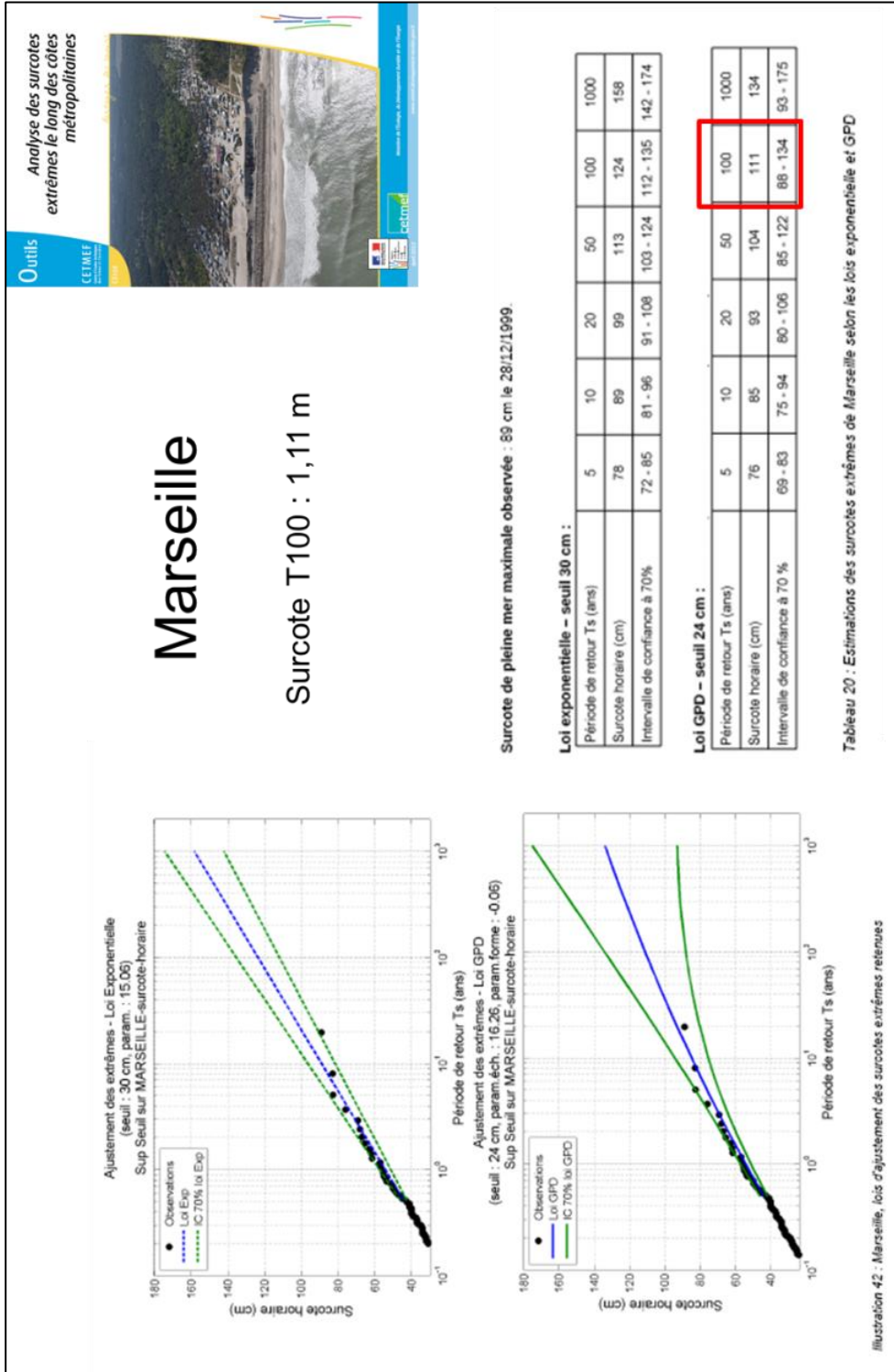


Illustration 50 – Analyse statistique des surcotes au marégraphe de Marseille (CETMEF, 2013b).

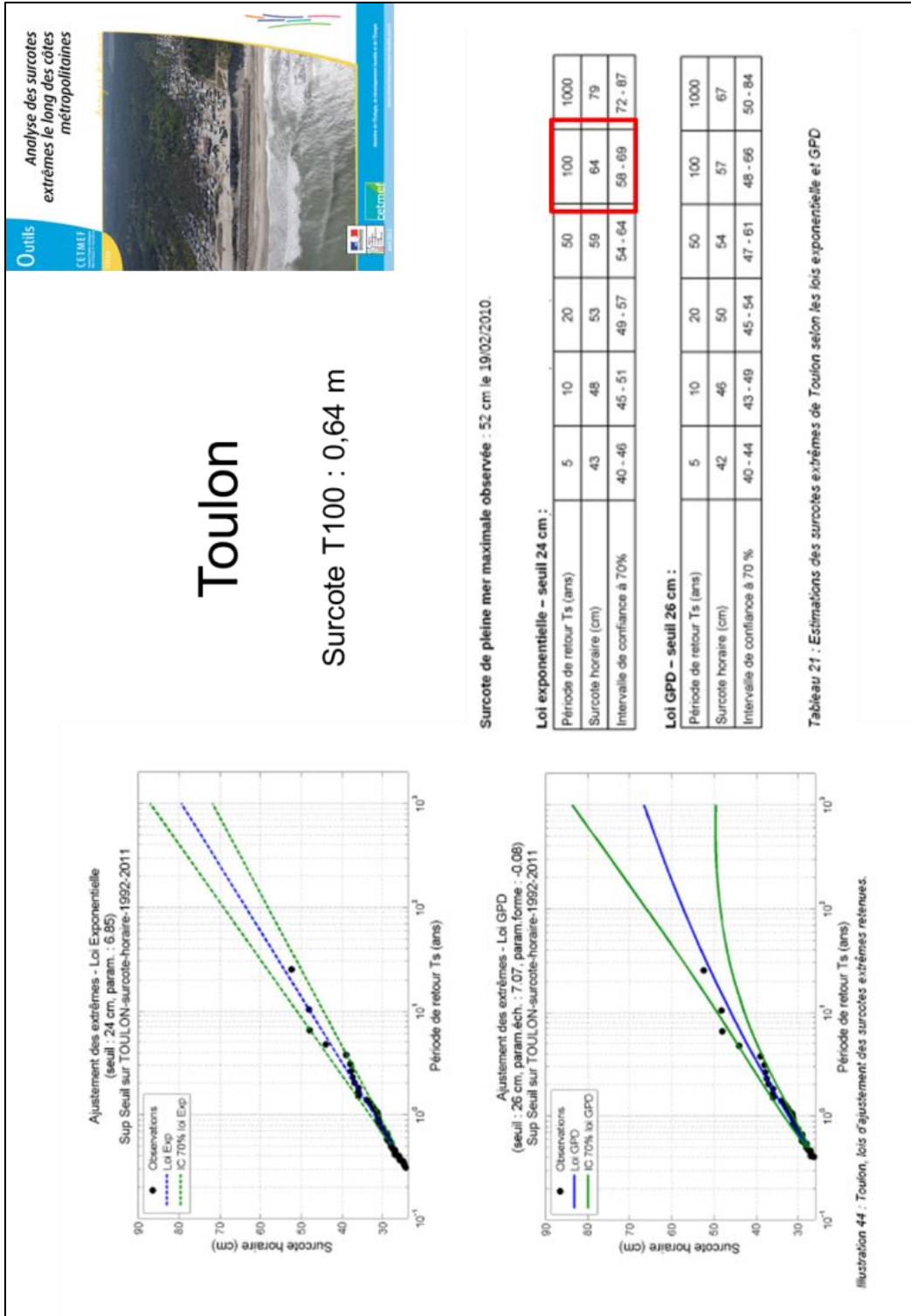


Illustration 51 – Analyses statistique des surcotes au marégraphe de Toulon (CETMEF, 2013b).

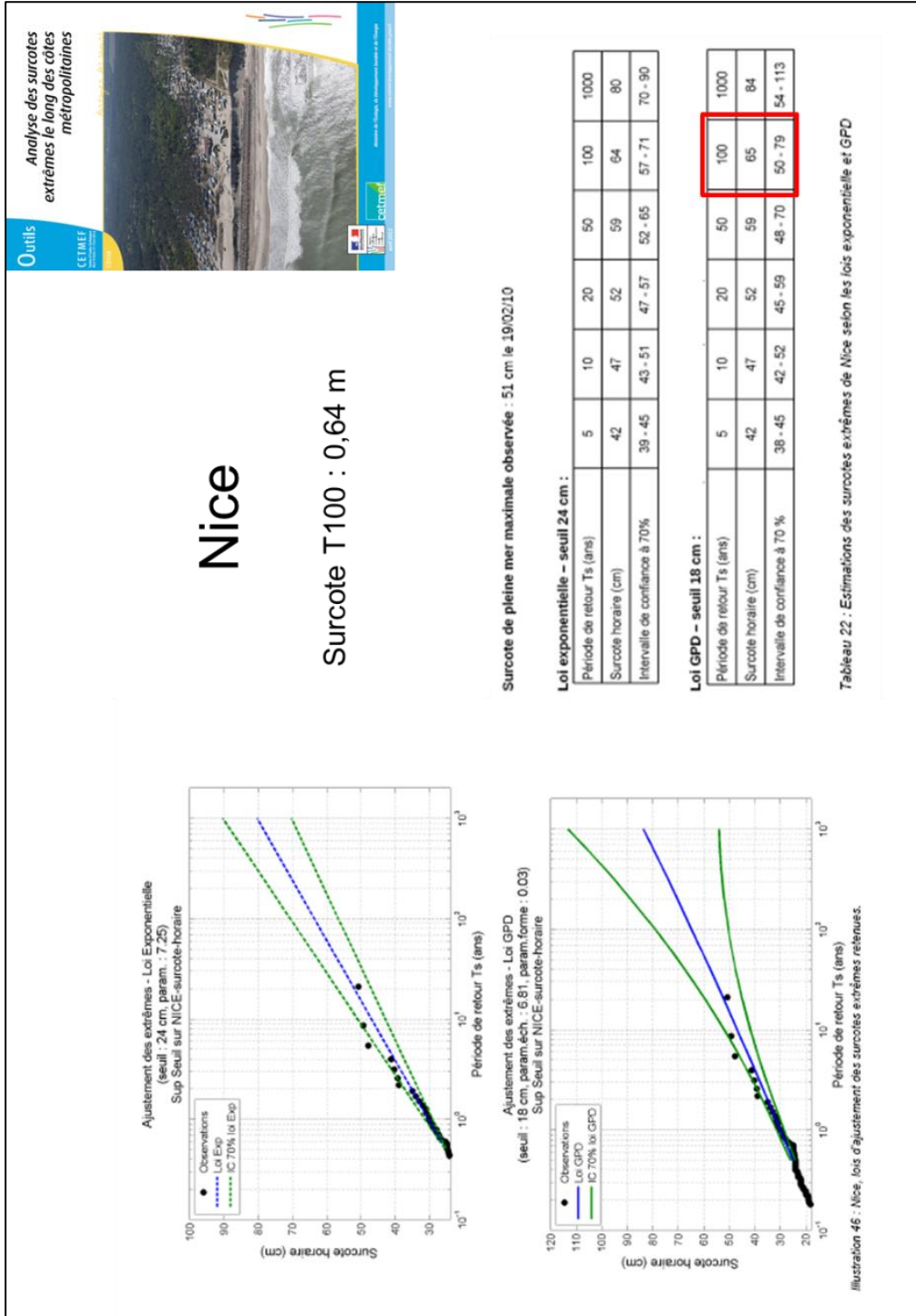


Illustration 52 – Analyse statistique des surcotes au marégraphe de Nice (CETMEF, 2013b).

Annexe 3

Méthode statistique de calcul des périodes de retour des vagues au large

Nous exposons ici la méthodologie appliquée pour le calcul des valeurs extrêmes et les niveaux de retour des vagues. Cette méthode est basée sur les travaux et recommandations de Hawkes et al, 2008 ; Mazas et al, 2011 et Li et al, 2012. Elle se base notamment sur l'échantillonnage des données par excès supérieurs à un seuil fixé.

Cette méthode dite POT pour Peak Over Threshold permet l'ajustement par une loi GPD (Generalized Pareto Distribution).

Dans les études précédentes du BRGM sur la submersion marine en région PACA (Le Roy et al., 2014 ; Stépanian et al., 2014), le choix de l'ajustement d'une unique loi avait été fait afin de pouvoir comparer les résultats point à point. Dans un souci d'homogénéité, nous conservons la même loi dont la fonction de répartition est la suivante :

$$F(x) = 1 - \left[1 + \xi \left(\frac{x - u_2}{\sigma} \right) \right]^{-\frac{1}{\xi}}$$

Avec ξ et σ respectivement les paramètres de forme et d'échelle de la loi GPD, et u_2 le seuil choisi.

Il est à noter que pour $\xi=0$, la fonction de répartition devient :

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\sigma}}$$

De plus, quand le paramètre de forme est négatif, x est borné vers les fortes valeurs $x \leq u - \frac{\sigma}{\xi}$.

Méthodologie

a) *Analyse directionnelle*

Lors d'une étude statistique d'extrêmes, l'hypothèse est faite que la série dont on souhaite étudier les extrêmes est constituée de variables indépendantes et identiquement distribuées (Coles, 2001).

Dans le cas des vagues, des directions différentes pour les valeurs extrêmes indiquent que les vagues ont été engendrées par des phénomènes météorologiques différents (forts coups de vents, ou tempêtes hivernales par exemple) et sont par conséquent non identiquement distribuées. Il importe donc de mener une analyse directionnelle des vagues, afin d'identifier la présence de plusieurs secteurs directionnels pour ensuite sous-échantillonner par secteur.

En pratique, nous constatons que les points situés plus au large ou directement exposés présentent deux secteurs directionnels pour l'occurrence des fortes vagues. Les autres points n'ont qu'un seul secteur privilégié pour les fortes valeurs de hauteurs significatives principalement du fait de leur localisation proche de la côte. En effet, cela s'explique par les particularités morphologiques de la côte, fortement découpée dans cette zone et avec la présence d'îles. Ainsi, certaines incidences à la côte sont tellement atténuées qu'elles ne sont pas considérées pour l'analyse statistique d'extrêmes.

Cette analyse directionnelle est faite en étudiant les roses des vagues aux bouées virtuelles considérées. L'illustration 53 présente l'exemple de deux roses de vagues. Sur celle de gauche, l'on distingue deux secteurs directionnels pour l'occurrence des fortes vagues (point P_48 Les Goudes), à droite, un seul secteur est visible (bouée virtuelle de Nice).

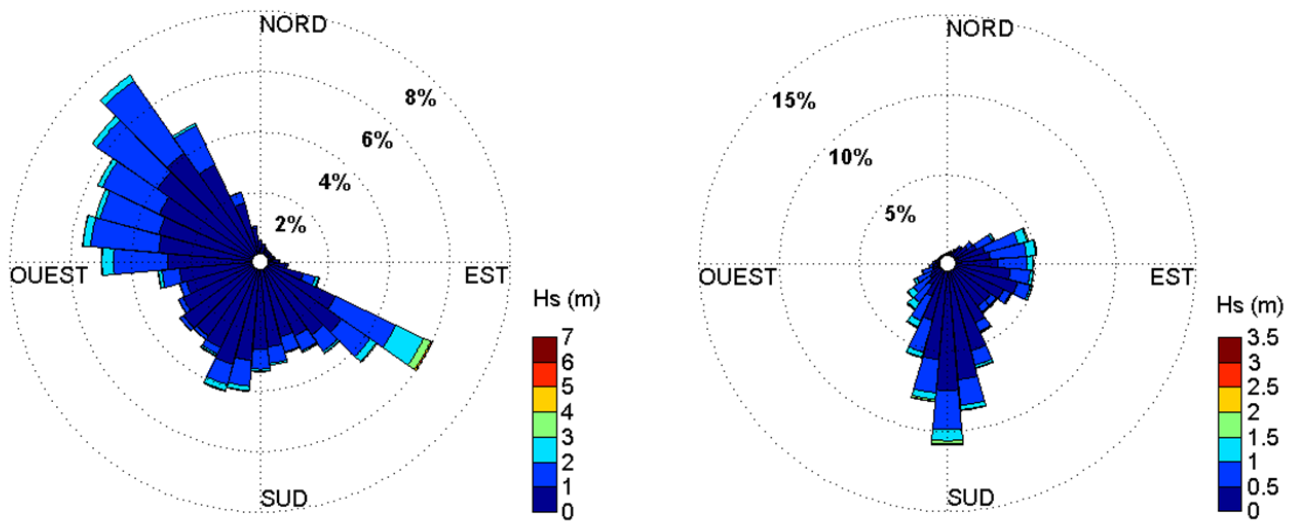


Illustration 53 - Rose des vagues. Gauche: Bouée virtuelle P_48 « Les Goudes ». Droite: Bouée de Nice. La fréquence d'occurrence des couple (Hs,Dp) se lit sur l'axe radial, avec une discrétisation de 10° pour Dp et 50cm pour Hs .

b) Echantillonnage des valeurs extrêmes

En faisant l'hypothèse d'indépendance des événements extrêmes de la série de données étudiée, il convient de définir une fenêtre temporelle (ou alors un critère de redescente sous un seuil u') pour effectivement considérer deux événements distincts l'un de l'autre lorsque l'on applique la méthode POT.

Dans notre cas, une période minimale de 36 heures est appliquée en chacun des 8 points étudiés pour s'assurer de l'indépendance des événements extrêmes (Illustration 54). En effet, en méditerranée, les événements extrêmes peuvent être soudains et répétés sur des périodes plus ou moins courtes alors même qu'ils proviennent de phénomènes météorologiques différents. Le choix de la fenêtre de 36 heures est de ce fait un critère satisfaisant pour distinguer les événements extrêmes les uns des autres.

Ce comportement a été vérifié dans la précédente étude du BRGM portant sur l'aléa submersion marine sur la côte méditerranéenne (Stépanian *et al.*, 2014 ; BRGM/RP-63949-FR).

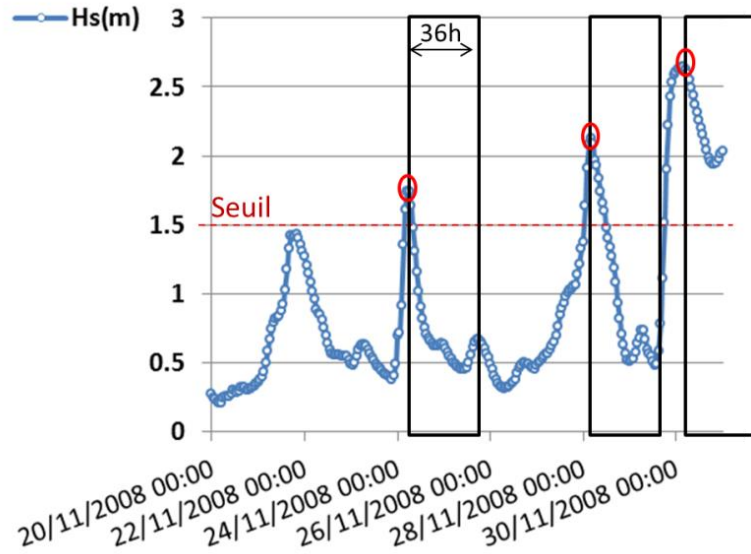


Illustration 54 - Exemple d'échantillonnage par la méthode d'excès supérieurs à un seuil (POT, pour Peak Over Threshold). Le seuil u_1 est représenté par la ligne en pointillé rouge et les pics de H_s sont entourés en rouge. Un critère de séparation temporel entre 2 événements est appliqué, il est pris égal à 36 heures.

Une fois le critère temporel fixé, le premier échantillonnage se fait en fixant un seuil u_1 qui n'est pas trop élevé de sorte à sélectionner des événements moyens et forts.

Puis, un test d'adéquation statistique classique de type test du χ^2 permet de s'assurer de l'adéquation à la loi de Poisson (niveau de risque de 0,1) de la distribution du nombre de pics annuel retenus dans l'échantillon. Si le test est rejeté, il convient de choisir un seuil plus élevé. A ce stade, une loi GPD peut déjà être ajustée à l'échantillon pour un seuil u_2 au moins égal à u_1 .

c) *Choix du seuil*

Le choix du seuil peut se révéler long et ardu. En effet, il est fréquent que plusieurs seuils soient envisageables ce qui engendre finalement une forte variabilité des résultats. Pour que le choix du seuil soit le plus objectif possible, nous appliquons une succession de tests présentés dans l'arbre de décision présenté sur l'illustration 55. Ces tests couramment appliqués dans ce type d'analyse et largement renseignés dans la littérature permettent d'assurer une bonne reproductibilité des résultats.

En outre, Mazas et Hamm (2011) suggèrent de choisir un seuil tel que l'échantillon obtenu comporte entre 2 et 5 événements par an, pour un jeu de données initial compris entre 9 et 44 ans.

Dans notre cas, la base utilisée couvre 31 ans, le seuil à déterminer devra donc mener à un échantillon de taille supérieure à 62 événements en chaque point étudié.

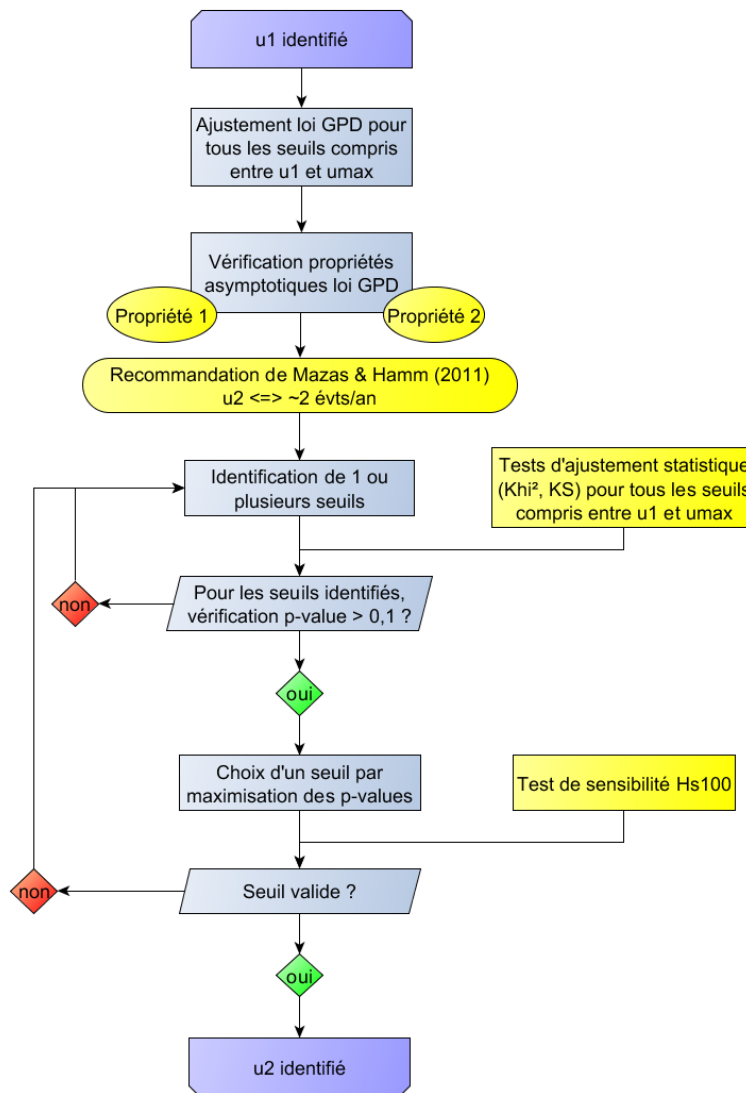


Illustration 55 - Arbre de décision illustrant la méthode d'identification du seuil u_2 . u_{max} est pris comme le seuil correspondant à 1 événement par an en moyenne. (Rapport BRGM/RP-63949-FR, Stépanian et al., 2014).

Il est également important de noter que nous basons le choix du seuil sur les propriétés de la distribution de Pareto, à savoir :

Propriété 1 : linéarité de la moyenne des excès par rapport au seuil u_2 ;

Propriété 2 : constance du paramètre d'échelle modifié $\sigma^* = \sigma - \xi u_2$ et du paramètre de forme ξ lorsque u_2 augmente.

- Test sur la moyenne des excès de H_s par rapport au seuil :

L'illustration 56 est un exemple de l'évolution de la moyenne des excès de H_s avec le seuil au point de bouée Nice. Ce test illustre bien la propriété 1 citée précédemment, qui veut que le dépassement moyen du seuil varie linéairement avec u_2 .

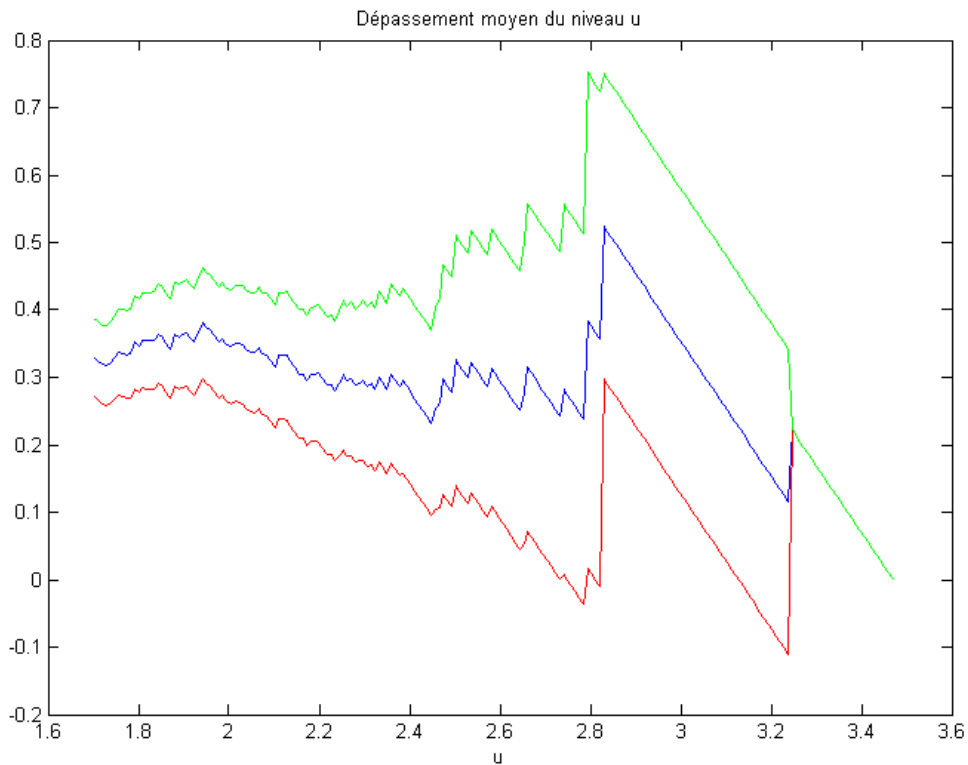


Illustration 56 - Recherche du seuil avec la propriété 1 au point Nice. Test de $u_1=1,7m$. Les intervalles de confiance à plus et moins 95% sont représentés respectivement en vert et rouge.

- Test sur les évolutions des paramètres d'échelle et de forme par rapport au seuil :

L'illustration 57, elle, présente les domaines de stabilité linéaire pour les paramètres d'échelle modifié σ^* et du paramètre de forme ξ quand u_2 augmente (cf. propriété 2).

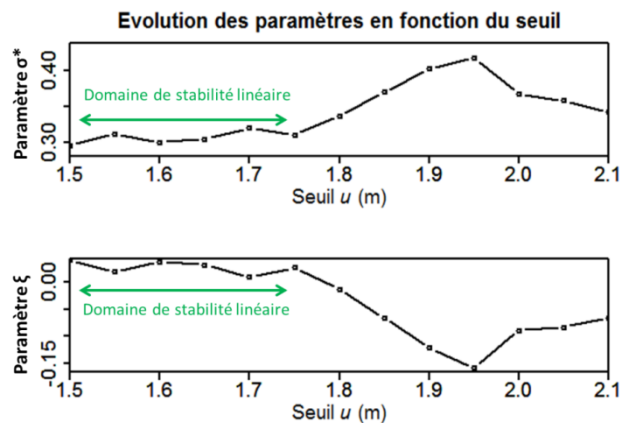


Illustration 57 - Evolution des paramètres σ^* et ξ en fonction du seuil. Exemple du point Nice.

- Test sur la variabilité des p-valeurs avec le seuil :

A ce stade de l'analyse, nous disposons de plusieurs seuils possibles. Nous menons donc deux tests supplémentaires sur les seuils envisageables : les tests de Kolmogorov-Smirnov (KS) et

du χ^2 (à 10 classes). Ces tests permettent de connaître la p-valeur associée à chaque seuil testé. La p-valeur doit être supérieure au niveau de risque 0,1 pour que le seuil ne soit pas rejeté. Il s'agit enfin de conserver le seuil qui présente les p-valeurs maximales.

L'illustration 58 illustre le test du χ^2 à la bouée virtuelle Nice. Dans le cas du point Nice, le seuil considéré est égal à 1,79 m.

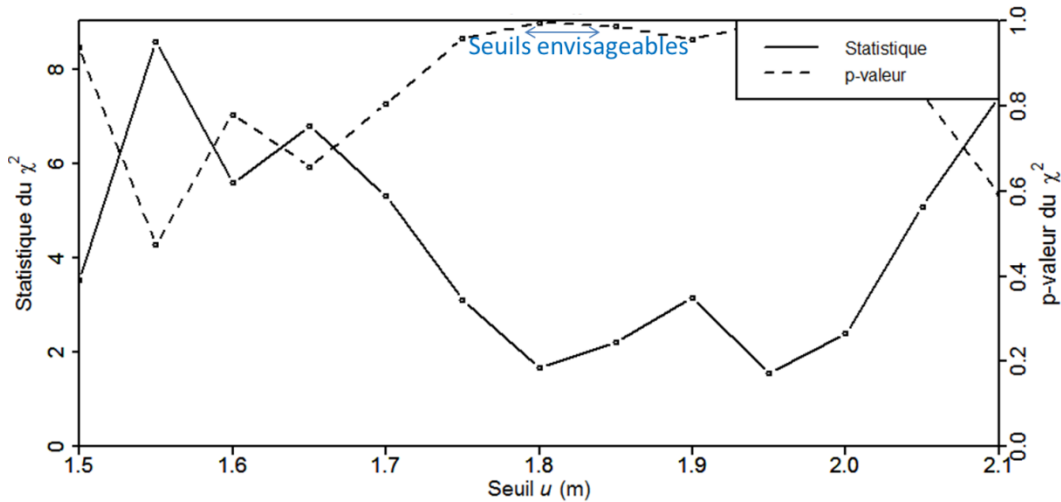


Illustration 58 - Evolution de la p-valeur du χ^2 (p-valeur >0,1) en fonction du seuil. Identification des seuils envisageables pour les p-valeur maximales. Exemple du point Nice.

- Test sur les variations de la valeur centennale de la hauteur significative $H_{s,100}$ en fonction du seuil :

Cet ultime test permet de s'assurer que le seuil a été correctement choisi. Cela se vérifie si $H_{s,100}$ est relativement constant pour des seuils supérieurs à u_2 . Si ce n'est pas le cas, il faut sélectionner un seuil plus élevé.

L'illustration 59 suivante donne un exemple de l'évolution de $H_{s,100}$ avec le seuil au point Nice.

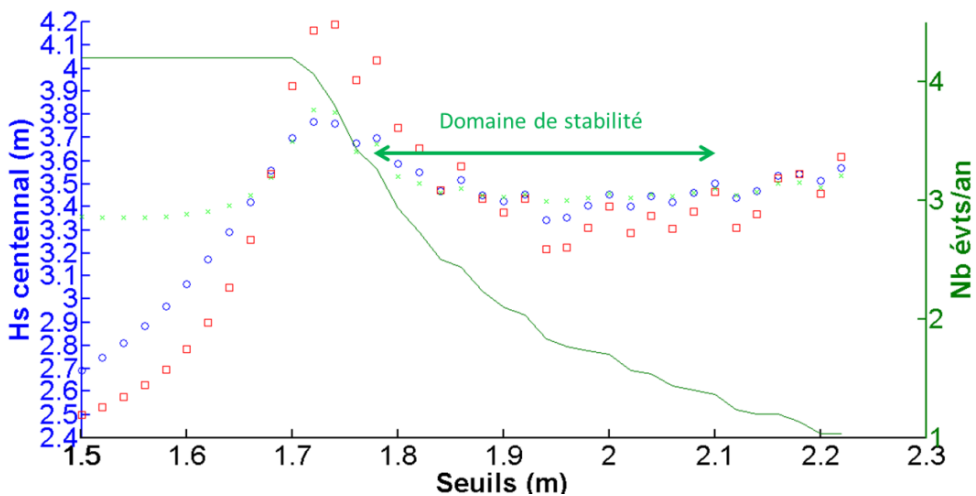


Illustration 59 - Evolution des $H_{s,100}$ en fonction du seuil. Les points bleus correspondent aux estimations de $H_{s,100}$ par la méthode des moments (MOM) et les points rouges et verts correspondent respectivement aux estimations par méthode des moments pondérés (PWM) et du maximum de vraisemblance (ML).

d) Estimation des paramètres de la loi d'ajustement

Précédemment, nous avons précisé n'utiliser qu'une seule loi statistique : la GPD. Chaque loi statistique est caractérisée par des paramètres propres que l'utilisateur doit caler au cas par cas sur l'échantillon.

Il existe d'ailleurs plusieurs méthodes pour estimer ces paramètres. Le choix de la méthode influe considérablement sur les résultats (cf. Illustration 59), il importe donc d'être vigilant lors du choix.

Nous avons donc testé trois méthodes présentées ci-après :

- La méthode la plus couramment employée est appelée méthode du maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood ML).
- Une autre méthode dite des moments (MOM), consiste à sélectionner les paramètres de la loi de telle sorte que les premiers moments de la distribution théorique (moyenne, écart-type, ou asymétrie) soient égaux à ceux de l'échantillon. Dans un souci d'homogénéité avec les études précédentes, nous présentons dans la suite les résultats obtenus après estimation des paramètres avec cette méthode MOM. Le choix de cette méthode avait alors été fait en se basant sur les travaux de Mackay *et al* (2011) qui montraient que pour des tailles d'échantillon autour de 100 et un paramètre de forme négatif, les estimateurs calculés par la méthode des moments présentaient les plus faibles biais et erreurs quadratiques moyennes. Ces conditions sont respectées pour la quasi-totalité des 8 échantillons analysés. Seul le point le plus au large des côtes présente un paramètre de forme faiblement positif (P48, Les Goudes). Toutefois, la méthode des moments s'ajuste bien en ce point et est donc conservée.
- Nous avons également testé une variante de la méthode des moments : la méthode des moments pondérés (PWM).

Il ressort de notre analyse que la méthode MOM est la plus stable sur les points étudiés, cela est donc en adéquation avec l'analyse de l'étude précédente et permet une comparaison aisée des résultats d'un point à l'autre de la côte.

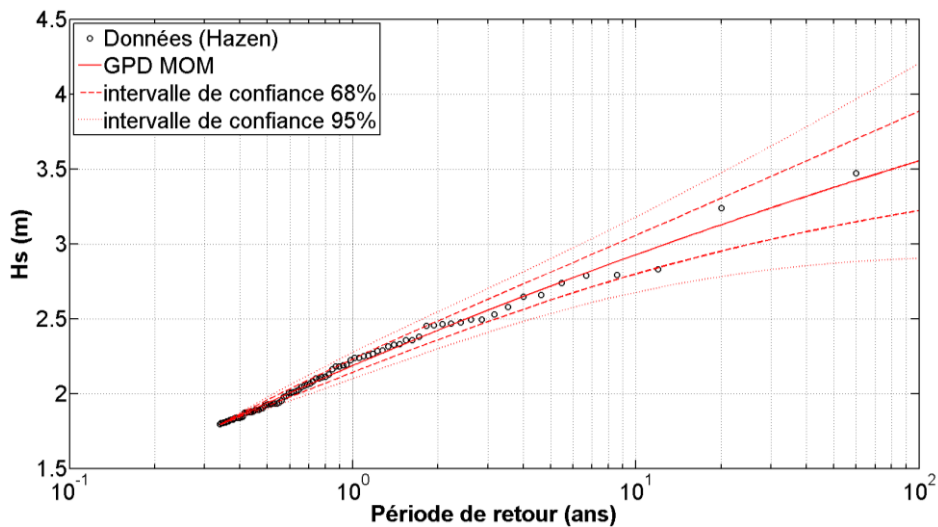


Illustration 60: Exemple de l'ajustement d'une loi GPD au point de bouée Nice. Les paramètres de cette loi sont estimés par la méthode des moments MOM et la distribution de probabilité empirique des

$$\text{données est calculée avec la formule de Hazen : } P_{emp}(H_s \leq H_s^i) = \frac{i-0,5}{n}$$

Avec H_s^i la $i^{\text{ème}}$ valeur de H_s dans l'échantillon des n points résultants, classé par ordre croissant.

Annexe 4

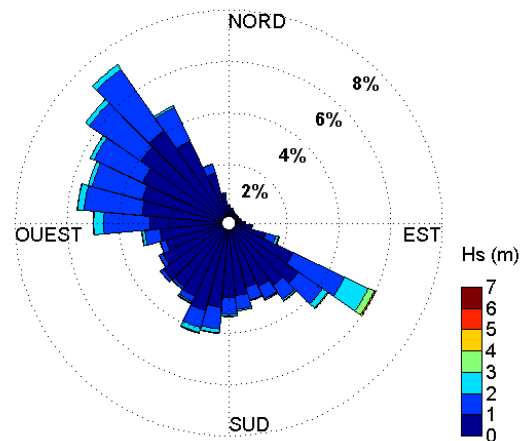
Fiches statistiques des climats de houle

Points d'extraction de Fos-sur-mer à Cassis (Bouches-du-Rhône)

P48 «Les Goudes »

Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(43,1747°N–5,16°E)	100 m	~ 20 km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
P_48	1 h	01/01/79 – 31/12/09

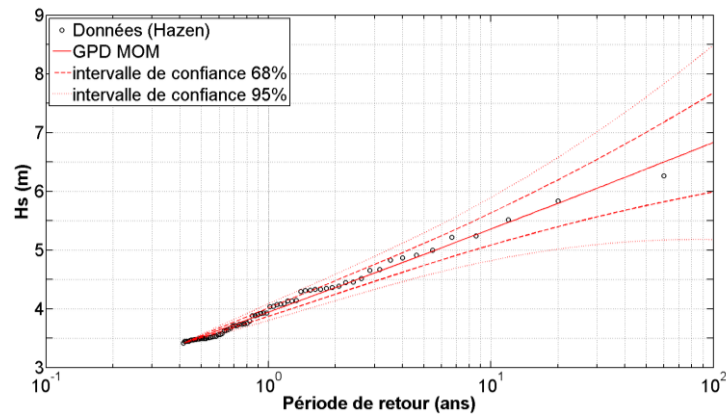


Rose des vagues à la bouée virtuelle Les Goudes.

Analyse des données :

	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,02	6,27	0,82
Tp (s)	1,04	12,18	4,09
Dp (°)	0,00	360,00	-

Analyse d'extrêmes :

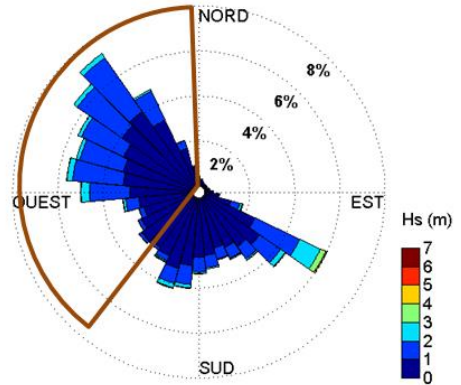
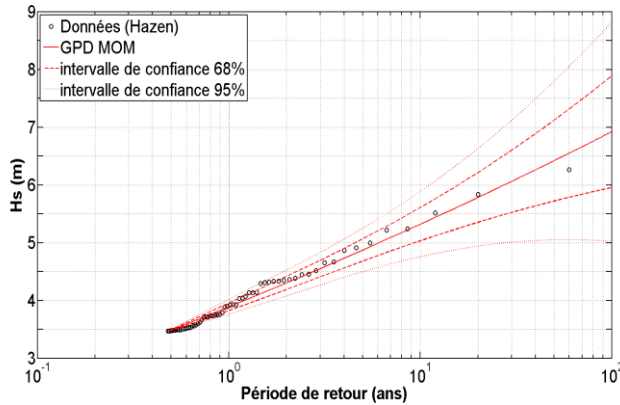


Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs.

Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
3,41	2,43	0,017443	0,5933

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	5,36	5,08	5,63	4,82	5,89
20	5,79	5,40	6,19	5,01	6,58
50	6,38	5,76	7,01	5,16	7,61
100	6,83	5,99	7,67	5,18	8,48

a) Analyse d'extrêmes : Secteur Sud-Ouest/Nord

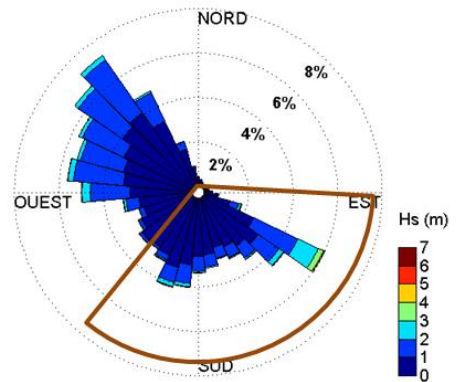
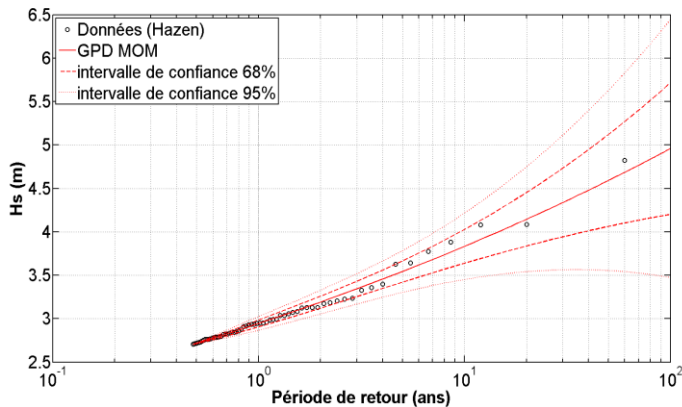


Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs (secteur Sud-Ouest/Nord).

Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
3,46	2,1	0,047761	0,56809

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	5.32	5.03	5.61	4.76	5.89
20	5.78	5.35	6.22	4.94	6.63
50	6.42	5.72	7.12	5.05	7.79
100	6.92	5.95	7.89	5.02	8.82

b) Analyse d'extrêmes : Secteur Est/Sud-Est



Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs (secteur Est/Sud-Est).

Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,70	2,1	0,10236	0,31726

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	3,83	3,64	4,03	3,45	4,22
20	4,14	3,84	4,45	3,54	4,75
50	4,59	4,06	5,12	3,55	5,63
100	4,96	4,20	5,72	3,47	6,44

Points d'extraction de La Ciotat à Saint-Raphaël (13 et 83)

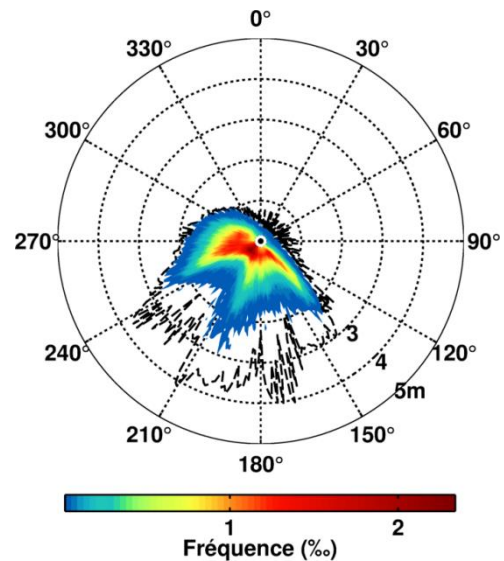
P56 « La Ciotat »

Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(43,16°N – 5,65°E)	≈ 50 m	< 5 km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
P_56	1 h	01/01/79 – 31/12/09

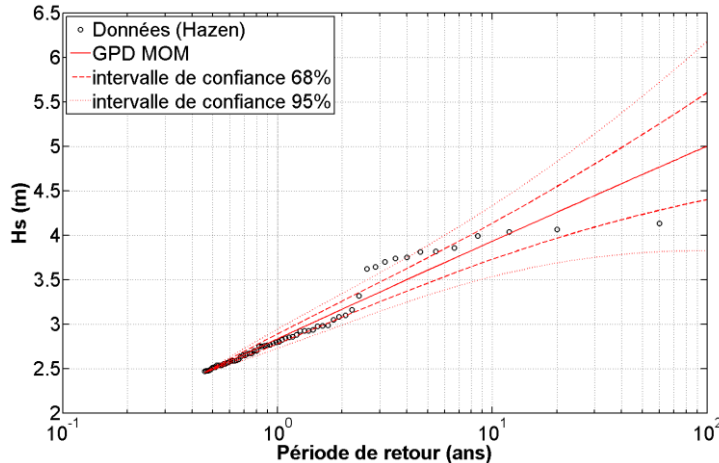
Analyse des données :

	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,05	4,13	0,58
Tp (s)	1,8	13,25	5,8
Dp (°)	0,00	360,00	-



Rose des vagues. la ligne pointillée représente l'enveloppe. La fréquence d'occurrence des couples (Hs, Dp) est représentée par l'échelle de couleur (min = 0,02‰), discrétisation de 5° pour Dp et 5 cm pour Hs.

Analyse d'extrêmes :



Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs.

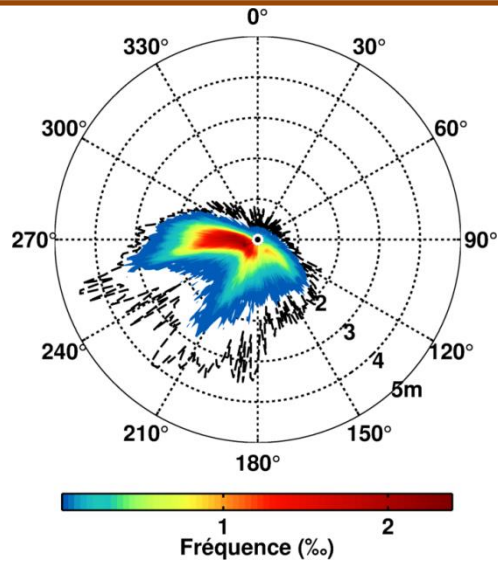
Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,45	2,2	-0.012047	0.48838

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup m)	Int. Conf. 9 % Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	3,93	3,73	4,14	3,53	4,33
20	4,26	3,97	4,55	3,69	4,83
50	4,68	4,23	5,13	3,80	5,56
100	5,00	4,40	5,60	3,82	6,18

P70 « Bandol »

Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(43,12°N – 5,74°E)	≈ 30 m	< 5 km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
P_70	1 h	01/01/79 31/12/09

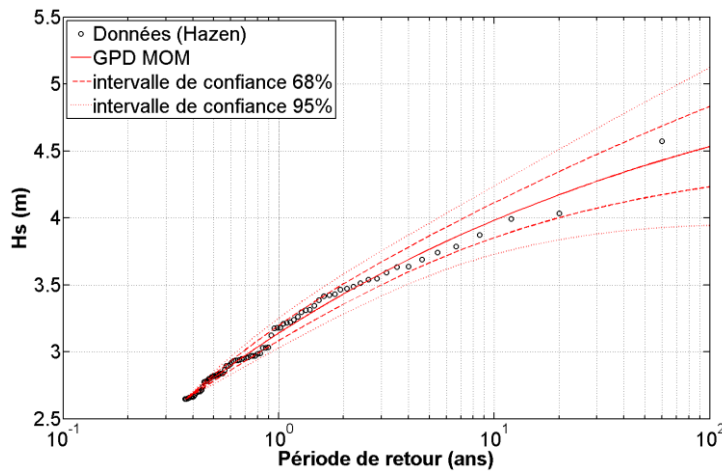


Rose des vagues. la ligne pointillée représente l'enveloppe. La fréquence d'occurrence des couples (Hs, Dp) est représentée par l'échelle de couleur (min = 0,02‰), discrétisation de 5° pour Dp et 5 cm pour Hs.

Analyse des données :

	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,05	4,57	0,66
Tp (s)	1,8	13,3	5,5
Dp (°)	0,00	360,00	-

Analyse d'extrêmes :



Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs.

Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,64	2,73	-0.18615	0.54347

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	3,98	3,85	4,11	3,73	4,24
20	4,17	4,00	4,35	3,84	4,51
50	4,39	4,15	4,63	3,92	4,86
100	4,53	4,23	4,83	3,94	5,12

P58 « Sanary »

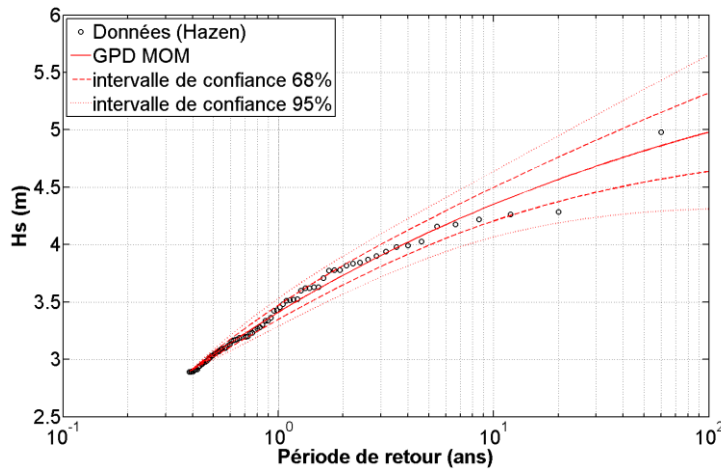
Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(43,09°N – 5,73°E)	≈ 50 m	5 à 10 km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
P_58	1 h	01/01/79 – 31/12/09

Analyse des données :

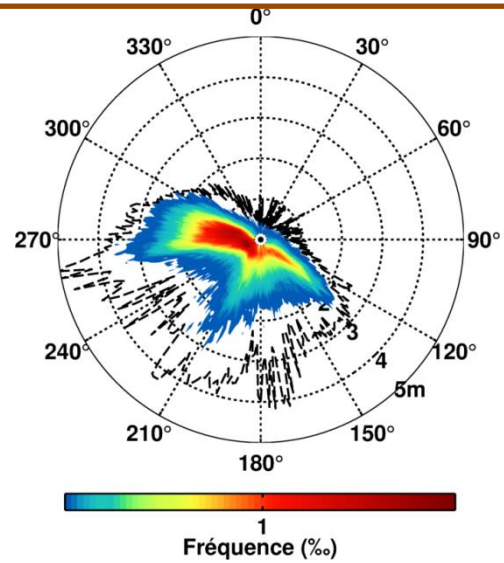
	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,06	4,98	0,73
Tp (s)	1,8	13,3	5,3
Dp (°)	0,00	360,00	-

Analyse d'extrêmes :



Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,89	2,6	-0.17635	0.58963

Période de retour (années)	Hs (m)	Int. Conf. 68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	4,35	4,21	4,50	4,06	4,64
20	4,57	4,37	4,76	4,19	4,95
50	4,82	4,54	5,09	4,28	5,35
100	4,98	4,64	5,32	4,31	5,65



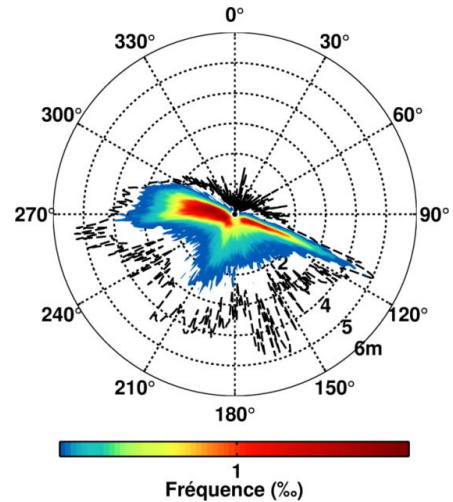
Rose des vagues. la ligne pointillée représente l'enveloppe. La fréquence d'occurrence des couples (Hs, Dp) est représentée par l'échelle de couleur (min = 0,02‰), discrétisation de 5° pour Dp et 5 cm pour Hs.

Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs.

P65 « Six Fours »

Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(43,03°N – 5,81°E)	≈ 100 m	< 5 km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
P_65	1 h	01/01/79 – 31/12/09

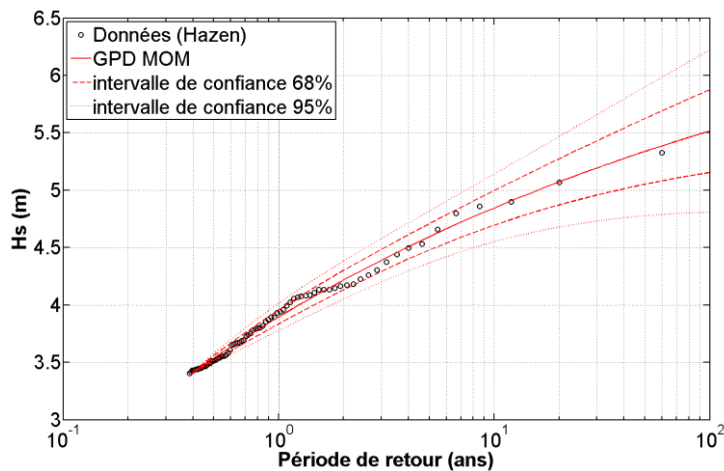


Analyse des données :

	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,04	5,32	0,84
Tp (s)	1,8	12,2	4,9
Dp (°)	0,00	360,00	-

Rose des vagues. la ligne pointillée représente l'enveloppe. La fréquence d'occurrence des couples (Hs, Dp) est représentée par l'échelle de couleur (min = 0,02‰), discrétisation de 5° pour Dp et 5 cm pour Hs.

Analyse d'extrêmes (toutes directions) :

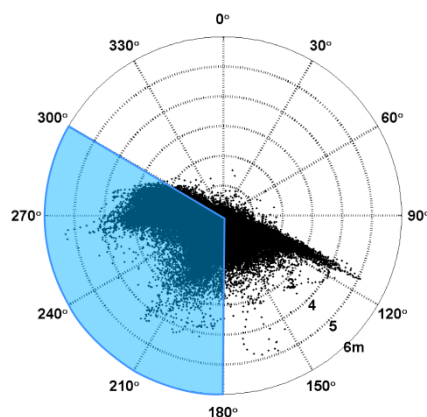
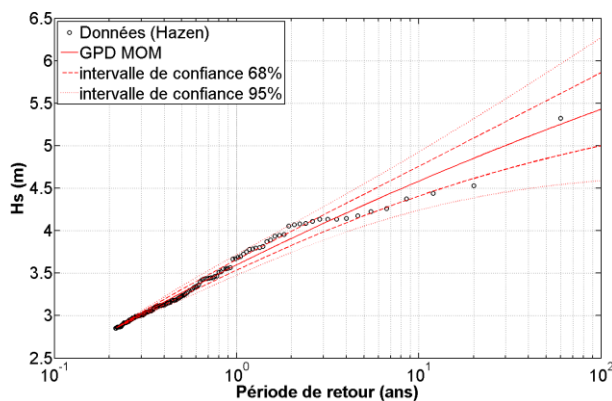


Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs.

Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
3,39	2,6	-0.15313	0.56757

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	4,85	4,70	5,00	4,55	5,14
20	5,07	4,87	5,27	4,68	5,4
50	5,34	5,05	5,62	4,78	5,90
100	5,51	5,15	5,88	4,81	6,22

a) Analyse d'extrêmes : Secteur Ouest/Sud-Ouest

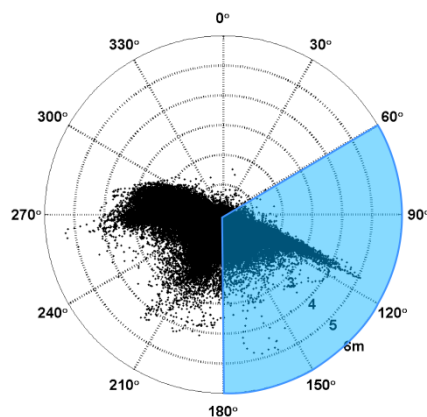
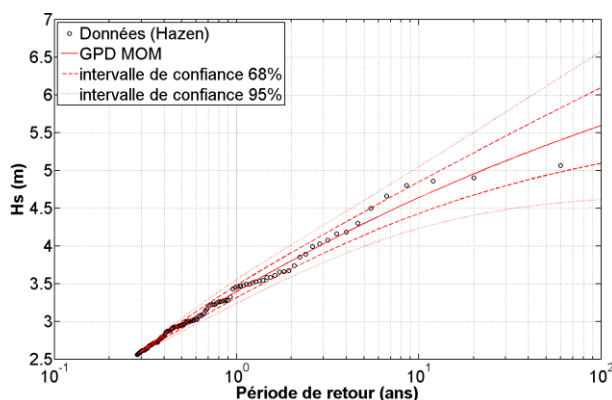


Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs (secteur Ouest/Sud-Ouest).

Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,85	4,63	-0.066892	0.51242

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	4,58	4,41	4,76	4,24	4,93
20	4,85	4,61	5,09	4,39	5,32
50	5,19	4,85	5,53	4,52	5,85
100	5,43	5,00	5,86	4,59	6,27

c) Analyse d'extrêmes : Secteur Est/Sud-Est



Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs (secteur Ouest/Sud-Ouest).

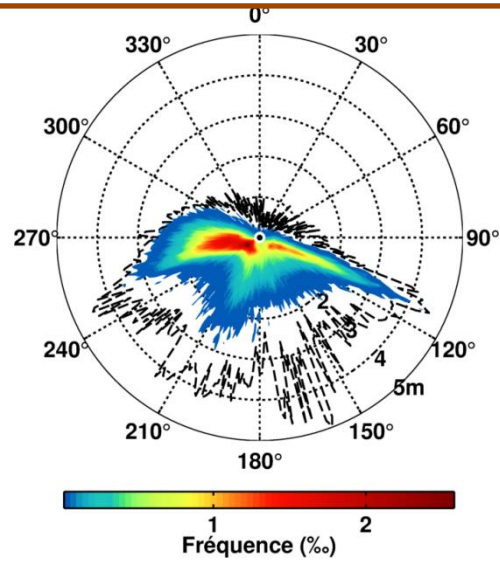
Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,56	3,53	-0.11445	0.70984

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	4,64	4,43	4,85	4,23	5,05
20	4,95	4,67	5,23	4,40	5,50
50	5,33	4,93	5,73	4,55	6,11
100	5,59	5,09	6,09	4,61	6,57

P67 « St Mandrier »

Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(43,04°N – 5,91°E)	≈ 100 m	5 km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
P_67	1 h	01/01/79 – 31/12/09

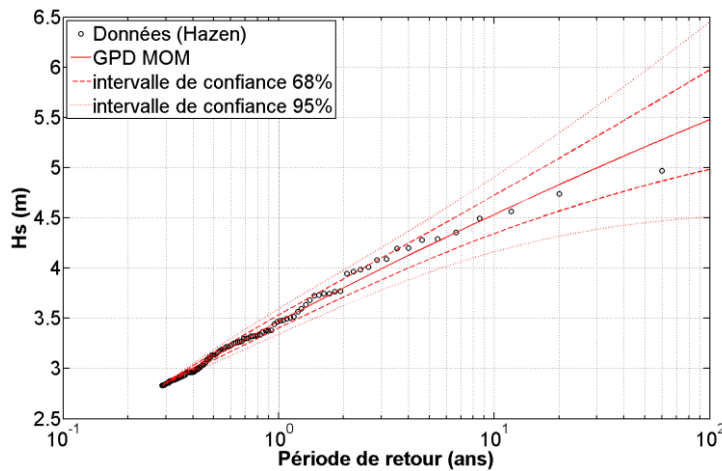


Analyse des données :

	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,04	4,97	0,74
Tp (s)	1,8	12,1	5,2
Dp (°)	0,00	360,00	-

Rose des vagues. la ligne pointillée représente l'enveloppe. La fréquence d'occurrence des couples (Hs, Dp) est représentée par l'échelle de couleur (min = 0,02‰), discrétisation de 5° pour Dp et 5 cm pour Hs.

Analyse d'extrêmes (toutes directions) :

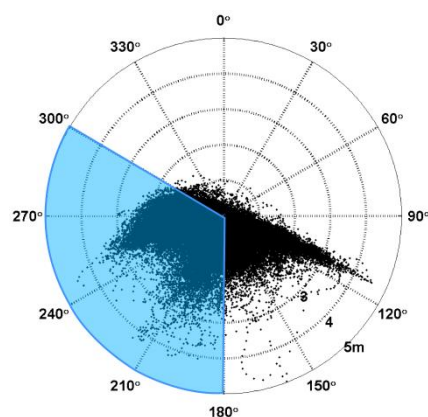
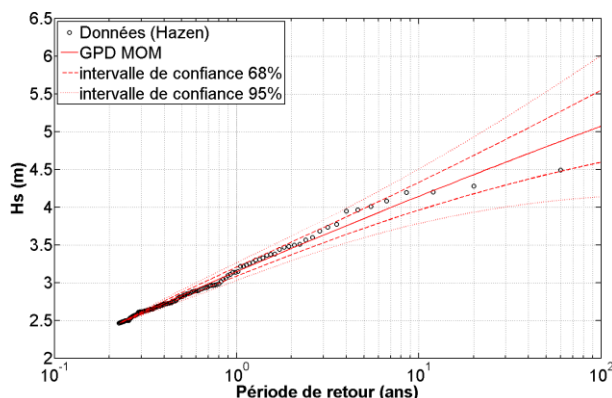


Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs.

Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,83	3,5	-0.053227	0.52621

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	4,53	4,34	4,72	4,16	4,91
20	4,83	4,57	5,09	4,32	5,35
50	5,21	4,82	5,59	4,45	5,96
100	5,48	4,98	5,97	4,51	6,45

a) Analyse d'extrêmes : Secteur Ouest/Sud-Ouest

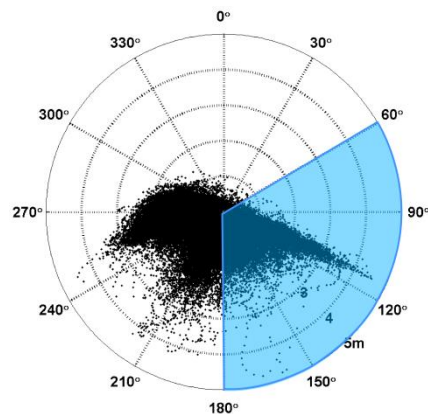
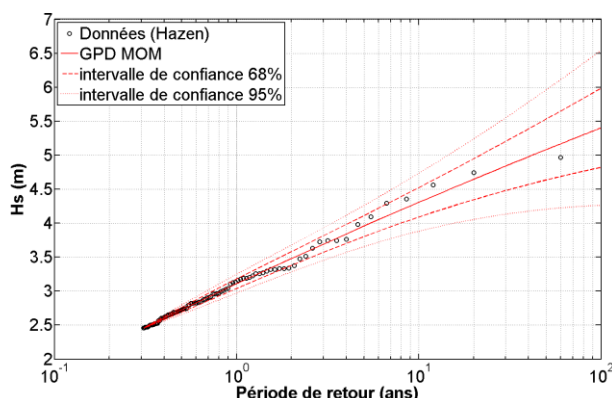


Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs (secteur Ouest/Sud-Ouest).

Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,46	4,43	-0.031658	0.47103

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	4,14	3,96	4,33	3,78	4,50
20	4,43	4,18	4,68	3,93	4,93
50	4,80	4,43	5,17	4,07	5,53
100	5,07	4,59	5,55	4,14	6,01

d) Analyse d'extrêmes : Secteur Est/Sud-Est



Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs (secteur Ouest/Sud-Ouest).

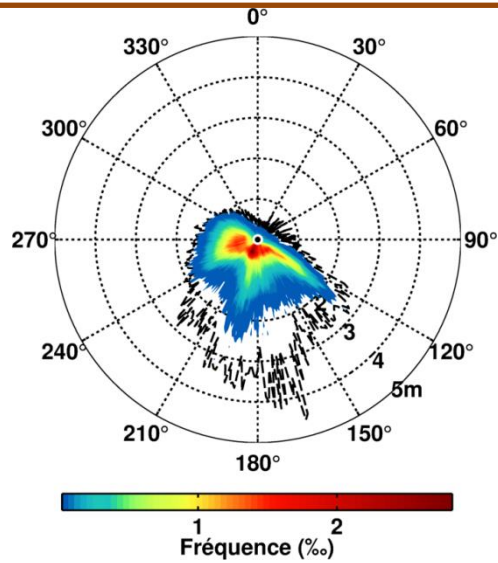
Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,45	3,26	-0.039089	0.56983

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	4,31	4,09	4,52	3,88	4,73
20	4,65	4,34	4,95	4,05	5,24
50	5,08	4,63	5,53	4,20	5,96
100	5,40	4,82	5,98	4,26	6,54

P62 « Toulon »

Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(43,08°N – 5,98°E)	≈ 50 m	< 5 km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
P_62	1 h	01/01/79 – 31/12/09

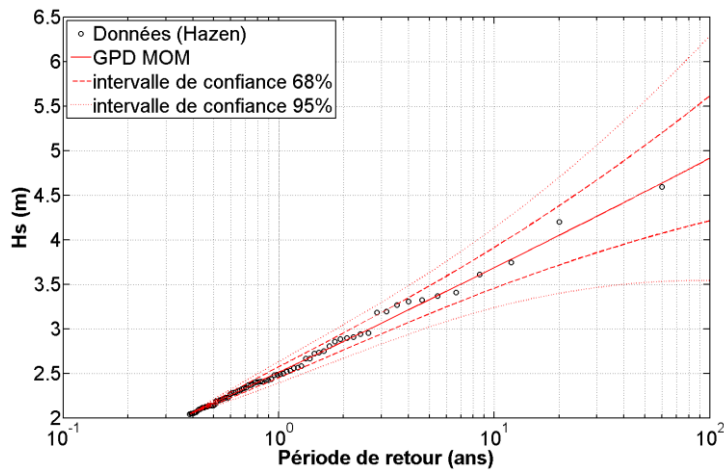


Rose des vagues. la ligne pointillée représente l'enveloppe. La fréquence d'occurrence des couples (Hs, Dp) est représentée par l'échelle de couleur (min = 0,02‰), discrétisation de 5° pour Dp et 5 cm pour Hs.

Analyse des données :

	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,04	4,59	0,51
Tp (s)	1,8	13,1	6,1
Dp (°)	0,00	360,00	-

Analyse d'extrêmes :



Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs.

Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,04	2,6	0.020171	0.48822

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	3,68	3,46	3,91	3,24	4,13
20	4,05	3,72	4,38	3,40	4,70
50	4,54	4,02	5,06	3,52	5,56
100	4,91	4,21	5,61	3,54	6,29

P78 « Giens »

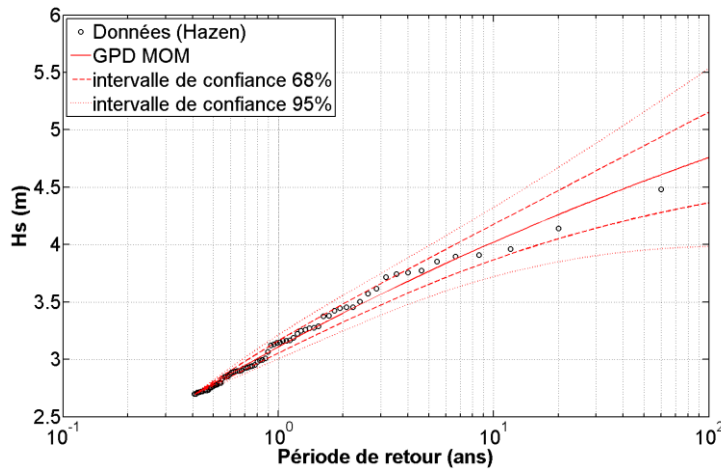
Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(43,06°N – 6,07°E)	≈ 50 m	< 5 km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
P_78	1 h	01/01/79 – 31/12/09

Analyse des données :

	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,04	4,48	0,64
Tp (s)	1,8	12,9	5,6
Dp (°)	0,00	360,00	-

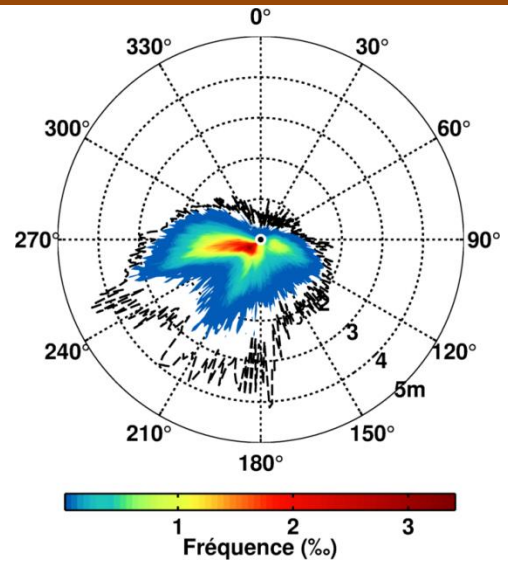
Analyse d'extrêmes :



Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs.

Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,69	2,47	-0.094277	0.48148

Période de retour (années)	Hs (m)	Int. Conf. 68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	4,02	3,87	4,18	3,72	4,32
20	4,26	4,05	4,47	3,85	4,6
50	4,55	4,25	4,86	3,95	5,16
100	4,76	4,36	5,15	3,98	5,53

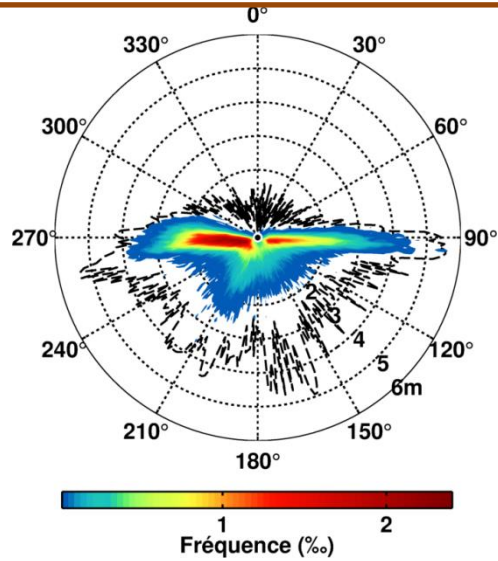


Rose des vagues. la ligne pointillée représente l'enveloppe. La fréquence d'occurrence des couples (Hs, Dp) est représentée par l'échelle de couleur (min = 0,02‰), discrétisation de 5° pour Dp et 5 cm pour Hs.

Porquerolles

Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(42,97°N – 5,22°E)	≈ 105 m	< 5 km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
Porquerolles	1 h	1/01/79 – 31/12/09

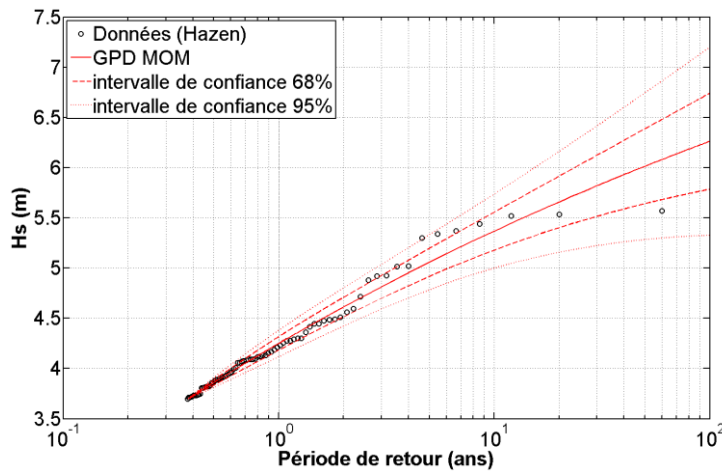


Rose des vagues. la ligne pointillée représente l'enveloppe. La fréquence d'occurrence des couples (Hs, Dp) est représentée par l'échelle de couleur (min = 0,02‰), discrétisation de 5° pour Dp et 5 cm pour Hs.

Analyse des données :

	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,05	5,57	0,90
Tp (s)	1,7	11,6	4,7
Dp (°)	0,00	360,00	-

Analyse d'extrêmes (toutes directions) :

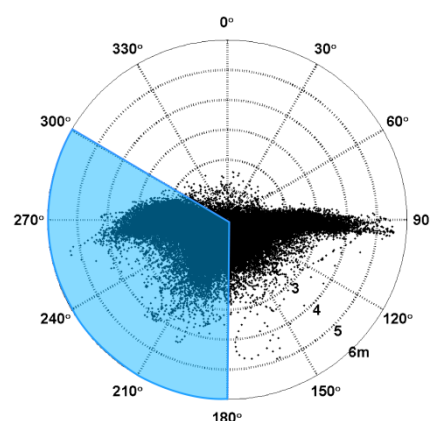
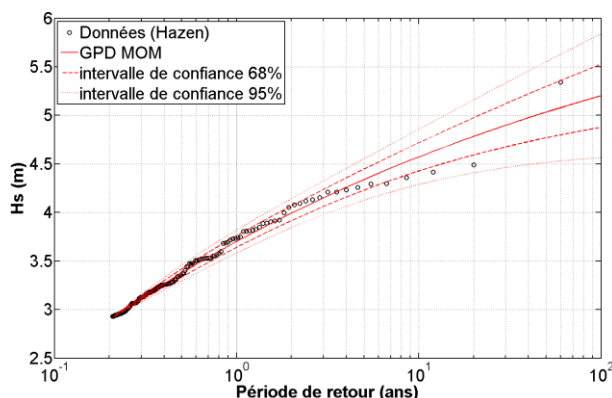


Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs.

Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
3,69	2,67	-0.097508	0.59731

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	5,37	5,18	5,57	4,99	5,75
20	5,68	5,41	5,95	5,15	6 20
50	6,06	5,66	6,46	5,28	6,84
100	6,33	5,82	6,85	5,32	7,34

a) Analyse d'extrêmes : Secteur Ouest/Sud-Ouest

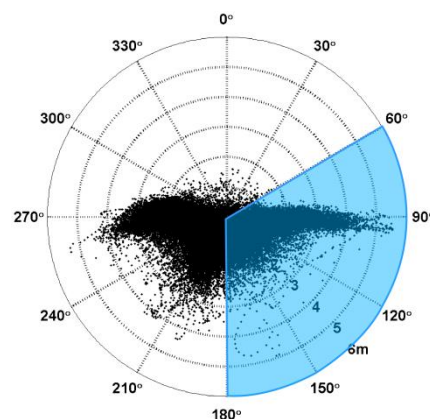
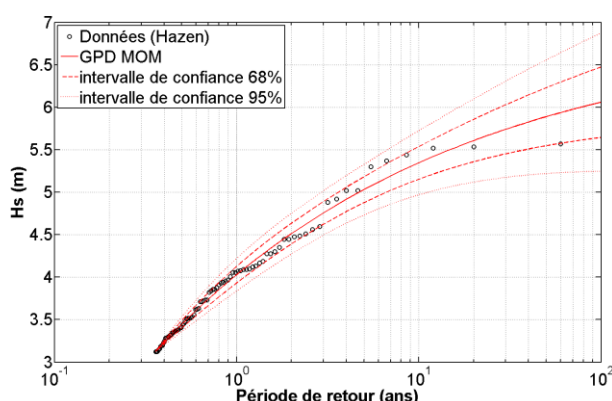


Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs (secteur Ouest/Sud-Ouest).

Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,92	4,8	-0.142	0.55502

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	4,57	4,43	4,72	4,29	4,86
20	4,78	4,59	4,98	4,41	5,16
50	5,03	4,77	5,30	4,52	5,55
100	5,20	4,88	5,53	4,56	5,84

e) Analyse d'extrêmes : Secteur Est/Sud-Est



Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs (secteur Ouest/Sud-Ouest).

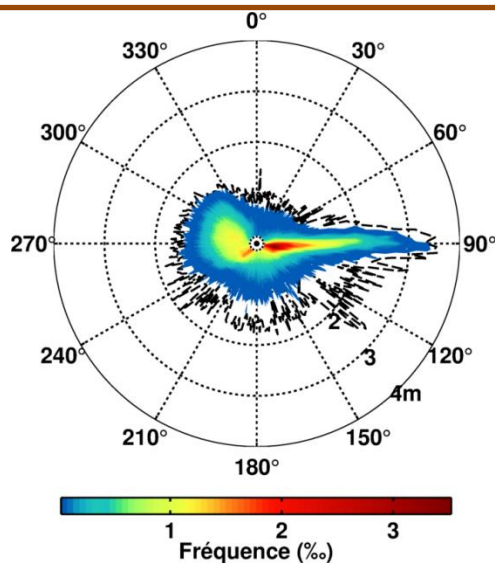
Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
3,12	2,8	-0.26676	1.0084

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	5,35	5,15	5,54	4,97	5,72
20	5,61	5,36	5,86	5,12	6,10
50	5,89	5,55	6,23	5,22	6,56
100	6,06	5,64	6,47	5,25	6,87

P99 « Hyères »

Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(43,06°N – 6,22°E)	≈ 20 m	5 à 10 km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
P_99	1 h	01/01/79 – 31/12/09

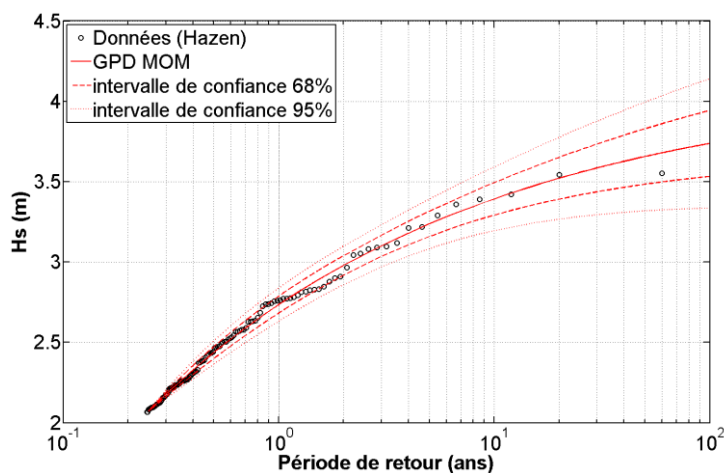


Rose des vagues. la ligne pointillée représente l'enveloppe. La fréquence d'occurrence des couples (Hs, Dp) est représentée par l'échelle de couleur (min = 0,02‰), discrétisation de 5° pour Dp et 5 cm pour Hs.

Analyse des données :

	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,05	3,55	0,49
Tp (s)	2,5	13,2	6,3
Dp (°)	0,00	360,00	-

Analyse d'extrêmes :



Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs.

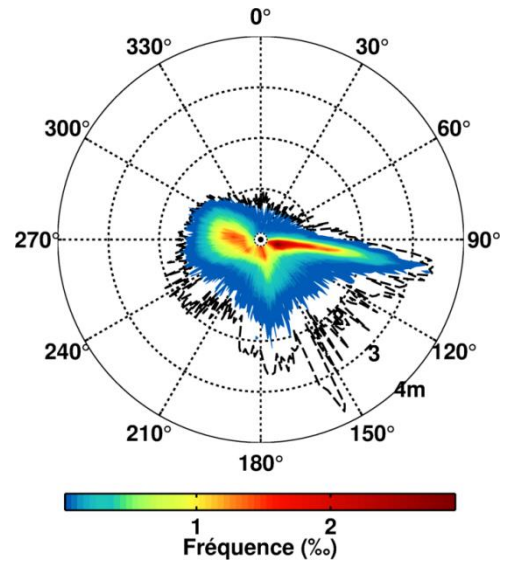
Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,06	4,1	-0.28155	0.57891

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	3,39	3,29	3,49	3,20	3,59
20	3,52	3,39	3,65	3,27	3,7
50	3,66	3,48	3,83	3,32	4,00
100	3,74	3,53	3,94	3,34	4,14

P88 « Lalonde »

Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(43,08°N – 6,27°E)	≈ 30 m	5 à 10 km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
P_88	1 h	01/01/79 – 31/12/09

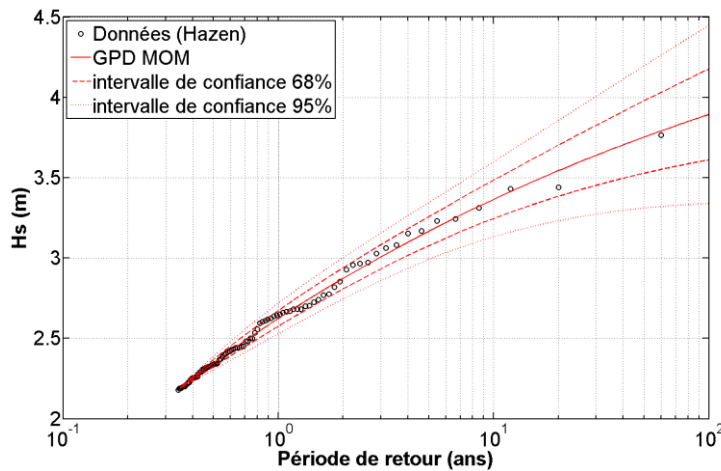


Rose des vagues. la ligne pointillée représente l'enveloppe. La fréquence d'occurrence des couples (Hs, Dp) est représentée par l'échelle de couleur (min = 0,02‰), discrétisation de 5° pour Dp et 5 cm pour Hs.

Analyse des données :

	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,04	3,76	0,51
Tp (s)	2,0	12,8	6,0
Dp (°)	0,00	360,00	-

Analyse d'extrêmes :



Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs.

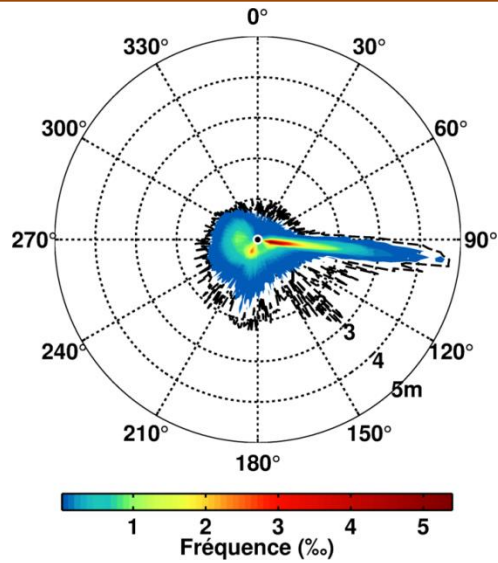
Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,18	2,93	-0.14748	0.44543

Période de retour (années)	Hs (m)	Int. Conf. 68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	3,37	3,25	3,48	3,13	3,60
20	3,54	3,38	3,70	3,23	3,86
50	3,75	3,53	3,98	3,31	4,19
100	3,89	3,61	4,18	3,34	4,45

P80 « Le Lavandou »

Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(43,12°N – 6,40°E)	≈ 50 m	< 5 km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
P_80	1 h	01/01 79 – 31/12/09

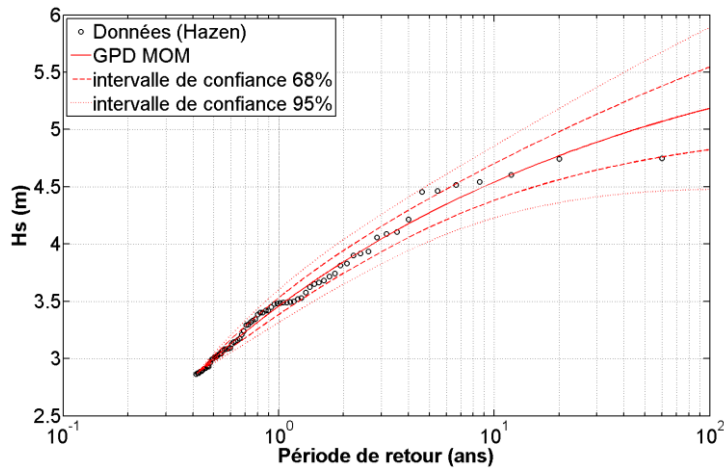


Analyse des données :

	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,03	4,75	0,50
Tp (s)	2,0	13,1	6,2
Dp (°)	0,00	360,00	-

Rose des vagues. la ligne pointillée représente l'enveloppe. La fréquence d'occurrence des couples (Hs, Dp) est représentée par l'échelle de couleur (min = 0,02‰), discrétisation de 5° pour Dp et 5 cm pour Hs.

Analyse d'extrêmes :



Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs.

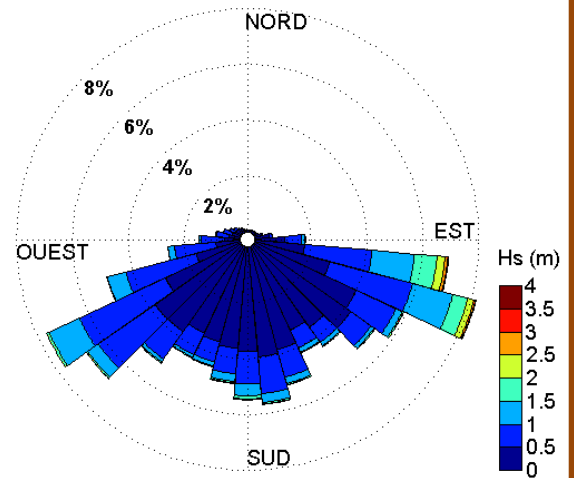
Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,86	2,43	-0.22712	0.74072

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	4,54	4,38	4,70	4,23	4,86
20	4,77	4,56	4,98	4,36	5,18
50	5,03	4,73	5,32	4,45	5,60
100	5,18	4,82	5,55	4,48	5,89

P94 « Cavalaire sur Mer »

Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(43,1573°N–6,5538°E)	~50 m	< 5km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
P_94	1 h	01/01/79 – 31/12/09

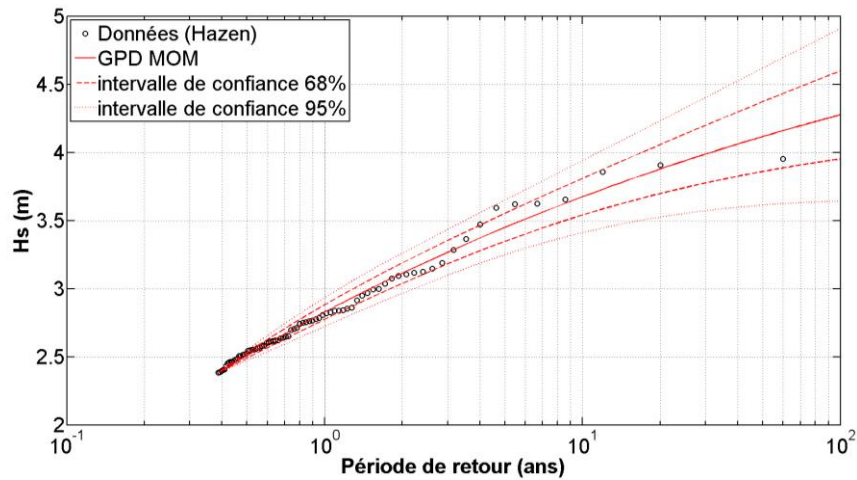


Analyse des données :

	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,012	3,95	0,53
Tp (s)	1,04	11,08	3,88
Dp (°)	0,00	360,00	-

Rose des vagues à la bouée virtuelle Cavalaire sur Mer.

Analyse d'extrêmes :

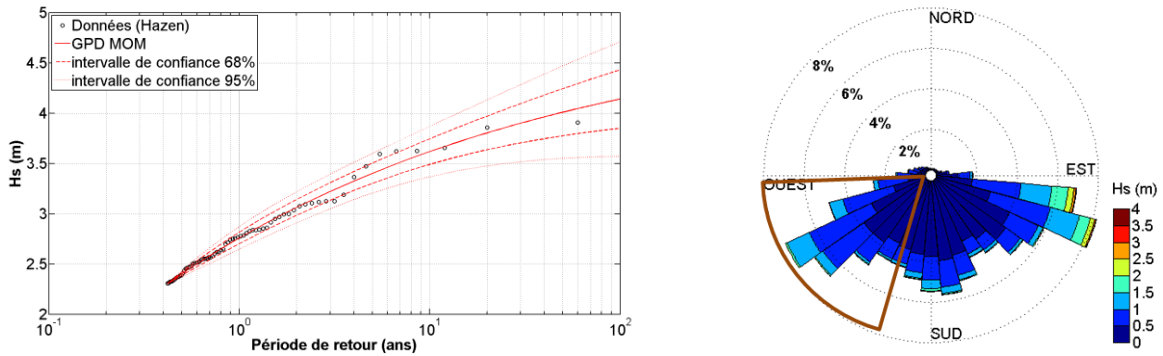


Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs.

Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,38	2,6	-0,14991	0,50238

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	3,67	3,54	3,81	3,41	3,94
20	3,88	3,70	4,06	3,52	4,23
50	4,12	3,86	4,37	3,61	4,62
100	4,28	3,95	4,60	3,64	4,91

a) Analyse d'extrêmes : Secteur Ouest/Sud-Ouest

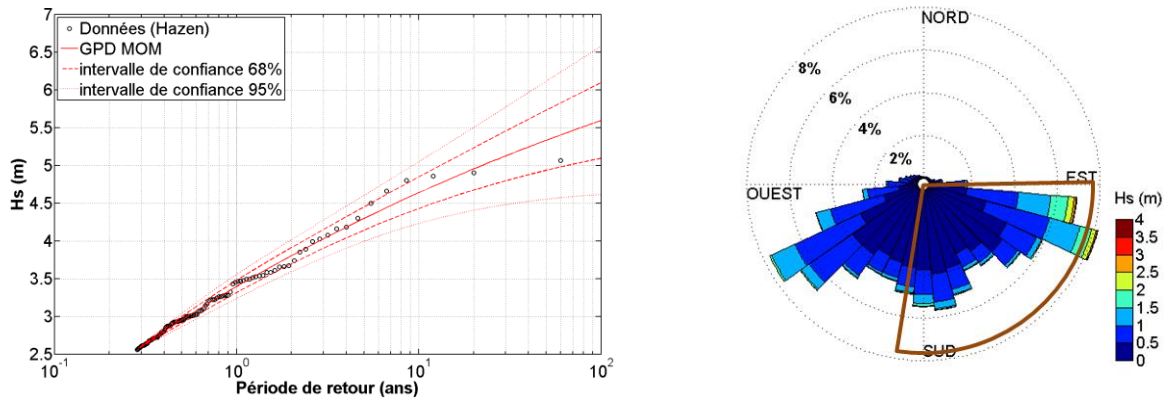


Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs (secteur Ouest/Sud-Ouest).

Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,30	2,4	-0,21707	0,57403

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	3,62	3,49	3,75	3,37	3,87
20	3,80	3,64	3,97	3,47	4,13
50	4,01	3,77	4,24	3,55	4,47
100	4,14	3,85	4,43	3,57	4,71

b) Analyse d'extrêmes : Secteur Est/Sud



Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs (secteur Est/Sud).

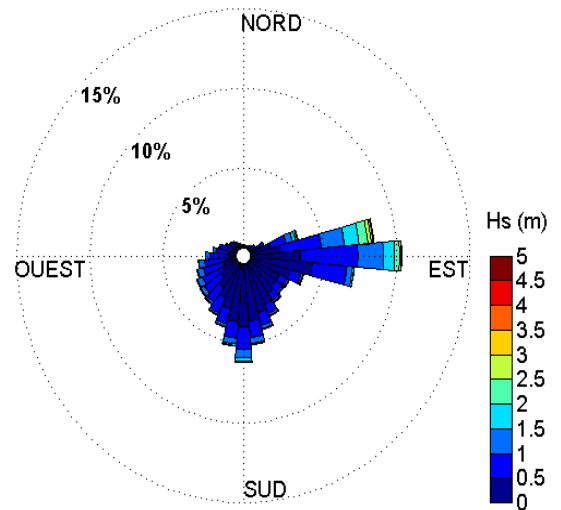
Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
1,80	2,37	0,047847	0,36337

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	3,04	2,85	3,23	2,68	3,41
20	3,34	3,06	3,62	2,80	3,88
50	3,75	3,30	4,20	2,87	4,63
100	4,07	3,46	4,69	2,87	5,28

P42 « Ramatuelle »

Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(43,222°N–6,73°E)	~150 m	5 à 10 km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
P_42	1 h	01/01/79 – 31/12/09

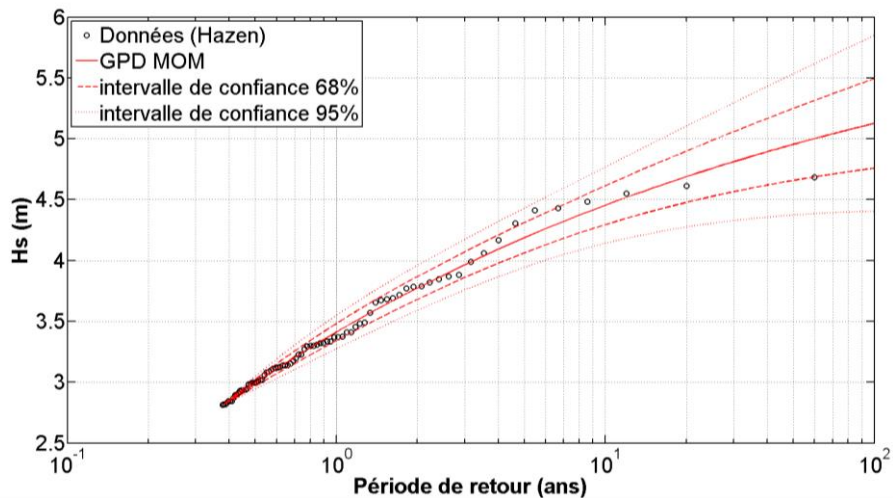


Rose des vagues à la bouée virtuelle Ramatuelle.

Analyse des données :

	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,03	4,68	0,60
Tp (s)	1,04	11,08	3,81
Dp (°)	0,00	360,00	-

Analyse d'extrêmes :



Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs.

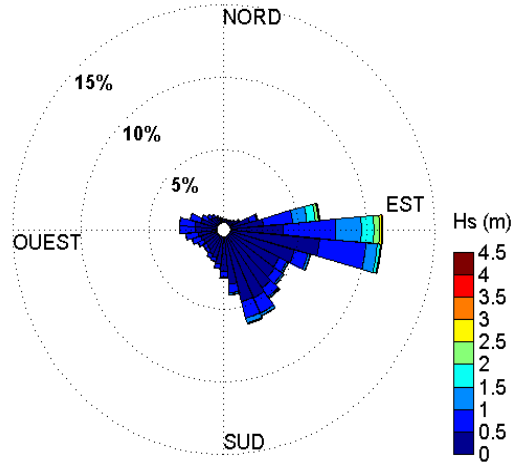
Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,81	2,67	-0,19169	0,67665

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	4,45	4,29	4,61	4,14	4,77
20	4,69	4,48	4,90	4,27	5,10
50	4,95	4,66	5,25	4,37	5,53
100	5,13	4,76	5,49	4,40	5,85

P32 « Pointe des Sardinaux »

Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(43,3022°N–6,7137°E)	~ 300 m	5 à 10 km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
P_32	1 h	01/01/79 –31/12/09

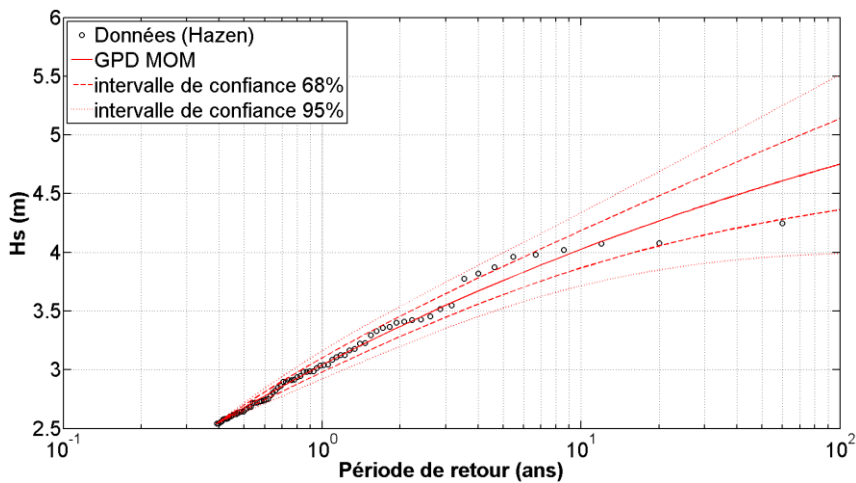


Rose des vagues à la bouée virtuelle Pointe des Sardinaux.

Analyse des données :

	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,02	4,25	0,49
Tp (s)	1,03	11,08	3,53
Dp (°)	0,00	360,00	-

Analyse d'extrêmes :



Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs.

Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,54	2,57	-0,13437	0,56527

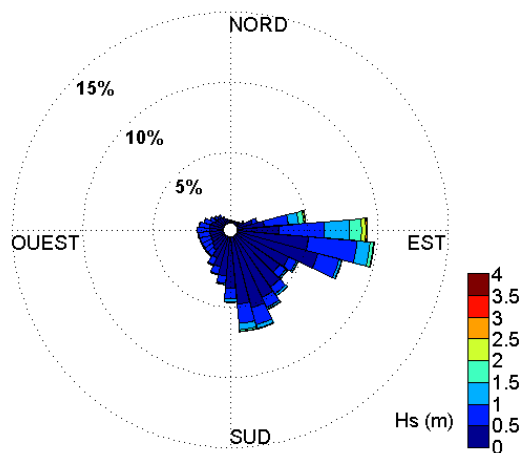
Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	4,03	3,87	4,19	3,71	4,34
20	4,27	4,05	4,48	3,85	4,69
50	4,56	4,25	4,86	3,96	5,16
100	4,75	4,36	5,14	3,99	5,51

Points d'extraction de Saint-Raphaël à Menton (83 et 06)

P33 « La Gaillarde »

Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(43,3636°N–6,7687°E)	~ 300 m	5 à 10 km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
P_33	1 h	01/01/79 – 31/12/09

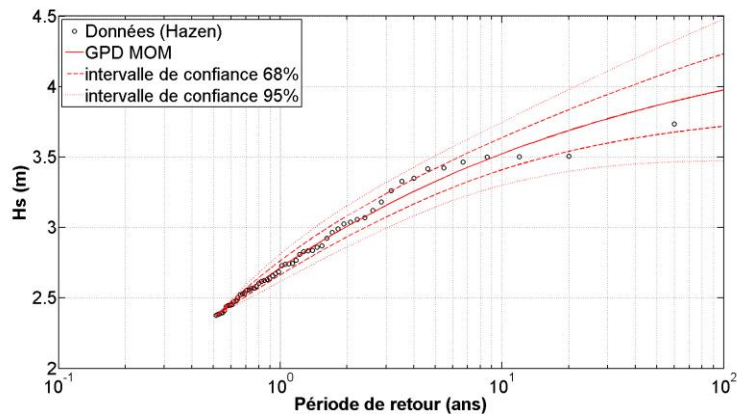


Rose des vagues à la bouée virtuelle La Gaillarde,

Analyse des données :

	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,02	3,73	0,48
Tp (s)	1,04	11,08	3,63
Dp (°)	0,00	360,00	-

Analyse d'extrêmes :



Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs,

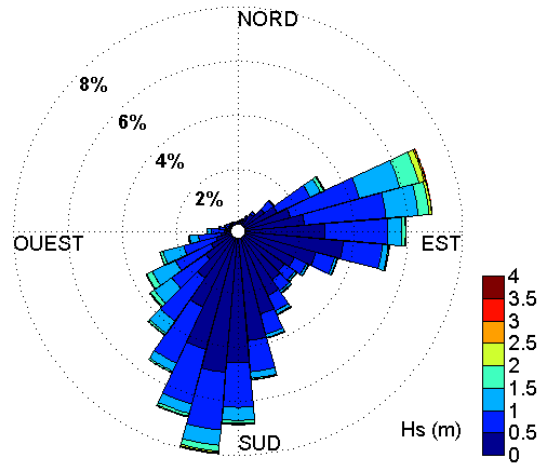
Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,37	1,97	-0,25391	0,55201

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	3,52	3,41	3,64	3,30	3,75
20	3,69	3,54	3,84	3,40	3,98
50	3,87	3,66	4,07	3,46	4,27
100	3,98	3,72	4,23	3,47	4,48

P53 « Iles de Lérins »

Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(43,4499°N–7,1088°E)	~1000 m	~ 10 km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
P_53	1 h	01/01/79 – 31/12/09

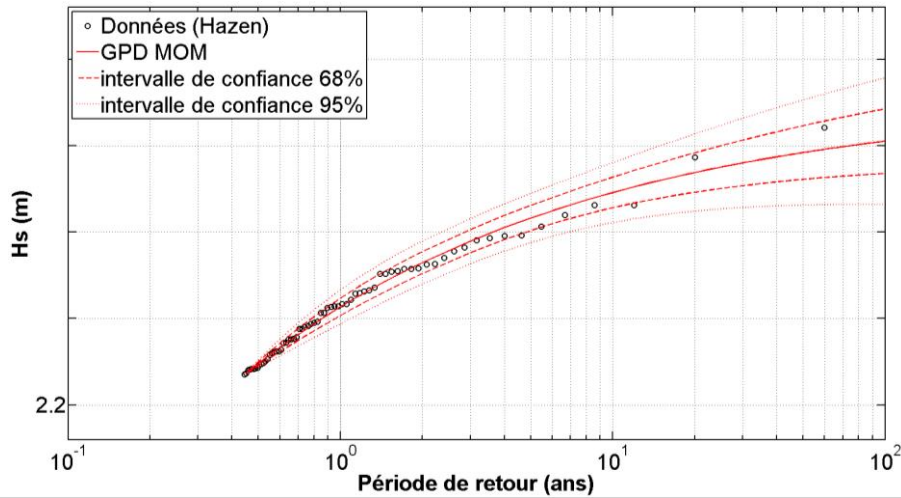


Rose des vagues à la bouée virtuelle Iles des Lérins.

Analyse des données :

	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,03	3,81	0,59
Tp (s)	1,04	11,08	3,94
Dp (°)	0,00	360,00	-

Analyse d'extrêmes :

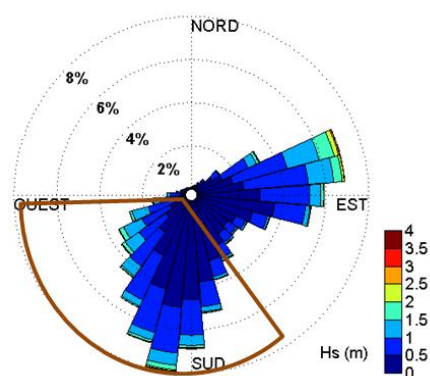
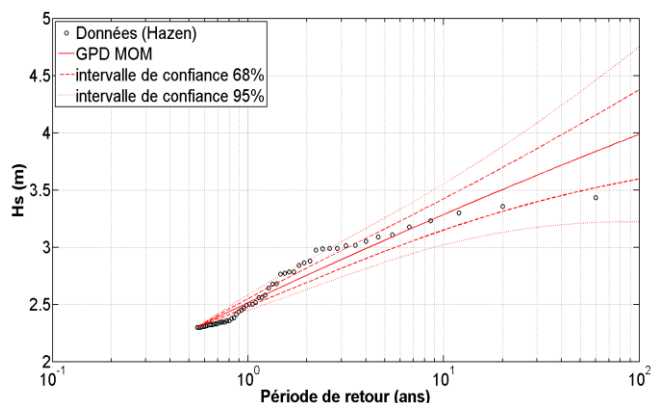


Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs.

Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,37	2,27	-0,34839	0,55674

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	3,43	3,34	3,52	3,26	3,60
20	3,54	3,43	3,66	3,32	3,77
50	3,66	3,51	3,82	3,36	3,96
100	3,73	3,54	3,91	3,36	4,09

a) Analyse d'extrêmes : Secteur Sud-Est/Ouest

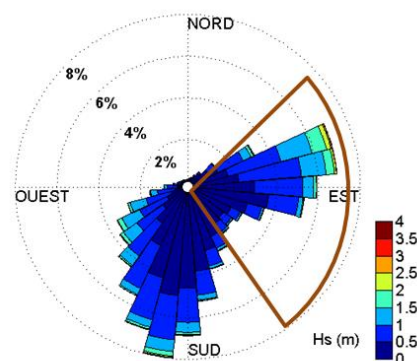
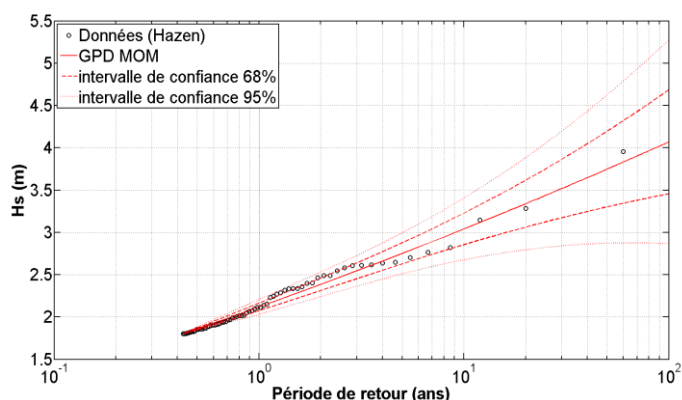


Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs (secteur Sud-Est/Ouest).

Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,30	1,83	-0,042269	0,36062

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	3,29	3,15	3,42	3,02	3,55
20	3,50	3,31	3,70	3,13	3,88
50	3,78	3,49	4,08	3,21	4,36
100	3,99	3,60	4,38	3,22	4,75

b) Analyse d'extrêmes : Secteur Est/Sud-Est



Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs (secteur Est/Sud-Est).

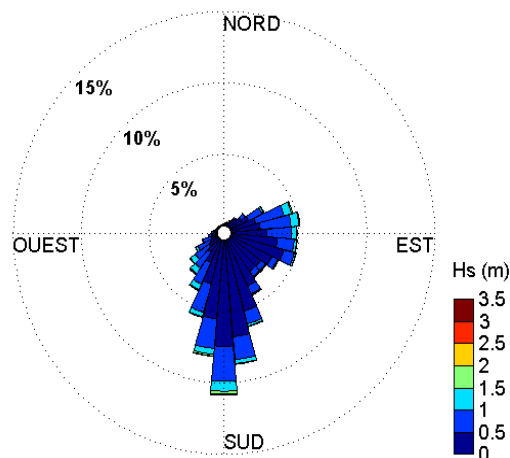
Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,10	1,97	-0,065442	0,4446

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	3,30	3,15	3,46	3,00	3,61
20	3,55	3,33	3,77	3,13	3,98
50	3,86	3,54	4,19	3,22	4,50
100	4,09	3,66	4,51	3,24	4,93

Nice

Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(43,6316°N–7,2376°E)	~ 400 m	< 5 km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
Nice	1 h	01/01/79 – 31/12/09

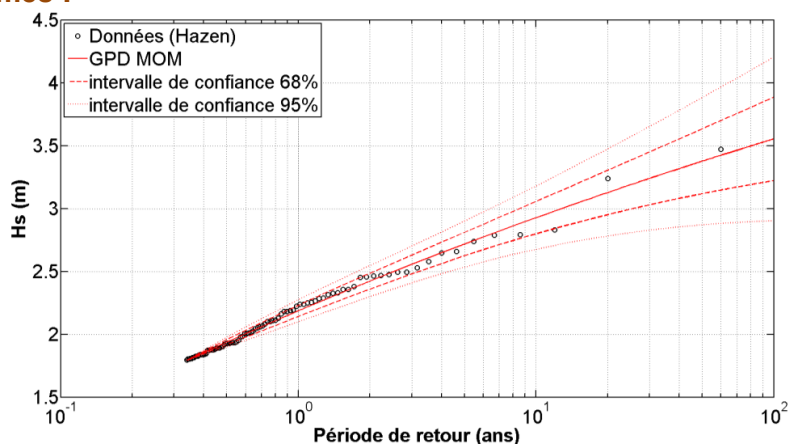


Rose des vagues à la bouée Nice.

Analyse des données :

	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,009	3,47	0,48
Tp (s)	1,04	11,08	3,85
Dp (°)	0,00	360,00	-

Analyse d'extrêmes :



Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs.

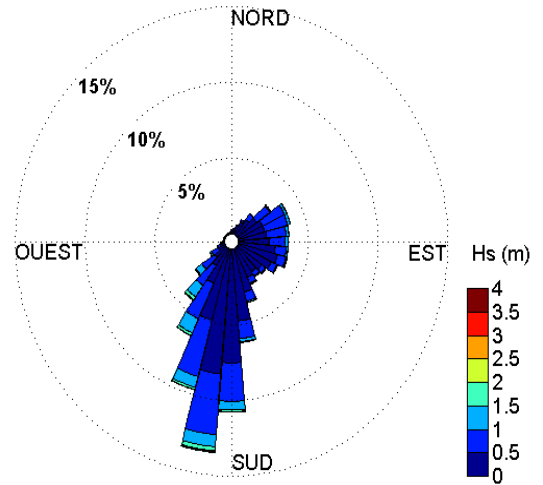
Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
1,79	~3	-0,073658	0,37923

Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	2,93	2,80	3,06	2,68	3,18
20	3,13	2,95	3,30	2,78	3,47
50	3,38	3,12	3,63	2,87	3,88
100	3,55	3,22	3,89	2,90	4,20

P39 « Monaco »

Caractéristiques du point :

Position (lat – lon)	Profondeur	Distance à la côte
(43,7144°N–7,4676°E)	260 m	~ 5 km
Nom du point	Pas de temps	Période simulée
P_39	1 h	01/01/79 – 31/12/09

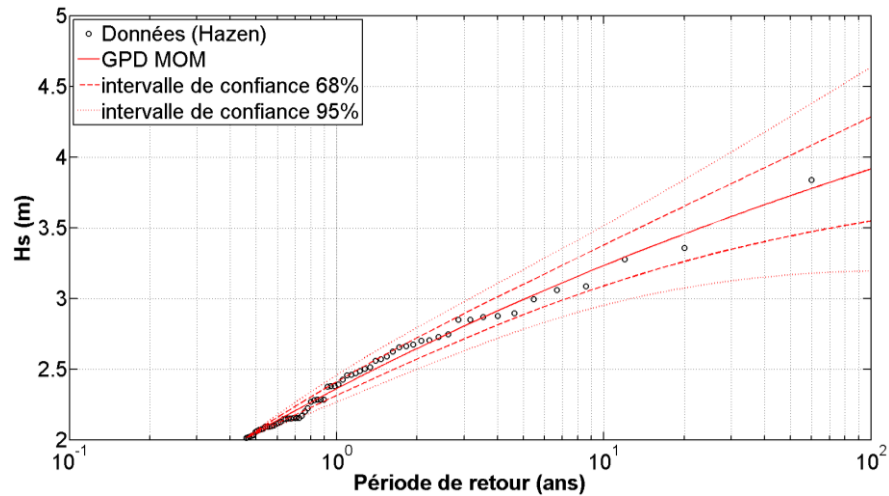


Rose des vagues à la bouée virtuelle Monaco.

Analyse des données :

	Minimum	Maximum	Moyenne
Hs (m)	0,01	3,84	0,49
Tp (s)	1,04	11,08	3,99
Dp (°)	0,00	360,00	-

Analyse d'extrêmes :



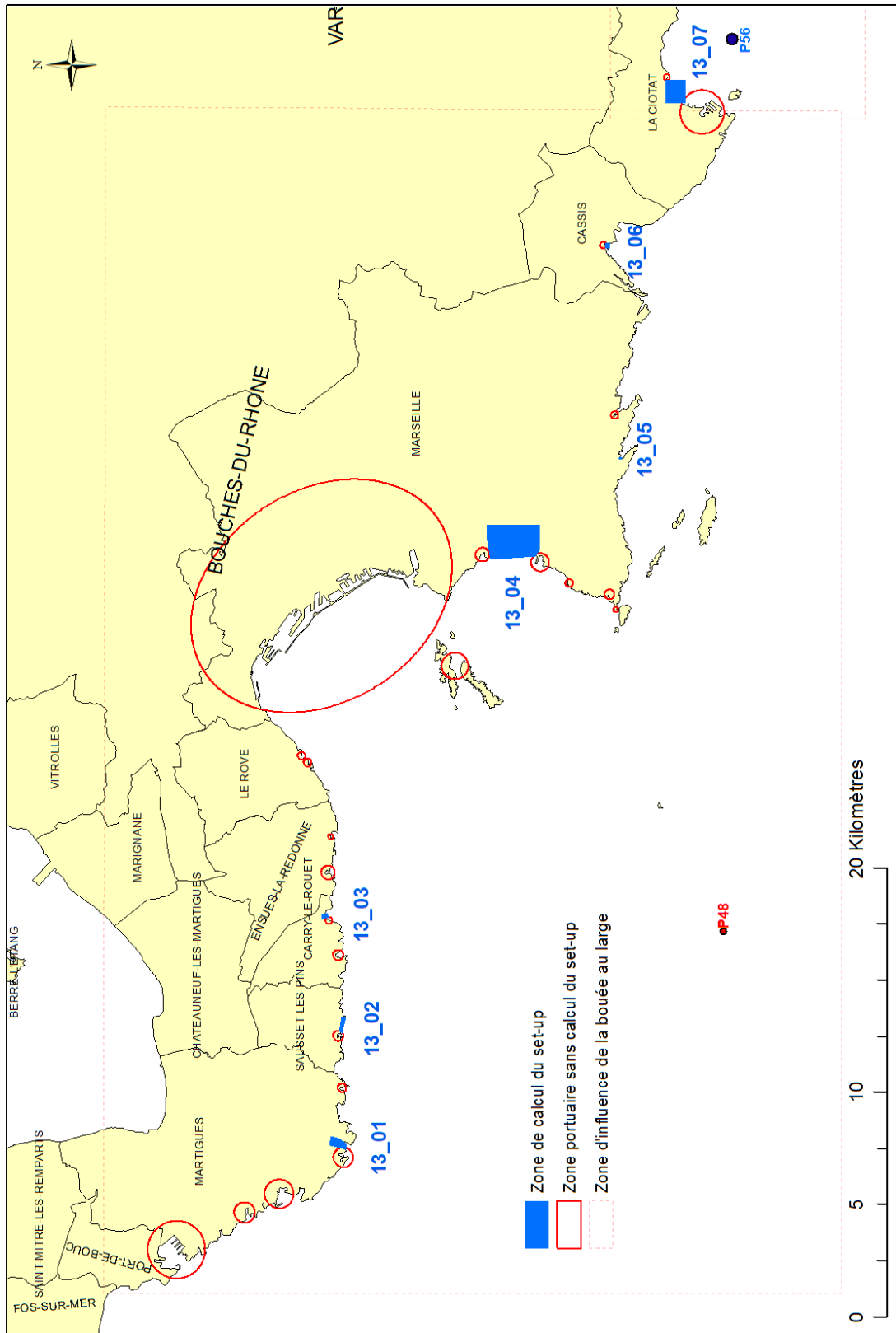
Représentation graphique des valeurs de retour pour Hs.

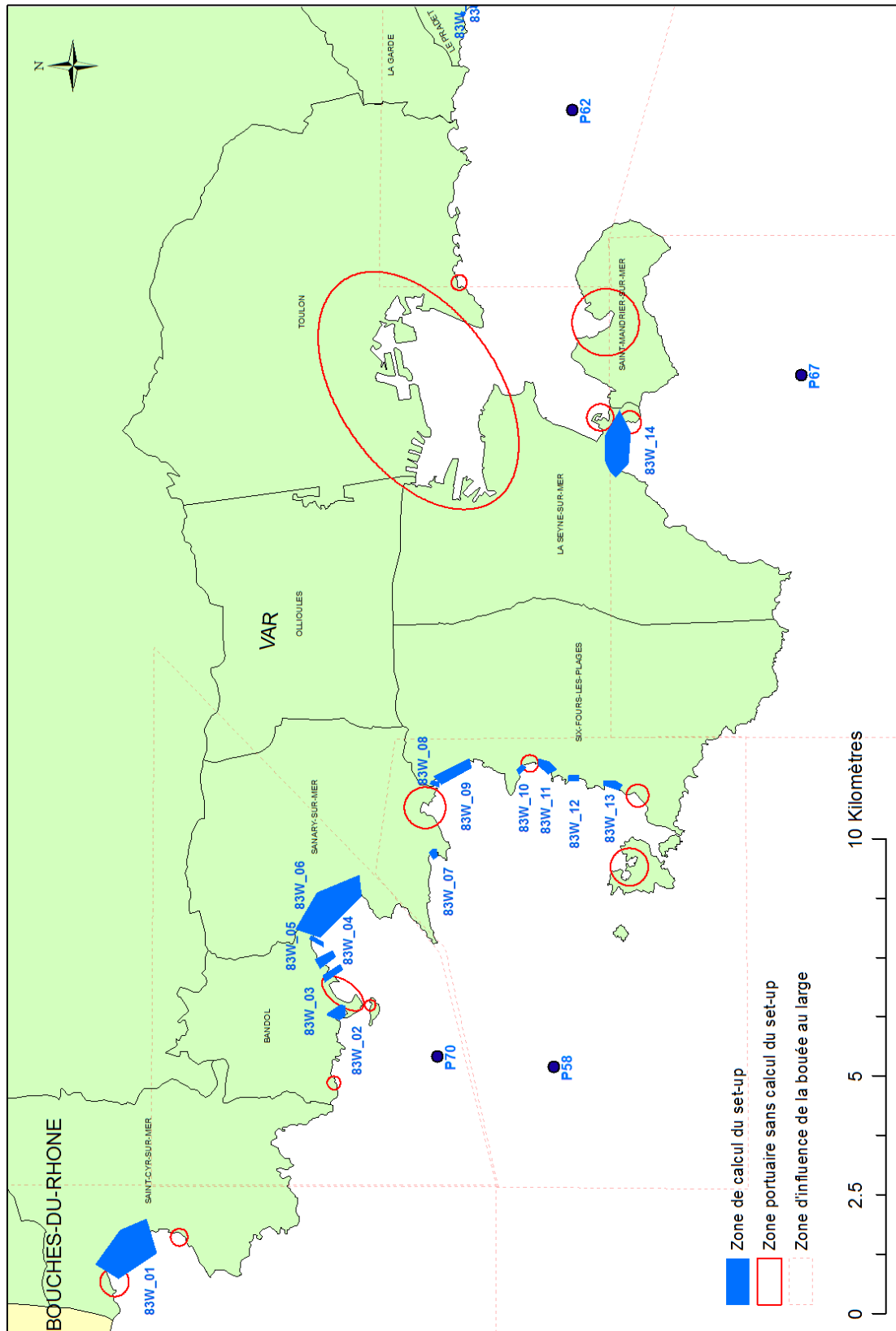
Seuil GPD (m)	Nb evts/an	Estimation de ξ	Estimation de σ
2,01	2,01	-0,10679	0,46453

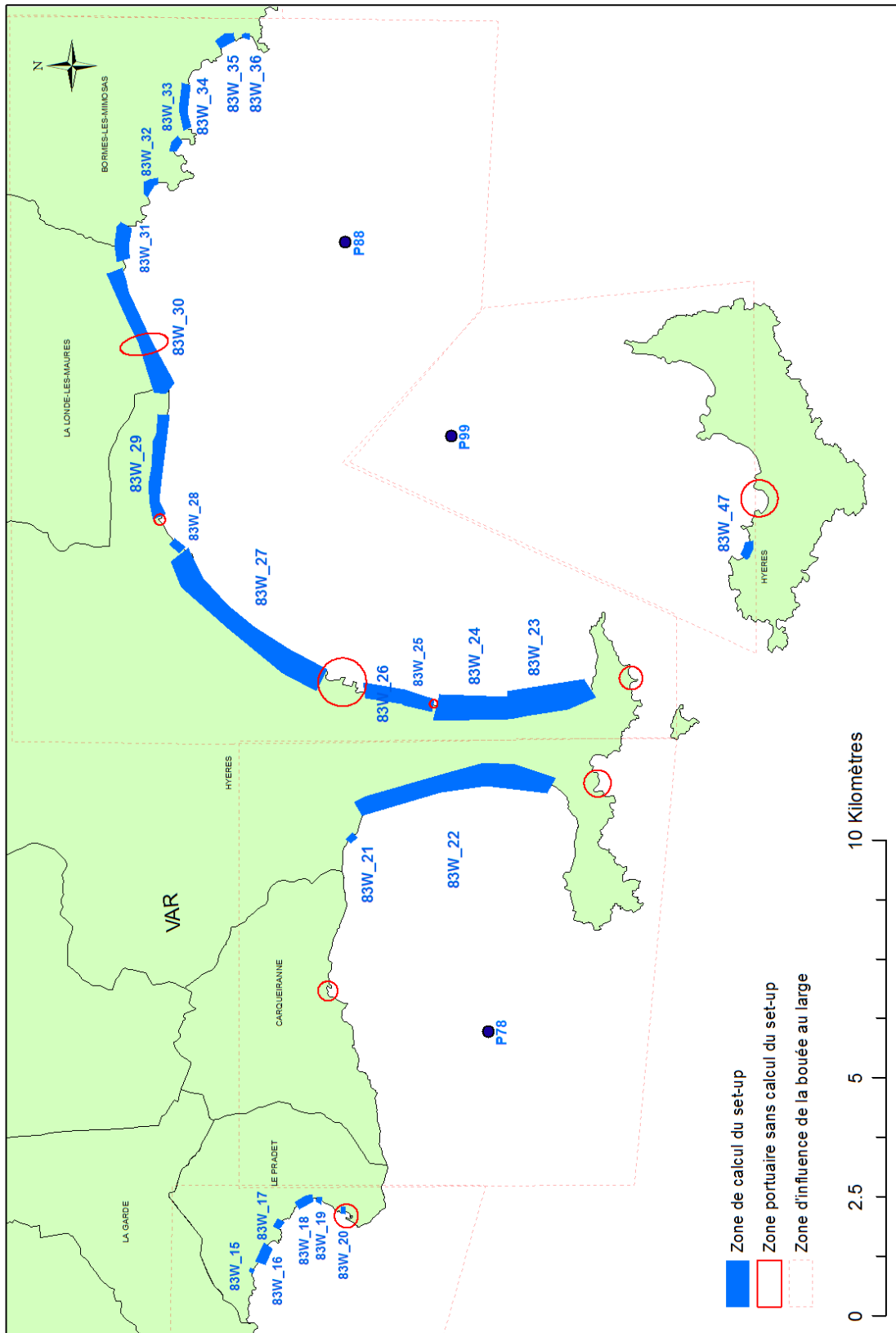
Période de retour (années)	Hs (m)	Int.Conf.68% Borne inf (m)	Int. Conf. 68% Borne sup (m)	Int. Conf. 95% Borne inf (m)	Int. Conf. 95% Borne sup (m)
10	3,23	3,09	3,38	2,95	3,51
20	3,46	3,26	3,65	3,07	3,84
50	3,73	3,44	4,01	3,17	4,29
100	3,91	3,55	4,28	3,19	4,64

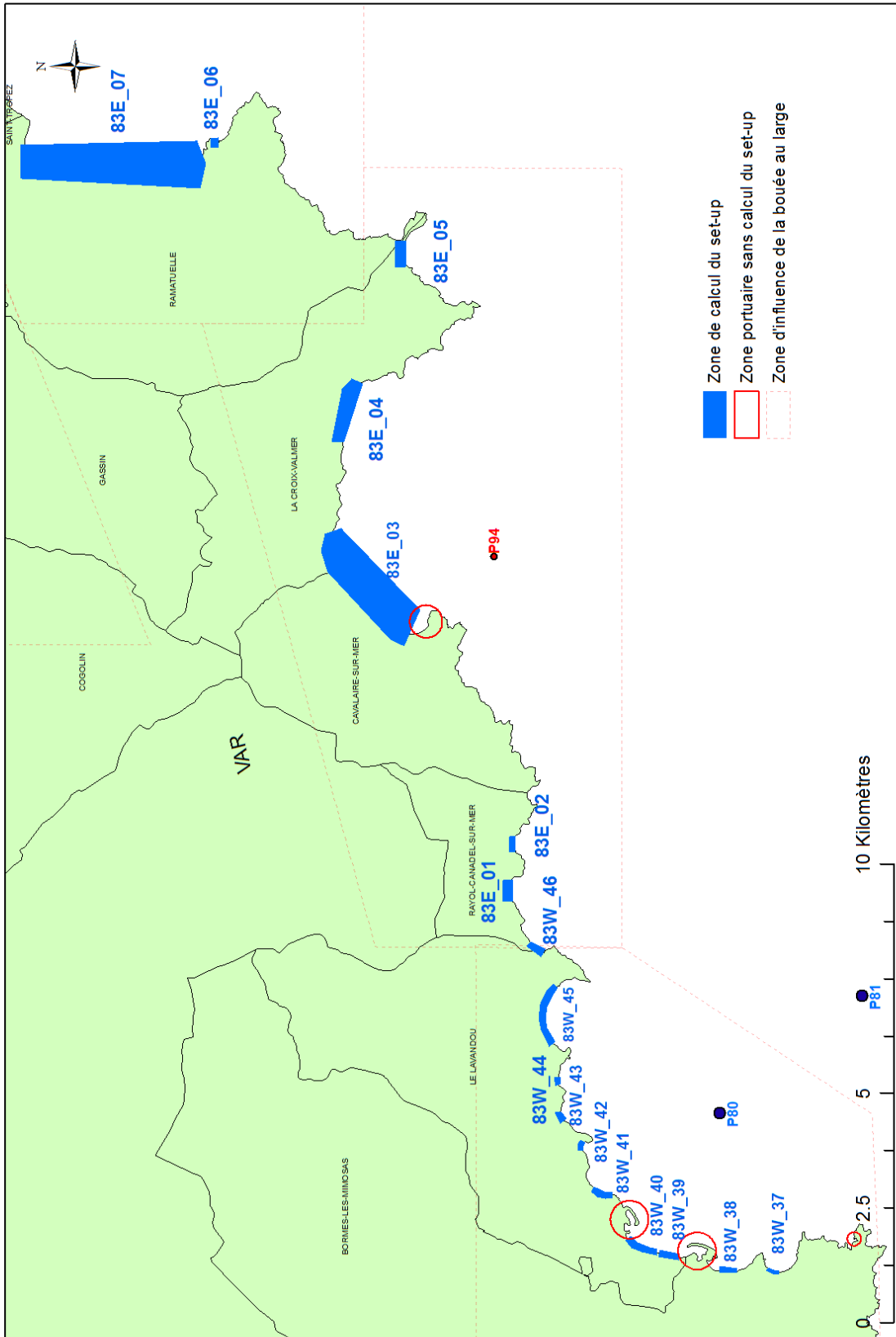
Annexe 5

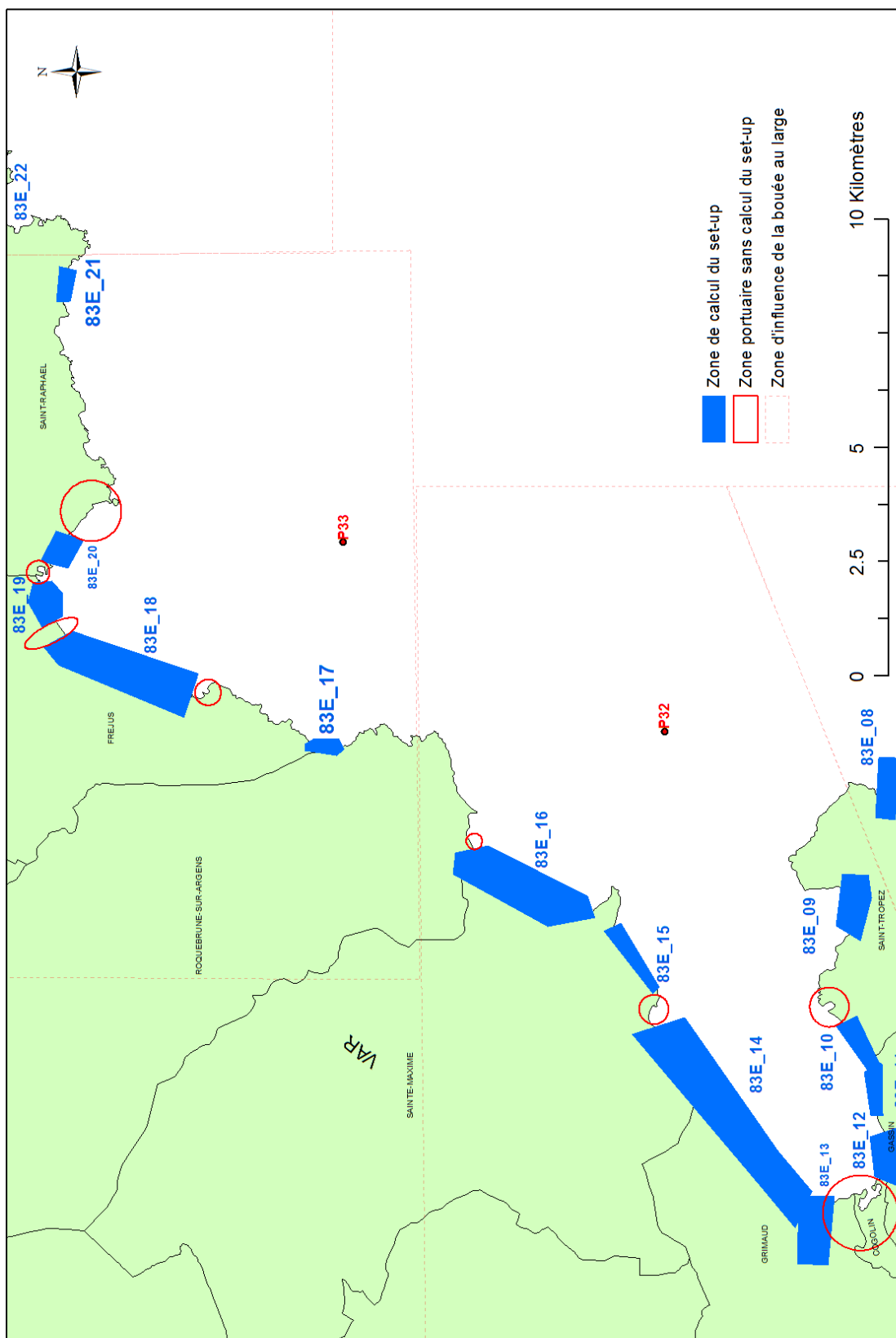
Cartographie des zones de calcul du wave set-up

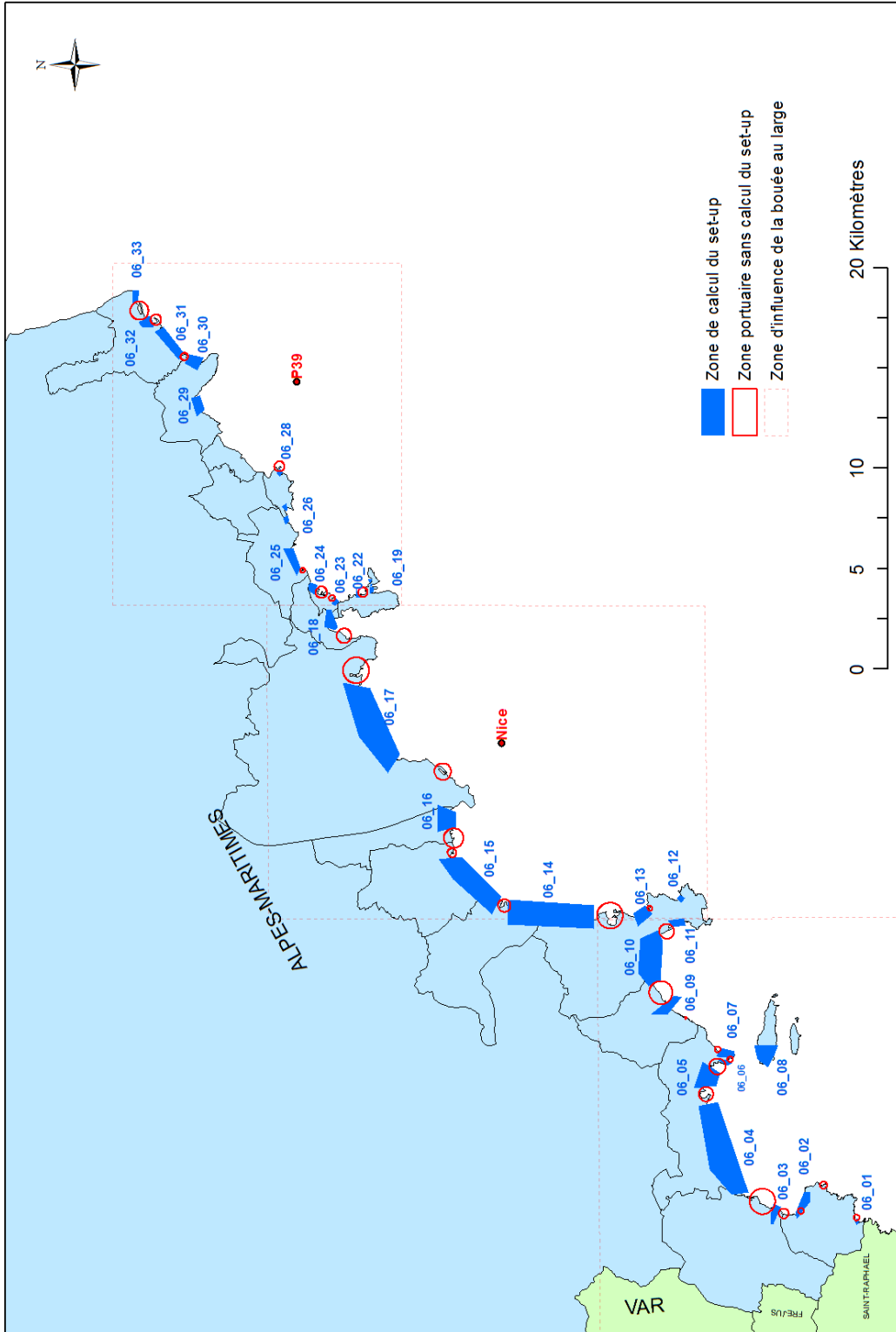












Annexe 6

Atlas cartographiques à 1/25 000 - Niveaux marins de référence de l'évènement moyen

Annexe 7

Atlas cartographiques à 1/25 000 – Niveau de référence de l'évènement moyen avec prise en compte du changement climatique

Annexe 8

Atlas cartographiques à 1/25 000 – Scénario « Évènement moyen »

Annexe 9

Atlas cartographiques à 1/25 000 – Scénario « Evènement moyen avec prise en compte du changement climatique »



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Provence-Alpes-Côte d'Azur
117 avenue de Luminy
BP. 168
13276 – Marseille – France
Tél. 04 91 17 74 77