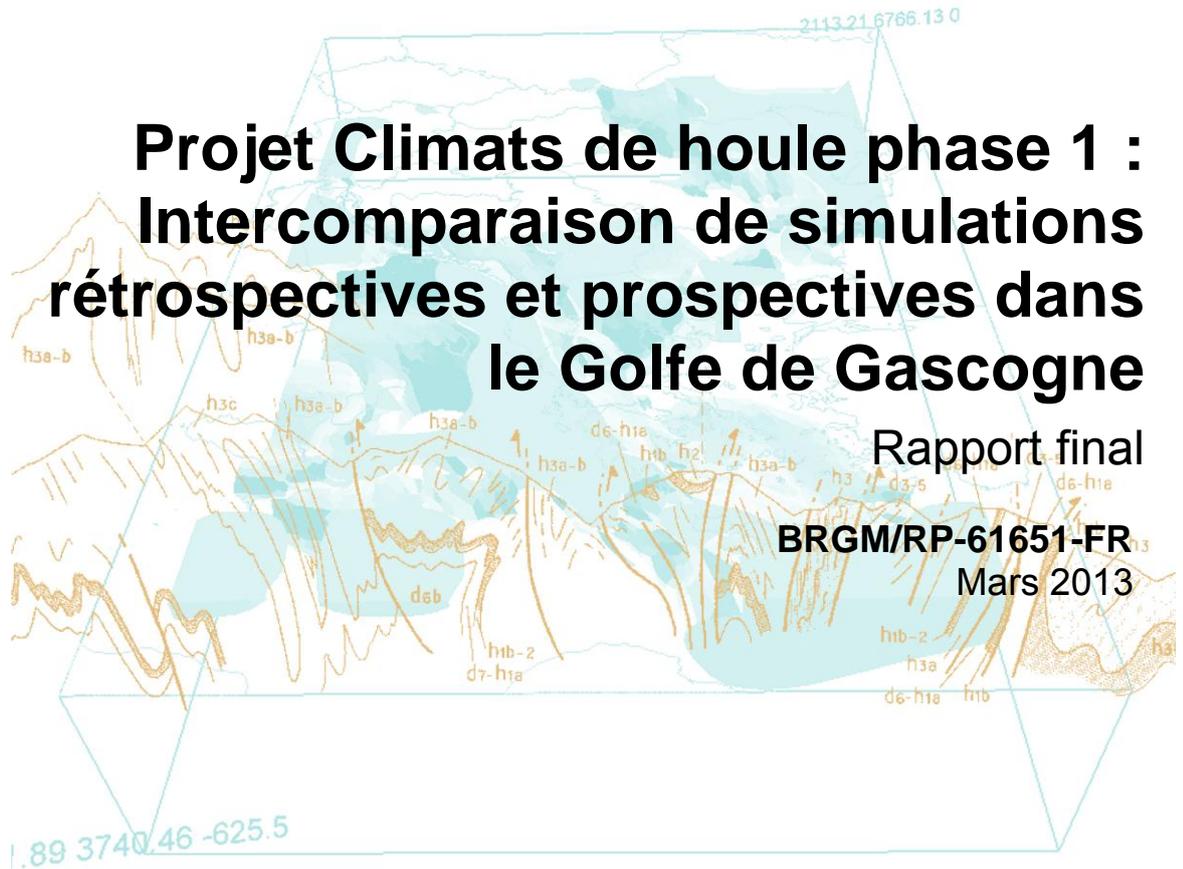




Projet Climats de houle phase 1 : Intercomparaison de simulations rétrospectives et prospectives dans le Golfe de Gascogne

Rapport final

BRGM/RP-61651-FR
Mars 2013



Projet Climats de houle phase 1 : Intercomparaison de simulations rétrospectives et prospectives dans le Golfe de Gascogne

Rapport final

BRGM/RP-61651-FR
Mars 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM

Sophie Lecacheux et François Paris
Avec la collaboration de
Gonéri Le Cozannet

Vérificateur :

Nom : Déborah Idier

Date : 15/03/2013

Signature :

Approbateur :

Nom : Jean-Luc Foucher

Date : 15/03/2013

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : modélisation, vagues, variabilité climatique, changement climatique, Golfe de Gascogne, BOBWA, ANEMOC, IOWAGA

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

Lecacheux S., Paris F. (2013) – Projet Climats de houle phase 1 : Intercomparaison de simulations rétrospectives et prospectives dans le Golfe de Gascogne. Rapport BRGM/RP-61651-FR, 116 p., 58 ill, 1 ann.

© BRGM, 2013, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La connaissance des climats de vagues et de leur interaction avec la variabilité climatique est un sujet très important en termes de protection des zones côtières contre la submersion, de planification d'opérations en mer, ou d'autres applications en ingénierie comme le dimensionnement d'ouvrages. En outre, le transport sédimentaire et la morphodynamique littorale sont fortement dépendants des caractéristiques des vagues.

Les récents efforts de modélisation menés par divers groupes de travail permettent aujourd'hui de disposer de plusieurs jeux de données de vagues long-terme (issus de régionalisations dynamiques) couvrant l'ensemble ou une partie du Golfe de Gascogne pour des périodes actuelles mais également pour des périodes futures.

Ce rapport, réalisé pour le compte de la Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère de l'Écologie, présente les résultats de l'intercomparaison des différents jeux de données de vagues long-terme disponibles au niveau du Golfe de Gascogne. L'objectif principal est de (1) caractériser leurs performances et (2) dégager des conclusions communes et cohérentes sur les tendances actuelles (fin du 20^{ième} siècle) et les évolutions futures (entre la fin du 20^{ième} siècle et la fin du 21^{ième} siècle) des climats de vagues.

Les **principaux résultats** que l'on peut tirer de cette étude sur le Golfe de Gascogne sont les suivants :

- aux échelles de temps courtes (évènementielles), les différences entre les jeux de données sont notables, en particulier pour la représentation des vagues les plus fortes. En ce qui concerne les moyennes mensuelles, on note également des variations (notamment spatiales) entre les jeux de données. Pour une représentation fine des paramètres de vagues actuelles, la comparaison des performances a montré que, sur les bouées étudiées, les données BOBWA montrent les meilleurs résultats dans la majorité des cas ;
- en revanche, pour les études long-terme, il ressort, tout comme dans Caires et al. (2004), que les tendances actuelles et les évolutions futures les plus marquées et significatives sont représentées de manière assez similaire dans tous les jeux de données : (1) une tendance à l'augmentation générale des hauteurs significatives sur la fin du 20^{ième} siècle et (2) une diminution globale des hauteurs significatives entre la fin du 20^{ième} siècle et la fin du 21^{ième} siècle.

Notons cependant que la sélection d'un jeu de données par rapport à un autre reste conditionnée par le secteur étudié (hauturier/côtier et selon la latitude) et l'objectif poursuivi (cartes d'aléa, dimensionnement, analyse d'extrêmes, etc.). Dans le secteur de la Manche, pour lequel les performances des données analysées sont de moins bonne qualité, les sorties de modèles doivent également être utilisées avec

précautions. Rappelons que dans tous les cas, les mesures restent la référence par rapport aux sorties de modèles.

Comité pilotage, données et remerciements

L'équipe du projet remercie le comité pilotage composé de Michel Benoit (Directeur du Laboratoire Saint Venant, EDF R&D), Anne-Laure Tibéri-Wadier (Ingénieur d'études au CETMEF), François Bouttes (Chef de la division hydraulique et sédimentologie, CETMEF), et Pascale Delecluse (Directeur Adjoint de la Recherche, Météo-France CNRM) ainsi que les organismes et personnes qui ont fourni les données :

- le jeu de données **BAD** a été mis à disposition par Xavier Bertin (Chargé de Recherche au CNRS, LIENS) ;
- les bases de données de vagues **BoBWA-10kH** et **BoBWA-10kF** ont été constituées dans le cadre d'un projet de recherche associant le BRGM et CNRM-GAME (Météo-France - CNRS) au travers de la thèse d'Elodie Charles, bénéficiaire d'une bourse AXA de doctorat du Fonds AXA pour la recherche. Les données seront disponibles sur le site <http://bobwa.brgm.fr/> à partir de juin 2013 ;
- les bases de données **CERA-40** et **ERA-INTERIM** sont mises à disposition sur le site : http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/Reanalysis_ECMWF géré par l'ECMWF ;
- la base de données **IOWAGA** est mise en ligne par Fabrice Arduin sur le ftp suivant : <ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/> ;
- les données ANEMOC et la projection de Morellatto et *al.* (2010) ont été fournies par Michel Benoit et le CETMEF. Un atlas des états de mer comprenant des statistiques sur un certain nombre de points est disponible en ligne sur le site : <http://anemoc.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/carte2/> ;
- le jeu de données **MORI** a été mis à disposition par Nobuhito Mori de l'Université de Kyoto ;
- les données de **bouées hauturières** (Gascogne et Brittany) ont été achetées auprès du service commercial de Météo-France. Un grand nombre de données de bouées hauturières sont répertoriées et parfois téléchargeables sur le site de la NOAA : <http://www.ndbc.noaa.gov/> ;
- les données de **bouées côtières** de la base CANDHIS ont été mises à disposition par le CETMEF à titre gracieux après signature d'une convention. Les données de bouées côtières disponibles dans la base CANDHIS sont visualisables sur le site internet : <http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/carte/>.

Sommaire

1. Introduction	11
2. État de l'art	13
2.1. MODÉLISATION ET ANALYSE DES CLIMATS DE VAGUES ACTUELS	13
2.1.1. Les études globales et en Atlantique Nord	13
2.1.2. Les études dans le Golfe de Gascogne.....	18
2.2. MODÉLISATION ET ANALYSE DES CLIMATS DE VAGUES FUTURS	20
2.2.1. Les études globales et en Atlantique Nord	20
2.2.2. Les études dans le Golfe de Gascogne.....	21
2.3. SYNTHÈSE.....	23
3. Objectifs et démarche proposée	25
3.1. PROBLÉMATIQUE	25
3.2. DÉMARCHE.....	26
3.3. MÉTHODE	26
3.3.1. Comparaison des performances.....	26
3.3.2. Comparaison spatiale.....	29
3.3.3. Comparaison ponctuelle.....	32
4. Description des données et discussion	35
4.1. RE-ANALYSES ET SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES.....	35
4.1.1. ANEMOC	37
4.1.2. BOBWA.....	38
4.1.3. BAD	39
4.1.4. CERA-40.....	40
4.1.5. ERA-INTERIM.....	41
4.1.6. Données IOWAGA	41
4.2. PROJECTIONS.....	41
4.2.1. MORI.....	43
4.2.2. BOBWA.....	43
4.2.3. MORELLATO	44
4.3. BOUÉES	44

4.4. DISCUSSION SUR LES DONNÉES UTILISÉES.....	45
4.4.1. Données de validation et calibration des modèles	45
4.4.2. Position des bouées et résolution des modèles	47
5. Résultats	49
5.1. PERFORMANCES	49
5.1.1. Analyse des hauteurs significatives	50
5.1.2. Analyse des périodes et des directions.....	59
5.1.3. Analyse par type de vague	62
5.1.4. Synthèse	65
5.2. CLIMATS DE VAGUES ACTUELS	66
5.2.1. Moyennes annuelles et saisonnières.....	66
5.2.2. Comparaison spatiale des tendances.....	70
5.2.3. Comparaison ponctuelle des tendances.....	78
5.3. CLIMATS DE VAGUES FUTURS.....	87
5.3.1. Comparaison spatiale des évolutions	88
5.3.2. Comparaison ponctuelle des évolutions	93
6. Conclusions.....	99
7. Bibliographie	103

Liste des illustrations

Figure 1 - Tendances sur les Hauteurs significatives en hiver (JFM, haut) et en automne (OND, bas) calculées avec les données CERA-40. Les contours sont indiqués tous les centimètre/an. Les traits pleins indiquent les tendances positives et les traits pointillés les tendances négatives. Figures extraites de Caires and Swail (2004).	16
Figure 2 - Tendances sur les moyennes annuelles des hauteurs significatives décelées avec les jeux de données 20CR et MSC50. Figures extraites de Wang et al. (2012).	17
Figure 3 - Schéma simplifié représentant l'évolution des hauteurs de vagues en Atlantique selon les projections globales. Figure extraite de Charles et al. (2012a).	21
Figure 4 - Différences des moyennes hivernales et estivales des hauteurs significatives et des directions des vagues entre le scénario A2 et le scénario de contrôle. Figure extraite de Charles et al. (2012b).	22
Figure 5 - Schéma explicatif de lecture d'un Diagramme de Taylor.	28
Figure 6 - Diagramme quantiles-quantiles (rouge) superposé au diagramme de dispersion (gris).	29
Figure 7 - Exemple de carte constituant l'atlas (pour les simulations rétrospectives).	30

Figure 8 - Projections de concentrations en CO ₂ pour les scénarios A2, A1B et B1 du GIEC. Source CNRS : http://www.insu.cnrs.fr/environnement/climat-changement-climatique/les-differents-scenarios-climatiques	31
Figure 9 - Exemple de diagrammes bivariés représentant l'occurrence relative des vagues dans les espaces période/hauteur et direction/hauteur réalisés avec les données CERA-40 à la bouée Gascogne recalculées sur une fenêtre temporelle de 6h. Sur le graphique de gauche, la courbe noire représente la cambrure médiane du jeu de données.	33
Figure 10 - Gauche : points de la base de données ANEMOC utilisés dans l'étude. Droite : emprises et maillages des modèles océanique (bas) et côtier (haut). Images extraites du site ANEMOC et de Benoît et al. (2006).	37
Figure 11 - Emprises des simulations effectuées avec le modèle WW3. Figure extraite de Charles et al. (2012a).	38
Figure 12 - Emprises des grilles de calcul du modèle WW3 et positions des bouées utilisées pour la validation. Figure extraite de Bertin et Dodet (2010).	39
Figure 13 - Position des bouées sélectionnées pour l'analyse des performances des jeux de données.	45
Figure 14 - Position des bouées utilisées pour la comparaison des jeux de données dans cette étude (étoiles) et des bouées utilisées pour la calibration des différents jeux de données (triangles).	46
Figure 15 - Position des points sélectionnés pour l'analyse ponctuelle. Pour les données CERA-40, le point d'extraction exact des données est précisé (position-ERA) car la résolution de la grille induit des écarts non négligeables.	47
Figure 16 - Performances sur les hauteurs significatives à la bouée Brittany : (1) Diagrammes de dispersion (gris) superposés à la tendance linéaire des quantiles de vagues (rouge) pour chaque jeu de données et (2) diagramme de Taylor.	51
Figure 17 - Performances sur les hauteurs significatives supérieures au quantile 90 (~4,6 m) à la bouée Brittany : Diagramme de Taylor.	52
Figure 18 - Performances sur les hauteurs significatives à la bouée Gascogne : (1) Diagrammes de dispersion (gris) superposés à la tendance linéaire des quantiles de vagues (rouge) pour chaque jeu de données et (2) diagramme de Taylor.	53
Figure 19 - Performances sur les hauteurs significatives à la bouée Biscarrosse : (1) Diagrammes de dispersion (gris) superposés à la tendance linéaire des quantiles de vagues (rouge) pour chaque jeu de données et (2) diagramme de Taylor.	55
Figure 20 - Performances sur les hauteurs significatives à la bouée Yeu : (1) Diagrammes de dispersion (gris) superposés à la tendance linéaire des quantiles de vagues (rouge) pour chaque jeu de données et (2) diagramme de Taylor.	56
Figure 21 - Performances sur les hauteurs significatives à la bouée Minquiers : (1) Diagrammes de dispersion (gris) superposés à la tendance linéaire des quantiles de vagues (rouge) pour chaque jeu de données et (2) diagramme de Taylor.	57
Figure 22 - Synthèse des performances sur les hauteurs significatives pour tous les jeux de données et toutes les bouées.	58
Figure 23 - Synthèse des performances sur les périodes moyennes pour tous les jeux de données et toutes les bouées.	60
Figure 24 - Distribution (en log10) des directions moyennes de vagues à la bouée Yeu.	61

Figure 25 - Distribution (en log10) des directions moyennes de vagues à la bouée Minquiers.	61
Figure 26 - Exemple de variations saisonnières de l'occurrence relative des classes de vagues à la bouée Gascogne pour le jeu de données BOBWA.	63
Figure 27 - Diagramme de Taylor synthétique à la bouée Brittany présentant, pour chaque jeu de données, les statistiques des cinq types de vagues au regard des observations (REF). Chaque pastille ou étoile est comparée à sa propre référence (classe de vagues 2, 3, 4 ou 5).	64
Figure 28 - Diagramme de Taylor synthétique à la bouée Gascogne présentant, pour chaque jeu de données, les statistiques des cinq types de vagues au regard des observations (REF). Chaque pastille ou étoile est comparée à sa propre référence (classe de vagues 2, 3, 4 ou 5).	65
Figure 29 - Cartes des moyennes hivernales des paramètres de vagues pour les cinq jeux de données sur la période 1979-2001 (de haut en bas) : CERA-40, ERA-INTERIM, BOBWA, BAD (Bertin and Dodet) et ANEMOC : Hauteurs significatives (m)(colonne 1), Quantile 90 des hauteurs de vagues (m) (colonne 2), Directions moyennes (°N) (colonne 3) et périodes moyennes (s) (colonne 4).	68
Figure 30 - Cartes des différences relatives hivernales (par rapport à BOBWA sur la période 1979-2001) des paramètres de vagues pour les quatre jeux de données (de haut en bas) : CERA-40, ERA-INTERIM, BAD (Bertin and Dodet) et ANEMOC. Hauteurs significatives (%)(colonne 1), Quantile 90 des hauteurs de vagues (%) (colonne 2), Directions moyennes (%) (colonne 3) et périodes moyennes (%) (colonne 4).	69
Figure 31 - Cartes présentant (de gauche à droite) les moyennes estivales des hauteurs de vagues fortes (Hs-90 en mètres), les écarts types associés (%), les tendances linéaire et les probabilités de significativité des tendances (p-value du test de T-Student). Les zones hachurées indiquent des tendances significatives à plus de 95 %.....	73
Figure 32 - Cartes présentant (de gauche à droite) les moyennes hivernales des hauteurs de vagues fortes (Hs-90 en mètres), les écarts types associés (%), les tendances linéaire et les probabilités de significativité des tendances (p-value du test de T-Student). Les zones hachurées indiquent des tendances significatives à plus de 95 %.....	76
Figure 33 - Cartes présentant (de gauche à droite) les moyennes printanières des directions moyennes de vagues, les écarts types normalisés associés (%), les tendances linéaire et les probabilités de significativité des tendances (p-value du test de T-Student). Les zones hachurées indiquent des tendances significatives à plus de 95 %.....	77
Figure 34 - Diagrammes bivariés à la bouée Gascogne en été (70-01) . Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de Hs.	81
Figure 35 - Diagrammes bivariés à la bouée Ouessant en été (70-01) . Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de Hs.	81
Figure 36 - Diagrammes bivariés à la bouée Yeu en été (70-01) . Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de Hs.....	82

Figure 37 - Diagrammes bivariés à la bouée Ferret en été (70-01) . Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de Hs.	82
Figure 38 - Diagrammes bivariés à la bouée Gascogne en hiver (58-01) . Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de Hs.	83
Figure 39 - Diagrammes bivariés à la bouée Ouessant en hiver (58-01) . Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de Hs.	83
Figure 40 - Diagrammes bivariés à la bouée Yeu en hiver (58-01) . Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de Hs.	84
Figure 41- Diagrammes bivariés à la bouée Cap-Ferret en hiver (58-01) . Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de Hs.	84
Figure 42 - Diagrammes bivariés à la bouée Gascogne en automne (70-01) . Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90.	85
Figure 43 - Diagrammes bivariés à la bouée Ouessant en automne (70-01) . Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90.	85
Figure 44 - Diagrammes bivariés à la bouée Yeu en automne (70-01) . Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de Hs.	86
Figure 45 - Diagrammes bivariés à la bouée Cap-Ferret en automne (70-01) . Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de Hs.	86
Figure 46 - Exemple de cartes sur les moyennes estivales des hauteurs significatives (période 1975-1996) et leur évolution entre les périodes 2075-2096 et 1975-1996 pour le scénario A1B. La zone hachurée dans les données MORI est exclue de l'analyse.	87
Figure 47 - Cartes d'évolutions relative des hauteurs de vagues en été pour les 3 scénarios de GES entre 2061-2100 et 1961-2000.	90
Figure 48 - Distribution des hauteurs significatives de vagues en été à la bouée Brittany pour le scénario de contrôle (trait plein) et les trois projections (pointillées).	91
Figure 49 - Cartes d'évolutions relative des directions des vagues en été pour les 3 scénarios de GES entre 2061-2100 et 1961-2000.	91
Figure 50 - Cartes d'évolutions relative des quantiles 95 des hauteurs de vagues automnales (Hs-95) pour les trois scénarios de GES entre 2061-2100 et 1961-2000.	92
Figure 51 - Cartes d'évolutions relatives des quantiles 95 des hauteurs de vagues hivernales (Hs-95) pour les trois scénarios de GES entre 2061-2100 et 1961-2000.	93
Figure 52 - Diagrammes bivariés à la bouée Gascogne en été . Les occurrences moyennes sont calculées à partir des scénarios REF et les différences sont calculées en soustrayant le diagramme A2 au REF.	95

Figure 53 - Diagrammes bivariés à la bouée Ouessant en été . Les occurrences moyennes sont calculées à partir des scénarios REF et les différences sont calculées en soustrayant le diagramme A2 au REF.....	95
Figure 54 - Diagrammes bivariés à la bouée Yeu en été . Les occurrences moyennes sont calculées à partir des scénarios REF et les différences sont calculées en soustrayant le diagramme A2 au REF.....	96
Figure 55 - Diagrammes bivariés à la bouée Ferret en été . Les occurrences moyennes sont calculées à partir des scénarios REF et les différences sont calculées en soustrayant le diagramme A2 au REF.....	96
Figure 56 - Diagrammes bivariés à la bouée Gascogne en hiver . Les occurrences moyennes sont calculées à partir des scénarios REF et les différences sont calculées en soustrayant le diagramme A2 au REF.....	97
Figure 57 - Diagrammes bivariés à la bouée Gascogne en automne . Les occurrences moyennes sont calculées à partir des scénarios REF et les différences sont calculées en soustrayant le diagramme A2 au REF.....	97
Figure 58 - Diagrammes bivariés à la bouée Gascogne au printemps . Les occurrences moyennes sont calculées à partir des scénarios REF et les différences sont calculées en soustrayant le diagramme A2 au REF.....	98

Liste des annexes

Annexe 1 Sélection de cartes de l'Atlas	107
---	-----

Liste des abréviations

Hs (SWH) : hauteur significative des vagues (Significant wave height).

Hs-90 (SWH-90) : moyenne des hauteurs significatives supérieures au quantile 90.

Hs-95 (SWH-95) : moyenne des hauteurs significatives supérieures au quantile 95.

Tm (MWP) : Période moyenne des vagues (Mean wave period)

Dm (MWD) : Direction moyenne des vagues (Mean wave direction)

Conventions

Dans le rapport, toutes les directions sont exprimées en convention nautique : direction de provenance par rapport au nord et dans le sens horaire.

1. Introduction

La connaissance des climats de vagues et de leur interaction avec la variabilité climatique est un sujet très important en termes de protection des zones côtières contre la submersion, de planification d'opérations en mer, ou d'autres applications en ingénierie comme le dimensionnement d'ouvrages. En outre, le transport sédimentaire et la morphodynamique littorale sont fortement dépendants du climat de vagues local. En zone côtière, le déferlement des vagues induit une élévation locale du plan d'eau, appelée wave set-up, ainsi que des courants longitudinaux qui charrient les sédiments. Ces processus sont tous contrôlés par les différents paramètres des vagues : hauteur significative (H_s), période (T) et direction (D). La hauteur significative et la période caractérisent l'énergie transportée par les vagues qui contrôle à la fois l'amplitude du set-up, l'intensité des courants générés lors du déferlement, et l'impact du choc des vagues sur les infrastructures côtières.

Afin de mieux prévoir l'influence du changement climatique sur les côtes françaises, il est essentiel de mieux caractériser les variations spatio-temporelles des vagues. Plusieurs travaux se sont d'ores et déjà penchés sur l'analyse de la variabilité, des tendances actuelles et de l'évolution future des conditions de vagues en Atlantique Nord.

Les études basées sur des observations, qu'il s'agisse de mesures de bouées (Dupuis et *al.*, 2006), d'observations visuelles de bateaux (Bacon and Carter 1991, 1993) ou de données satellites (Woolf et *al.*, 2002 ; Izaguirre et *al.*, 2011), ont contribué à améliorer les connaissances sur les conditions de vagues actuelles et leur interaction avec les indices climatiques tels que l'Oscillation Nord Atlantique (NAO). Dans le Golfe de Gascogne en particulier, Woolf et *al.* (2002) ne montrent aucun changement significatif des caractéristiques des vagues entre 1985 et 2002. Quant à Dupuis et *al.* (2006), ils mettent en évidence une augmentation des hauteurs significatives à la bouée Biscarosse entre 1980 et 1998. De manière générale, les études basées sur des observations sont limitées, soit par la faible période temporelle couverte (les données de bouées sont disponibles depuis les années 70 et les données issues de satellites depuis les années 90), soit par leur faible couverture spatiale (les mesures de bouées sont ponctuelles et les observations visuelles ne concernent que les routes des navires commerciaux). Or, l'analyse des climats de vagues et de leur évolution requiert l'utilisation de données long terme et bien résolues à la fois temporellement et spatialement.

Les récents efforts de modélisation menés par divers groupes de travail permettent aujourd'hui de disposer de plusieurs jeux de données long terme issus de régionalisations dynamiques et couvrant l'ensemble ou une partie du Golfe de Gascogne pour la période actuelle mais également pour des périodes futures. Ces données sont produites selon un même canevas qui consiste à générer et propager les conditions de vagues avec un modèle de vague forcé par les vents de surface. Ces vents sont issus de modèles climatiques avec lesquels ont été réalisées des

simulations rétrospectives ou des simulations prospectives (sur la base de scénarios d'émission de gaz à effet de serre).

Il y a différents niveaux d'incertitude dans la génération de telles bases de données (sur l'actuel ou le futur). Le premier (valable pour les projections uniquement) réside dans les scénarios d'émission de gaz à effet de serre et leur transformation en concentrations atmosphériques. Le second concerne la capacité du modèle climatique utilisé à produire les champs de vent et celle du modèle de vagues à générer et propager les états de mer. Il est associé à la connaissance des processus physiques et leur mise en équation mais également à la manière dont sont configurés les modèles (résolutions spatiale et temporelle, paramètres, validation/calibration, assimilation de données, etc.).

Ces différents travaux de simulations rétrospectives et prospectives ont chacun donné lieu à des études sur la variabilité et l'évolution actuelle et future des caractéristiques des vagues. La comparaison des résultats avancés dans la littérature n'est pas aisée car chaque groupe de travail a analysé des périodes temporelles et des variables différentes. Certaines études se basent sur les moyennes annuelles et saisonnières, d'autres sur les quantiles les plus élevés (90, 95 ou 99) ou encore sur l'analyse des extrêmes. Dans ce rapport, le terme « analyse d'extrêmes » est employé pour désigner le calcul des probabilités d'occurrence (ou périodes de retour) d'événements rares et de forte amplitude à partir de lois de distribution de probabilités issues de la théorie des valeurs extrêmes comme la loi GPD (Generalized Pareto Distribution). Contrairement à l'analyse des quantiles, cette technique permet de calculer la période de retour de n'importe quelle valeur extrême, notamment au-delà de la gamme de valeurs représentée par les observations. Néanmoins, le calcul d'extrêmes dont la période de retour est supérieure à deux fois la durée des observations est associé à de très fortes incertitudes.

La caractérisation des incertitudes sur les tendances actuelles et les évolutions futures dégagées par ces jeux de données est primordiale avant d'envisager des études d'impacts potentiels à la côte. Dans cette étude, on propose une intercomparaison des différents jeux de données disponibles (pour des périodes actuelles et futures) et pertinents au niveau du Golfe de Gascogne afin de : (1) caractériser leurs performances et (2) dégager des conclusions communes et cohérentes entre les différents modèles. Notons que dans le cadre de cette étude, les extrêmes, tels que définis dans le paragraphe précédent, ne sont pas analysés.

Ce rapport est organisé comme suit. Le chapitre 2 est un état de l'art sur les données aujourd'hui disponibles en Atlantique Nord et dans le Golfe de Gascogne et les principaux résultats trouvés dans la littérature. Le chapitre 3 présente la démarche et la méthode adoptées dans le projet. Le chapitre 4 décrit les données utilisées dans cette étude et le chapitre 5 les résultats obtenus. Enfin, une synthèse ainsi que des perspectives pour de futurs travaux sont proposées.

2. État de l'art

2.1. MODÉLISATION ET ANALYSE DES CLIMATS DE VAGUES ACTUELS

2.1.1. Les études globales et en Atlantique Nord

Historique et données existantes

Dans les années 90, le programme **WASA** (« Waves and Storms in the North Atlantic », Günther et *al.* 1998) a initié les premiers travaux de simulation rétrospective des états de mer sur de longues périodes temporelles dans le but d'analyser l'évolution récente des tempêtes en Atlantique Nord. Un premier jeu de données a été produit sur 40 ans (**1955-1994**) à l'aide du modèle de vagues de 3^{ème} génération WAM (Komen et *al.*, 1994) et des champs de vents opérationnels de la U.S. Navy Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (FNMOC). Néanmoins, le manque d'homogénéité des champs de vents utilisés (issus d'une compilation de diverses sources) complique l'analyse de l'évolution long-terme des états de mer avec ces données. Ainsi, les travaux menés ultérieurement à partir des années 2000 par d'autres groupes de travail sont tous basés sur des champs de vents ré-analysés, produits avec un même modèle numérique et bénéficiant d'assimilation de données.

Dans une première série de travaux, Wang and Swail (2001, 2002 et 2004) ont analysé la variabilité et les tendances des hauteurs significatives des vagues (moyennes, quantiles 90 et 99, et valeurs extrêmes pour différentes périodes de retour) à partir de deux simulations rétrospectives réalisées avec les vents de la ré-analyse atmosphérique NCEP/NCAR (Kalney et *al.*, 1996) :

- la première, **CS01** (Cox and Swail, 2001), a une emprise globale (résolution 1,25° X 2,5°) et a été obtenue en forçant le modèle spectral de vagues de seconde génération ODGP2 avec les vents NCEP/NCAR sur la période **1958-1997** ;
- la seconde, **AES40** (Swail and Cox, 2000), couvre l'Atlantique Nord uniquement (résolution 0,625° X 0,833°) et a été réalisée avec le modèle de vagues de 3^{ème} génération OWI 3-G sur la période **1858-2000**. Pour cette simulation, l'intensité des vents NCEP/NCAR a été corrigée car les études précédentes ont montré une nette sous-estimation de l'intensité des vents pour les tempêtes extratropicales ainsi que des problèmes d'assimilation des données satellites dans les données brutes.

Parallèlement, **ERA-40** (Uppala et *al.*, 2005), réalisée par l'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), est la première ré-analyse pour laquelle un modèle de vagues (WAM) a été couplé à un modèle atmosphérique. Les données de vagues produites bénéficient donc également d'assimilation de données,

principalement de bouées et de données altimétriques. Elles couvrent la période **1957-2001** à une résolution spatiale de $1,5^\circ \times 1,5^\circ$. Une validation à l'aide d'observations a été réalisée par Caires et Sterl (2005) et a montré que les données ERA-40 sous-estimaient les vagues les plus hautes et présentaient de fortes hétérogénéités temporelles dues à l'assimilation de données de vagues de différents altimètres. Ainsi, l'utilisation des données de vagues brutes est déconseillée par les auteurs dans le cadre d'études sur la variabilité et les tendances long-terme.

Une première synthèse de ces travaux a été réalisée par Caires et *al.* (2004). Ils ont comparé, de manière indépendante, les performances des données de vagues (et des vents utilisés pour les produire) des simulations rétrospectives CS01 et AES01 ainsi que de la ré-analyse ERA-40 :

- en ce qui concerne les vents, l'étude montre que tous les jeux de données tendent à surestimer les intensités inférieures à 4 m.s^{-1} et à sous-estimer celles supérieures à 14 m.s^{-1} . ERA-40 montre globalement de plus faibles erreurs statistiques que NCEP-NCAR mais les données NCEP/NCAR, corrigées par Swail and Cox (2000) (et utilisées pour produire les données AES40), sont de meilleure qualité en Atlantique Nord ;
- en ce qui concerne les vagues, les performances des différents jeux de données sont assez variables. Pour une description fine des états de mer, il est préconisé d'utiliser ERA-40 pour les études globales et AES40 pour l'Atlantique Nord. En revanche, l'étude conclut que même si la qualité des jeux de données est variable, les tendances long-terme sur les vagues issues des différents jeux de données sont cohérentes à l'échelle du bassin (mais montre plus de disparités en zone côtière et dans les régions tropicales).

Suite à cette étude, Caires et Sterl (2005) ont corrigé les hauteurs significatives des données ERA-40 avec les données altimétriques du satellite TOPEX-POSEIDON, à l'aide d'une méthode de régression non paramétrique. Le résultat a donné lieu à un nouveau jeu de données de vagues sur 45 ans, à un pas de temps de 6h, nommé **CERA-40**. Une nouvelle validation a montré une très nette amélioration des performances de ce jeu de données sur toute la gamme des hauteurs significatives et la disparition des hétérogénéités présentes dans les données initiales. Ces nouvelles données n'ont cependant pas refait l'objet d'inter-comparaisons en termes de performances avec les autres simulations rétrospectives. Les données de vents et de vagues ERA-40 ainsi que les Hauteurs significatives CERA-40 sont regroupées dans un atlas en ligne (<http://www.knmi.nl/waveatlas>). Ce dernier donne une vision complète du climat de vague, de sa variabilité et de ces tendances sur la période d'étude.

L'année suivante, Swail et *al.* (2006) ont également proposé une nouvelle version des données AES40 (vents et vagues) à travers la mise en place d'un nouveau jeu de données, nommé **MSC50**, qui s'étend de **1954 à 2005**. Les vents utilisés initialement pour AES40 ont bénéficié de nouvelles corrections et le modèle de vagues a été amélioré en Atlantique Nord en termes de physique et de résolution (affinée à $0,5^\circ \times 0,5^\circ$). Un atlas de vagues proposant des cartes de moyennes annuelles et

saisonniers ainsi que des analyses d'extrêmes a été mis en ligne à l'adresse suivante : <http://www.oceanweather.net/MSC50WaveAtlas/>.

Depuis, l'ECMWF a créé une nouvelle ré-analyse avec un modèle couplé océan-atmosphère nommé **ERA-INTERIM** (Dee et *al.*, 2011). La principale amélioration d'ERA-INTERIM par rapport à ERA-40 réside dans une meilleure assimilation des données (atmosphériques et hydrodynamiques) et une résolution spatio-temporelle accrue. Les données de vagues sont disponibles sur une grille de résolution $0.7^\circ \times 0.7^\circ$ à un pas de temps de 3 h. Cette base de données couvre une période temporelle un peu trop restreinte pour faire des analyses de tendances (**1979-2011**) mais devrait être étendue prochainement sur tout le 20^{ème} siècle dans le cadre du projet ERA-CLIM (qui ne sera disponible que courant 2013).

Enfin, la NOAA a récemment produit une ré-analyse atmosphérique, nommée **20CR**, qui s'étend sur 140 ans, de 1871 à 2010 (Compo et *al.*, 2011). Cependant, celle-ci n'étant pas couplée à un modèle océanique, les champs de vagues doivent être produits indépendamment. À ce jour, seuls Wang et *al.* (2012) ont publié une telle étude. Ils ont reconstruit les champs de hauteur significative des vagues à un pas de temps de 6 h sur les 140 ans de données en utilisant une méthode de régionalisation statistique. Cette méthode consiste (1) à trouver une relation statistique entre la pression de surface et la hauteur des vagues (souvent calibrée à partir de données de ré-analyses fournissant à la fois des données de pression et de vagues comme ERA-INTERIM), (2) à appliquer la même relation sur les champs de pression issus d'un autre modèle climatique afin de reconstituer les champs de hauteurs de vagues correspondants. Si cette méthode ne permet pas d'obtenir des séries temporelles pour tous les paramètres de vagues comme dans les simulations rétrospectives, elle peut permettre d'analyser les tendances et la variabilité des hauteurs significatives.

Principales conclusions pour l'Atlantique Nord

De manière générale, à l'échelle de l'Atlantique Nord, les analyses des jeux de données décrits précédemment donnent des résultats cohérents en termes de tendances d'évolution des climats de vagues. Il ressort, dans la majorité des cas, une tendance globale à l'augmentation des hauteurs significatives en Atlantique Nord-Est (au-delà de 50° N) et dans la Mer du Nord en particulier, ainsi qu'une diminution aux moyennes latitudes (vers 40° N). Cependant, selon les études, l'amplitude et l'étendue spatiale de ces tendances sont variables.

L'analyse des données CERA-40 (Caires and Swail, 2004) et AES40 (Wang and Swail, 2004) donne des résultats très comparables sur les tendances saisonnières des hauteurs significatives moyennes. Si aucune évolution ne ressort en été et au printemps, les études mettent en évidence des tendances significatives en hiver et en automne. La Figure 1 propose des cartes de tendances sur ces deux saisons, extraites de Caires and Swail (2004). En hiver, on note une forte tendance à l'augmentation des hauteurs au nord-est (jusqu'à 2,6 cm/an) et une diminution aux moyennes latitudes (jusqu'à -1,5 cm/an). En automne, il ressort principalement une augmentation des hauteurs aux moyennes latitudes (de l'ordre de 1,3 cm/an). Les tendances mises en avant par Wang and Swail (2004) sont similaires mais de plus forte amplitude en hiver. Les tendances observées pour les forts quantiles (90 et 99) ainsi que pour les valeurs

extrêmes sont comparables mais de plus forte amplitude et les zones de significativité sont plus restreintes.

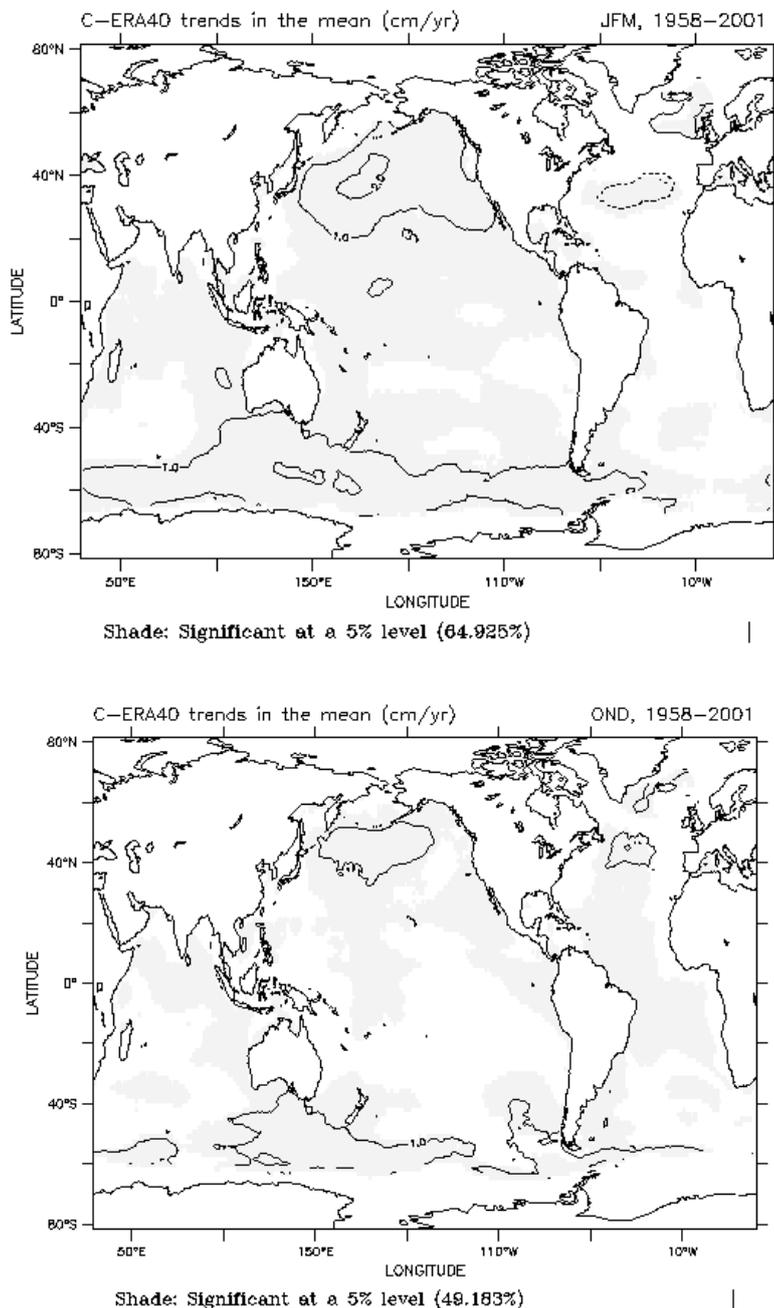


Figure 1 - Tendances sur les Hauteurs significatives en hiver (JFM, haut) et en automne (OND, bas) calculées avec les données CERA-40. Les contours sont indiqués tous les centimètre/an. Les traits pleins indiquent les tendances positives et les traits pointillés les tendances négatives. Figures extraites de Caires and Swail (2004).

Les résultats obtenus récemment par Wang et al. (2012) sur le 20^{ème} siècle corroborent les analyses précédentes. De manière générale :

- sur 1958-2001, les tendances décelées avec les données de Wang et al. (2012) et les données de MSC50 (Swail et al., 2006) sont en bon accord et correspondent aux tendances mises en avant dans Caires et al. (2004). La Figure 2 montre un exemple pour les moyennes annuelles avec une augmentation des hauteurs significatives au nord-est de l'Atlantique Nord et une diminution dans la partie sud (vers 40°N) ;
- sur 1871-2010, on retrouve des motifs similaires à ceux de 1958-2001 mais beaucoup moins prononcés.

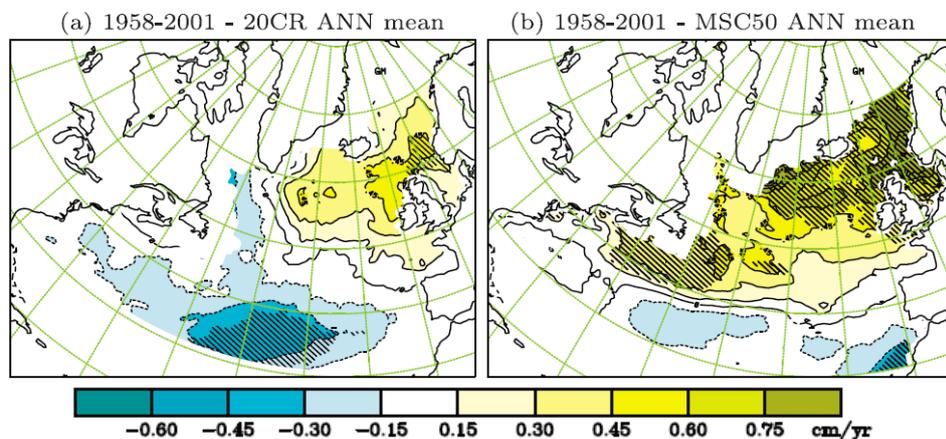


Figure 2 - Tendances sur les moyennes annuelles des hauteurs significatives décelées avec les jeux de données 20CR et MSC50. Figures extraites de Wang et al. (2012).

Ces résultats, issus de la littérature, donnent une idée des tendances récentes à l'échelle de l'Atlantique Nord mais n'offrent qu'une analyse partielle très souvent focalisée sur les hauteurs significatives en omettant les périodes et les directions des vagues. De plus, leurs résolutions sont insuffisantes pour tirer des conclusions au niveau du Golfe de Gascogne (le plus résolu étant de l'ordre de 0,5°) qui se situe dans une zone intermédiaire où les tendances sont assez faibles et, dans la plupart des cas, non significatives. L'utilisation de modèles régionaux est nécessaire pour affiner les résultats.

2.1.2. Les études dans le Golfe de Gascogne

Historique et données existantes

Les analyses focalisées sur le Golfe de Gascogne et les côtes françaises sont plus récentes et moins nombreuses. Il existe actuellement trois simulations rétrospectives long-terme qui proposent une régionalisation sur le Golfe de Gascogne.

La première, réalisée en collaboration par EDF et le CETMEF a donné lieu à la création de la base de données des états de mer **ANEMOC** qui couvre la période **1979-2002** (Benoit and Lafon, 2004). Des analyses statistiques d'extrêmes sont proposées sur le site mais aucune analyse de tendance sur les paramètres des vagues n'est disponible dans la littérature. Plus récemment, deux simulations rétrospectives centrées sur le Golfe de Gascogne ont été menées en parallèle. **Dodet et al. (2010)** ont réalisé une simulation rétrospective sur la période **1953-2009** avec le modèle de vagues Wavewatch3 et les vents de la ré-analyse NCEP/NCAR, à une résolution de $0,2^\circ \times 0,2^\circ$. Par la suite, **Bertin and Dodet (2010)** ont rejoué les simulations avec la même configuration mais en corrigeant les vents NCEP/NCAR afin d'éliminer le biais constaté par Dodet et al. (2010) sur les hauteurs significatives. Les simulations de Charles et al. (2012a), regroupées dans la base de données **BOBWA**, ont également été effectuées avec le modèle WaveWatch3 (jusqu'à une résolution de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ dans le Golfe de Gascogne) et les vents de la ré-analyse ERA-40 sur la période **1958-2001**.

Actuellement, la nouvelle base de données ANEMOC-2 est en cours de réalisation. Elle comporte deux maillages emboîtés (comme ANEMOC-1) : le premier, océanique, couvre l'Atlantique de 60° S à 80° N jusqu'à une résolution de 20 km pour les côtes européennes et 10 km pour les côtes françaises. Le second maillage couvre les côtes françaises (Atlantique et Manche) avec une résolution de 1 km à la côte. Le forçage de vent utilisé provient de la base CFSR de la NOAA (Saha et al., 2010) disponible de 1979 à 2009, avec une résolution horaire et une résolution spatiale de $0,312^\circ \times 0,312^\circ$. Actuellement, ANEMOC-2 "océanique" a été simulée sous TOMAWAC avec la paramétrisation BAJ (Bidlot, Abdalla, Janssen, 2005 et 2007) de 1979 à 2009 (31 ans), calibrée avec des données satellites (TOPEX, JASON1&2, ENVISAT, ERS2, GFO) et validée avec des données de bouées (Météo France et CANDHIS). L'objectif pour la partie côtière est notamment d'introduire les interactions houle - courant.

Principales conclusions dans le Golfe de Gascogne

Sur la période 1958-2001, Charles et al. (2012a) ne mettent pas en avant de tendance significative malgré une très légère tendance à la hausse des hauteurs significatives supérieures au quantile 95 (et des moyennes hivernales de Hs). Cette tendance apparaît plus fortement dans l'analyse de Dodet et Bertin (2010) (de $+0,75$ à $+1,25$ cm/an dans le Golfe de Gascogne) mais les zones de significativité ne sont pas renseignées. Les tendances sur les périodes et les directions sont du même ordre de grandeur dans les deux jeux de données (respectivement $+0,01$ s/an et de $+0^\circ$ /an à

+0,05°/an pour BOBWA) mais elles n'apparaissent pas comme significatives. Ces résultats ne sont pas en opposition avec les résultats des modèles en Atlantique Nord, cités précédemment, qui ne montrent pas de tendance significative sur les hauteurs significatives sur cette période dans le Golfe de Gascogne.

Outre l'analyse sur la période 1958-2001, Charles et *al.* (2012a) ont décelé des tendances significatives sur la période 1970-2001, principalement pour les houles d'été, pour lesquelles ils mettent en évidence une augmentation significative des hauteurs de vagues (+0,54 cm.an⁻¹ à la bouée Gascogne). Sur cette même période, il ressort également une rotation anti-horaire des directions en automne (de l'ordre de -0,4°) et horaire au printemps (de l'ordre de 0,3°).

Les résultats cités ci-dessus s'appuient sur l'analyse séparée des différents paramètres des vagues (Hs, T, D). Or, celles-ci peuvent être classées en différents états de mer en fonction de la combinaison de ces trois paramètres qui permet de décrire l'énergie ($\sim Hs^2 T^2$), la cambrure ($\sim Hs / T^2$) et l'âge des vagues ($\sim (T^2 / Hs)^3$) :

- les houles sont les vagues les plus anciennes avec une faible cambrure. Elles sont générées au loin en Atlantique Nord, au sud de l'Islande, et se propagent vers les côtes françaises avec une direction ouest-nord-ouest. On distingue les houles d'hiver, particulièrement énergétiques, avec de fortes hauteurs et périodes, et les houles d'été, moins énergétiques, avec de faibles hauteurs et de grandes périodes ;
- les mers de vent sont générées localement dans le Golfe de Gascogne. Elles sont caractérisées par une très forte cambrure, et une faible énergie. Elles proviennent généralement du nord-nord-est et sont présentes toute l'année ;
- les vagues restantes sont considérées comme intermédiaires entre des houles et des mers de vent. On les retrouve toute l'année.

Ces différents types de vagues peuvent être reliés à des conditions atmosphériques et des lieux de formation différents. L'étude de leur évolution apporte une vision complémentaire à l'analyse des paramètres séparés. Deux études récentes ont réalisé des analyses par type de vagues au niveau de la bouée Gascogne. Le Cozannet et *al.* (2010) ont effectué une classification des vagues issues de la ré-analyse ERA-40, au niveau de la bouée Gascogne, à l'aide d'un algorithme K-means. Ils ont ainsi montré une augmentation récente de l'occurrence relative des houles énergétiques hivernale venant du nord-ouest qui expliquerait la tendance à l'augmentation des hauteurs de vagues depuis les années 70. De plus, ils ont mis en évidence un lien entre l'occurrence relative des différentes classes et les indices climatiques NAO (Oscillations Nord Atlantique) et EA (East Atlantique pattern). Charles et *al.* (2012a) ont également procédé à une analyse par type de vagues afin de rechercher des corrélations entre l'occurrence de certains types et les indices climatiques NAO et EA. Pour cela, ils ont employé des diagrammes bivariés (Hs/Tm et Hs/Dp) représentant l'occurrence des différents types de vagues.

La comparaison des résultats avancés par les différentes études régionales d'une part, et les études globales d'autre part (cf. paragraphe 2.1.1), n'est pas aisée. Si les tendances dégagées ne sont pas contradictoires, la comparaison reste très limitée car les périodes et les méthodes d'analyse diffèrent beaucoup d'une étude à l'autre.

2.2. MODÉLISATION ET ANALYSE DES CLIMATS DE VAGUES FUTURS

2.2.1. Les études globales et en Atlantique Nord

Historique

Les premières projections de vagues ont été réalisées par régionalisation statistique à l'échelle du globe (Wang and Swail, 2006 ; Caires et *al.*, 2006) ou sur l'Atlantique Nord (the Wasa group, 1998 ; Wang et *al.*, 2004). Cette méthode consiste à (1) trouver une relation statistique entre la pression de surface et la hauteur des vagues à partir de données de ré-analyses, (2) appliquer la relation aux projections sur les champs de pression issus des modèles climatiques afin de reconstituer les champs de hauteurs de vagues correspondants. Cette technique comporte certaines limites : elle ne permet d'analyser que la hauteur significative des vagues, ce qui représente une vision partielle des états de mer, et l'hypothèse sous-jacente est que la relation statistique reste la même pour le climat actuel et le climat futur. Le principal avantage de cette méthode est qu'elle requiert peu de capacités de calcul et permet de réaliser des études d'ensemble en multipliant les simulations (avec différents scénarios et modèles climatiques). Wang et *al.* (2006) ont comparé les résultats des projections globales réalisées avec 3 scénarios de l'IPCC (IS92a, B2 et A2) et 3 modèles climatiques (CGCM2, HadCM3 et ECHAM4).

Depuis 2007, les régionalisations dynamiques se sont beaucoup développées. Cette méthode consiste à générer et propager les conditions de vagues avec un modèle de vague forcé par les vents de surface (à 10m). Ainsi, les projections permettent d'accéder à toutes les variables caractérisant les états de mer (hauteur, période et direction). Des études globales (Mori et *al.*, 2010) ou régionales en Mer du Nord (Weisse and Günther, 2007 ; Debenard and Roed, 2008) ou en Angleterre (Leake et *al.*, 2007), ont été réalisées. Même si certains modèles régionaux incluent le Golfe de Gascogne, les emprises des simulations n'ont pas été dimensionnées pour reproduire correctement les vagues dans cette zone et les résultats de ces études ne sont pas directement exploitables au niveau des côtes françaises.

Principales conclusions pour l'Atlantique Nord

Dans l'ensemble, les résultats de ces différentes projections sont consistants en Atlantique Nord (A.N.) et indiquent des tendances très dépendantes de la latitude (cf. Figure 3). Il se dégage une tendance à l'augmentation des hauteurs significatives au

nord-est et au sud-ouest du bassin Nord Atlantique ainsi qu'une tendance à la diminution des hauteurs significatives dans la partie centrale.

Cependant, comme pour les simulations rétrospectives, la significativité, l'amplitude et l'étendue spatiale de ces tendances sont variables selon la saison, les variables analysées (moyennes, quantile 90, extrêmes), les scénarios et les modèles climatiques. Ces résultats à grande échelle ne sont donc pas directement exploitables régionalement en zone côtière, notamment dans le Golfe de Gascogne, situé dans une zone intermédiaire dans laquelle les changements sont assez variables d'une étude à l'autre. De plus, ces études globales ne s'attachent qu'à l'analyse des hauteurs significatives et négligent les périodes et les directions.

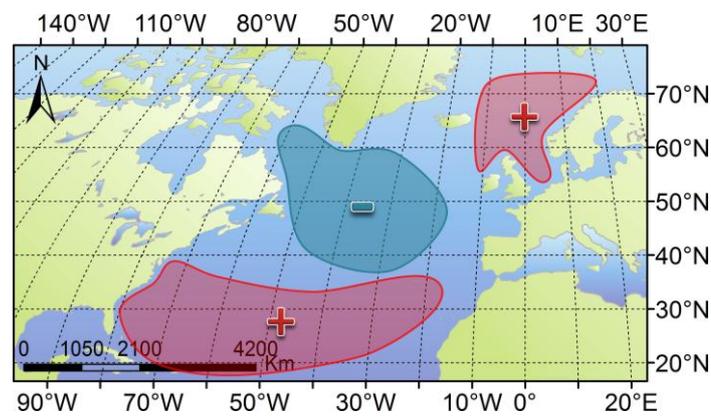


Figure 3 - Schéma simplifié représentant l'évolution des hauteurs de vagues en Atlantique selon les projections globales. Figure extraite de Charles et al. (2012a).

Les tendances qui se dessinent pour les projections à la fin du 21^{ème} siècle sont plus complexes que pour le climat actuel (cf. paragraphe 2.1.1). Si la tendance d'augmentation des hauteurs significatives au Nord-Est de l'A.N. se poursuit, elle semble s'inverser à proximité du Golfe de Gascogne qui se situe entre une zone d'augmentation et une zone de diminution des hauteurs de vagues.

2.2.2. Les études dans le Golfe de Gascogne

Historique

Beaucoup de modèles régionaux ont été développés pour la partie Nord-Est de l'Atlantique Nord (pour laquelle les tendances actuelles et les évolutions futures sont les plus marquées dans les modèles globaux) mais assez peu d'études sont aujourd'hui disponibles pour le Golfe de Gascogne et les côtes françaises en particulier.

Charles et al. (2012b) ont produit des simulations prospectives sur la période 2061-2100 pour 3 scénarios d'émission de gaz à effet de serre (A1B, B1 et A2) ainsi qu'une simulation dite de contrôle sur la période 1961-2000 nommée REF. Elles ont été

réalisées avec les vents issus des simulations Arpège Climat de Météo-France et le modèle de vagues Wavewatch3.

Morellato et *al.* (2010) ont également réalisé des simulations prospectives pour les mêmes scénarios mais la période couverte est continue de 2000 à 2100. La simulation de contrôle couvre la période 1960-2000 et a été calée par rapport aux simulations de la base ANEMOC sur la période 1979-2000. Les simulations ont été réalisées avec le logiciel TOMAWAC et la même grille de calcul « océanique » que celle utilisée pour réaliser la base ANEMOC.

Une thèse est actuellement en cours au laboratoire LNHE sur l'étude de l'impact du changement climatique sur la climatologie des vagues avec une approche statistique de type « régimes de temps » qui est appliquée avec les données d'ARPEGE-CLIMAT (Météo France) pour les scénarios A1B, A2 et B1.

Principales conclusions

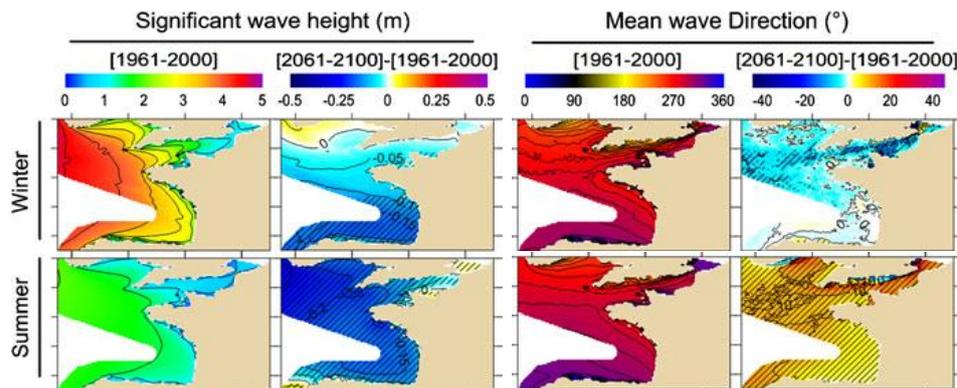


Figure 4 - Différences des moyennes hivernales et estivales des hauteurs significatives et des directions des vagues entre le scénario A2 et le scénario de contrôle. Figure extraite de Charles et al. (2012b).

Charles et *al.* (2012b) ont identifié une baisse généralisée des hauteurs de vagues à toutes les saisons. Les principaux changements interviennent en hiver et surtout en été :

- en été, ils mettent en avant une diminution des hauteurs significatives moyennes de 10 cm à 20 cm, une diminution des périodes moyennes de 0.5s et une rotation horaire de + 3° à + 10° (entre la fin du 20^{ème} et du 21^{ème} siècle). Une analyse par diagrammes bivariés (Hs/Tp et Hs/Dp) montre que ces évolutions générales s'expliquent à la fois par une occurrence moins importante des houles les plus énergétiques venant de l'ouest et une augmentation de l'occurrence des vagues les moins énergétiques (mers de vent et intermédiaires) venant du nord-ouest et nord-nord-ouest ;

- en hiver, ils identifient une augmentation générale de l'occurrence des houles ainsi qu'une rotation vers le nord et une diminution de la hauteur des houles les plus fortes.

Si les modifications sur les hauteurs et les périodes des vagues sont du même ordre de grandeur au large et près des côtes, la réfraction bathymétrique induit une atténuation de la variation sur les directions en zone côtière. Ainsi, la modification constatée sur les directions est toujours visible à la côte pour les vagues d'été mais pas pour les vagues d'hiver.

Charles et *al.* (2012b) montrent que ces changements sont d'autant plus importants que les scénarios d'émission de gaz à effet de serre sont pessimistes. Une analyse approfondie des vents utilisés pour la modélisation indique qu'ils peuvent être reliés aux modifications de l'intensité et de la direction des vents à la fois locaux et à l'échelle de l'Atlantique Nord. Le décalage des rails de tempête vers le Nord-Est en hiver et en été peut notamment expliquer la diminution globale des hauteurs de vagues.

Les analyses des simulations effectuées par Morellatto et *al.* (2010) mettent en évidence les tendances générales suivantes :

- une légère diminution de la valeur moyenne de la hauteur des vagues sur la façade Atlantique, et une légère augmentation sur la Mer du Nord ;
- une légère augmentation de la hauteur des vagues pour les quantiles les plus élevés (99) sur le Golfe de Gascogne ;
- une faible diminution de l'occurrence des tempêtes, mais une augmentation sensible de leur intensité. De plus, ces tempêtes remontent sensiblement vers le nord ;
- une saisonnalité plus marquée, avec une légère augmentation des hauteurs de vague (moyennes et pour les quantiles élevés) pour la saison hivernale et une diminution nette pour la saison estivale.

De même que pour Charles et *al.* (2012b), ces évolutions sont d'autant plus marquées que le scénario de changement climatique du GIEC est pessimiste.

Ces résultats ne sont pas en contradiction avec les modèles globaux dans lesquels le Golfe de Gascogne se situe dans une zone intermédiaire entre une zone d'augmentation des hauteurs significatives et une zone de diminution.

2.3. SYNTHÈSE

Sur les simulations rétrospectives :

- les études globales ou ciblées sur l'Atlantique Nord indiquent sur la seconde moitié du 20^{ème} siècle (1) en hiver, une tendance à l'augmentation des hauteurs de vagues dans la partie Nord-Est et à la diminution aux moyennes latitudes,

(2) en automne, une augmentation aux moyennes latitudes. Aucune tendance claire ne s'observe sur les autres saisons. Si les tendances apparaissent assez nettement en Atlantique Nord-Est (dans la Mer du Nord notamment), le Golfe de Gascogne se situe dans une zone intermédiaire dans laquelle les résultats varient d'un modèle à l'autre et les tendances sont peu significatives sur les périodes étudiées;

- les études régionales dans le Golfe de Gascogne indiquent (1) une légère tendance à l'augmentation des hauteurs de vagues les plus hautes entre 1958 et 2001 (mais pas nécessairement significative, comme dans les modèles globaux), (2) une tendance à l'augmentation de la hauteur significative des vagues en été sur la période 1970-2001 (qui n'a pas été étudiée dans les études plus globales mais qui semble intéressante à analyser).

Sur les simulations prospectives :

- les études globales ou ciblées en Atlantique Nord indiquent globalement une augmentation de la hauteur des vagues au nord-est et au sud-ouest ainsi qu'une diminution dans la partie centrale de l'Atlantique Nord. Cependant, l'amplitude et l'étendue spatiale de ces tendances varient selon la saison, les variables étudiées et les modèles. Encore une fois, le Golfe de Gascogne se situe dans une zone intermédiaire dans laquelle les tendances n'apparaissent pas significatives et peuvent s'inverser d'un modèle à l'autre ;
- les études régionales dans le Golfe de Gascogne indiquent plutôt une tendance à la diminution globale des hauteurs de vagues et une rotation de leur direction de provenance vers le nord.

3. Objectifs et démarche proposée

3.1. PROBLÉMATIQUE

Le chapitre précédent présente une synthèse des différents travaux réalisés en termes de modélisation hydrodynamique, d'analyse de la variabilité et de l'évolution des vagues (1) sur la seconde moitié du 20^{ème} siècle et, (2) entre la fin du 20^{ème} et du 21^{ème} siècle. Qu'il s'agisse de simulations rétrospectives ou prospectives, les résultats avancés par ces études sont sujets à des incertitudes qui se déclinent à différents niveaux :

- le scénario d'émission de gaz à effet de serre (pour les projections) ;
- les modèles climatiques utilisés pour produire les champs de vents (et le type de données assimilées dans les ré-analyses) ;
- le modèle de vagues utilisé pour traduire les champs de vents en états de mer (formulation physique, schéma numérique, résolutions spatiale et temporelle, etc.).

La comparaison entre les différentes études est limitée car chacune se focalise sur des variables (moyennes, quantiles, valeurs extrêmes), des périodes et des secteurs différents (correspondant souvent à des positions de bouées). En outre, la notion de significativité des tendances est perçue différemment selon les groupes de travail. Alors que certains ne présentent que les tendances significatives à plus de 95 %, d'autres ne font pas d'analyse de significativité. Ce manque d'homogénéité dans les méthodes d'analyse entrave l'intercomparaison des différents travaux et la recherche de résultats cohérents.

En avril 2011, le colloque COWCLIP (Coordinated Ocean Wave Climate Projections), animé par Marc Hemer du CSIRO (the Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), a regroupé les principaux acteurs de la recherche internationale sur les climats de vagues et leur variabilité. Il a conduit à la constitution d'un groupe de travail collaboratif dont l'un des objectifs est notamment d'encadrer les études sur les climats de vagues en proposant un cadre de travail et en diffusant des bonnes pratiques dans le but de « standardiser » les méthodes de travail. Des travaux d'intercomparaison de simulations rétrospectives et prospectives ont ainsi été initiés à l'échelle globale (menés par Marc Hemer) et à l'échelle de l'Atlantique Nord (menés par Will Perrie d'Environnement Canada). Si ces travaux apporteront certainement des éclaircissements à l'échelle du bassin Atlantique Nord, cette échelle de travail n'est pas suffisante pour tirer des conclusions adaptées et pertinentes pour les côtes françaises.

En s'inscrivant dans la démarche initiée par COWCLIP, ce projet propose de mener une intercomparaison des différentes simulations rétrospectives et prospectives dans

le Golfe de Gascogne et le long des côtes françaises en particulier, en utilisant les jeux de données régionaux et globaux disponibles les plus adaptés.

3.2. DÉMARCHE

Plusieurs chantiers sont menés en parallèle.

Tout d'abord, une comparaison des performances des différentes ré-analyses et simulations rétrospectives long-terme est proposée. L'objectif est de déterminer quels sont les jeux de données les mieux adaptés pour différentes applications et différents secteurs géographiques (façade Atlantique ou Manche, au large ou au niveau du plateau continental). Cette comparaison est basée sur des mesures de bouées réparties au large et le long des côtes françaises. Elle permet également d'apporter un éclairage sur la fiabilité des jeux de données et des tendances/évolutions qui peuvent en être dégagées.

Puis, une analyse des tendances actuelles et des évolutions futures des climats de vagues est proposée de manière homogène (mêmes périodes et variables) afin de tenter de dégager des résultats cohérents. Cette analyse est menée :

- de manière spatiale (sur l'ensemble du Golfe de Gascogne) pour chaque paramètre de vague séparément (Hs, T, D) ;
- de manière ponctuelle, au niveau de quatre bouées situées à différentes latitudes le long de la côte française. L'analyse ponctuelle permet de travailler sur les différents types de vagues comme dans Charles et *al.* (2012a) et Le Cozannet et *al.* (2011). Le choix a été fait ici de travailler comme Charles et *al.* (2012a), à partir de diagrammes bivariés Hs/T et Hs/D, afin d'analyser l'évolution de l'occurrence des différents types de vagues et d'interpréter les tendances mises en avant sur les paramètres (Hs, T, D).

3.3. MÉTHODE

3.3.1. Comparaison des performances

L'analyse des performances se base sur la comparaison des données simulées avec les mesures de six bouées (dont deux bouées hauturières et quatre bouées côtières). Afin de compléter l'intercomparaison, les données IOWAGA sont également intégrées. Au début de la présente étude (janvier 2012), cette base de données ne couvrait que la dernière décennie et n'a donc pas pu être utilisée pour de l'analyse de tendances. Cependant, elle est fréquemment utilisée dans le cadre d'études à l'échelle événementielle car les vents CFSR (de résolution spatiale $0,312^\circ$ et à un pas de temps horaire) sont de haute qualité et donnent de très bons résultats dans la reproduction des états de mer (Magne et *al.*, 2010).

Trois paramètres de vagues sont utilisés : la hauteur significative (Hs), la période moyenne (Tm), et la direction moyenne (Dm). Les directions sont exprimées en

convention nautique (direction de provenance à partir de l'axe nord et dans le sens horaire). Afin d'homogénéiser les différentes données utilisées, et de ramener les mesures et les simulations sur une échelle de temps comparable, celles-ci ont été recalculées sur une fenêtre temporelle de 6 heures en appliquant une moyenne quadratique (pour les hauteurs et périodes) et linéaire (pour les directions).

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 ;
- **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 ;
- **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 ;
- **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 ;
- **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.

$$biais = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Si - Oi) \quad R^2 = \frac{\sum (Si - \bar{O})^2}{\sum (Oi - \bar{O})^2}$$

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

Afin de synthétiser les informations exprimées par ces indices, deux types de représentation sont utilisés.

La RMSE, le coefficient de corrélation et le biais sont représentés sur des **diagrammes de Taylor** (Taylor, 2001). Cette représentation permet de comparer les performances de plusieurs modèles à la mesure sur un seul et même graphique. La construction et la lecture d'un diagramme de Taylor se basent sur une relation géométrique reliant le coefficient de corrélation (R^2), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et les écarts-types des données (σ_D) et du modèle (σ_M). Taylor (2001) a intégré cette relation dans un graphique en coordonnées polaires schématisé sur la

Figure 5. Le point correspondant aux observations (rouge) est placé de manière à ce que son écart-type soit normalisé ($\sigma_M=1$, pas de variance). Les points associés aux modèles (bleu) ont un écart-type normalisé relatif à celui des observations, soit au-dessus (>1) du quart de cercle noir correspondant à $\sigma_M=1$ ou en-deçà (<1).

Les indices statistiques exprimant les erreurs des modèles par rapport aux observations se lisent comme suit :

- la position azimutale (angle) du point du modèle donne la valeur du coefficient de corrélation R^2 entre le modèle et l'observation (en vert Figure 5) ;
- la **RMSE** est proportionnelle à la distance entre le point des observations et le point du modèle. Sa valeur se lit sur les demi-cercles centrés sur les observations (en rouge Figure 5) ;
- en plus de ces indices, nous avons également intégré l'information sur le **biais** à l'aide d'un code couleur.

Ainsi, la position de chaque jeu de données (point bleu) est d'autant plus proche de la référence (point en rouge) que les indices statistiques indiquent des erreurs faibles.

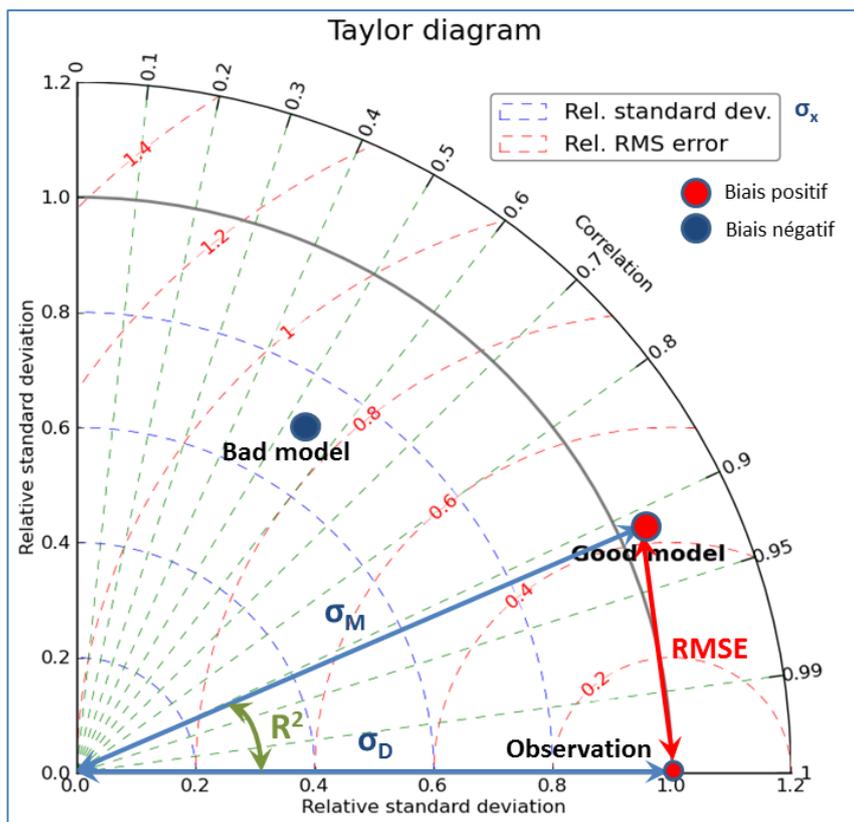


Figure 5 - Schéma explicatif de lecture d'un Diagramme de Taylor.

De plus, des **diagrammes quantiles-quantiles superposés aux diagrammes de dispersion** des données (modèles vs. observations) sont utilisés (exemple Figure 6). Ces graphiques permettent d'analyser le comportement des différents quantiles des paramètres de vagues (en rouge) comparé 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 % et 10 % par rapport aux observations.

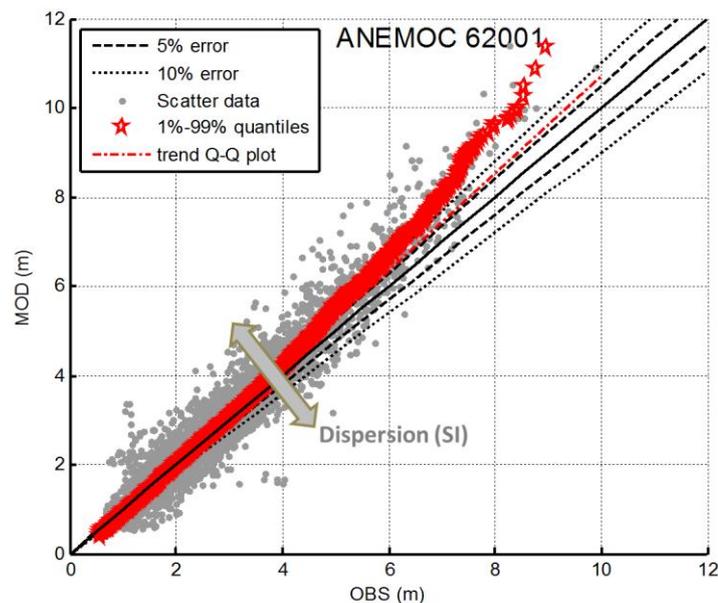


Figure 6 - Diagramme quantiles-quantiles (rouge) superposé au diagramme de dispersion (gris).

3.3.2. Comparaison spatiale

La comparaison des différents jeux de données est réalisée à travers la construction d'un atlas de cartes sur le Golfe de Gascogne (de -10° E à 0° E et de 43° N à 52° N).

L'atlas, ainsi que sa description exhaustive, ne sont pas présentés dans le présent rapport qui reprend les points d'analyse principaux illustrés avec une sélection de cartes pertinentes. Une sélection de cartes est reportée dans l'Annexe 1 et l'intégralité des cartes est annexée sous forme de CD-ROM.

Ré-analyses et simulations rétrospectives

Pour la période actuelle, l'atlas est construit pour trois périodes différentes : (1) **1979-2001** qui est la période commune à tous les jeux de données sélectionnés, (2) **1970-2001** pour laquelle des tendances significatives ont été mises en avant par Charles et

al. (2012a) et enfin, (3) **1958-2001** qui est la période la plus longue disponible. Pour chacune d'elles, l'atlas contient :

- des cartes de moyennes annuelles et saisonnières des quatre paramètres de vagues (Hs, Hs-90, Tm, Dm) accompagnées de leur écart-type normalisé (en %) ;
- des cartes de différences relatives (par rapport à un jeu de données de référence) pour chaque paramètre ;
- des cartes de tendance sur les mêmes paramètres accompagnées des cartes de p-value (issue d'un T-test de Student) qui expriment la probabilité de commettre une erreur sur le calcul de la tendance. La *p-value* à moins de 0,05 (correspondant soit à 5% de chances d'être obtenue par hasard, soit à 95 % de significativité) est également hachurée sur les cartes de tendance. Cette valeur correspond à un seuil pour lequel la significativité de la tendance est très forte ;
- des cartes de corrélations entre les trois paramètres des vagues et les indices climatiques NAO et EA.

Dans cette étude, on ne fait pas d'analyse d'extrêmes tels que définis au paragraphe 1. Un exemple de carte est fourni sur la Figure 7.

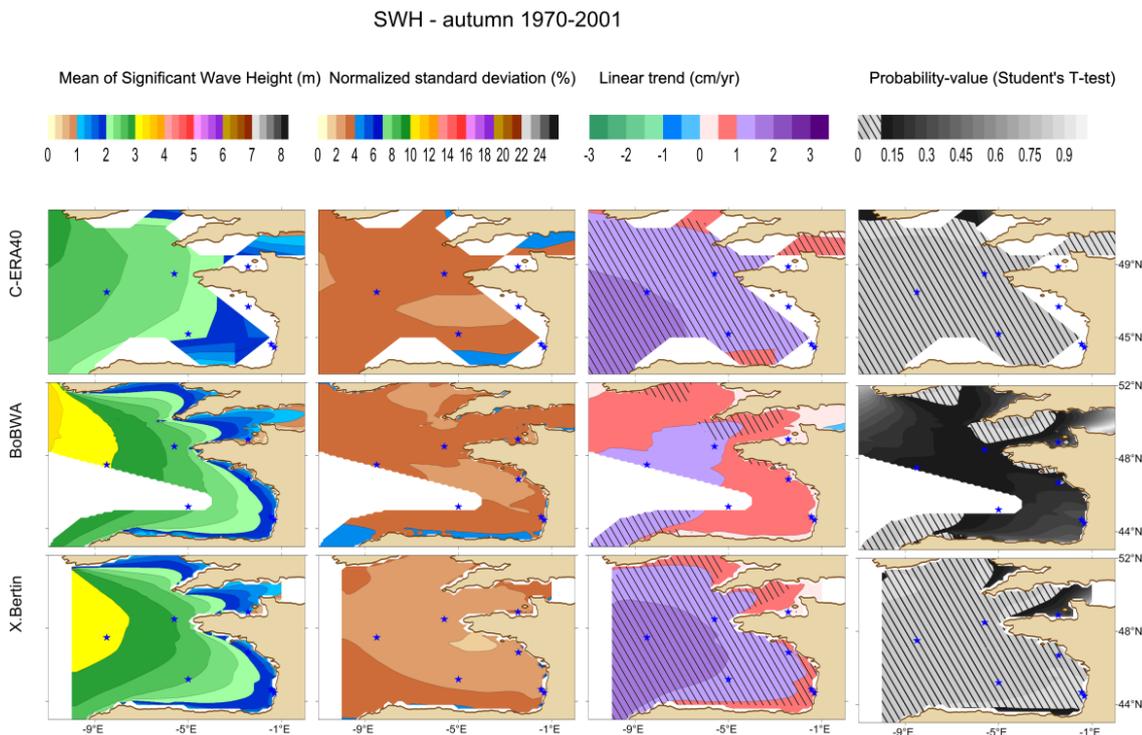


Figure 7 - Exemple de carte constituant l'atlas (pour les simulations rétrospectives).

Simulations prospectives

Pour l'analyse des projections futures, l'atlas contient essentiellement des cartes de différences relatives (exprimées en %) entre les moyennes annuelles et saisonnières du scénario de contrôle (1961-2000) et des projections à la fin du 21^{ème} siècle (2061-2100) pour les paramètres Hs, Hs-90, Tm, Dm et pour les trois scénarios B1, A1B et A2 :

- **A1B** fait partie de la famille des scénarios A1 qui prévoient un développement économique rapide, une population globale à 9 billion en 2050, puis une décroissance et l'introduction rapide de technologies plus efficaces. Cette famille de scénarios prévoit également une convergence des niveaux de vie régionaux ;
- **A2** correspond à un scénario de nations autonomes fonctionnant indépendamment, une population en augmentation continue avec un développement économique régionalisé et des améliorations technologiques plus lentes ;
- **B1** correspond dans un premier temps, à un développement économique rapide avec une population globale de 9 billions en 2050, puis une décroissance, avec une évolution vers une économie de services et d'information et l'introduction de technologies propres et peu consommatrices en ressources.

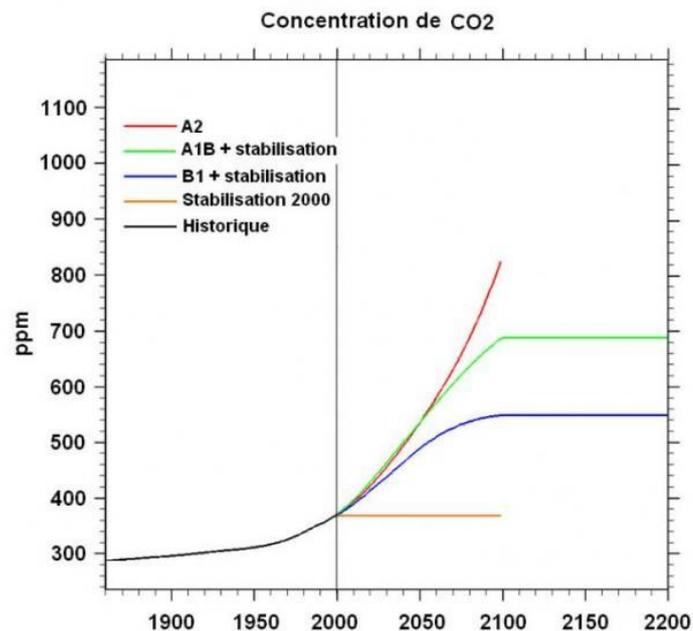


Figure 8 - Projections de concentrations en CO₂ pour les scénarios A2, A1B et B1 du GIEC.
Source CNRS : <http://www.insu.cnrs.fr/environnement/climat-changement-climatique/les-differents-scenarios-climatiques>.

Dans cette étude, on ne fait pas d'analyse d'extrêmes tels que définis au paragraphe 1.

3.3.3. Comparaison ponctuelle

L'analyse ponctuelle est basée sur quatre points correspondant aux positions de trois bouées côtières le long de la côte (Cap Ferret, Yeu et Ouessant) et une bouée hauturière (Gascogne), positionnées sur la Figure 15. Pour chaque point et chaque modèle, les séries temporelles des paramètres de vagues (Hs, Tm, Dm) sont ré-échantillonnées toutes les 6h (avec la même méthode que pour l'analyse des performances décrite ci-dessus) afin d'homogénéiser les jeux de données.

Ces séries temporelles sont utilisées pour construire des diagrammes bivariés de densité qui représentent (1) la distribution des périodes en fonction des hauteurs et (2) la distribution des directions en fonction des hauteurs. Ils sont réalisés en discrétisant l'espace tous les 1 m pour les hauteurs, 1,25 s pour les périodes, et 18° pour les directions (comme dans Charles et *al.*, 2012a), et en répartissant les différents points des séries temporelles dans ces cellules. Ces diagrammes représentent in fine la densité ou l'occurrence relative (exprimée en %) de points dans chaque cellule (cf. Figure 9).

A partir de ces diagrammes, on analyse :

- pour les simulations rétrospectives : les tendances des occurrences relatives annuelles et saisonnières des vagues sur les périodes 1958-2001 et 1970-2001. La significativité de ces tendances est indiquée par la p-value calculée par un T-test de Student ;
- pour les simulations prospectives : la différence entre les occurrences relatives annuelles et saisonnières pour le scénario A2 sur 2061-2100 et la période de référence REF sur 1961-2000.

Afin de faciliter la lecture de ces diagrammes et la distinction entre les différents types de vagues, les courbes représentant la cambrure médiane et la hauteur correspondant au quantile 90 sont superposées sur les diagrammes de tendance et de différence. La cambrure des vagues peut être utilisée pour distinguer les houles des vagues intermédiaires et des mers de vent. A la bouée Gascogne, Butel et *al.* (2002) et Le Cozannet et *al.* (2011) estiment que les vagues se situant au-dessus de la cambrure médiane peuvent être considérées comme des houles et les autres comme un mélange de houles et de mers de vent (vagues intermédiaires).

En eau profonde, la théorie linéaire définit la cambrure avec l'équation suivante :
$$C = 2\pi H_s / g T_m^2 .$$

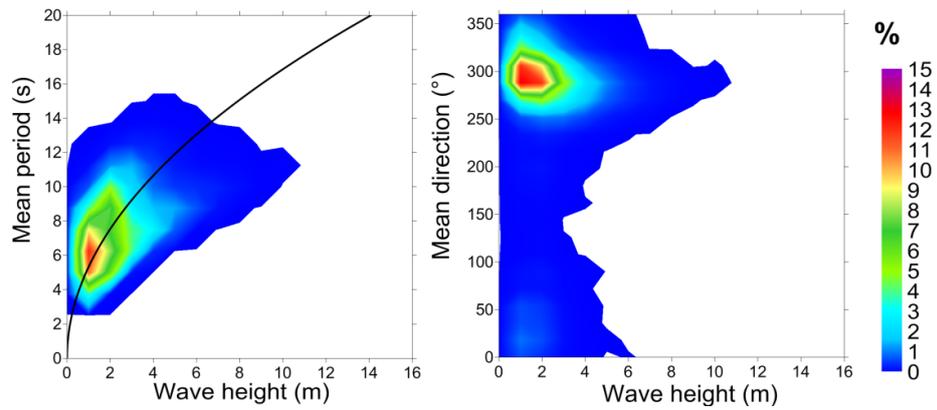


Figure 9 - Exemple de diagrammes bivariés représentant l'occurrence relative des vagues dans les espaces période/hauteur et direction/hauteur réalisés avec les données CERA-40 à la bouée Gascogne recalculées sur une fenêtre temporelle de 6h. Sur le graphique de gauche, la courbe noire représente la cambrure médiane du jeu de données.

4. Description des données et discussion

4.1. RE-ANALYSES ET SIMULATIONS RÉTROSPECTIVES

Pour l'analyse des climats de vagues actuels, cinq jeux de données, dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 1, ont été retenus :

- **deux jeux de données globaux** : **CERA-40** (Caires and Sterl, 2005) et **ERA-INTERIM** (Dee et *al.*, 2011). Il s'agit de ré-analyses, c'est-à-dire qu'ils bénéficient d'assimilation de données ;
- **trois jeux de données régionaux** en Atlantique Nord et proche des côtes françaises : **ANEMOC** (Benoit et *al.*, 2006), **BoBWA** (Charles et *al.*, 2012a) et la simulation rétrospective de Bertin and Dodet (2010) nommée **BAD** dans la suite du rapport. Il s'agit ici de simulations rétrospectives, sans assimilation de données, mais qui ont été calibrées à partir de mesures in-situ.

S'ils n'ont pas une résolution aussi fine que les modèles régionaux, l'intégration de deux modèles globaux dans l'analyse permet (1) d'inclure des données ré-analysées (issues d'un modèle couplé océan-atmosphère avec assimilation de données atmosphériques et hydrodynamiques) qui ne sont disponibles qu'à une échelle globale et (2) de replacer les résultats des modèles régionaux dans un contexte plus global. Le choix des ré-analyses utilisées a été guidé par les différents travaux d'intercomparaison en cours du groupe COWCLIP, ce dernier considérant la ré-analyse ERA-INTERIM comme référence pour la représentation du climat de vagues actuel (globalement comme en Atlantique Nord). Les données ERA-INTERIM n'ayant que 20 ans (1979-2002) en commun avec les autres jeux de données, les données CERA-40 (données de vague corrigées de la ré-analyse ERA-40) ont également été intégrées à l'étude afin de couvrir une période temporelle plus longue. Le choix était initialement porté sur les données MSC50 (disponibles de 1954 à 2005 et qui montraient de meilleures performances ainsi qu'une meilleure résolution dans la littérature, cf. 2.1.1), mais ces données sont la propriété d'Oceanweather Inc. et ne sont pas diffusables sous forme de grille (communication personnelle de V. Swail).

Les jeux de données régionaux sélectionnés sont les trois seules régionalisations dynamiques existantes pour le Golfe de Gascogne à notre connaissance. Il a été choisi d'utiliser les données de Bertin and Dodet (2010) plutôt que celles de Dodet et *al.* (2010), les premières ayant été recalibrées (cf. 2.2.2). D'autres simulations rétrospectives ont été menées en Atlantique Nord mais leur régionalisation concerne d'autres secteurs. Par exemple, Weisse and Günther (2007) ont produit une régionalisation dynamique sur des grilles emboîtées allant de l'Atlantique Nord à la Mer du Nord, mais seules les zones de génération des vagues pour la Mer du Nord sont prises en compte dans les premières grilles du modèle, ce dernier n'étant pas dimensionné pour produire des résultats réalistes sur les autres secteurs (communication personnelle de Ralf Weisse).

Tableau 1- Caractéristiques des données utilisées dans l'étude des climats de vagues actuels.

Jeux de données	Modèles		CARACTERISTIQUES					ASSIMILATION DE DONNEES	VALIDATION	CALIBRATION / CORRECTION
	Code	Forçages	Début	Fin	Résolution spatiale	Fréquence des sorties	Emprise			
CERA-40	WAM	Couplage océan-atmosphère (ECMWF s IFS)	1957	2002	1.5°	6h	Globale	Données satellites (SSM/I, ERS-1 et ERS-2) + Observations de bateaux	Bouées (NOAA/NDBC) + données satellites (TOPEX/Poseidon)	Correction du lis d'origine (données ERA-40) avec les données TOPEX/Poseidon
ERA-INTERIM	WAM	Couplage océan-atmosphère (ECMWF s IFS)	1979	2011	0.7°	3h	Globale	Données satellites (ERS-1 et ERS-2 corrigés, ENVISAT, JASON-1 et JASON-2)	Bouées, observations de bateaux	/
ANEMOC	TOMAWAC	ERA-40 (6h, 0.5°x0.5°)	1979	2002	1° à 20 km 2-3 km	/ 1h	Atl. Nord Côtes françaises	/	Bouées CANDHIS	Ajustement de l'intensité du vent par application d'un facteur correctif
BAD	WW3 (param. Ardhuin et al., 2009)	NCEP/NCAR (6h, 1.875°x1.905°)	1953	2009	1° 0.2°	/ 6h	Atl. Nord Golfe de Gascogne	/	Bouées	Ajustement de l'intensité du vent par application d'un facteur correctif de + 3%
BoBWA	WW3 (param. Ardhuin et al., 2009)	ERA-40 (6h, 1.125°x1.125°)	1958	2001	0.5° 0.1°	/ 6h "grille" 1h "points"	Atl. Nord Golfe de Gascogne	/	Bouées NOAA/NDNC et CANDHIS	Ajustement de l'intensité du vent par modulation de son altitude à Z=4.5m

Les paragraphes suivants présentent une brève description de chaque jeu de données et de leur méthode de calibration et de validation. Ces éléments sont synthétisés dans le Tableau 1. Des informations complémentaires sur ces données sont disponibles dans les articles de référence cités.

4.1.1. ANEMOC

Description

ANEMOC est une base de données numérique d'états de mers produite avec le logiciel TOMAWAC (Benoît et al., 1996), forcée par les vents ERA-40 de l'ECMWF (Uppala, 2005). Elle couvre la période 1979-2002. Les simulations ont été réalisées sur deux modèles emboîtés (cf. Figure 10). Le premier (modèle océanique) couvre une partie de l'océan Atlantique Nord avec une résolution variable de 1° au large à 20 km près des côtes avec un pas de temps de 15 minutes. Le second (modèle côtier) décrit les côtes françaises avec une résolution de quelques kilomètres et un pas de temps côtier de 4 minutes.

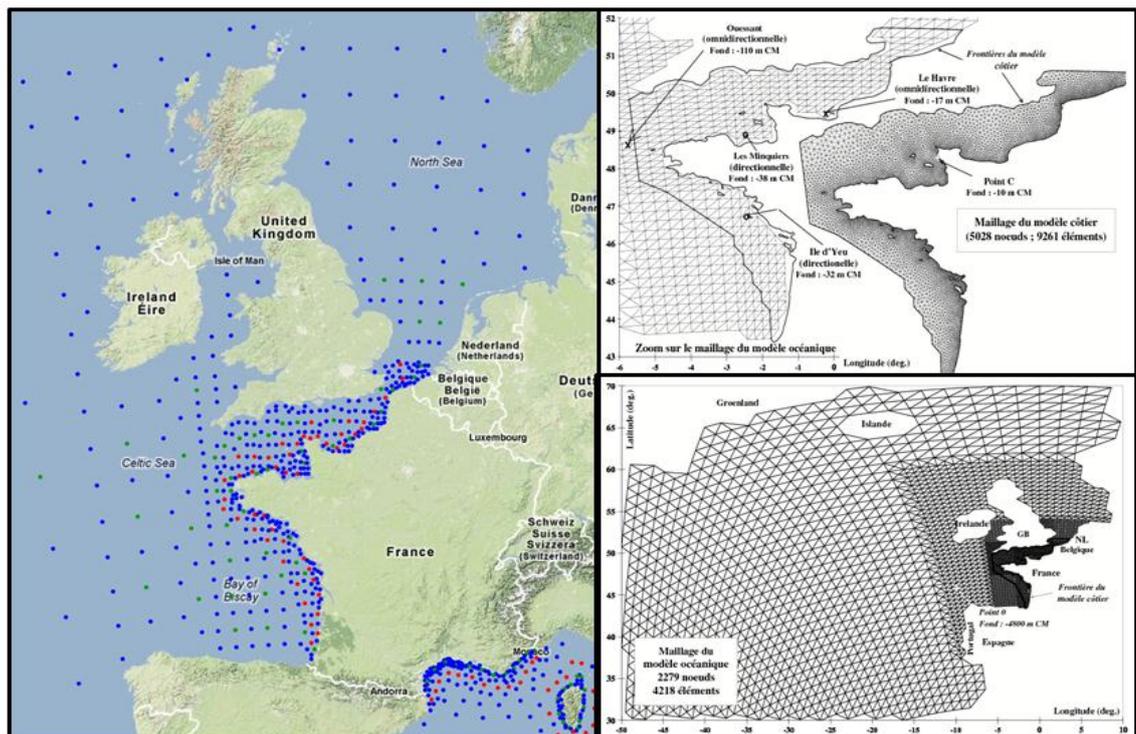


Figure 10 - Gauche : points de la base de données ANEMOC utilisés dans l'étude. Droite : emprises et maillages des modèles océanique (bas) et côtier (haut). Images extraites du site ANEMOC et de Benoît et al. (2006).

Dans les simulations, le niveau marin est considéré comme constant (niveau moyen) et les courants de marée ne sont pas pris en compte. La réfraction, le shoaling et le frottement sur le fond sont considérés dans les deux grilles de calcul mais le déferlement des vagues n'est pris en compte que pour l'emprise côtière.

Les données utilisées pour cette étude sont les séries temporelles horaires des paramètres H_m0 (hauteur significative spectrale), T_m (période moyenne) et D_m (direction moyenne) des différents points disponibles en Atlantique Nord dans la base de données ANEMOC.

Méthode de calibration/validation

Les deux emprises du modèle ont été validées et calibrées à partir des mesures de houlographes de la base de données CANDHIS de 1999 à 2000. Deux bouées directionnelles (Minquiers et Ile d'Yeu) et deux bouées non directionnelles (Ouessant et Le Havre) ont été utilisées.

4.1.2. BOBWA

La base de données créée par Charles et *al.* (2012a) est une simulation rétrospective qui couvre la période 1958-2001. Les simulations ont été effectuées avec le logiciel Wavewatch 3 version 3,14 (Tolman 2009) et la paramétrisation de Arduin et *al.* (2009). Deux grilles emboîtées (en mode two-way nesting) de résolutions respectives $0,5^\circ$ et $0,1^\circ$ ont été forcées avec les vents issus de la ré-analyse ERA-40 (Uppala, 2005).

Dans les simulations, le niveau marin est considéré comme constant (niveau moyen) et les courants ne sont pas pris en compte.

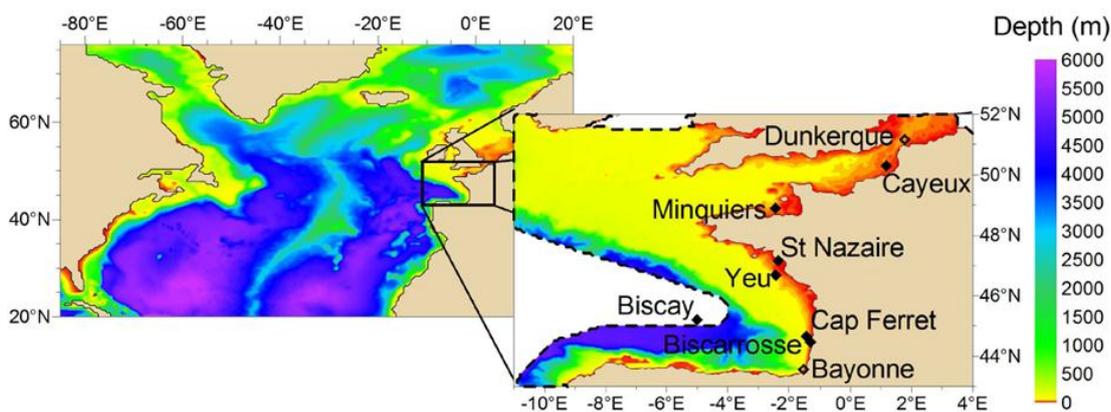


Figure 11 - Emprises des simulations effectuées avec le modèle WW3. Figure extraite de Charles et *al.* (2012a).

Méthode de calibration/validation

Une première analyse sur le vent ERA-40 a montré que celui-ci sous-estimait l'intensité du vent au niveau de la bouée Gascogne. Aussi, la calibration a été effectuée au niveau de la bouée Gascogne en modulant l'altitude du vent en entrée (afin d'augmenter artificiellement sa force). L'altitude choisie (4,5 m) correspond à la comparaison optimale en termes de vagues au niveau de la bouée Gascogne.

Le modèle a également été validé avec neuf bouées (Biscarosse, Cap Ferret 1, Cap Ferret 2, Gascogne, Saint Nazaire, Minquiers, Cayeux, Yeu2 et Yeu 3) sur la période 1998-2002. Cette validation a mis en évidence trois limites du modèle mis en place :

- la marée et les courants de marée n'étant pas pris en compte, les vagues ne sont pas correctement reproduites dans la Manche. Il est recommandé de se limiter à la région du Golfe de Gascogne pour l'exploitation de la base de données ;
- les périodes moyennes des vagues sont surestimées d'environ 1 s sur la majorité des bouées à proximité de la côte ;
- la résolution spatio-temporelle des champs de vent en entrée du modèle de vagues ($Dt = 6h$ et $Dx; Dy = 1:125$) ne permet pas de représenter correctement la mer de vent.

4.1.3. BAD

Description

La simulation rétrospective BAD effectuée par Bertin et Dodet (2010) couvre la période de 1953 à 2009. Elle a été effectuée avec le modèle WW3 (Tolman, 2009) version 3,14 et la paramétrisation de Ardhuin et *al* (2009). Les vents utilisés sont issus de la réanalyse NCEP (Kalnay et *al.*, 1996). Les deux grilles emboîtées sont de résolutions respectives 1° et $0,2^\circ$.

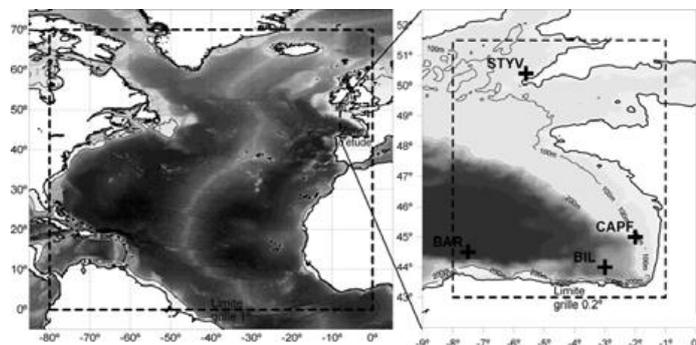


Figure 12 - Emprises des grilles de calcul du modèle WW3 et positions des bouées utilisées pour la validation. Figure extraite de Bertin et Dodet (2010).

Dans les simulations, le niveau marin est considéré comme constant (niveau moyen) et les courants ne sont pas pris en compte.

Méthode de calibration/validation

Pour la calibration, une correction de + 3 % a été appliquée sur le champ de vent initial afin de corriger le biais négatif (de 10 à 30 cm) sur les hauteurs significatives observé sur les bouées OWS Juliet, Bilbao, Cabo Silleiro, Leixoes, Figueira da Foze et Sines dans les simulations de Dodet et *al.* (2010).

Le modèle BAD a ensuite été validé par comparaison avec les bouées de Saint-Yves (STYV, Cornouaille anglaise), Cap Ferret (CAPF), Bilbao (BIL) et Bares (BAR).

4.1.4. CERA-40

Description

ERA-40 est une ré-analyse d'observations météorologiques de couverture globale, de septembre 1957 à août 2002, produite par l'ECMWF (Uppala et *al.*, 2001). Il s'agit de la première ré-analyse pour laquelle un modèle de vagues (WAM, Komen et *al.* 1994) a été couplé à un modèle atmosphérique. Les données assimilées pour les vagues sont principalement des données satellites (ERS-1, ERS-2) et des observations visuelles de bateaux. Les données sont disponibles sur une grille de résolution 1,5° X 1,5° à un pas de temps de 6 h.

Méthode de calibration/validation

Les données ERA-40 ont fait l'objet de validations à l'aide d'observations (Caires et Sterl, 2005) et d'autres ré-analyses (cf. paragraphe 2.1). En plus de la sous-estimation des vagues les plus hautes, les vagues d'ERA-40 montrent des hétérogénéités temporelles dues à l'assimilation de données de différents altimètres. Il n'est pas recommandé par les auteurs d'utiliser ces données pour les analyses sur la variabilité et les tendances.

Les hauteurs significatives ont été corrigées à l'aide d'une méthode de régression non paramétrique (Caires and Sterl, 2005). Cette méthode consiste à estimer le biais entre les hauteurs significatives ERA-40 et les hauteurs significatives de TOPEX/Poseidon (non utilisé dans l'assimilation des données). Le résultat a donné lieu à un nouveau jeu de données sur 45 ans, à un pas de temps toutes les 6h, nommé CERA-40. Caires and Sterl (2005) ont montré une très nette amélioration des performances de ce jeu de données sur toute la gamme des hauteurs significatives (en comparant avec les bouées) et la disparition des hétérogénéités présentes dans les données initiales.

4.1.5. ERA-INTERIM

Description

L'objectif principal d'ERA-INTERIM est de préparer le projet plus ambitieux de ré-analyse couplée océan-atmosphère sur tout le 20^{ème} siècle (ERA-CLIM). Pour cela, un des principaux objectifs d'ERA-INTERIM est de résoudre certaines difficultés rencontrées pour l'assimilation des données dans ERA-40 (notamment en termes de cohérence dans le temps) et l'utilisation d'observations supplémentaires pour la validation/calibration. Pour l'assimilation des données de vagues, les données satellites ERS-1 et ERS-2 ont été corrigées et les données ENVISAT, JASON-1 et JASON-2 ont été rajoutées par rapport à la version ERA-40. Les résolutions spatiales et temporelles ont été significativement affinées et les données sont aujourd'hui disponibles sur une grille de résolution 0,7° X 0,7° toutes les 3 h.

Méthode de calibration/validation

Les simulations de vagues ont été validées à l'aide d'observations issues de bouées et de bateaux. L'amélioration par rapport à ERA-40 est visible pour tous les paramètres et la qualité d'ERA-INTERIM égale celle du système opérationnel de l'ECMWF.

4.1.6. Données IOWAGA

Les données de la simulation rétrospective IOWAGA (Magne et *al.* 2010) sont utilisées uniquement pour l'analyse des performances. Il s'agit d'un modèle basé sur une approche multi-échelles, combinant plusieurs modèles hauturiers de résolution relativement grossière (0,5°) et une série de loupes côtières (dont le modèle Gascogne-Manche de résolution 0,1°). Les simulations ont été réalisées avec le modèle WW3 (paramétrisation TEST441, Arduin et *al.* 2009) et forcées par les champs de vents CFSR (Climate Forecast System Reanalysis ; Saha et *al.*, 2010) de 1988 à 2005.

4.2. PROJECTIONS

De même que pour les simulations rétrospectives, l'ensemble de jeux de données inclut un modèle global en plus des deux modèles régionaux disponibles pour le Golfe de Gascogne (Charles et *al.*, 2012b et Morellato et *al.*, 2010) afin de mettre les résultats régionaux en perspective par rapport à des études à plus grande échelle. Le modèle global utilisé est celui de Mori et *al.* (2010). La description de ces données est synthétisée dans le Tableau 2. Dans la suite du rapport, les données de Morellato et *al.* (2010) sont nommées **MORELLATO**, celles de Mori et *al.* (2010) sont nommées **MORI** et celles de Charles et *al.* (2012b) **BOBWA**.

Tableau 2 - Caractéristiques des projections utilisées dans l'étude des climats de houle futurs.

Jeux de données	Modèles		CARACTERISTIQUES						CALIBRATION / CORRECTION
	Code	Forçages	REF.	SCENARIO	Résolution spatiale	Fréquence des sorties	Paramètres dispo.	Emprise	
MORI	SWAN	Vents modèles climatiques MRI-JMA (1.25° x 1.25°)	1979-2004	A1B 2015 - 2031 2075 - 2100	1.25 °	6h	Hs, Tm, Dm	Globale	Validation sur la période 1979-2004 (sous-estimation générale de 11%)
MORELLATO	TOMAWAC	Vents 10 m modèle ECHAM5/MP10M (1.8° - 6h)	1960 - 2000	A1B - B1 - A2 2000-2100	1° à 20 km	6h	Hs, Dm	Atl. Nord	Calage statistique des vents : augmentation de 6% de la vitesse
BOBWA	WW3	ARPEGE Climat (MeteoFrance)	1961 - 2100	A1B - B1 - A2 2061-2100	0.5° 0.1°	/ 6h	/ Hs, Tm, Dm	Atl. Nord Golfe de Gascogne	Correction quantile-quantile entre la REF et l'hindcast BOBWA pour les paramètres Hs, Tm, Dm

4.2.1. MORI

Description

Cette simulation prospective a été réalisée pour le scénario A1B sur trois périodes temporelles : 1979-2004 (considérée comme la référence pour le climat actuel), 2015-2031 et 2075-2100. Les vagues ont été simulées à l'échelle globale avec le modèle SWAN (Booij et *al.*, 1999) et les vents de surface issus des simulations du modèle climatique développé par MRI-JMA (Meteorological Research Institute in the Japan Meteorological Agency), à une résolution de 1,25° X 1,25°.

Les simulations ont été validées sur la période 1979-2004 par comparaison avec des données de bouées dans l'océan Pacifique. La comparaison montre une sous-estimation générale des hauteurs significatives moyennes d'environ 11 %. Cependant, les auteurs considèrent ces performances comme suffisantes pour analyser l'évolution relative des hauteurs de vagues.

Les paramètres de vague récupérés sont uniquement les hauteurs et les périodes moyennes mensuelles.

4.2.2. BOBWA

Description

Charles et *al.* (2012b) ont produit des simulations prospectives sur la période 2061-2100 pour trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre (A1B, B1 et A2) ainsi qu'une simulation dite de contrôle sur la période 1961-2000. Elles ont été réalisées avec les vents issus des simulations Arpège Climat de Météo-France (dont la résolution spatiale en Atlantique Nord varie entre 20km et 90km à un pas de temps horaire) et le modèle de vagues Wavewatch3 en utilisant la même grille de calcul que pour la simulation rétrospective décrite au paragraphe 4.1.2.

Validation

Les simulations de la période de contrôle ont été calibrées par rapport aux simulations rétrospectives réalisées avec les vents ERA-40 (décrites au paragraphe 4.1.2) à l'aide d'une correction quantile-quantile menée indépendamment sur les hauteurs, périodes et directions des vagues. Cette même correction a été appliquée aux projections sur 2061-2100 pour les trois scénarios en supposant que les erreurs systématiques restent stationnaires dans le contexte du changement climatique.

4.2.3. MORELLATO

Description

Morellato et *al.* (2010) ont également réalisé des simulations prospectives pour les scénarios A1B, B1 et A2 mais la période couverte est continue de 2000 à 2100. La simulation de contrôle couvre également la période 1960-2000. Les simulations ont été réalisées avec le logiciel TOMAWAC sur la grille de calcul « océanique », utilisée pour réaliser la base ANEMOC décrite au paragraphe 4.1.1. Le modèle a été forcé avec les vents à 10m du modèle ECHAM5/MPIOM qui couvrent la période 1960-2100, avec une résolution spatiale de 1,8° et une résolution temporelle de 6 h.

Validation

Un calage statistique des vents a été réalisé en augmentant la vitesse du vent de 6 % afin d'ajuster la hauteur des vagues de la période 1979-2000 à celles de la base ANEMOC. Cet ajustement a également été appliqué à l'ensemble des simulations prospectives.

4.3. BOUÉES

Pour la validation des bases de données, nous avons sélectionné six bouées situées dans le Golfe de Gascogne dont les positions sont reportées sur la Figure 13 et les caractéristiques dans le Tableau 3 :

- deux bouées hauturières situées avant le plateau continental qui sont pertinentes pour l'analyse des performances de tous les modèles (globaux et régionaux) : **Gascogne**, opérée par Météo-France et le MetOffice, et **Brittany (62163)**, opérée par le MetOffice. Ces deux bouées sont non directionnelles. Leurs positions sont assez complémentaires car elles permettent de suivre l'évolution des performances du large vers la côte ;
- quatre bouées côtières le long de la côte atlantique française qui ne sont utilisées que pour l'analyse des modèles régionaux : les bouées CANDHIS **Minquiers**, **Cap Ferret** et **Yeu (1)** ainsi que la bouée **Biscarrosse** (gérée par le CELM). Le choix des bouées a été motivé par la longueur de la période couverte et les paramètres disponibles. Les bouées Yeu 1 et Biscarrosse sont non directionnelles mais leur couverture temporelle est assez longue (cf. Tableau 3). Les bouées Cap Ferret et Minquiers ne couvrent respectivement que deux ans et quatre ans mais fournissent également des informations sur la direction des vagues. Les bouées présentant des biais connus (biais sur les vagues les plus hautes à la bouée CANDHIS Ouessant) ou des discontinuités importantes dans la qualité de la mesure (bouée CANDHIS Oléron) ont été écartées (Charles et *al.*, 2012a).

Tableau 3 - Description et périodes couvertes par les bouées utilisées dans l'analyse des performances.

Bouées	Position	Profondeur	Paramètres	1980	...	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Brittany (62123)	8.5°W, 47.5°N	2100 m	Hs, Tm02													
Gascogne (62001)	5°W, 45.2°N	4500 m	Hs, Tm02													
Minquiers	2.44°W, 48.89°N	38 m	Hs, Tm02, Dp													
Yeu	2.42°W, 46.69°N	35 m	Hs, Tm02													
CapFerret	1.45°W, 44.65°N	54 m	Hs, Tm02, Dm													
Biscarosse	1.32°W, 44.46°N	26 m	Hs, Tm02													

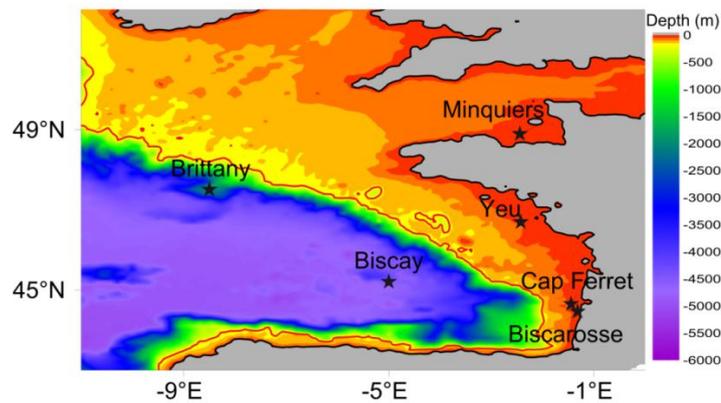


Figure 13 - Position des bouées sélectionnées pour l'analyse des performances des jeux de données.

En ce qui concerne les bouées CANDHIS, le rapport de Kergadallan et *al.* (2012) explicite les tests qualité et les traitements réalisés sur les données brutes afin notamment d'éliminer les valeurs aberrantes (en cas de défaillance du système ou de manipulation du houlographe).

Les données retravaillées par Élodie Charles dans sa thèse (filtrage des valeurs aberrantes par contrôle automatique et manuel, bande de fréquence et fréquence de coupure) sont directement réutilisées pour cette étude. Afin de faciliter la comparaison avec les résultats de simulations, les données ont été recalculées sur une fenêtre temporelle de 6 heures en appliquant une moyenne quadratique (pour les hauteurs et périodes) et linéaire (pour les directions).

4.4. DISCUSSION SUR LES DONNÉES UTILISÉES

4.4.1. Données de validation et calibration des modèles

Notons que les différents jeux de données comparés dans cette étude n'ont pas tous été initialement validés et/ou calibrés sur la même sélection d'observations. La Figure

14 rassemble les bouées utilisées dans la calibration des jeux de données et les bouées utilisées dans cette étude pour comparer les performances des jeux de données. Parmi ces dernières :

- la bouée Gascogne (ou Biscay) a été utilisée dans la calibration de BOBWA (cf. 4.1.2) ;
- les bouées Minquiers et Yeu ont été utilisées dans la calibration des données ANEMOC (cf. 4.1.1) ;
- aucune de ces bouées n'a été utilisée pour calibrer les autres jeux de données : BAD (cf. 4.1.3), CERA-40 (cf. 4.1.4) et ERA-INTERIM (cf. 4.1.5).

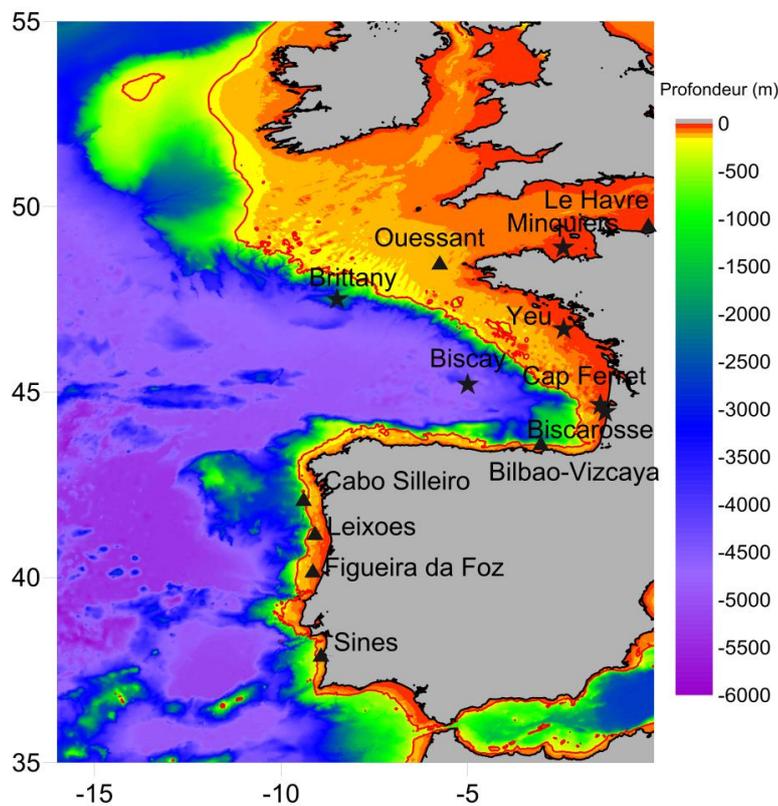


Figure 14 - Position des bouées utilisées pour la comparaison des jeux de données dans cette étude (étoiles) et des bouées utilisées pour la calibration des différents jeux de données (triangles).

Ces différences dans les données utilisées pour la calibration des modèles apportent un éclairage (1) sur les différences observées dans la comparaison des performances des modèles sur certaines bouées et (2) sur les variations spatiales dans les performances des modèles (cf. analyse au paragraphe 5.1). En effet, les modèles qui ont bénéficié de données de calibration dans le Golfe de Gascogne doivent à priori montrer de meilleures performances dans ce secteur.

4.4.2. Position des bouées et résolution des modèles

Dans l'analyse des performances, les jeux de données sont comparés à des données de bouées. Or, selon la résolution des modèles, les positions des points d'extraction peuvent s'éloigner significativement des positions exactes des bouées.

Pour les jeux de données globaux, dont la résolution est assez grossière, la différence de position entre les bouées et les données extraites peut être assez importante. C'est particulièrement le cas pour CERA-40, dont la résolution horizontale est de 1.5° (cf. Figure 15) :

- pour les bouées hauturières Gascogne et Brittany (de profondeurs respectives 4500 m et 2100 m), les écarts de position s'élèvent à une cinquantaine de kilomètres. Cependant, pour de telles profondeurs, cette différence ne devrait pas altérer la comparaison de manière significative ;
- pour les bouées plus côtières, comme Yeu et Cap-Ferret, les écarts de position sont plus problématiques. En effet, les modèles globaux ne représentant pas l'ensemble des processus en zone côtière (réfraction, déferlement, etc.), la comparaison des données CERA-40 avec ces bouées n'est pas pertinente (on attend notamment une surestimation des hauteurs de vagues). Les données ont toutefois été extraites afin d'analyser les résultats du modèle à différentes latitudes en termes de tendances et d'évolutions futures (paragraphes 5.2.3 et 5.3.2).

Pour les jeux de données régionaux, les positions d'extraction sont quasiment les mêmes que celles des bouées à la résolution près des modèles (une dizaine de kilomètres). Cependant, pour la base de données ANEMOC, les écarts de position peuvent être plus importants car nous ne disposons que des points de grille de niv. 1.

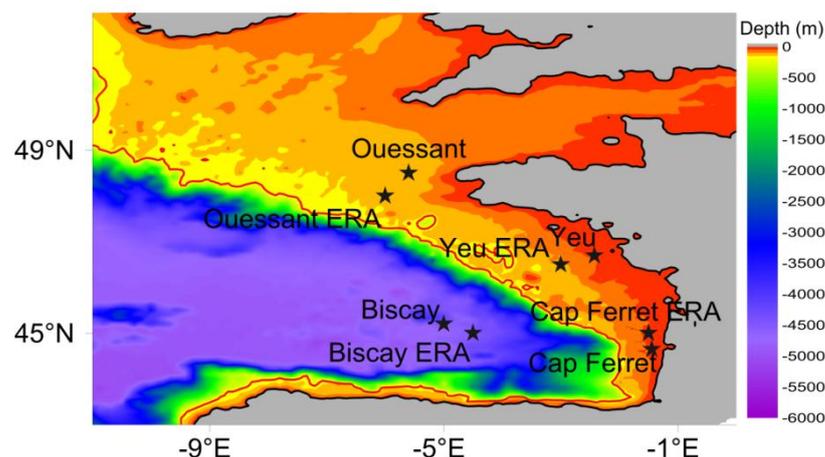


Figure 15 - Position des points sélectionnés pour l'analyse ponctuelle. Pour les données CERA-40, le point d'extraction exact des données est précisé (position-ERA) car la résolution de la grille induit des écarts non négligeables.

5. Résultats

Ce paragraphe présente les résultats obtenus pour l'analyse des performances des différentes simulations rétrospectives (5.1), la comparaison des tendances actuelles sur les paramètres Hs, Tm et Dm, ainsi que sur l'occurrence des différents types de vagues (5.2), et la comparaison des évolutions futures sur les paramètres Hs, Tm, Dm et l'occurrence des différents types de vagues (5.3).

5.1. PERFORMANCES

L'analyse des performances est basée sur la comparaison des simulations rétrospectives aux mesures de 6 bouées décrites au paragraphe 4.3. On analyse d'abord les performances sur les hauteurs significatives (5.1.1) puis, sur les périodes et les directions (5.1.2). Dans le paragraphe 5.1.3, une analyse complémentaire sur les hauteurs significatives est menée par type de vagues.

Tableau 4 - Synthèse des performances sur les Hs. « n » indique le nombre d'observations.

Buoys	n	Dataset	Significant wave height (SWH)			
			R ²	Bias	Rmse	SI
Brittany	10664	BoBWA	0.97	0.09	0.41	0.15
		ANEMOC	0.96	0.15	0.52	0.19
		BAD	0.95	0.22	0.63	0.23
		ERA-INTERIM	0.97	-0.09	0.36	0.13
		C-ERA40	0.97	-0.19	0.41	0.15
		IOWAGA	0.98	0.07	0.34	0.12
Biscay	6023	BoBWA	0.98	0.00	0.32	0.13
		ANEMOC	0.97	0.10	0.45	0.17
		BAD	0.92	0.05	0.61	0.24
		ERA-INTERIM	0.98	-0.24	0.39	0.15
		C-ERA40	0.97	-0.19	0.41	0.15
		IOWAGA	0.98	-0.11	0.29	0.11
Biscarosse	17585	BoBWA	0.95	0.11	0.28	0.21
		ANEMOC	0.94	0.26	0.45	0.33
		BAD	0.90	0.22	0.45	0.33
Cap Ferret	1256	BoBWA	0.97	-0.18	0.32	0.17
		ANEMOC	0.96	0.00	0.30	0.16
		BAD	0.95	0.00	0.33	0.18
		IOWAGA	0.98	-0.05	0.22	0.12
Yeu 1	8368	BoBWA	0.97	-0.10	0.29	0.15
		ANEMOC	0.96	-0.14	0.35	0.18
		BAD	0.94	0.10	0.46	0.24
Yeu 2	2723	BoBWA	0.97	-0.05	0.25	0.15
		ANEMOC	0.96	-0.09	0.29	0.17
		BAD	0.95	0.22	0.45	0.27
Minquiers	15278	BoBWA	0.96	-0.09	0.22	0.17
		ANEMOC	0.94	-0.25	0.35	0.28
		BAD	0.92	-0.18	0.33	0.27

5.1.1. Analyse des hauteurs significatives

Les résultats sur les hauteurs significatives, synthétisés dans le Tableau 4, sont analysés bouée par bouée, du large (bouées Brittany et Gascogne) vers la zone côtière (bouées Yeu, Cap-Ferret, Minquiers et Biscarrosse). Pour les deux bouées hauturières, les cinq jeux de données sont exploités mais pour les quatre bouées côtières, seuls les jeux de données régionaux sont analysés. Pour chaque bouée, les indices statistiques sont représentés sur des diagrammes de Taylor et des diagrammes quantile-quantile. Le mode de lecture des diagrammes de Taylor est explicité au paragraphe 3.3.1.

Très au large : la bouée Brittany par 2100 m de fond

Les résultats à la bouée Brittany (62163) sont indiqués sur la Figure 16 (graphes de dispersion et diagramme de Taylor pour l'ensemble des vagues) et la Figure 17 (diagramme de Taylor pour les vagues supérieures au quantile 90).

De manière générale, les modèles représentent correctement les hauteurs significatives. Les coefficients de corrélations sont tous supérieurs à 0,95, l'amplitude des erreurs est faible (RMSE < 60 cm), et les indices de dispersion sont en moyenne inférieurs à 20 % (cf. Figure 16 et Tableau 4). Cependant, on remarque :

- une surestimation générale des modèles régionaux (BOBWA, ANEMOC et BAD) qui présentent des biais positifs de 0cm à 10 cm et des écarts-types normalisés supérieurs à celui des observations ;
- une sous-estimation générale des modèles globaux (CERA-40 et ERA-INTERIM) dont les biais sont négatifs (respectivement de -19 cm et -9 cm) et les écart-types normalisés inférieurs à celui des observations.

Ces différences sont d'autant plus marquées que les quantiles sont élevés. Sur les graphes de dispersion (Figure 16), on remarque que les modèles globaux sous-estiment d'environ 5 % les hauteurs supérieures à 6-7 m tandis que les modèles régionaux surestiment tous de plus de 10 % les hauteurs supérieures à 4 m. Toutefois, la surestimation des hauteurs pour les quantiles les plus élevés est moins importante dans les données BOBWA. Celle-ci reste de l'ordre de 10 %, même pour les vagues les plus hautes, alors qu'elle atteint plus de 20 % dans les données BAD et ANEMOC.

Le diagramme de Taylor pour les hauteurs supérieures au quantile 90 (Figure 17) confirme ces résultats. Les données BAD et ANEMOC surestiment plus fortement les hauteurs de vagues (RMSE > 1m et écart-types normalisés supérieurs à 1,75) que les données BOBWA (RMSE ~0.8 et écart-type normalisé de d'environ 1,5). Même s'il sous-estime légèrement les hauteurs de vagues les plus élevées, ERA-INTERIM montre globalement les meilleures performances sur ce type de vagues.

En résumé, à la bouée Brittany, qui se situe très au large dans le Golfe de Gascogne, les modèles globaux, en particulier ERA-INTERIM, montrent de meilleures

performances que les modèles régionaux. Parmi ces derniers, BOBWA reste le plus proche des observations.

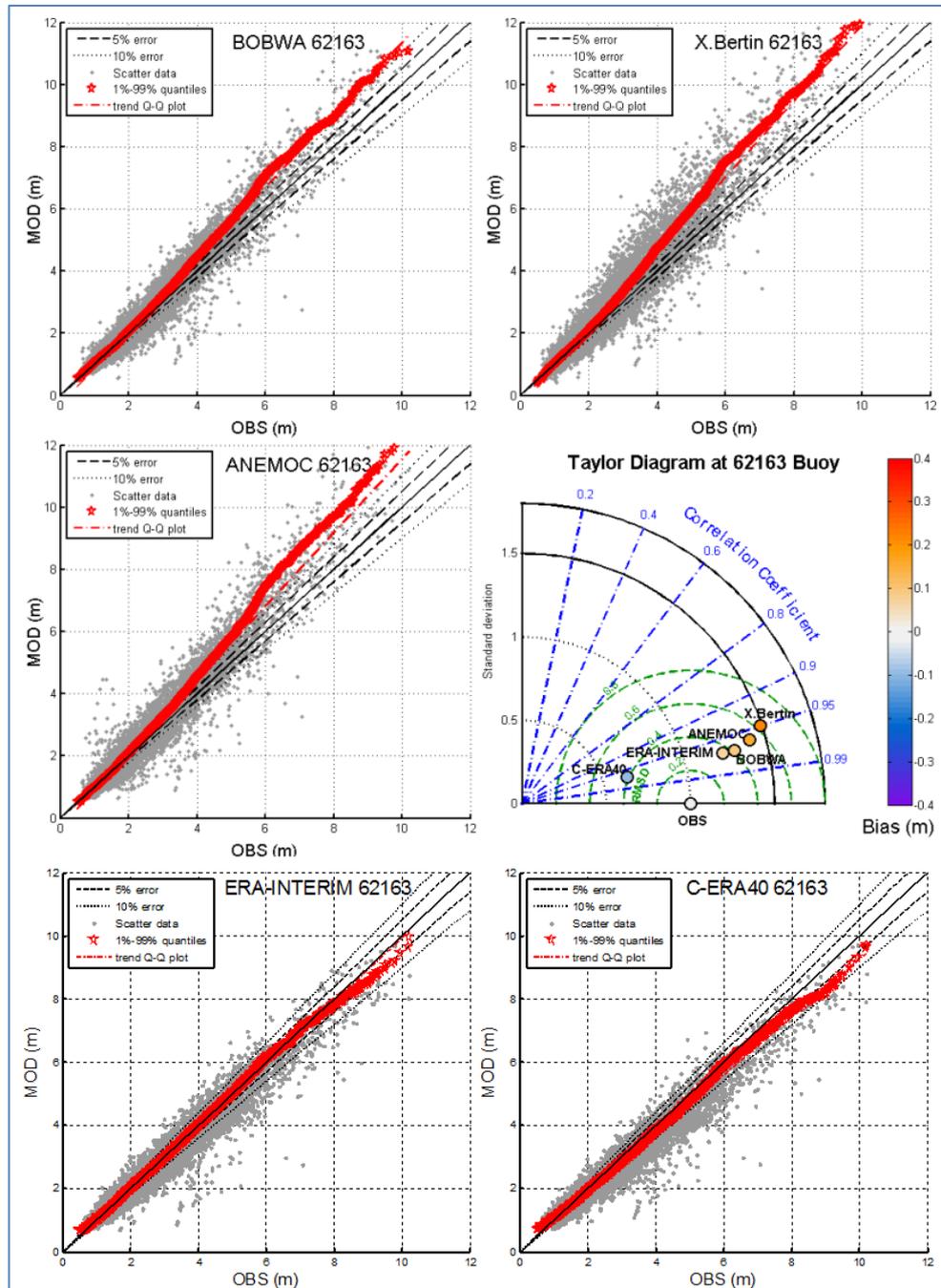


Figure 16 - Performances sur les hauteurs significatives à la bouée Brittany : (1) Diagrammes de dispersion (gris) superposés à la tendance linéaire des quantiles de vagues (rouge) pour chaque jeu de données et (2) diagramme de Taylor.

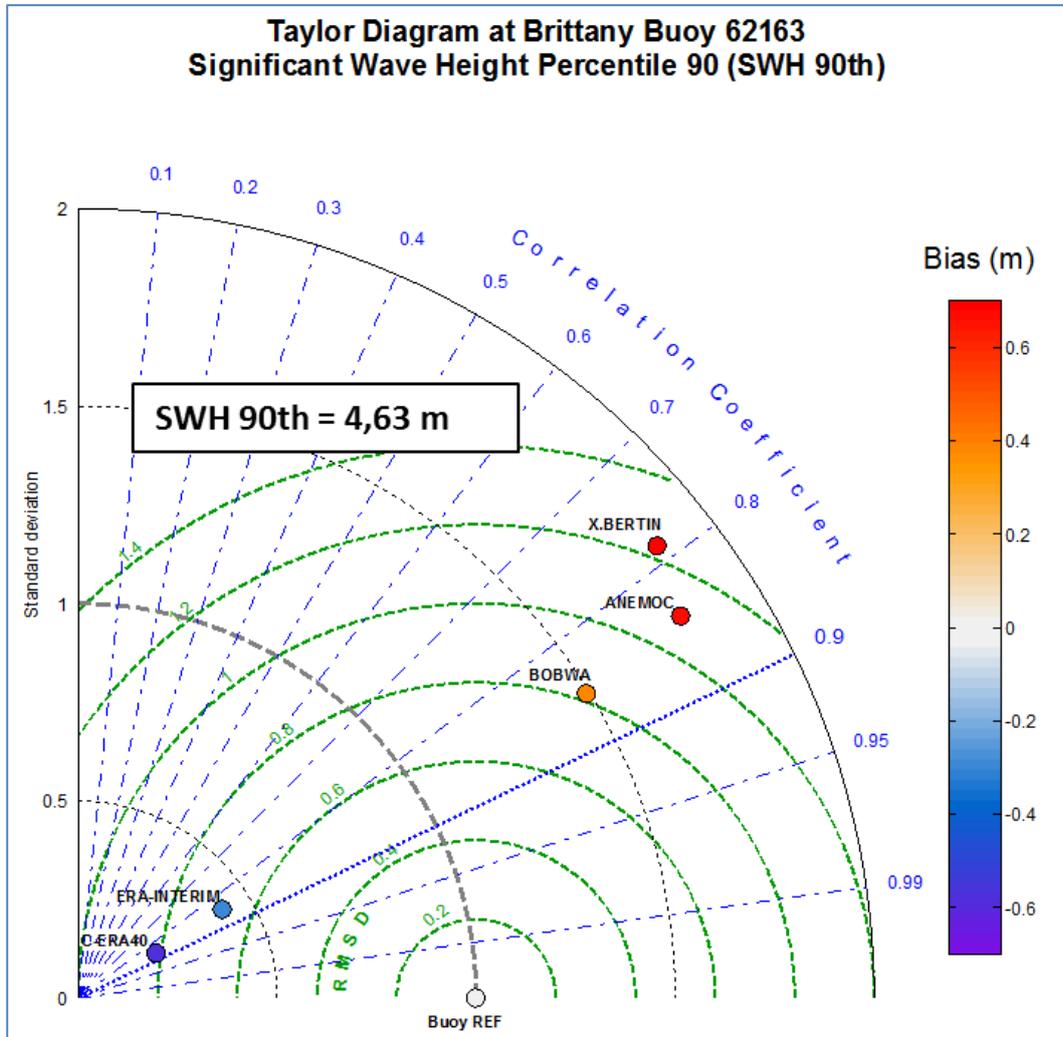


Figure 17 - Performances sur les hauteurs significatives supérieures au quantile 90 (~4,6 m) à la bouée Brittany : Diagramme de Taylor.

Au large, la bouée Gascogne par 4500 m de fond

Les résultats à la bouée Gascogne (62001) sont indiqués sur la Figure 18 (graphes de dispersion et diagramme de Taylor pour l'ensemble des vagues).

De manière générale, les jeux de données sont d'une qualité comparable. Leurs coefficients de corrélation varient entre 0,92 et 0,98 et leurs RMSE restent inférieures à 80 cm (cf. Tableau 4). On remarque les mêmes comportements des modèles qu'à la bouée Brittany, à savoir : (1) une sous-estimation générale des modèles globaux et (2) une surestimation générale des modèles régionaux.

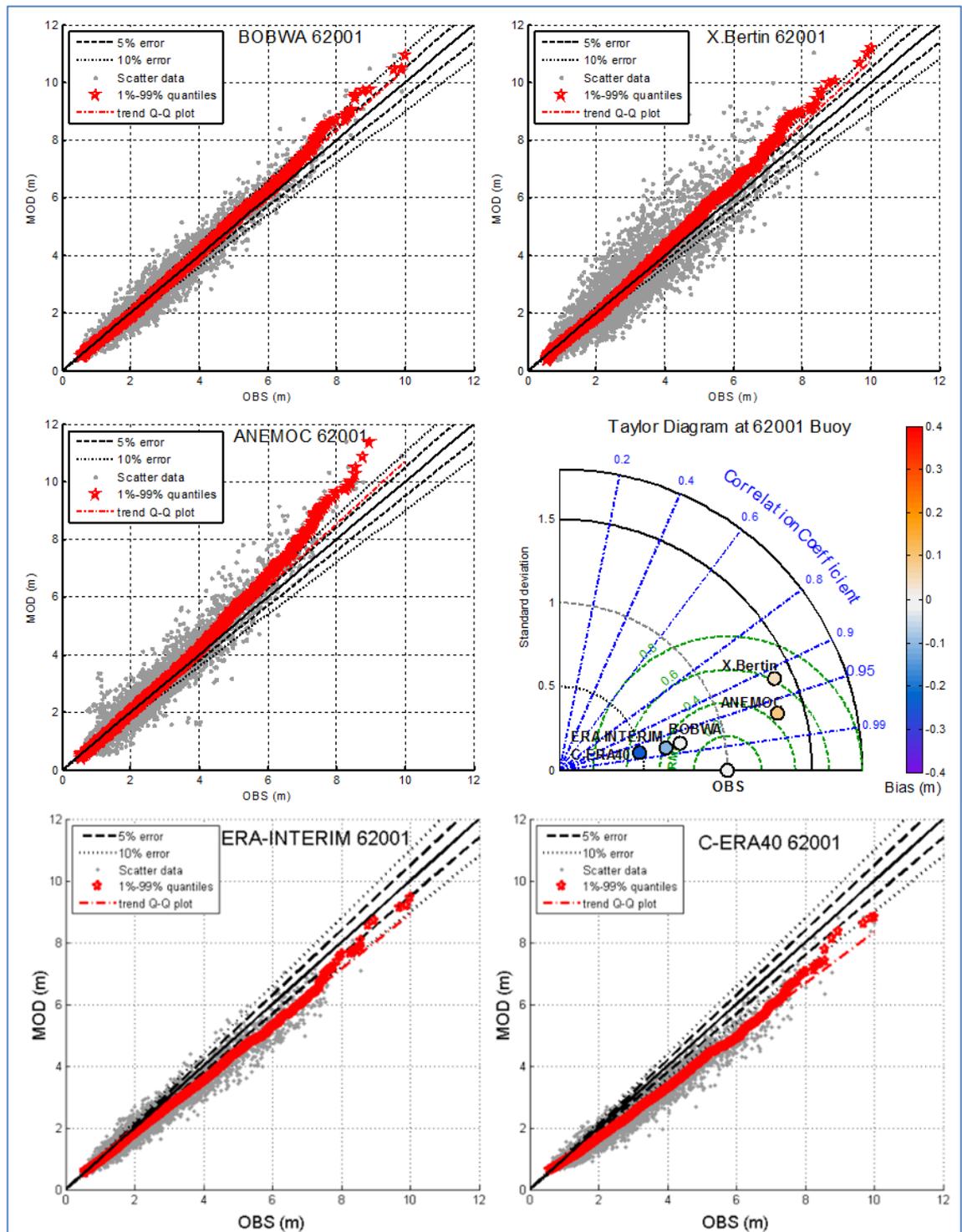


Figure 18 - Performances sur les hauteurs significatives à la bouée Gascogne : (1) Diagrammes de dispersion (gris) superposés à la tendance linéaire des quantiles de vagues (rouge) pour chaque jeu de données et (2) diagramme de Taylor.

Cependant, la sous-estimation des modèles globaux est plus importante qu'à la bouée Brittany, notamment pour les hauteurs plus faibles (à partir de 2 m). Les erreurs du modèle ERA-INTERIM restent de l'ordre de 10 % alors que celles du modèle CERA-40 atteignent plus de 20 %.

En revanche, pour les modèles régionaux, les hauteurs de vague sont globalement mieux représentées qu'à la bouée Brittany. Les biais positifs des trois modèles sont légèrement plus faibles à la bouée Gascogne (cf. Tableau 4) et la surestimation des hauteurs concerne les quantiles plus élevés. BOBWA présente moins de 10 % d'erreur jusqu'à des hauteurs de 7m et les modèles BAD et ANEMOC jusqu'à des hauteurs d'environ 5 m. Il est à noter que la forte dispersion dans les données BAD reste présente sur les deux bouées (indice de dispersion de l'ordre de 25 %).

En résumé, à la bouée Gascogne, BOBWA montre les meilleures performances (Biais 0 cm, RMSE, 32 cm et Indice de dispersion de 13 %) et dépasse le modèle ERA-INTERIM qui présentait les plus faibles erreurs statistiques au niveau de la bouée Brittany.

En zone côtière : les bouées Biscarosse, Cap Ferret, Yeu et Minquiers.

Bouée Biscarosse en Atlantique, profondeur 26 m

Les résultats au niveau de la bouée Biscarosse sont présentés sur la Figure 19. On remarque une surestimation générale importante de la hauteur des vagues dans tous les jeux de données. Toutefois, la comparaison des trois jeux de données révèle que les erreurs statistiques des données BOBWA (biais : 11 cm, RMSE : 28 cm, R^2 : 0.95, Indice de dispersion(SI) : 21 %) sont globalement plus faibles que pour les données ANEMOC et BAD (biais : respectivement de 26cm et 22cm, RMSE de 45cm et SI de 33 %).

Bouée Yeu en Atlantique, profondeur 45 m

Pour la bouée Yeu, les résultats sont présentés sur la Figure 20. Les trois jeux de données présentent ici une qualité très comparable. Contrairement aux bouées précédentes (Brittany, Gascogne et Biscarosse), on ne note pas de surestimation systématique des hauteurs significatives. Les données BOBWA et ANEMOC tendent même à globalement sous-estimer les hauteurs de vagues (écart-types normalisés de l'ordre de 0,7 et biais respectifs de -10 et -14 cm). Pour les vagues les plus hautes (supérieures à 7m), ANEMOC tend à surestimer les hauteurs significatives alors que BOBWA les sous-estime d'environ 5 %. Quant à lui, le modèle BAD tend vers une surestimation de l'ensemble des hauteurs de vagues et montre globalement des erreurs statistiques plus importantes qu'ANEMOC et BOBWA.

Bouée Minquiers en Manche, profondeur 38 m

À la bouée Minquiers (Figure 21), les trois jeux de données sont de qualités comparables et présentent tous une sous-estimation des hauteurs de vagues (biais compris entre -9 cm et -25 cm). Néanmoins, le modèle BOBWA présente le

coefficient de corrélation le plus fort (0,96) et les erreurs statistiques les plus faibles (SI plus faible de 10 % et RMSE plus faible de 10 cm par rapport aux données ANEMOC et BAD).

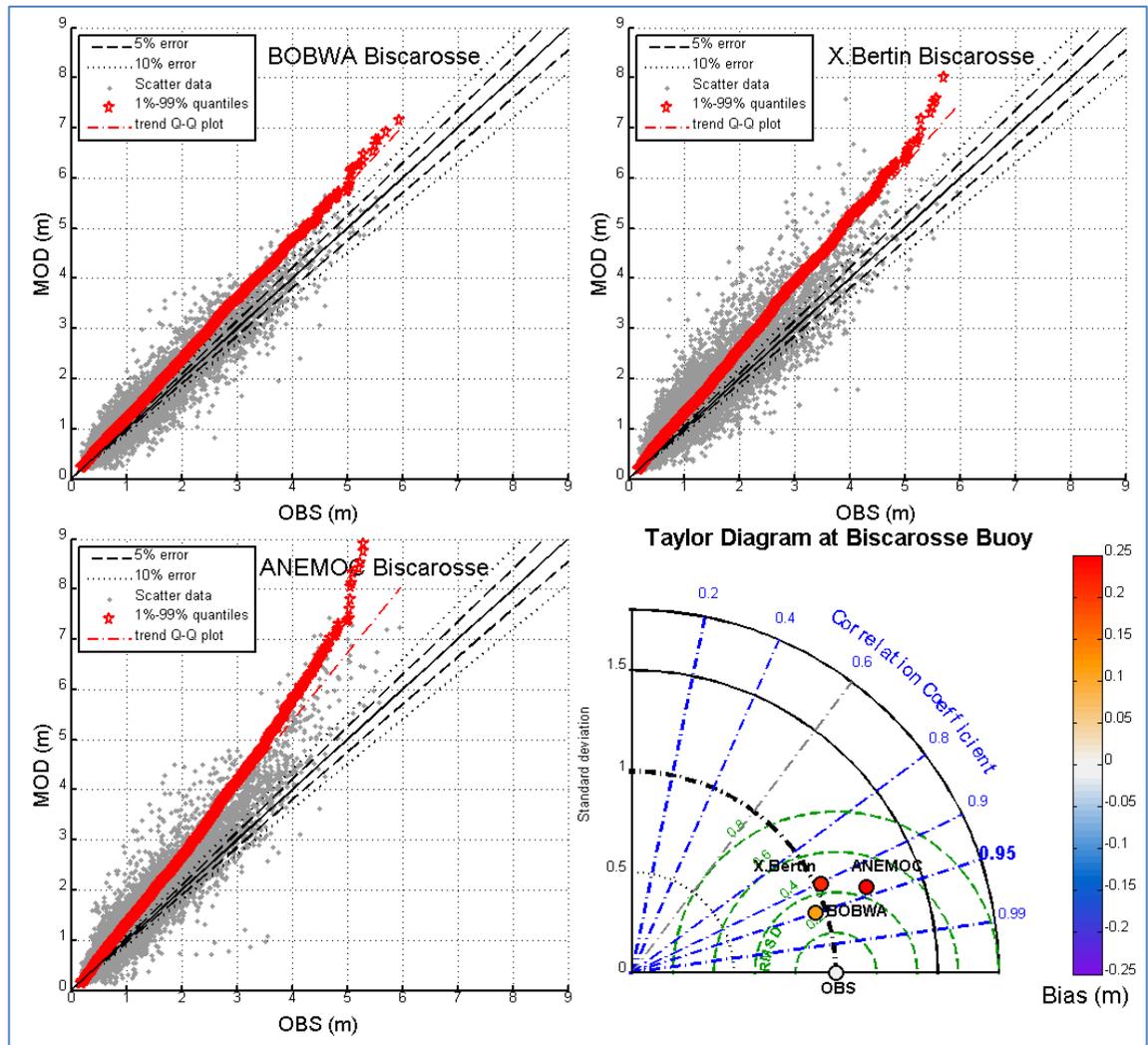


Figure 19 - Performances sur les hauteurs significatives à la bouée Biscarrosse : (1) Diagrammes de dispersion (gris) superposés à la tendance linéaire des quantiles de vagues (rouge) pour chaque jeu de données et (2) diagramme de Taylor.

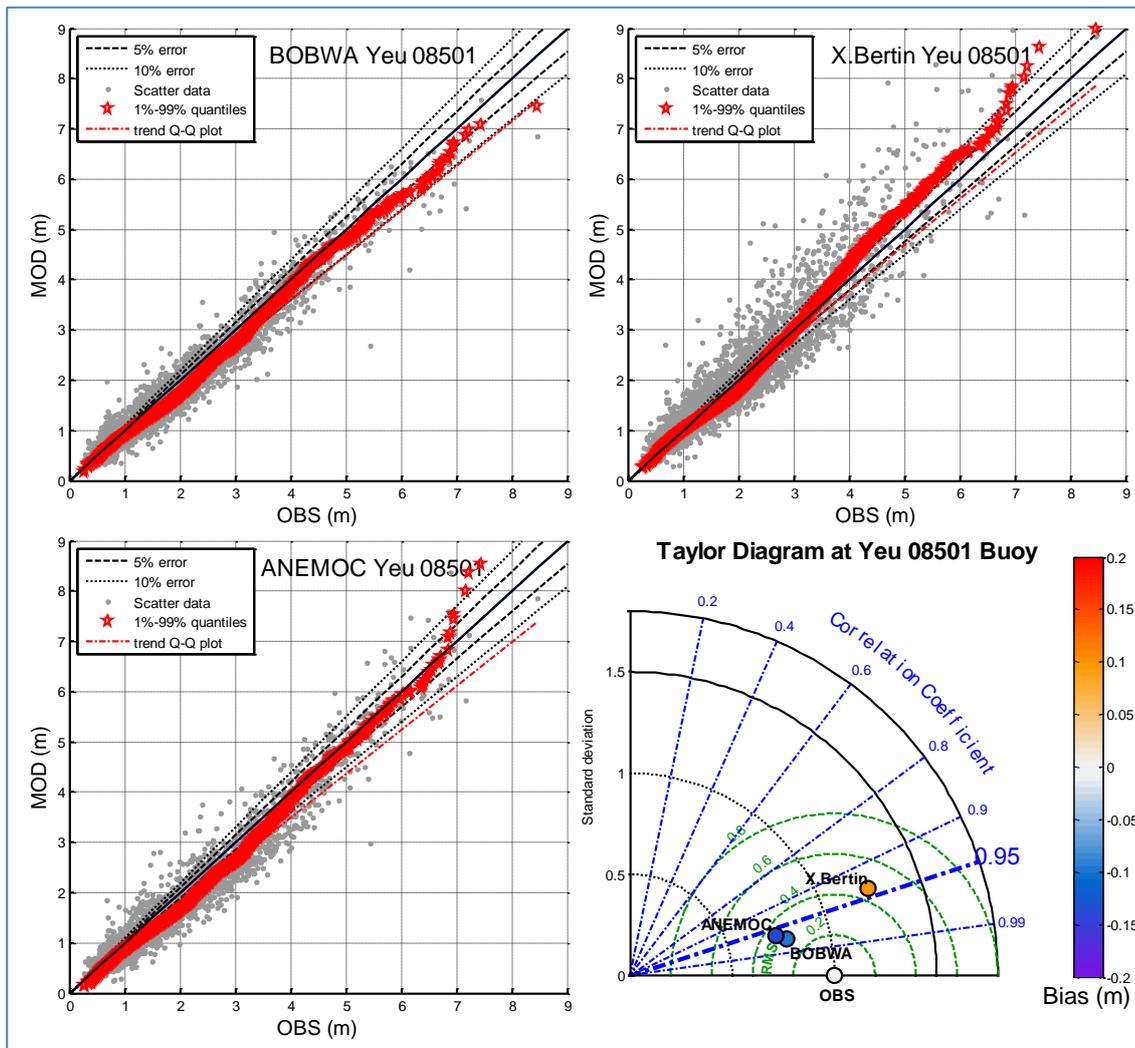


Figure 20 - Performances sur les hauteurs significatives à la bouée Yeu : (1) Diagrammes de dispersion (gris) superposés à la tendance linéaire des quantiles de vagues (rouge) pour chaque jeu de données et (2) diagramme de Taylor.

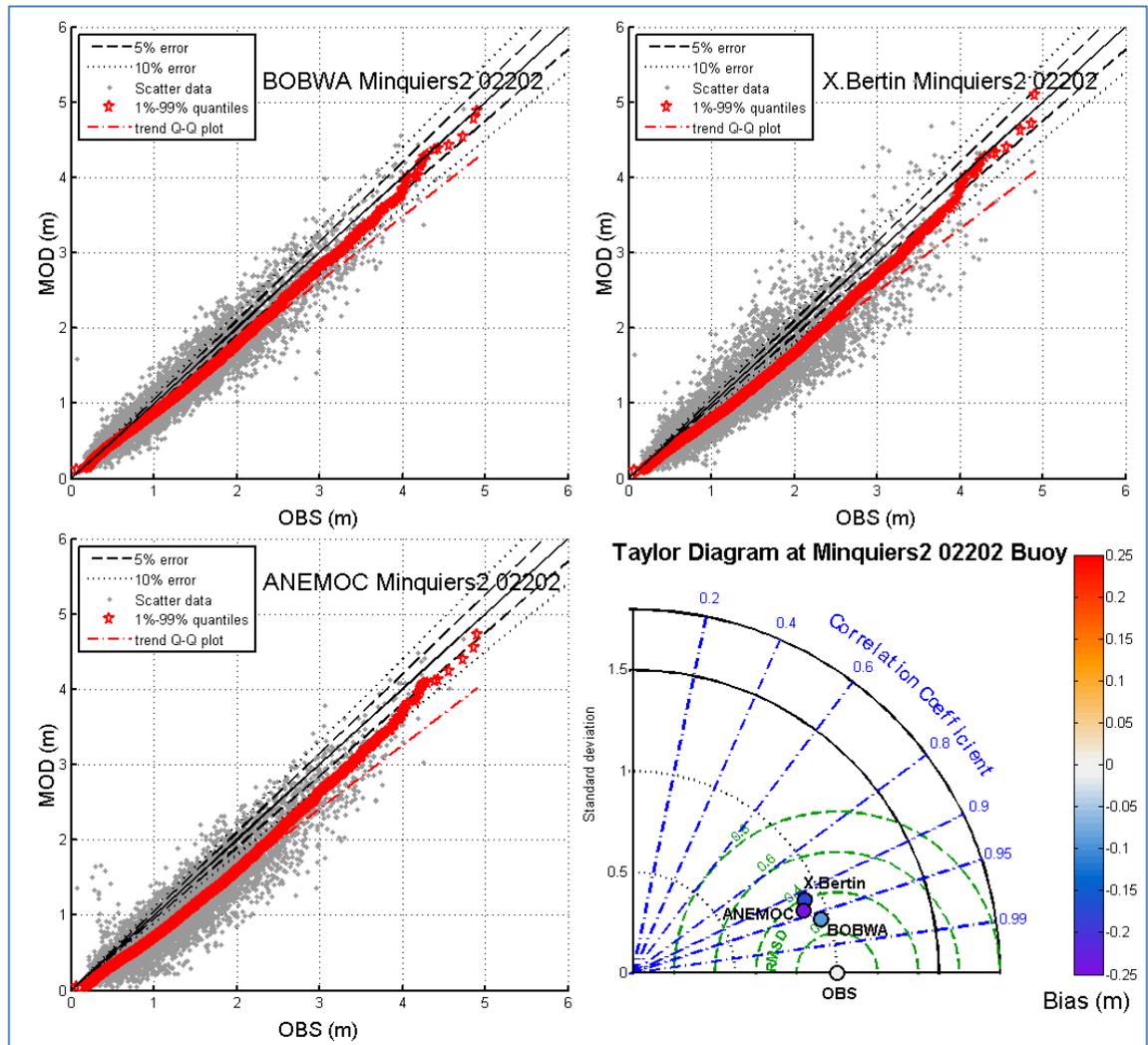


Figure 21 - Performances sur les hauteurs significatives à la bouée Minquiers : (1) Diagrammes de dispersion (gris) superposés à la tendance linéaire des quantiles de vagues (rouge) pour chaque jeu de données et (2) diagramme de Taylor.

Synthèse des performances sur les hauteurs significatives

Les outils d'analyse mis en place ont permis de mettre en évidence les performances relatives des différents modèles. La Figure 22 présente une synthèse des diagrammes de Taylor sur les hauteurs significatives pour toutes les bouées et tous les jeux de données. Sur ce graphe, les données IOWAGA ont également été intégrées pour les bouées Brittany et Gascogne. Il ressort (1) une surestimation générale des données ANEMOC et BAD (zone rosée), (2) une sous-estimation générale des modèles globaux (ERA-INTERIM et CERA-40) bien que performants au niveau des bouées hauturières (zone bleutée). De manière générale, les données BOBWA présentent des erreurs statistiques plus faibles (corrélations supérieures à 0.95, erreurs RMS inférieures à 39 cm et biais compris entre -10 et 10 cm) et se rapprochent davantage des observations (zone jaune). Les données IOWAGA présentent des performances similaires (voire meilleures) au jeu de données BOBWA sur les deux bouées hauturières.

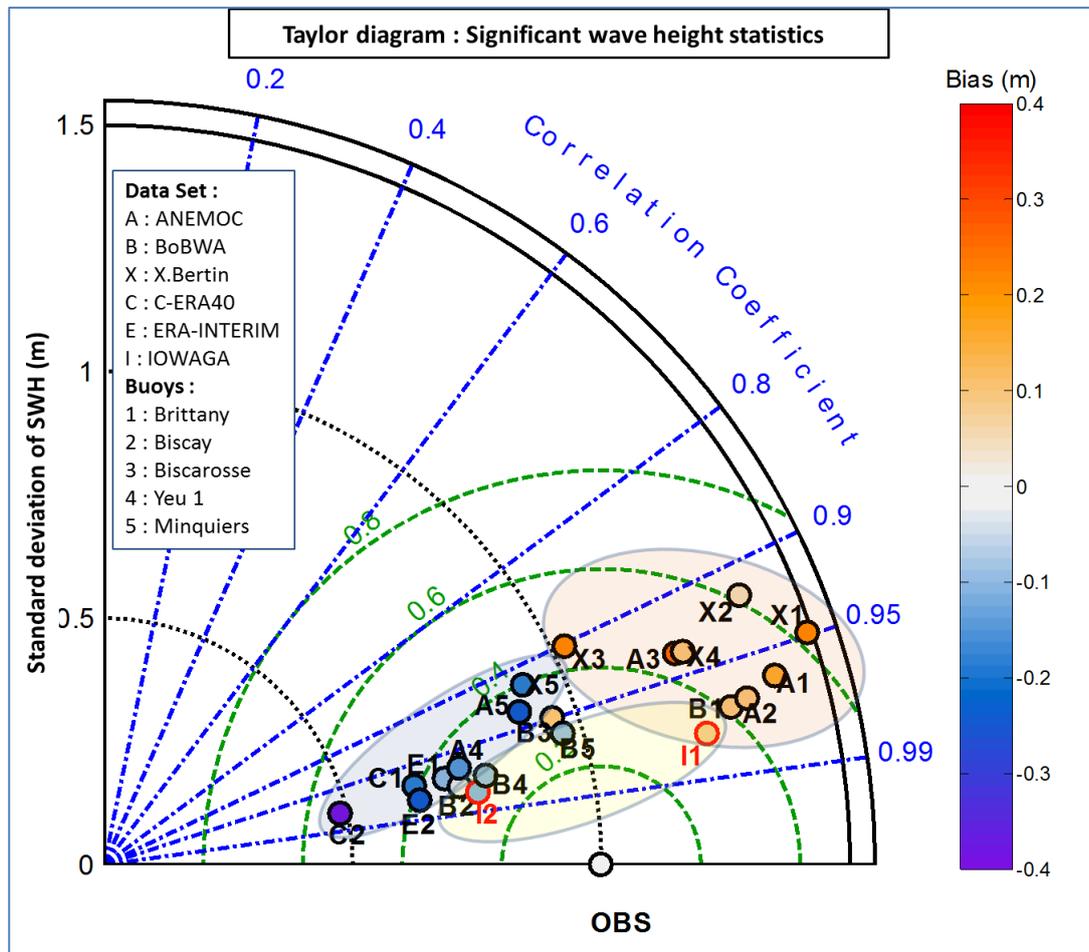


Figure 22 - Synthèse des performances sur les hauteurs significatives pour tous les jeux de données et toutes les bouées.

5.1.2. Analyse des périodes et des directions

Périodes moyennes

Les erreurs statistiques calculées pour les périodes moyennes de tous les jeux de données sont synthétisées dans le Tableau 5 et sur le diagramme de Taylor Figure 23.

De manière générale, la reproduction des périodes moyennes est meilleure pour les bouées hauturières (Brittany et Gascogne), pour lesquelles les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0.8, que pour les bouées côtières (Yeu, Cap-Ferret et Minquiers), pour lesquelles les corrélations oscillent entre 0.5 et 0.8. Sur les bouées hauturières, on ne distingue pas deux comportements différents pour les modèles globaux d'une part et les modèles régionaux d'autre part (comme c'était le cas pour les Hs). Les modèles globaux restent cependant légèrement plus performants que les modèles régionaux.

Tableau 5 - Synthèse des performances sur les périodes moyennes.

Buoys	n	Dataset	Mean wave period (MWP)			
			R ²	Bias	Rmse	SI
Brittany	10664	BoBWA	0.89	1.60	1.87	0.26
		ANEMOC	0.91	-0.23	0.74	0.10
		BAD	0.87	1.61	1.87	0.26
		ERA-INTERIM	0.92	1.42	1.56	0.22
		C-ERA40	0.87	-0.01	0.72	0.10
Biscay	6023	BoBWA	0.93	-0.45	0.75	0.10
		ANEMOC	0.90	-0.21	0.91	0.12
		BAD	0.81	-0.02	1.02	0.14
		ERA-INTERIM	0.93	1.29	1.48	0.20
		C-ERA40	0.82	0.16	1.05	0.14
Biscarosse	17585	BoBWA	0.66	1.08	1.87	0.29
		ANEMOC	0.67	0.68	1.58	0.24
		BAD	0.74	1.01	1.79	0.28
Cap Ferret	1256	BoBWA	0.85	0.87	1.3	0.19
		ANEMOC	0.78	1.02	1.66	0.24
		BAD	0.74	1.12	1.66	0.24
Yeu 1	8368	BoBWA	0.72	0.78	1.74	0.20
		ANEMOC	0.69	-1.35	2.17	0.25
		BAD	0.75	-1.36	2.00	0.23
Yeu 2	2723	BoBWA	0.58	0.67	1.42	0.24
		ANEMOC	0.76	0.91	1.46	0.24
		BAD	0.82	0.84	1.20	0.20
Minquiers	15278	BoBWA	0.75	0.24	1.02	0.19
		ANEMOC	0.55	0.46	1.78	0.33
		BAD	0.72	0.93	1.52	0.28

En zone côtière, les modèles régionaux surestiment tous, de manière quasi-systématique, les périodes moyennes (sauf à la bouée Yeu 1). Aucun jeu ne se distingue particulièrement en termes de performance sauf à la bouée Minquiers pour laquelle les données BOBWA se rapprochent plus des observations.

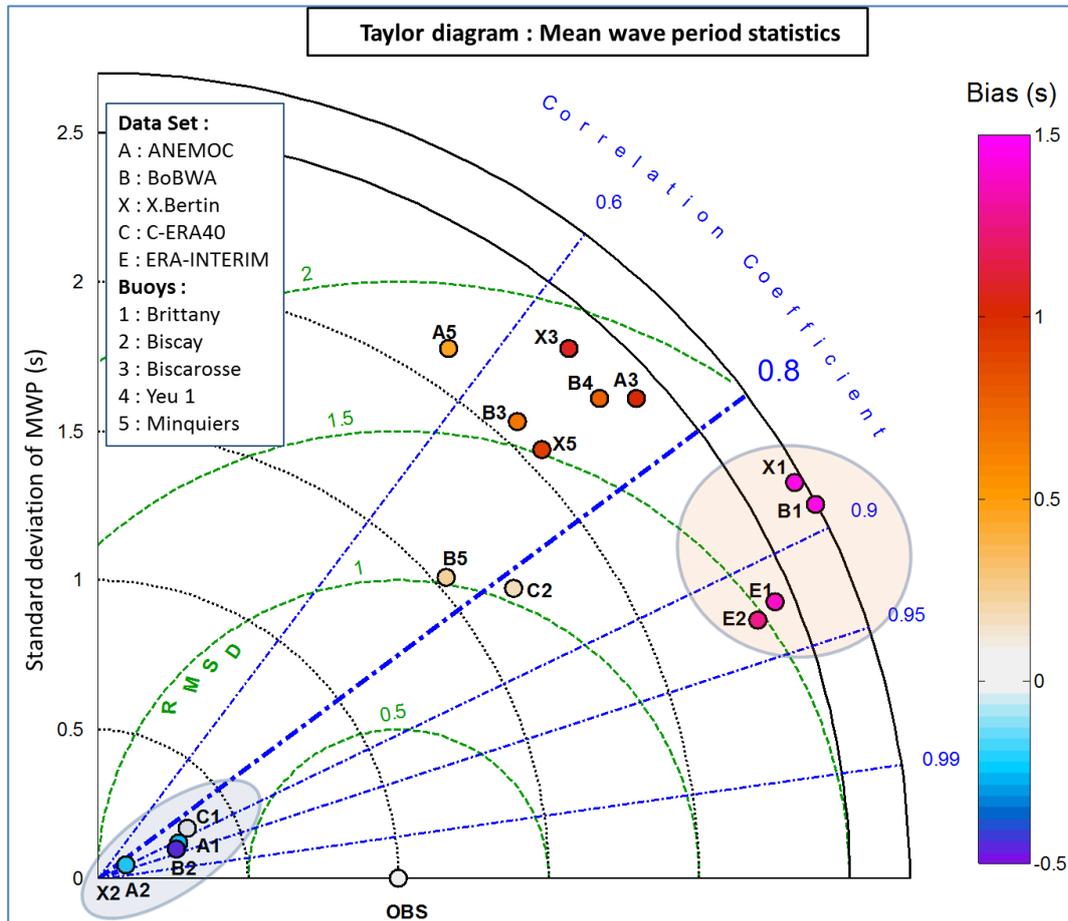


Figure 23 - Synthèse des performances sur les périodes moyennes pour tous les jeux de données et toutes les bouées.

Directions moyennes

L'analyse sur les directions est présentée sous la forme d'histogrammes de distribution à la bouée Yeu (Figure 24) pour l'Atlantique et la bouée Minquiers (Figure 25) pour la Manche. Ces bouées sont les seules à fournir des données sur les directions (cf. Tableau 3).

Les statistiques de performances réalisées pour les hauteurs significatives et périodes ne sont pas reproduites pour les directions. En effet, la reproduction des directions de vagues est généralement moins bonne que celle des autres paramètres, en particulier pour les modèles globaux et régionaux dont la discrétisation est généralement assez

grossière. Ici, les performances sur les directions sont comparées à l'aide de graphiques de distribution.

Sur la façade Atlantique (Figure 24), la direction des vagues est relativement bien reproduite. L'ensemble des données reproduit fidèlement la direction de provenance principale qui se situe autour de 270°. Pour les directions les moins fréquentes (correspondant aux vagues générées plus localement et venant du Nord et de l'Est), la comparaison avec les observations est moins bonne mais reste correcte.

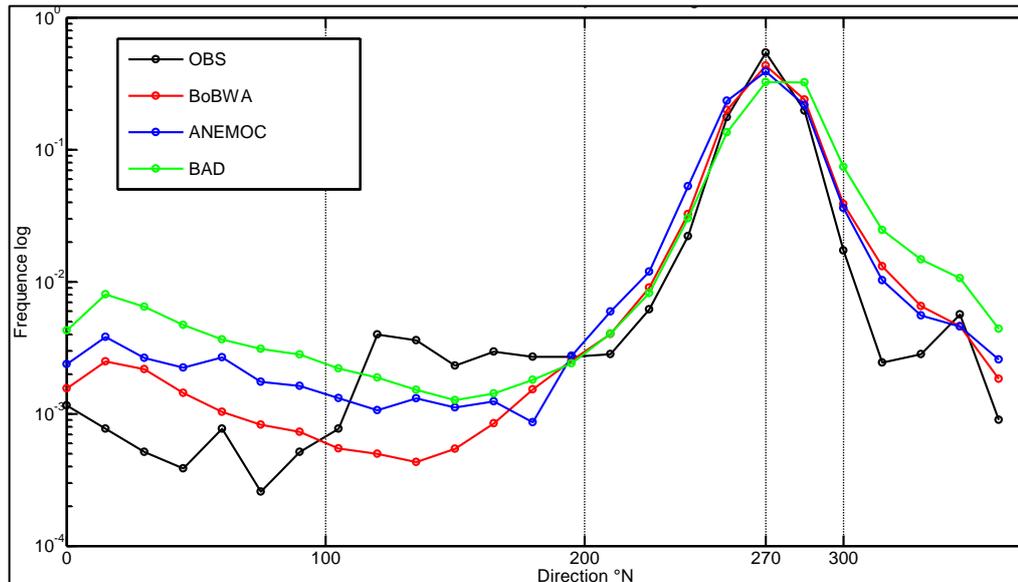


Figure 24 - Distribution (en log10) des directions moyennes de vagues à la bouée Yeue.

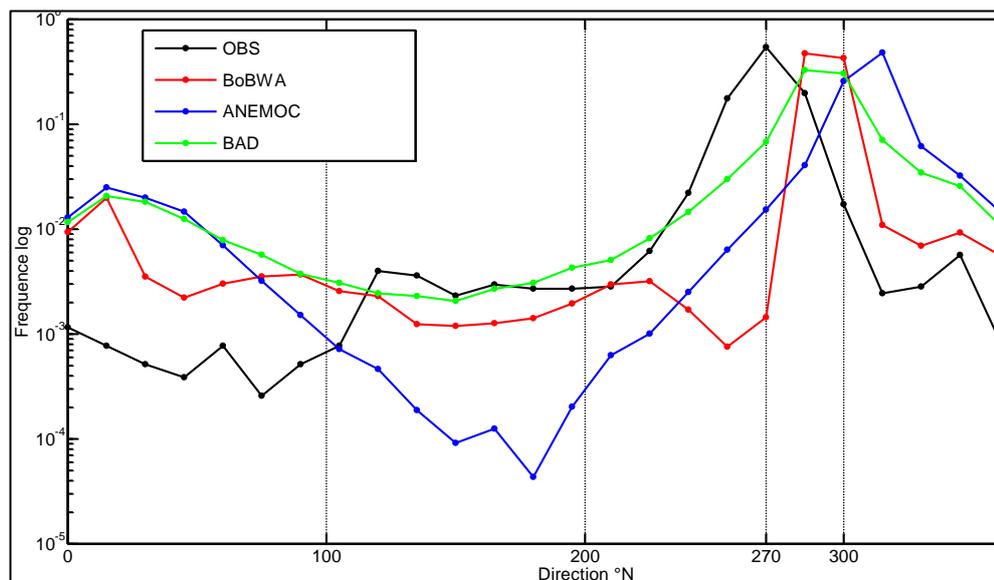


Figure 25 - Distribution (en log10) des directions moyennes de vagues à la bouée Minquiers.

En Manche (Figure 25), la reproduction des directions des vagues est moins bonne. Pour les trois modèles régionaux, on observe une rotation de la direction de provenance principale d'environ 30° vers le Nord. Cette rotation est légèrement plus importante dans les données ANEMOC (jusqu'à 40°). Elle pourrait s'expliquer par la non prise en compte des hauteurs d'eau et des courants de marée dans les modèles de vague. Alors qu'ils ont un impact négligeable sur la façade Atlantique, leur intensité dans la Manche crée des interactions houle-courant importantes. Dans sa thèse, Elodie Charles a constaté que les erreurs statistiques étaient encore plus importantes pour les bouées situées en Manche (Cayeux et Dunkerque). Dans cette étude, on s'intéresse uniquement au Golfe de Gascogne.

5.1.3. Analyse par type de vague

Afin d'affiner l'analyse des performances par type de vague, une classification des états de mer a été réalisée avec le jeu de données BOBWA, à partir des séries temporelles des trois paramètres des vagues (Hs, Tm, Dm) au niveau des bouées **Gascogne et Brittany**. Pour chaque point, un algorithme K-means (Le Cozannet et *al.*, 2011) a été utilisé pour décrire le signal de vagues en 12 classes qui ont ensuite été regroupées en différents types selon leur barycentre et leur saisonnalité. Pour les deux bouées, 5 regroupements de classes ont été définis :

- la classe correspondant aux **mers de vent (1)** est caractérisée par un barycentre avec de faibles périodes et hauteurs significatives (Hs~1,2 m, Tm~4 s), ainsi qu'une direction de provenance est-nord-est (Dm~30°). Ces vagues sont également caractérisées par un fort étalement directionnel à l'intérieur de la classe (~140°). Elles sont présentes toute l'année et représentent 5 % des données ;
- les **vagues de tempête (2)** correspondent aux classes les plus énergétiques avec de très fortes hauteurs de vague et de longues périodes (Hs>6 m et Tm>9 s). Elles sont de provenance nord-ouest à ouest-nord-ouest et sont présentes pendant les mois d'hiver. Elles représentent 6 % des vagues ;
- les autres classes ont été regroupées selon leur saisonnalité (**annuelle (3)**, **estivale (4)** et **hivernale (5)**) et sont composées à la fois de houles et de mers de vent.

À partir de la classification, réalisée avec les données BOBWA, un numéro de classe (et donc un type de vague) peut être associé à chaque pas de temps. Pour tous les jeux de données, ainsi que pour les mesures des bouées, on associe le même numéro de classe pour un même pas de temps. Puis, les performances sur les hauteurs significatives sont recalculées pour les 5 types de vagues ainsi prédéfinis.

Les résultats sont synthétisés au travers de diagrammes de Taylor regroupant à la fois les cinq jeux de données et les regroupements de vagues décrits précédemment (cf. *Figure 27* pour la bouée Brittany et *Figure 28* pour la bouée Gascogne). Notons ici que la référence (correspondant aux observations) pour chaque groupement de vagues est différente, et chaque groupement est positionné par rapport à sa propre référence.

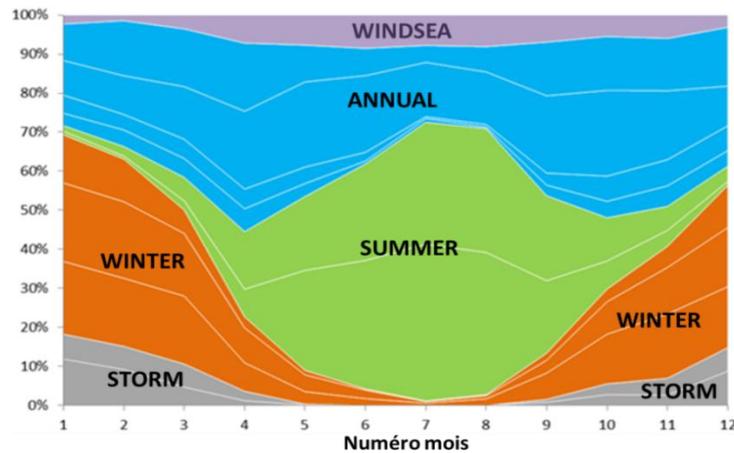


Figure 26 - Exemple de variations saisonnières de l'occurrence relative des classes de vagues à la bouée Gasconne pour le jeu de données BOBWA.

Les mers de vent (1)

Les mers de vents ne sont représentées que pour la bouée Gasconne (cf. Figure 28). En effet, à la bouée Brittany les points représentant les mers de vent sortent du cadre du graphique car les erreurs statistiques sont assez importantes. À la bouée Gasconne, on ne note pas de grande disparité dans les performances des différents jeux de données. Cependant, les données BAD s'écartent davantage des observations que les autres modèles (avec une corrélation plus faible de l'ordre de 0,8).

Les vagues hivernales (5) et les vagues de tempêtes (2)

Pour les vagues d'hiver, on retrouve les résultats sur les vagues supérieures au quantile 90 de la Figure 17, à savoir une surestimation des hauteurs significatives pour les trois modèles régionaux et une sous-estimation pour les modèles globaux. Les modèles ERA-INTERIM et BOBWA restent les plus fidèles aux observations.

La classe des vagues de tempêtes est la moins bien reproduite. De même que les quantiles les plus élevés et les vagues hivernales, ces vagues sont :

- fortement surestimées par les modèles régionaux pour lesquels on observe des écarts-type normalisés supérieurs à 1,5. Cette surestimation est plus importante pour les données ANEMOC et BAD que pour les données BOBWA ;
- fortement sous-estimées par les modèles globaux (écart-type normalisé de l'ordre de 0,5). Le modèle ERA-INTERIM montre toutefois de meilleures performances que CERA-40.

Les vagues annuelles (3) et estivales (4)

Les vagues annuelles et estivales sont bien reproduites pour les jeux ANEMOC, BOBWA et ERA-INTERIM à la fois aux bouées Brittany et Gascogne (R^2 proche de 0,95, RMSE < 40 cm et écart-type normalisé proche de 1). Les données CERA-40 et BAD montrent des erreurs légèrement plus importantes (écart-type normalisé de l'ordre de 0,5 et RMSE ~ 60 cm).

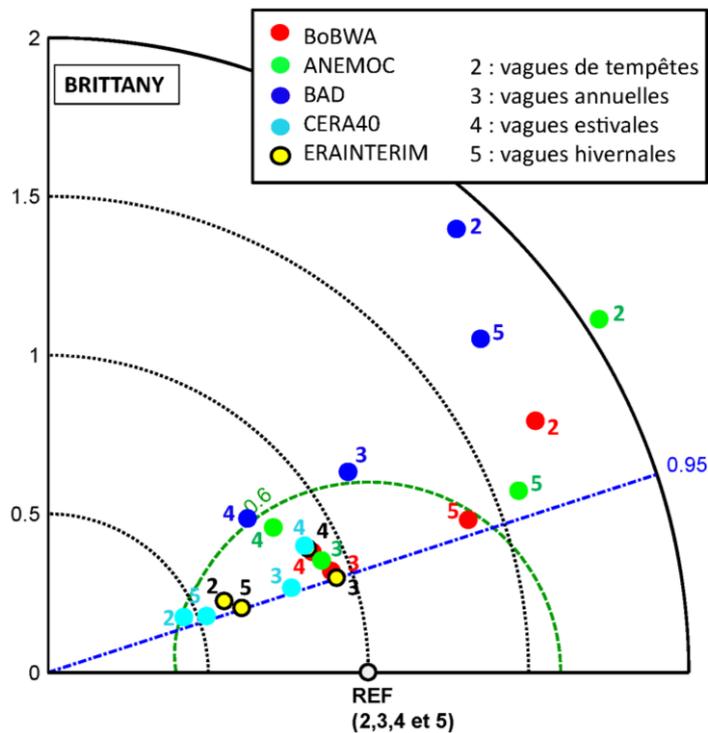


Figure 27 - Diagramme de Taylor synthétique à la bouée Brittany présentant, pour chaque jeu de données, les statistiques des cinq types de vagues au regard des observations (REF). Chaque pastille ou étoile est comparée à sa propre référence (classe de vagues 2, 3, 4 ou 5).

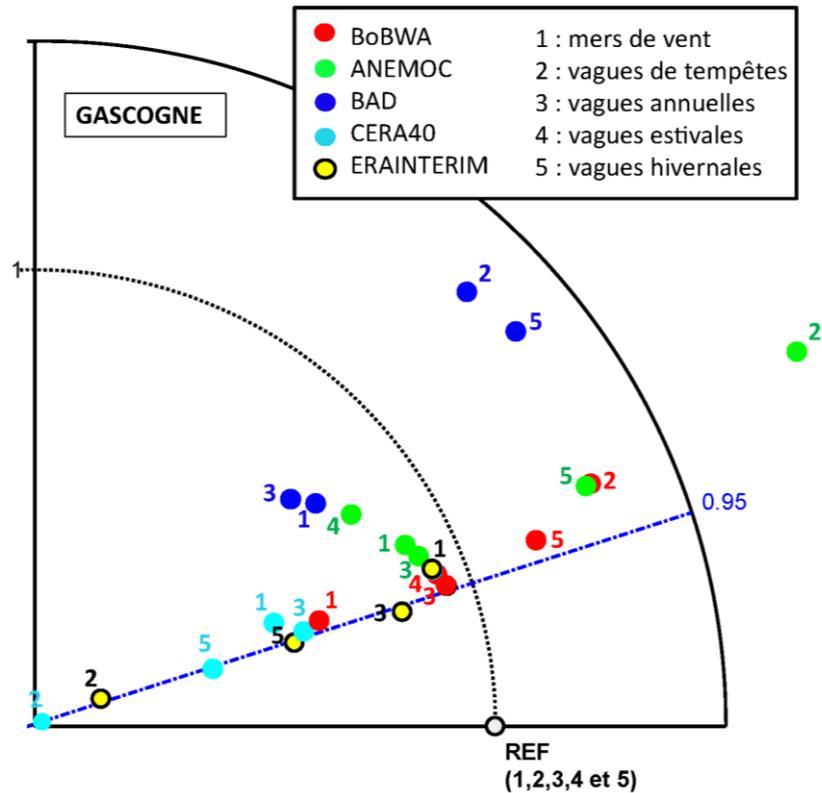


Figure 28 - Diagramme de Taylor synthétique à la bouée Gascogne présentant, pour chaque jeu de données, les statistiques des cinq types de vagues au regard des observations (REF). Chaque pastille ou étoile est comparée à sa propre référence (classe de vagues 2, 3, 4 ou 5).

5.1.4. Synthèse

Synthèse des comparaisons

Suite à l'analyse des performances des cinq jeux de données, on retient les conclusions suivantes :

- au large, on observe une sous-estimation des modèles globaux et une surestimation des modèles régionaux sur l'ensemble du Golfe de Gascogne, en particulier pour les quantiles les plus élevés. Parmi les modèles régionaux, BOBWA est celui qui représente le mieux tous les types de vagues (y compris les vagues de type tempête), qui sont fortement surestimées par les deux autres modèles, en particulier ANEMOC ;
- en zone côtière, BOBWA montre les meilleures performances sur toutes les bouées étudiées. Les deux autres modèles régionaux tendent à surestimer les vagues les plus hautes (sauf à la bouée Minquiers). On note également une surestimation quasi systématique des périodes pour tous les jeux de données ;

- en Manche, les trois modèles régionaux tendent plutôt à sous-estimer les hauteurs de vague et présentent tous une rotation des directions d'environ 30° vers le nord. Ces différences par rapport aux observations sont probablement dues à la non prise en compte de la marée et des courants de marée qui ont un fort impact dans ce secteur ;
- les données IOWAGA restent les plus performantes mais ne couvrent actuellement qu'une dizaine d'années et ne peuvent pas encore être utilisées pour l'analyse de tendances.

Ces performances sont liées à la combinaison de plusieurs paramètres dont la résolution spatio-temporelle, les processus physiques pris en compte, les données de vent utilisées ou encore la méthode de calibration.

Si la sous-estimation systématique des modèles globaux peut s'expliquer par leur faible résolution spatio-temporelle, les différences observées entre les modèles régionaux sont plus difficiles à interpréter. Parmi les données analysées, BOBWA et ANEMOC ont été produits avec les mêmes données de vent, et BOBWA et BAD ont été produits avec le même modèle de vagues ainsi que la même paramétrisation. Or, on n'observe pas plus de similarités entre BOBWA et l'un ou l'autre des autres jeux de données. Les méthodes et les données de calibration différentes utilisées (modulation de l'altitude du vent pour BOBWA, correction de l'intensité du vent pour BAD et ANEMOC) semblent avoir plus d'impact sur la qualité des jeux de données que les modèles (qui prennent en compte à peu près les mêmes processus) et les données de vent brutes.

Commentaires par rapport aux données de calibration des modèles

Il faut garder à l'esprit que les modèles sont optimisés pour donner des erreurs minimales sur les bouées utilisées pour la calibration et que chaque modèle utilise des bouées différentes (cf. 4.4). Il est donc normal d'observer une variabilité spatiale dans les performances des jeux de données. Par exemple, BOBWA a été calibré avec les données de la bouée Gascogne. Les bonnes performances BOBWA dans le secteur du Golfe de Gascogne peuvent donc en partie s'expliquer ainsi. A l'inverse, pour le jeu de données BAD, aucune bouée n'a été utilisée dans ce secteur pour la calibration. Il est donc normal que ses performances soient de moindre qualité. En revanche, elles doivent être accrues dans les secteurs où se situent les données de calibration (comme sur les côtes portugaises).

5.2. CLIMATS DE VAGUES ACTUELS

5.2.1. Moyennes annuelles et saisonnières

Ce paragraphe est basé sur l'analyse des cartes de moyennes annuelles et saisonnières des paramètres de vagues sur la période commune à tous les jeux de données (1979-2001). Pour faciliter l'intercomparaison, les cartes de différences relatives des quatre jeux de données (CERA-40, ERA-INTERIM, BAD, ANEMOC) avec

le jeu BOBWA ont aussi été exploitées. Le choix de BOBWA comme référence est motivé par ses bonnes performances au large comme le long de la façade Atlantique (cf. paragraphe 5.1). Ici, l'objectif est d'analyser la répartition spatiale des paramètres de vagues et de cibler les zones pour lesquelles il y a des différences notables entre les jeux de données. Seules les cartes de la saison hivernale sont présentées en illustration (car la variabilité spatiale et les différences entre les jeux de données sont plus accentuées pour cette saison) mais l'ensemble des cartes saisonnières est présenté en annexe 1.

Hauteurs significatives

De manière générale, les moyennes annuelles des hauteurs significatives de vagues (Hs) varient spatialement, en diminuant depuis le large (3 m/3,5 m vers 10° W) jusqu'à la côte (1,5 m aux abords des côtes françaises). Les quantiles 90 (Hs -90) montrent des motifs similaires mais plus prononcés (de 4,5 m/5 m au large jusqu'à 3 m à l'approche des côtes).

Cette variabilité spatiale s'observe également pour les moyennes saisonnières. Lors de la période estivale, les hauteurs de vagues qui atteignent 2 m au large sont de l'ordre de 1 m à l'approche des côtes. Ce gradient Ouest/Est double lors des périodes hivernales comme le montre la Figure 29 (4 m/5 m au large à 2,25 m aux abords des côtes). Cette variabilité est d'autant plus marquée que l'on s'intéresse aux fortes hauteurs de vagues (Hs -90). Les valeurs moyennes des hauteurs de vagues passent de 7 m au large à 3 m à la côte en hiver, et de 3,5 m au large à 1 m à la côte en été.

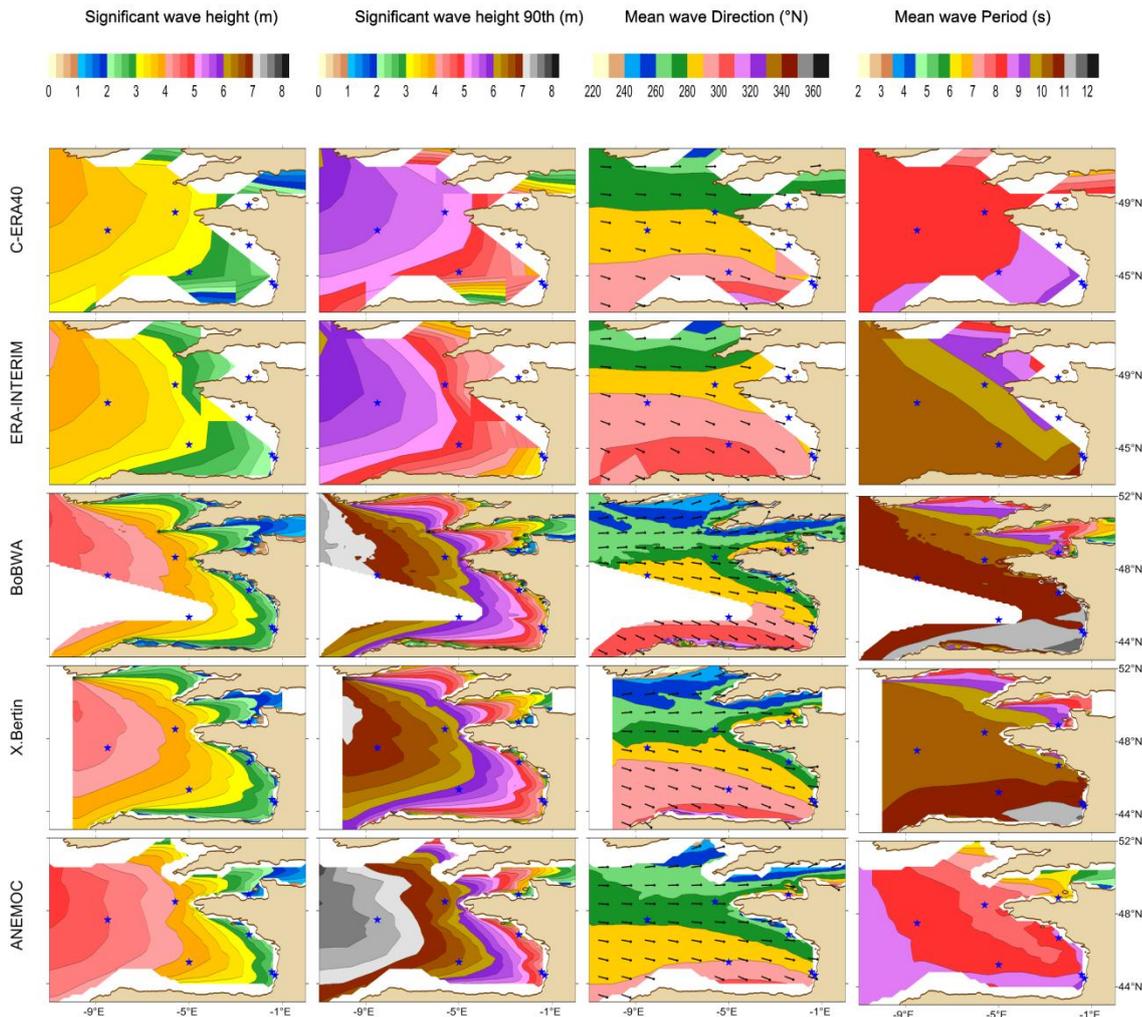


Figure 29 - Cartes des moyennes hivernales des paramètres de vagues pour les cinq jeux de données sur la période 1979-2001 (de haut en bas) : CERA-40, ERA-INTERIM, BOBWA, BAD (Bertin and Dodet) et ANEMOC : Hauteurs significatives (m)(colonne 1), Quantile 90 des hauteurs de vagues (m) (colonne 2), Directions moyennes (°N) (colonne 3) et périodes moyennes (s) (colonne 4).

Les cartes de différences relatives entre les jeux de données et BOBWA confirment les conclusions établies au niveau des bouées dans l'analyse des performances, à savoir que les modèles globaux présentent des hauteurs de vagues généralement plus faibles que les modèles régionaux. En hiver (Figure 30, colonnes 1 et 2), la sous-estimation relative par rapport à BOBWA est de l'ordre de 10 % à 15 % pour les modèles globaux, alors que les modèles régionaux BAD et ANEMOC présentent plutôt une surestimation relative par rapport à BOBWA (de 1 % à 5 % pour BAD et de 5 % à 10 % pour ANEMOC pour les Hs -90). Quelques particularités sont à noter selon les secteurs du Golfe de Gascogne :

- ✓ sur la pointe Bretagne (Finistère), on observe des fortes hauteurs de vagues (Hs - 90) moins élevées pour le modèle ERA-INTERIM (plus de 25 % d'erreur relative

par rapport à BOBWA en hiver : des vagues estimées à 6m avec BOBWA, BAD et ANEMOC près de Ouessant sont d'environ 4,5 m avec ERA-INTERIM) ;

- ✓ en Manche, on observe des hauteurs de vagues plus élevées (Hs et Hs -90) pour le modèle ANEMOC (jusqu'à 20 % d'erreur relative par rapport à BOBWA en hiver) ;
- ✓ au large, on remarque une importante surestimation relative des fortes hauteurs de vague de la base de données ANEMOC par rapport aux autres modèles (pour la moyenne hivernale, 7 m au large pour BOBWA est estimée à 7,75 m avec ANEMOC, soit environ 10 % d'erreur relative).

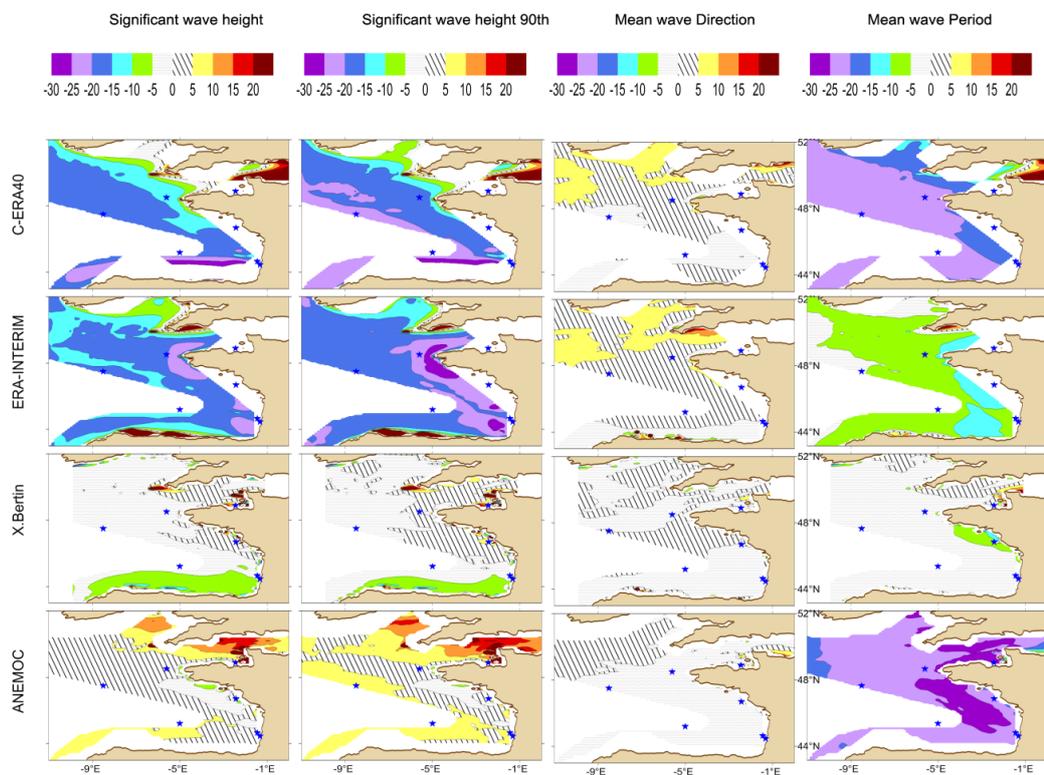


Figure 30 - Cartes des différences relatives hivernales (par rapport à BOBWA sur la période 1979-2001) des paramètres de vagues pour les quatre jeux de données (de haut en bas) : CERA-40, ERA-INTERIM, BAD (Bertin and Dodet) et ANEMOC. Hauteurs significatives (%)(colonne 1), Quantile 90 des hauteurs de vagues (%) (colonne 2), Directions moyennes (%) (colonne 3) et périodes moyennes (%) (colonne 4).

Périodes

De manière générale, les périodes sont légèrement plus importantes au sud qu'au nord du Golfe de Gascogne (en hiver, $T_m \sim 8$ s au nord de la latitude 48° N, et $T_m \sim 9-10$ s au sud de 48° N). Les périodes moyennes présentent une variation saisonnière caractérisée, en été, par des périodes de l'ordre de 6 s à 8 s et, en hiver, de 8 s à 11 s.

D'un point de vue comparatif, les jeux BOBWA et BAD sont similaires en termes de reproduction des périodes à l'échelle du Golfe de Gascogne. Les autres modèles présentent une sous-estimation relative des périodes moyennes par rapport à BOBWA de 5-10 % (ERA-INTERIM et CERA-40) à 20 % (ANEMOC, voire -25 % le long des côtes françaises) (Figure 30, colonne 4).

Directions

Une analyse similaire sur les moyennes annuelles des directions de provenance des vagues montre également une variabilité spatiale. En effet, les vagues proviennent du secteur Ouest, au sud de l'Irlande (de 270° N à 280° N) et subissent une rotation progressive vers le Nord, au fur et à mesure que la latitude diminue, pour atteindre une provenance Nord-ouest au niveau des côtes Espagnoles (310° N à 320° N).

Comme observé pour les hauteurs de vagues, il existe une variabilité saisonnière importante pour les directions moyennes des vagues. En été, les directions sont généralement de 10° à 20° plus au Nord qu'en hiver.

Les erreurs relatives des jeux de données par rapport à la base BOBWA ne montrent pas de nettes différences sur les directions moyennes des vagues. Pour la période hivernale, on note cependant une légère rotation vers le Nord de la direction de provenance des vagues de l'ordre de 5 % pour les jeux de données globaux au-dessus de la latitude 48° N (Figure 30, colonne 3). Dans cette même zone, pour la période printanière, on note une légère rotation des vagues vers le Sud du jeu ANEMOC par rapport au jeu BOBWA (rotation anti-horaire de 20° à 30°).

5.2.2. Comparaison spatiale des tendances

Les tendances des paramètres de vague (Hs, Hs -90, Tm et Dm) sont examinées de manière annuelle et saisonnière sur trois périodes : (1) 1979-2001 commune aux cinq jeux de données, (2) 1958-2001 qui est la plus grande période disponible et, (3) 1970-2001 pour laquelle des tendances significatives ont été identifiées par Charles et al. (2012b). Pour les deux dernières périodes, seuls les jeux de données CERA-40, BOBWA et BAD sont disponibles. Afin d'estimer la significativité des tendances qui ressortent de chaque jeu de données, la p-value du T-test de Student est indiquée. Traditionnellement, une tendance est dite significative si la p-value est inférieure à 5 %. Néanmoins, des cartes spatialisées de p-value sont indiquées afin de ne pas limiter l'analyse aux zones les plus significatives.

Afin de guider la comparaison des tendances, une grille d'analyse (reportée dans le Tableau 6) a été mise en place. Pour chaque jeu de données, les tendances calculées sont reportées dans un tableau à l'aide de deux critères : (1) l'intensité ou amplitude de la tendance et (2) son degré de significativité (indiqué par la p-value). Un tableau a ainsi été créé par période temporelle, par saison, et par variable (Hs, Hs -90, Tm et Dm). Les tendances constatées étant souvent différentes (et parfois opposées) au nord et au sud du Golfe de Gascogne, une distinction a été faite au nord et au sud de 48° N. Les tendances non significatives et/ou présentant une grande disparité sur le Golfe de

Gascogne (principalement pour les périodes et les directions) ne sont pas interprétées et les cases correspondantes sont laissées vides dans les tableaux d'analyse. Les tendances pour lesquelles l'ensemble des jeux de données donne des résultats cohérents et significatifs sont cerclées en rouge dans les tableaux afin de dégager les résultats les plus robustes.

Tableau 6 - Légende des tableaux d'analyse des tendances.

Hauteur significative (m)			
+	entre 0 et 0.5cm/ans	-	entre -0 et -0.5cm/ans
++	entre 0.5 et 1cm/ans	--	entre -0.5 et -1cm/ans
+++	entre 1 et 1.5cm/ans	---	entre -1 et -1.5cm/ans
++++	entre 1.5 et 2cm/ans	----	entre -1.5 et -2cm/ans
Période moyenne (s)			
+	entre 0 et 0.02 s/ans	-	entre 0 et -0.02 s/ans
++	entre 0.02 et 0.04 s/ans	--	entre -0.02 et -0.04 s/ans
+++	entre 0.04 et 0.06 s/ans	---	entre -0.04 et -0.06 s/ans
++++	> 0.06 s/ans	----	< -0.06 s/ans
Direction moyenne (°N)			
+	entre 0 et 0.2 °/ans	-	entre 0 et -0.2 °/ans
++	entre 0.2 ° et 0.4 °/ans	--	entre -0.2 ° et -0.4 °/ans
+++	entre 0.4 ° et 0.6 °/ans	---	entre -0.4 ° et -0.6 °/ans
++++	> 0.8 °/ans	----	< -0.8 °/ans
rouge	P-value < 0.05	significativité > à 95%	
vert	P-value < 0.2	significativité supérieure à 80%	
bleu	P-value > 0.2	significativité inférieure à 80%	

ÉTÉ

Les tendances pour la saison estivale sont synthétisées dans le Tableau 7 et un exemple de cartes est présenté pour les Hs-90 sur la période 1970-2001 sur la Figure 31. Les autres cartes, pour les paramètres Hs, Tm et Dm sur cette même période, sont présentées en Annexe 1.

L'été est la saison pour laquelle on trouve les tendances les plus nettes et le plus de similarités entre les jeux de données (Tableau 7). En effet, des tendances significatives apparaissent pour les trois paramètres (Hs et Hs-90, Tm, Dm), en particulier sur la période 1970-2001.

Tableau 7 - Synthèse des tendances en été. La légende est explicitée dans le Tableau 6.

Tendances en été						
1979-2001	5 modèles	C-ERA40	ERA-INTERIM	BOBWA	BAD	ANEMOC
HS moy	Nord 48°N	++	++	+	+	+
	Sud 48°N	++	++	+	+	+
HS 90	Nord 48°N	+++	+++	++	+++	+
	Sud 48°N	+++	+++	+	+++	+
TM	Nord 48°N	+++	+	+	-	+
	Sud 48°N	+++	+	-	-	+
DM	Nord 48°N		++	+	+	-
	Sud 48°N		-	+	+	-
1970-2001	3 modèles	C-ERA40	ERA-INTERIM	BOBWA	BAD	ANEMOC
HS moy	Nord 48°N	++		++	++	
	Sud 48°N	++		++	++	
HS 90	Nord 48°N	+++		+++	+++	
	Sud 48°N	+++		++	+++	
TM	Nord 48°N	+++		+	+	
	Sud 48°N	+++		+	+	
DM	Nord 48°N	--		--	--	
	Sud 48°N	--		-	-	
1958-2001	3 modèles	C-ERA40	ERA-INTERIM	BOBWA	BAD	ANEMOC
HS moy	Nord 48°N	+		+	+	
	Sud 48°N	-		-	+	
HS 90	Nord 48°N	+		-	+	
	Sud 48°N	+		-	+	
TM	Nord 48°N	++		+	+++	
	Sud 48°N	++		+	+	
DM	Nord 48°N					
	Sud 48°N					

Pour les hauteurs, on note une tendance à la hausse significative à plus de 95 % sur toute la côte Atlantique, sur la période 1970-2001, pour les trois jeux disponibles : entre 0,5 cm/an et 1 cm/an pour les valeurs moyennes et entre 0,5 cm/an et 2 cm/an pour Hs-90 (cf. Figure 31). Sur la période 1979-2001, seules les deux ré-analyses CERA-40 et ERA-INTERIM montrent des tendances significatives similaires, particulièrement marquées dans le sud du Golfe de Gascogne. En revanche, aucune tendance n'apparaît sur la plus longue période de 1958 à 2001.

En ce qui concerne les périodes, on ne note pas de tendance aussi marquée. Toutefois, l'ensemble des jeux de données tend à montrer une tendance à la hausse sur les périodes 1970-2001 et 1958-2001. Si les données CERA-40 montrent une augmentation significative à plus de 95 % jusqu'à + 0,04 s/an sur 1970-2001, celle-ci n'est pas aussi prononcée dans les jeux de données régionaux. Sur cette même

période, BOBWA et BAD montrent une faible tendance de l'ordre de + 0,02 s/an (significative à plus de 95 % pour BOBWA et 80 % pour BAD).

Pour les directions, dans la partie nord du Golfe de Gascogne (latitude supérieure à 48° N) sur la période 1970-2001, on note une légère rotation significative vers le sud dans tous les jeux de données (jusqu'à - 0,4°/an).

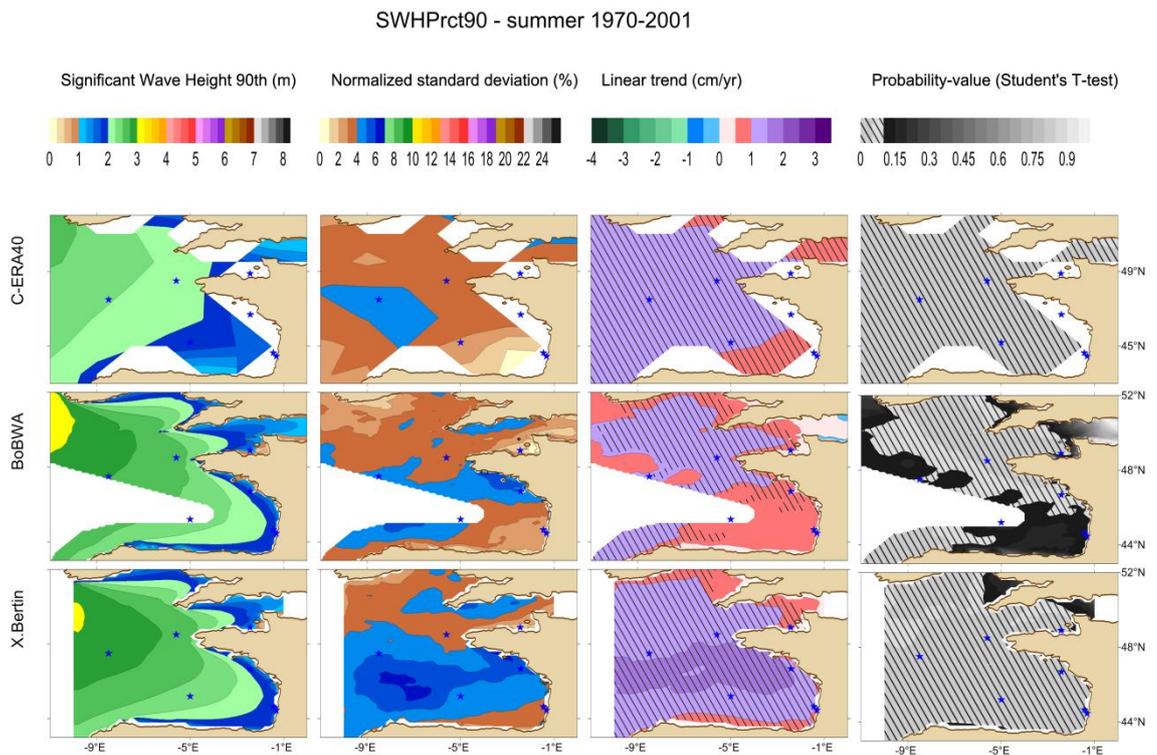


Figure 31 - Cartes présentant (de gauche à droite) les moyennes estivales des hauteurs de vagues fortes (Hs-90 en mètres), les écarts types associés (%), les tendances linéaire et les probabilités de significativité des tendances (p-value du test de T-Student). Les zones hachurées indiquent des tendances significatives à plus de 95 %.

AUTOMNE

Les tendances sur les paramètres Hs, Hs-90, Tm et Dm, pour la saison automnale, sont synthétisées dans le Tableau 8. L'ensemble des cartes correspondantes est présenté en Annexe 1.

On note une tendance à la hausse des hauteurs dans tous les jeux de données, sur les périodes 1970-2001 et 1958-2001, qui sont particulièrement marquées pour les Hs -90 (Tableau 8). Sur la période 1970-2001, la tendance à la hausse des Hs -90 apparaît sur l'ensemble du Golfe de Gascogne avec une significativité supérieure à 95 % dans les trois jeux de données (CERA-40, BAD et BOBWA). Elle est particulièrement marquée dans les données CERA-40 et BAD où elle atteint jusqu'à 3 cm/an. Sur la période 1958-2001, la tendance à la hausse des Hs-90 est légèrement plus faible et

n'apparaît de manière significative que sur la partie nord du Golfe de Gascogne (avec une intensité comprise entre 0,5 cm/an et 1,5 cm/an selon le jeu de données).

Concernant les périodes et les directions moyennes, il ne ressort pas de tendances suffisamment significatives et cohérentes entre les jeux de données sur les trois périodes.

Tableau 8 - Synthèse des tendances en automne. La légende est explicitée dans le Tableau 6.

Tendances en Automne						
1979-2001	5 modeles	C-ERA40	ERA-INTERIM	BOBWA	BAD	ANEMOC
HS moy	Nord 48°N	++	++	+	+++	-
	Sud 48°N	+++	+++	+	+++	+
HS 90	Nord 48°N	+++	+++		+++	-
	Sud 48°N	++++	+++		+++	-
TM	Nord 48°N	+	-	--	-	--
	Sud 48°N	+	-	---	--	---
DM	Nord 48°N	+++	+++	++	++	++
	Sud 48°N			++	++	
1970-2001	3 modeles	C-ERA40	ERA-INTERIM	BOBWA	BAD	ANEMOC
HS moy	Nord 48°N	+++		+++	+++	
	Sud 48°N	+++		++	+++	
HS 90	Nord 48°N	++++		++++	++++	
	Sud 48°N	+++		++	++++	
TM	Nord 48°N	++		-	+	
	Sud 48°N	++		-	+	
DM	Nord 48°N					
	Sud 48°N					
1958-2001	3 modeles	C-ERA40	ERA-INTERIM	BOBWA	BAD	ANEMOC
HS moy	Nord 48°N	+		+	++	
	Sud 48°N	+		+	++	
HS 90	Nord 48°N	++		++	+++	
	Sud 48°N	+		+	+++	
TM	Nord 48°N	+		--	-	
	Sud 48°N	+		---	--	
DM	Nord 48°N					
	Sud 48°N					

HIVER

Pour les mois d'hiver, les résultats sont synthétisés dans le Tableau 9. Un exemple de cartes sur les Hs-90 pour la période 1958-01 est présenté Figure 32 . De même que pour les saisons précédentes, les autres cartes sont reportées dans l'annexe.

Pour cette saison, les jeux de données montrent plutôt des tendances à la hausse des hauteurs de vague mais celles-ci ne sont significatives à plus de 95 % que dans le jeu

de données BAD sur la période 1958-2001 (sur la partie nord du Golfe de Gascogne). Cette tendance est plus nette pour les forts quantiles et atteint jusqu'à 3 cm/an au sud de l'Irlande sur la période 1958-2001 pour Hs-90.

Pour les périodes, on note une tendance à la hausse (significative à plus de 95 %) dans la partie sud du Golfe de Gascogne sur la période 1958-2001 pour tous les jeux de données. Celle-ci est de l'ordre de + 0,02 s/an à + 0,04 s/an.

Tableau 9 - Synthèse des tendances en hiver. La légende est explicitée dans le Tableau 6.

Tendances en Hiver						
1979-2001	5 modeles	C-ERA40	ERA-INTERIM	BOBWA	BAD	ANEMOC
HS moy	Nord 48°N	-	+	--	+	-
	Sud 48°N	-	+	---	-	--
HS 90	Nord 48°N	---	-	-	+++	---
	Sud 48°N	---	-	--	--	----
TM	Nord 48°N	++	-	-	-	-
	Sud 48°N	+++	-	-	-	-
DM	Nord 48°N	+	++	+++	+++	
	Sud 48°N			++	++	
1970-2001	3 modeles	C-ERA40		BOBWA	BAD	
HS moy	Nord 48°N	+++		+++	+++	
	Sud 48°N	++		+	+	
HS 90	Nord 48°N	++++		++++	++++	
	Sud 48°N	+		-	+	
TM	Nord 48°N	+		-	-	
	Sud 48°N	++		-	-	
DM	Nord 48°N					
	Sud 48°N					
1958-2001	3 modeles	C-ERA40		BOBWA	BAD	
HS moy	Nord 48°N	++		++	+++	
	Sud 48°N	+		+	++	
HS 90	Nord 48°N	+++		+++	+++	
	Sud 48°N	++			++	
TM	Nord 48°N	++		+	+	
	Sud 48°N	++		++	++	
DM	Nord 48°N					
	Sud 48°N					

Concernant les directions, une rotation vers le Nord (de l'ordre de + 0,5 à 1° N/an), au-delà de la latitude 48° N, apparait dans les jeux de données BOBWA et BAD sur la période 1979-2001. Ces tendances sont inexistantes ou très faibles dans les données globales et les données ANEMOC.

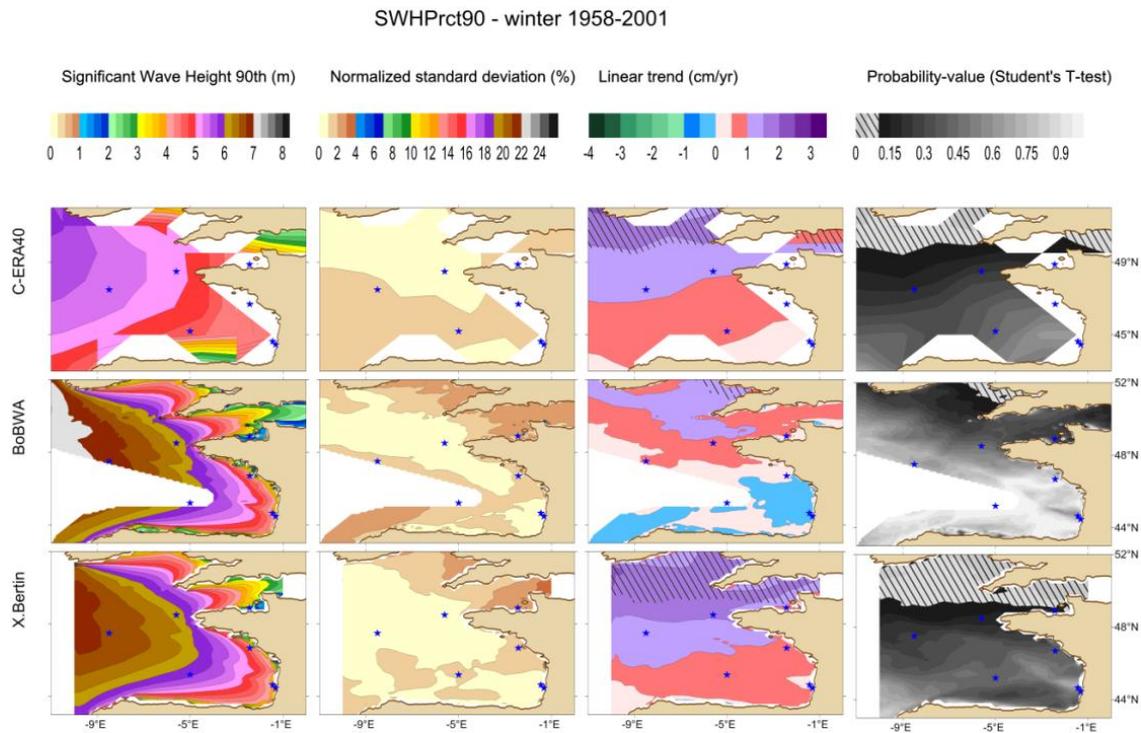


Figure 32 - Cartes présentant (de gauche à droite) les moyennes hivernales des hauteurs de vagues fortes (H_s-90 en mètres), les écarts types associés (%), les tendances linéaire et les probabilités de significativité des tendances (p -value du test de T -Student). Les zones hachurées indiquent des tendances significatives à plus de 95 %.

PRINTEMPS

Pour le printemps, les résultats sont présentés sur le Tableau 10. Aucune tendance significative commune à tous les jeux de données ne ressort.

Pour les hauteurs significatives et les périodes, les données CERA-40 montrent une tendance à la hausse, entre 1970 et 2001, qui n'est pas retrouvée dans ERA-INTERIM ni dans les jeux de données régionaux.

Pour les directions (cf. Figure 33), on observe une légère rotation vers le nord des directions au sud de l'Irlande ($+ 0,2^\circ/\text{an}$) dans les données CERA-40 et BOBWA, mais celle-ci ne se répercute pas au niveau du Golfe de Gascogne.

Tableau 10 - Synthèse des tendances au printemps. La légende est explicitée dans le Tableau 6.

Tendances au Printemps						
1979-2001	5 modeles	C-ERA40	ERA-INTERIM	BOBWA	BAD	ANEMOC
HS moy	Nord 48°N	+	-	-	-	-
	Sud 48°N	+	-	-	-	-
HS 90	Nord 48°N	-	-	---	---	---
	Sud 48°N	-	-	---	---	---
TM	Nord 48°N	++	-	-	+	+
	Sud 48°N	+++	-	-	+	+
DM	Nord 48°N					-
	Sud 48°N					-

1970-2001	3 modeles	C-ERA40		BOBWA	BAD	
HS moy	Nord 48°N	++		+	+	
	Sud 48°N	++		+	+	
HS 90	Nord 48°N	++		+	+	
	Sud 48°N	+		-	-	
TM	Nord 48°N	++		+	+	
	Sud 48°N	+++		+	+	
DM	Nord 48°N					
	Sud 48°N	-		-	-	

1958-2001	3 modeles	C-ERA40		BOBWA	BAD	
HS moy	Nord 48°N	-		-	-	
	Sud 48°N	-		-	-	
HS 90	Nord 48°N	-		-	-	
	Sud 48°N	-		-	-	
TM	Nord 48°N	+		-	-	
	Sud 48°N	+		-	-	
DM	Nord 48°N	++		++		
	Sud 48°N	+				

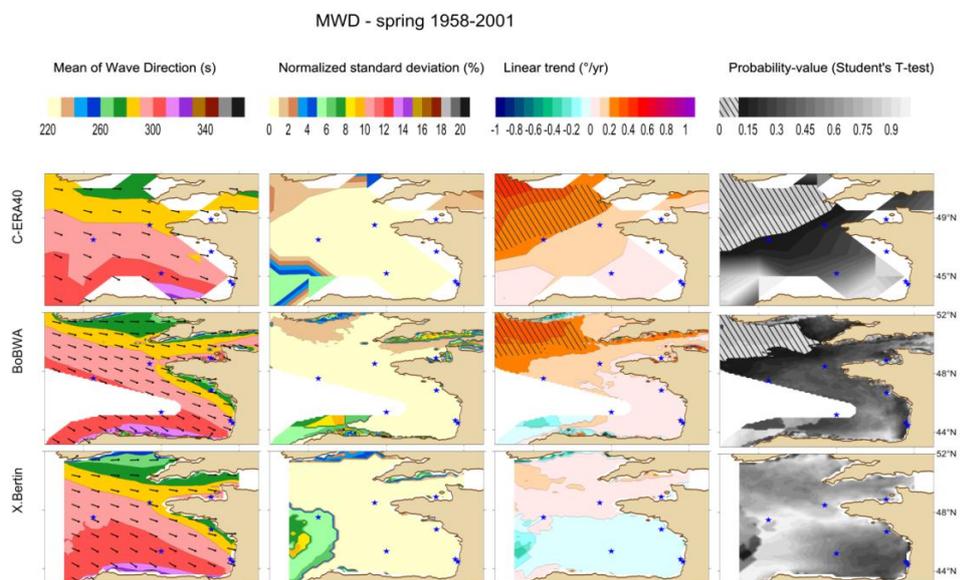


Figure 33 - Cartes présentant (de gauche à droite) les moyennes printannières des directions moyennes de vagues, les écarts types normalisés associés (%), les tendances linéaire et les probabilités de significativité des tendances (p-value du test de T-Student. Les zones hachurées indiquent des tendances significatives à plus de 95 %.

Synthèse des tendances identifiées

Les principales tendances cohérentes observées sur l'ensemble des jeux de données sont les suivantes :

- en été, on observe des tendances sur tous les paramètres sur la période 1970-2001. Il ressort une augmentation des hauteurs de vagues moyennes (+ 0,5 à +1 cm/an sur la période 1970-2001), des hauteurs supérieures au quantile 90 (+ 0,5 à + 2 cm/an), et des périodes moyennes (+ 0,02 à + 0,04 s/an sur la période 1970-2001) sur l'ensemble du Golfe de Gascogne, ainsi qu'une légère rotation des directions vers le sud (- 0,4° N/an sur la période 1970-2001) dans la partie nord du Golfe de Gascogne. Les tendances sur les périodes ressortent également sur la période 1958-2001 dans la partie sud du Golfe de Gascogne ;
- en automne, il ressort principalement une tendance à l'augmentation des hauteurs de vagues supérieures au quantile 90 (de l'ordre de 3 cm/an sur la période 1970-2001), sur l'ensemble du Golfe de Gascogne entre 1970 et 2001, et sur la partie nord uniquement entre 1958 et 2001 ;
- en hiver, les tendances sont moins marquées que sur les deux saisons précédentes. La tendance la plus notable est une augmentation des périodes moyennes (+ 0,02 à + 0,04 s/an) dans la partie sud du Golfe de Gascogne sur la période 1958-2001. Une légère tendance à la hausse des hauteurs significatives apparaît également mais de significativité faible dans la majorité des jeux de données ;
- au printemps, aucune tendance nette ne s'observe.

5.2.3. Comparaison ponctuelle des tendances

Afin de mieux identifier l'évolution des différents types de vagues et d'interpréter les tendances dégagées pour les différents paramètres (Hs, Tm, Dm), les diagrammes bivariés d'occurrence sont analysés pour les trois saisons pour lesquelles des tendances ont pu être dégagées (cf. Figure 38 à Figure 45). Dans ce paragraphe, on présente successivement les résultats obtenus en été, en hiver, en automne et au printemps.

De manière générale, la distribution des vagues au niveau des points hauturiers (Gascogne ~ 4500m), intermédiaires (Ouessant ~ 100m) et plus côtiers (Yeu et Cap-Ferret ~ 30m) n'est pas la même. Si la gamme des périodes reste constante, les hauteurs de vagues sont plus petites et les directions plus resserrées autour d'un axe ouest-nord-ouest pour les points plus côtiers. En effet, en se propageant vers les côtes, les vagues sont dissipées et réfractées. Ce phénomène est moins visible dans les données CERA-40 à cause de la résolution spatiale lâche et de l'éloignement plus important entre les positions des bouées et les points de grille utilisés pour extraire les données (cf. paragraphe 3.3).

ÉTÉ

L'analyse des cartes, détaillée dans le paragraphe 5.2.2 a montré que l'été est la saison pour laquelle les tendances les plus importantes sont observées dans les jeux de données, en particulier sur la période 1970-2001. Les diagrammes bivariés (Hs/Tm et Hs/Dm) d'occurrence relative moyenne et des tendances associées entre 1970 et 2001 sont tracés sur les Figure 34 (bouée Gascogne) Figure 35 (bouée Ouessant) Figure 36 (bouée Yeu) et Figure 37 (bouée Cap-Ferret).

De manière générale, on note pour toutes les bouées et tous les jeux de données, une tendance à la hausse significative de l'occurrence relative des vagues les plus énergétiques, c'est à dire de plus fortes hauteurs significatives (supérieures à 2 m) et de plus longues périodes (supérieures à 6 s). Cependant, on remarque un comportement légèrement différent entre CERA-40 et les jeux de données régionaux BOBWA et BAD. Pour ces derniers, cette tendance n'est significative que pour les vagues les plus hautes (supérieures à 4 m) et dont la cambrure est plus importante (vagues de type intermédiaire). L'augmentation de l'occurrence des vagues longues apparaît moins nettement que dans CERA-40 pour lequel on note également une augmentation de l'occurrence des vagues de type houle (dont la cambrure est plus faible). Ces observations sont cohérentes avec l'analyse des cartes au paragraphe 5.2.2 qui montrait une augmentation significative des hauteurs moyennes des vagues (et des quantiles les plus élevés) dans tous les jeux de données, mais un allongement des périodes beaucoup plus important dans les données CERA-40 (cf. Tableau 7).

Sur les diagrammes bivariés Hs/Dm, on retrouve, sur tous les points et dans tous les jeux de données, (1) une tendance à la hausse significative de l'occurrence des vagues les plus hautes et dont la direction de provenance est comprise entre 250° et 300° et, (2) une tendance inverse (mais non significative) pour les vagues plus petites et dont la direction de provenance est supérieure à 300°. Ces tendances expliquent la légère rotation des directions vers le Sud observée sur les cartes au paragraphe 5.2.2. Au niveau des bouées Gascogne et Ouessant, on remarque que cette rotation est un peu plus marquée dans les données CERA-40 que dans les données régionales.

En résumé, les diagrammes bivariés mettent en évidence une tendance à l'augmentation de l'occurrence des vagues plus énergétiques de provenance Ouest-Nord-Ouest par rapport aux vagues moins énergétiques de provenance Nord-Ouest. Cette analyse est cohérente et permet d'expliquer les tendances constatées sur les moyennes saisonnières sur la période 1970-2001 au paragraphe 5.2.2.

HIVER

L'analyse des cartes, détaillée dans le paragraphe 5.2.2, a montré que la saison hivernale présentait moins de tendances significatives d'évolution des paramètres de vagues que la saison estivale. Cependant, des tendances à la hausse significatives ressortent sur la période 1958-2001 (1) sur Hs et principalement Hs -90 dans les données BAD, et (2) sur les périodes moyennes dans tous les jeux de données. On se propose d'analyser les raisons de cette tendance en étudiant les diagrammes bivariés sur cette même période. Ceux-ci sont présentés sur les Figure 38 (Gascogne)

Figure 39 (Ouessant) Figure 40 (Yeu) et Figure 41 (Cap-Ferret). De même que sur les cartes, les diagrammes bivariés montrent des tendances moins nettes et moins de cohérence entre les jeux de données que pour la saison estivale.

On remarque, de manière générale, une tendance à la hausse de l'occurrence des vagues plus longues de type houle, sans augmentation systématique des hauteurs :

- au large, au niveau de la bouée Gascogne, cette tendance est particulièrement prononcée dans les données ERA-40 qui montrent également une légère augmentation des hauteurs. Dans les données BAD, cette tendance concerne essentiellement les vagues les plus hautes (supérieures au quantile 90) ce qui pourrait expliquer la tendance significative décelée sur les hauteurs des vagues dans les cartes au paragraphe 5.2.2. A la bouée Ouessant, les motifs sont plus confus ;
- au niveau des bouées côtières (Yeu et Ferret), cette tendance est toujours présente mais se traduit plus par une baisse de l'occurrence des vagues peu énergétiques.

Sur les diagrammes bivariés (Hs/Dm), on remarque une augmentation de l'occurrence des vagues dont la direction de provenance est comprise entre 280° et 300° et la hauteur entre 2m et 4m. Cette tendance, qui se distingue quelque soient les données et les points étudiés (hauturiers ou côtiers), n'apparaissait pas dans l'analyse des cartes au paragraphe 5.2.2.

En résumé, les diagrammes bivariés sont plus difficilement interprétables que pour la saison estivale car les tendances constatées sont de plus faibles amplitudes et les zones de significativité sont plus restreintes. Cependant, ils mettent en évidence une légère augmentation de l'occurrence des vagues longues de type houle dont la direction de provenance se situerait entre 280° et 300°. Ces résultats sont cohérents avec les tendances décelées sur les paramètres de vagues sur la période 1958-2001.

AUTOMNE

L'analyse des cartes, détaillée dans le paragraphe 5.2.2, a montré une tendance à l'augmentation des hauteurs significatives des vagues sur 1970-2001, qui apparaît de manière significative dans les données CERA-40 et BAD et peu significative dans les données BOBWA. Les diagrammes bivariés pour cette saison sont présentés sur les Figure 42 (Gascogne) Figure 43 (Ouessant) Figure 44 (Yeu) et Figure 45 (Cap-Ferret). Sur tous les diagrammes, on remarque, de manière assez nette, une tendance positive de l'occurrence des vagues de plus forte cambrure (de type intermédiaire) par rapport aux vagues de type houle. Cette augmentation apparaît de manière plus significative pour les vagues hautes (supérieures au quantile 90) dans les jeux de données BAD et CERA-40, ce qui expliquerait la tendance à la hausse des hauteurs significatives constatée sur les cartes. Pour BOBWA, la tendance est bien moins prononcée.

Au niveau des diagrammes Hs/Tm, on retrouve l'augmentation de l'occurrence des vagues fortes supérieures ou égales au quantile 90 mais les tendances sur les directions n'apparaissent pas clairement.

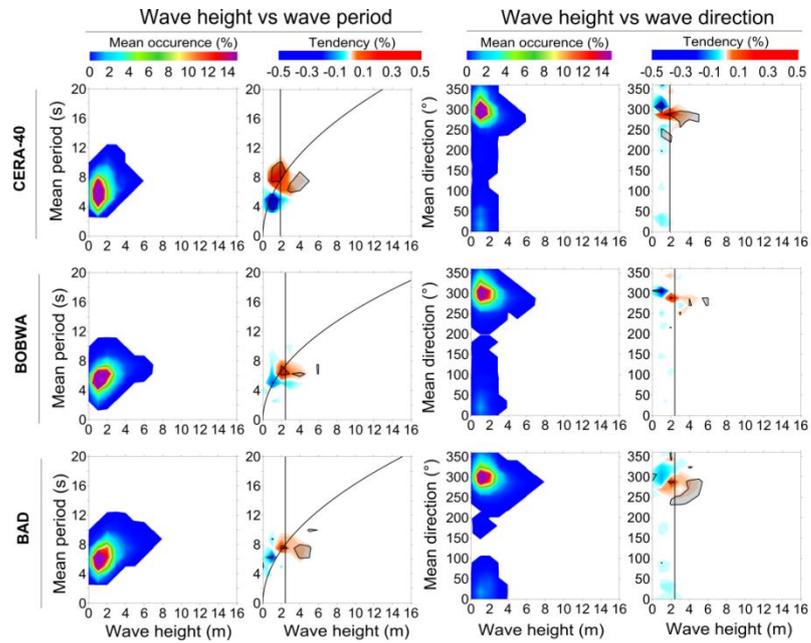


Figure 34 - Diagrammes bivariés à la bouée **Gascogne en été (70-01)**. Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de H_s .

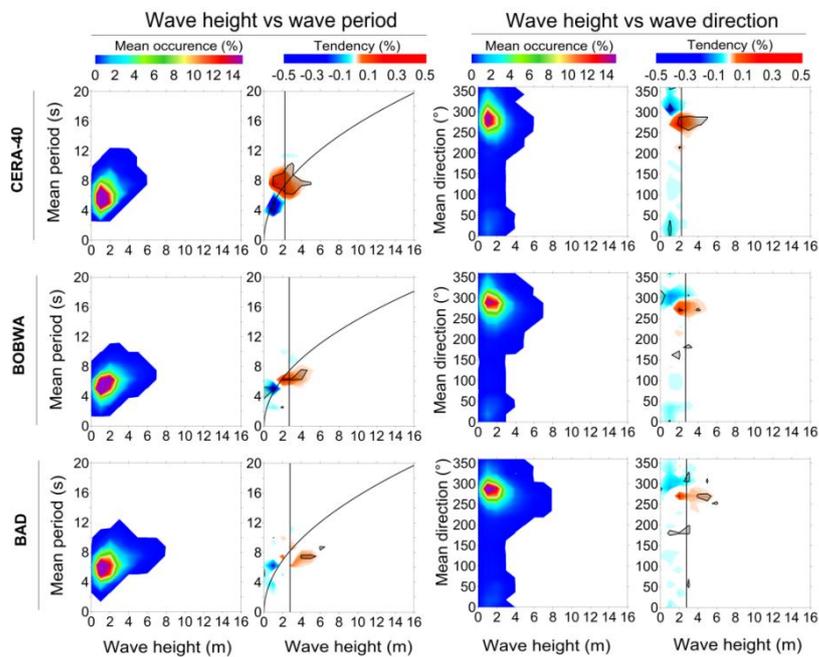


Figure 35 - Diagrammes bivariés à la bouée **Ouessant en été (70-01)**. Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de H_s .

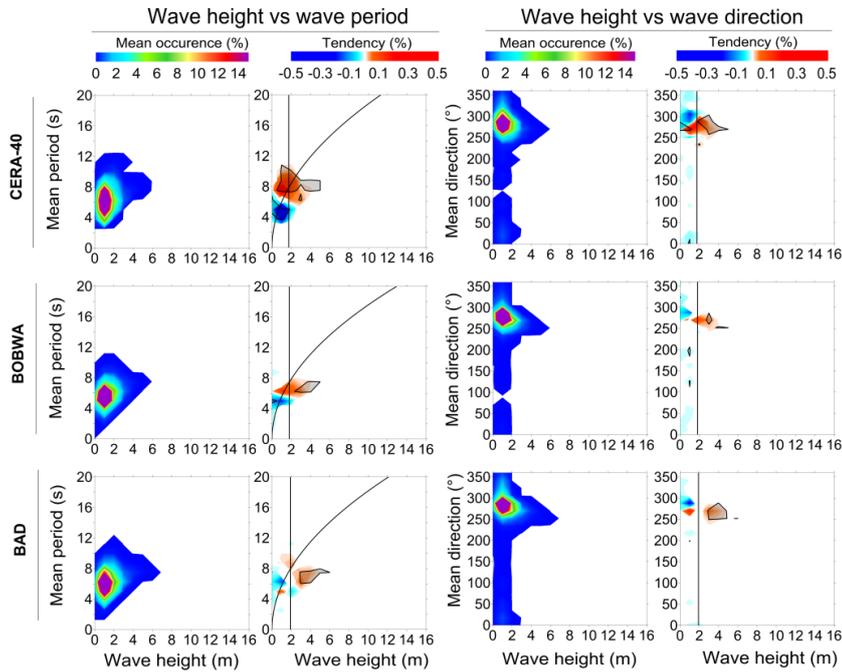


Figure 36 - Diagrammes bivariés à la bouée **Yeu en été (70-01)**. Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de H_s .

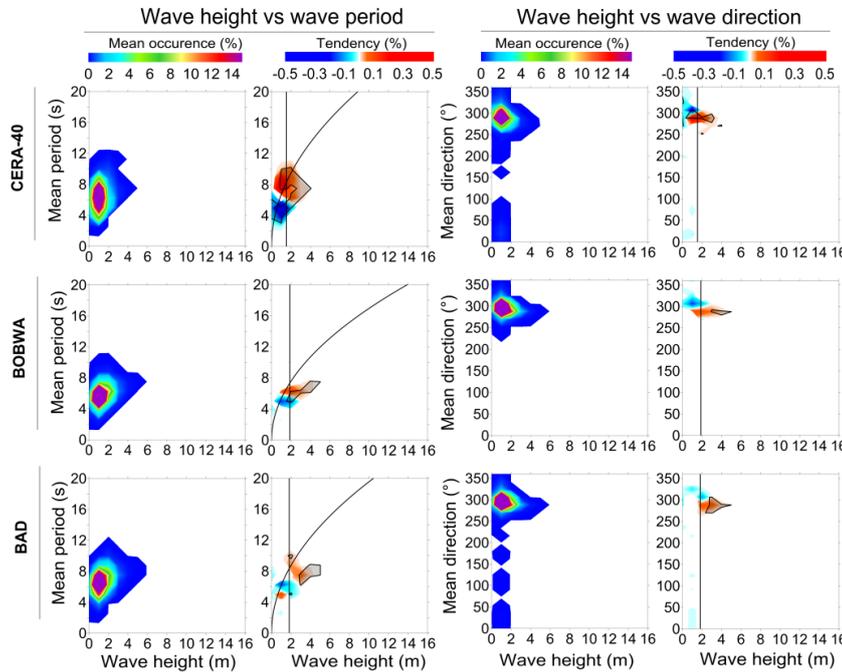


Figure 37 - Diagrammes bivariés à la bouée **Ferret en été (70-01)**. Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de H_s .

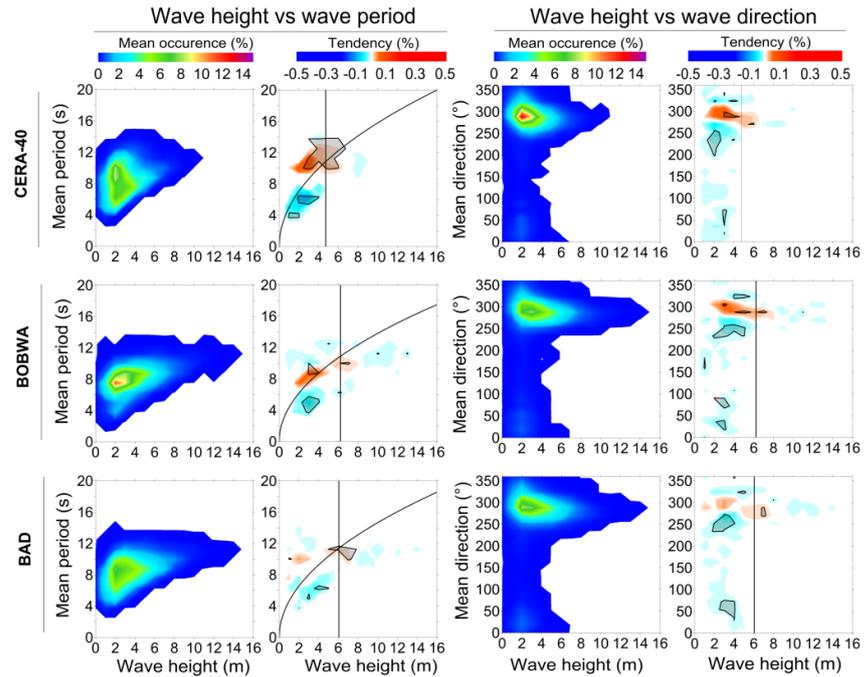


Figure 38 - Diagrammes bivariés à la bouée **Gascogne en hiver (58-01)**. Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de Hs.

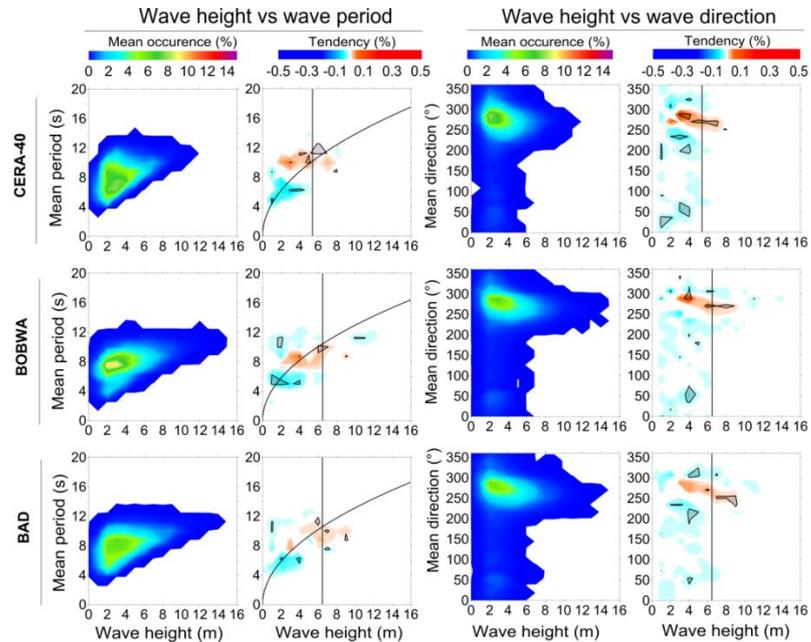


Figure 39 - Diagrammes bivariés à la bouée **Ouessant en hiver (58-01)**. Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de Hs.

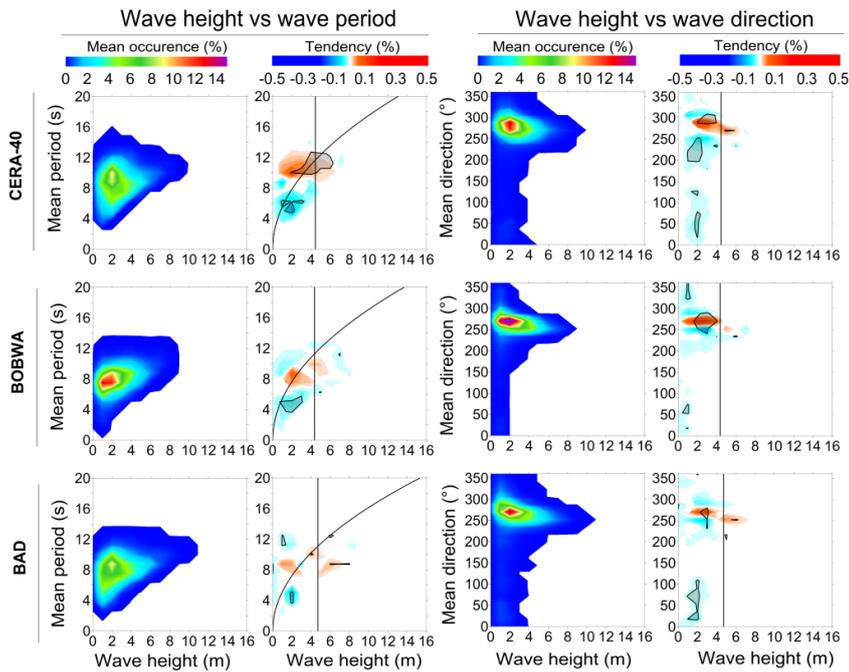


Figure 40 - Diagrammes bivariés à la bouée **Yeu en hiver (58-01)**. Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de Hs.

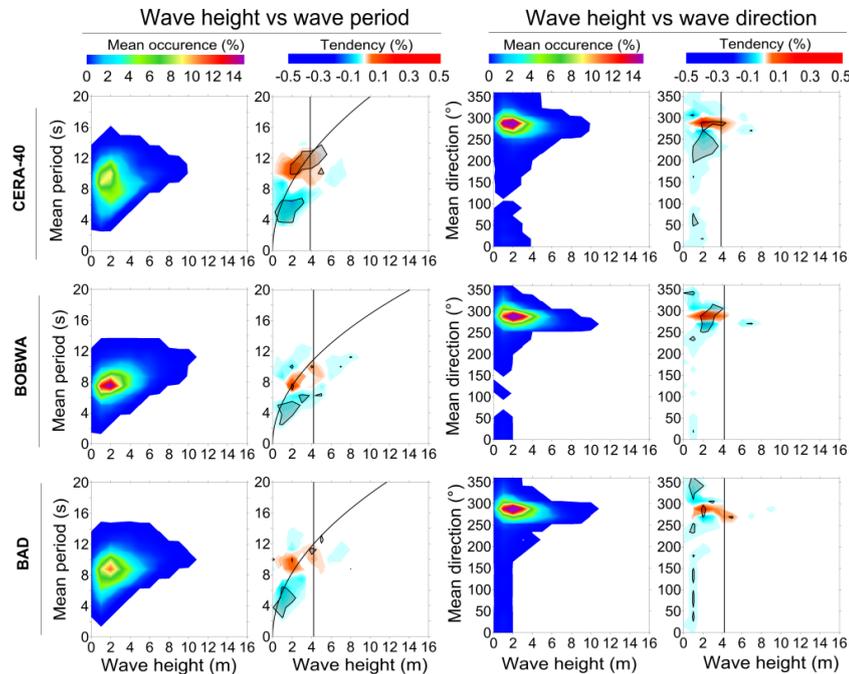


Figure 41- Diagrammes bivariés à la bouée **Cap-Ferret en hiver (58-01)**. Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de Hs.

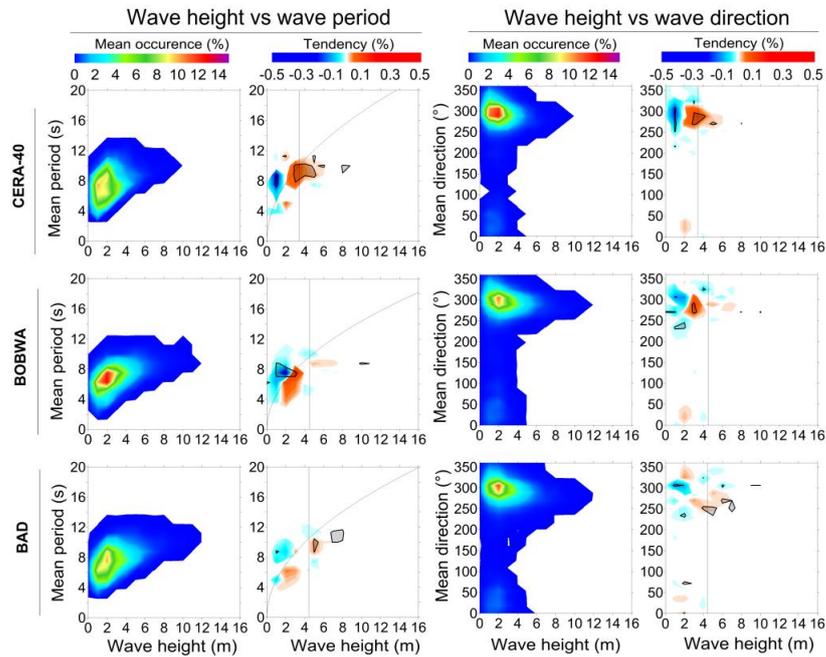


Figure 42 - Diagrammes bivariés à la bouée **Gascogne en automne (70-01)**. Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90.

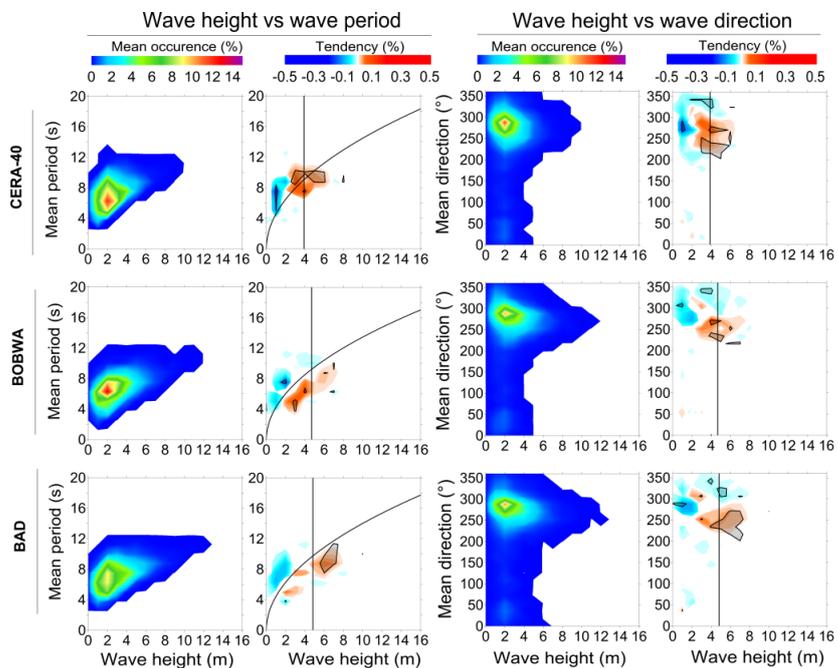


Figure 43 - Diagrammes bivariés à la bouée **Ouessant en automne (70-01)**. Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90.

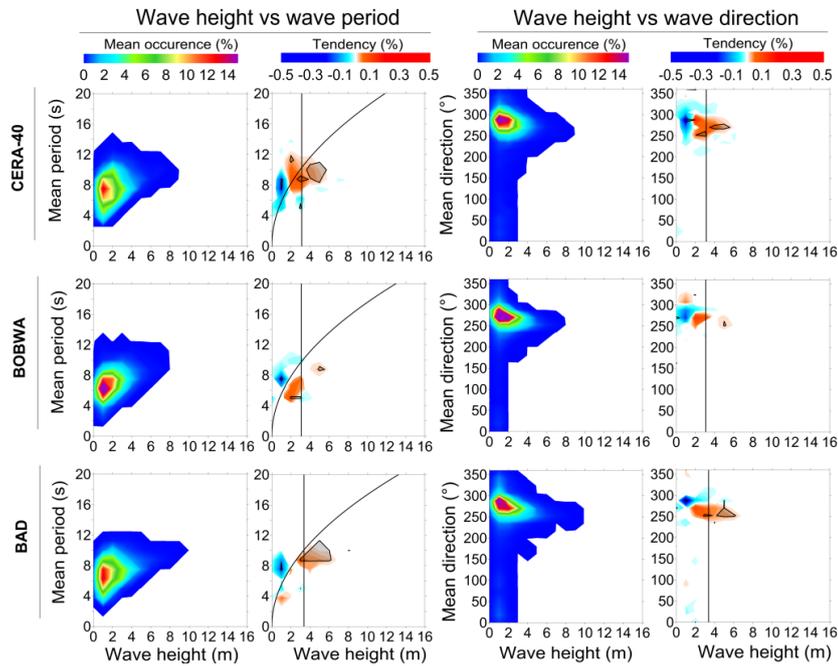


Figure 44 - Diagrammes bivariés à la bouée **Yeux en automne (70-01)**. Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de H_s .

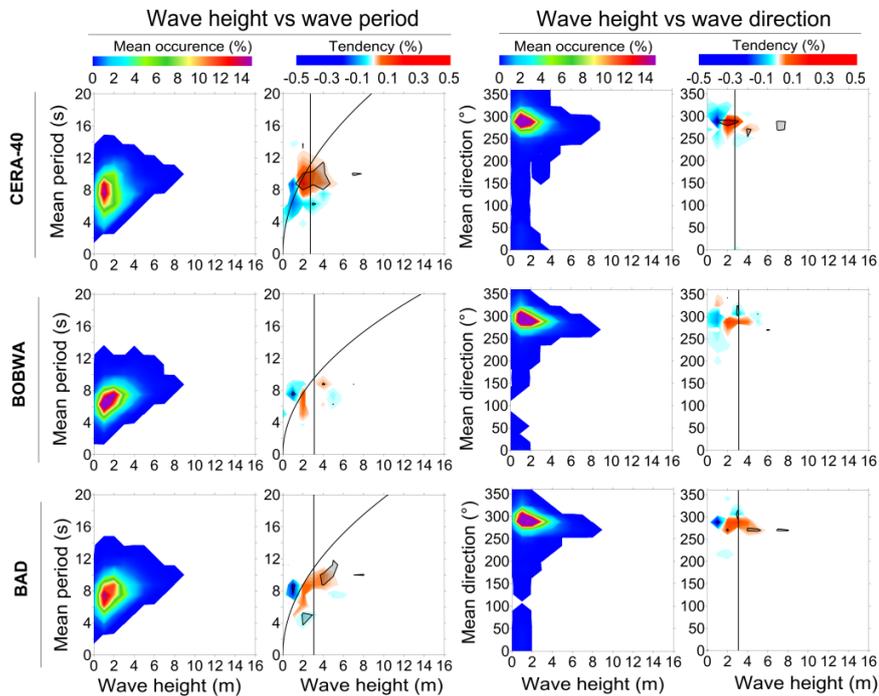


Figure 45 - Diagrammes bivariés à la bouée **Cap-Ferret en automne (70-01)**. Seules les tendances significatives à plus de 50 % sont tracées (et hachurées à plus de 90 %). Les courbes montrent la cambrure médiane et le quantile 90 de H_s .

5.3. CLIMATS DE VAGUES FUTURS

Les évolutions des paramètres de vague (Hs, Hs-95, Tm et Dm), entre la fin du 20^{ème} siècle et la fin du 21^{ème} siècle, sont examinées de manière annuelle et saisonnière. Pour les projections, le quantile 95 est utilisé (et non le quantile 90 comme pour les simulations rétrospectives) car les données de Mori et *al.* (2010) n'étaient disponibles que sous forme de moyennes annuelles et mensuelles pour les hauteurs significatives moyennes et les hauteurs significatives supérieures au quantile 95. Néanmoins, l'analyse des Hs-90 a été effectuée sur les données BOBWA et MORELLATO et a permis de vérifier que les évolutions étaient similaires à celles des Hs-95 (mais moins prononcées).

Pour rappel :

- les données MORI sont disponibles (1) pour la période REF de 1975 à 2000 et (2) pour le scénario A1B uniquement de 2075 à 2100 ;
- les données BOBWA et MORELLATO sont disponibles (1) pour la période REF de 1961 à 2000 et (2) pour les scénarios A1B, B1 et A2 de 2061 à 2100. Pour les données MORELLATO, on ne dispose pas des périodes des vagues.

Une première analyse des cartes de moyennes annuelles et saisonnières a mis en évidence que la faible résolution spatiale des données MORI ne permet pas une représentation correcte des vagues à l'intérieur du Golfe de Gascogne, particulièrement entre la côte nord espagnole et la Bretagne (exemple sur les hauteurs significatives moyennes estivales Figure 46). Ainsi, dans les résultats présentés ci-dessous, (1) pour l'analyse spatiale, les données de direction ne sont pas exploitées et les données sur les périodes moyennes et les hauteurs significatives ne sont exploitées que pour la zone située au nord de la pointe Bretagne, (2) pour l'analyse ponctuelle, les données ne sont pas exploitées car tous les points sélectionnés sont situés dans la zone considérée comme non valide.

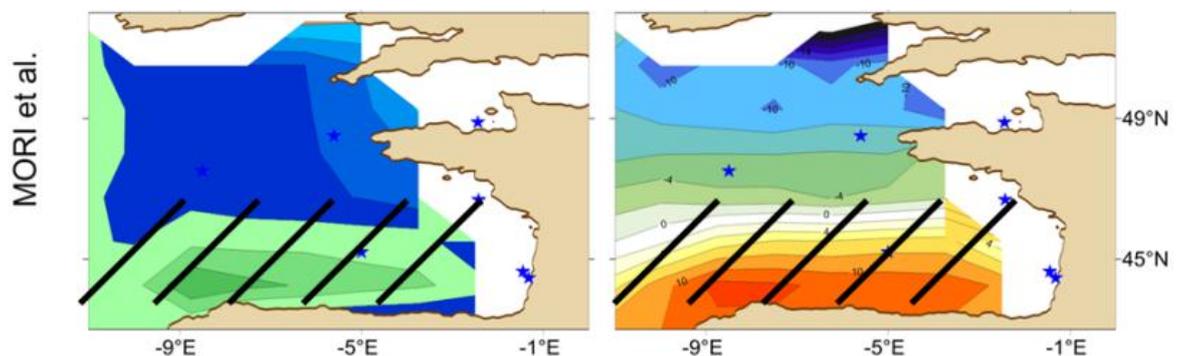


Figure 46 - Exemple de cartes sur les moyennes estivales des hauteurs significatives (période 1975-1996) et leur évolution entre les périodes 2075-2096 et 1975-1996 pour le scénario A1B. La zone hachurée dans les données MORI est exclue de l'analyse.

5.3.1. Comparaison spatiale des évolutions

Les changements entre climats de vagues actuels et climats de vagues futurs sont examinés de manière saisonnière pour les trois scénarios d'émission de gaz à effets de serre et sur les deux périodes disponibles (entre 1961-2000 et 2061-2100 ou entre 1975-1996 et 2075-2096). De manière générale, les évolutions sont relativement homogènes sur le Golfe de Gascogne. C'est la raison pour laquelle les résultats sont quantifiés à la bouée Brittany (pour laquelle les données MORI sont exploitables) et présentés sous forme de tableaux. Les évolutions sur les hauteurs significatives moyennes et supérieures au quantile 95 sont présentées dans le Tableau 11 (pour BOBWA et MORELLATO) et le Tableau 12 (pour MORI), les évolutions sur les périodes moyennes sont reportées dans le Tableau 13 (pour BOBWA et MORI) et les évolutions des directions moyennes dans le Tableau 14 (pour BOBWA et MORELLATO). Cependant, les cartes les plus pertinentes sont présentées pour chaque saison afin d'avoir une vision spatialisée.

En termes de comparaison des scénarios actuels (REF), on retrouve la surestimation des données MORELLATO par rapport aux données BOBWA sur les hauteurs significatives. Les données de projection (REF et futures) ayant été calibrées à partir des simulations rétrospectives ANEMOC (pour MORELLATO) et BOBWA (pour BOBWA), il est cohérent de retrouver les mêmes différences entre ces données que celles observées dans l'analyse des performances (cf. 5.1). En revanche, les données MORI sous-estiment les hauteurs significatives et les périodes moyennes par rapport aux données BOBWA. Les évolutions entre climats actuel et futur étant étudiées de manière relative, les différences observées sur moyennes annuelles et saisonnières n'entravent pas la comparaison entre les jeux de données.

Tableau 11 - Évolution de la hauteur significative des vagues à la bouée Brittany pour une projection à l'horizon 2075-2096. Le scénario A1B est comparé au scénario de contrôle REF. Les nuances de bleu montrent les évolutions négatives et les nuances de rouge les évolutions positives.

Evolution [1975-1996 => 2075-2096] near Brittany buoy location (62163)					
SWH		REF (m)		A1B (%)	
		Mean	H95th	Mean	H95th
Annual	BoBWA-F	3	5.5	-4	-5
	Morellato	3.25	6	-4	-5
	MORI	2.75	5	-2	-5
Winter	BoBWA-F	4.5	8	-2	-3
	Morellato	4.75	8	-2	-3
	MORI	3.5	6.75	2	0
Spring	BoBWA-F	2.75	5.25	-6	-10
	Morellato	3.25	6	-6	-6
	MORI	3.25	5.25	-6	-6
Summer	BoBWA-F	2	3.25	-10	-15
	Morellato	2.25	3.75	-12	-20
	MORI	2	3.5	-4	-10
Autumn	BoBWA-F	3.25	6	-4	-6
	Morellato	3.5	6.5	-4	-2
	MORI	2.75	5	-2	-6

Tableau 12 - Évolution de la hauteur significative des vagues à la bouée Brittany pour une projection à l'horizon 2061-2100. Les trois scénarios B1, A1B et A2 des GES sont comparés au scénario de contrôle REF. Les nuances de bleu montrent les évolutions négatives et les nuances de rouge les évolutions positives.

SWH		Evolution [1961-2000 => 2061-2100] near Brittany buoy location (62163)							
		REF (m)		B1 (%)		A1B (%)		A2 (%)	
		Mean	H95th	Mean	H95th	Mean	H95th	Mean	H95th
Annual	BoBWA-F	3	5.75	-2	-2	-4	-6	-5	-6
	Morellato	3.25	6	-3	-3	-4	-4	-4	-5
Winter	BoBWA-F	4.5	7.75	0	0	-1	-1	-2	-2
	Morellato	4.75	8	-2	-2	-1	-1	0	0
Spring	BoBWA-F	2.75	5.25	-2	-2	-6	-9	-8	-10
	Morellato	3.25	6	-4	-4	-8	-6	-8	-6
Summer	BoBWA-F	2	3.5	-6	-8	-11	-18	-11	-18
	Morellato	2.25	3.75	-11	-10	-10	-14	-12	-18
Autumn	BoBWA-F	3.25	5.75	-4	-4	-6	-6	-6	-6
	Morellato	3.5	6.5	-2	0	-3	-2	-4	-4

Tableau 13 - Évolution de la période moyenne des vagues à la bouée Brittany pour une projection à l'horizon 2075-2096. Le scénario A1B est comparé au scénario de contrôle REF. Les nuances de bleu montrent les évolutions négatives et les nuances de rouge les évolutions positives.

Evolution [1975-1996 => 2075-2096] near Brittany buoy location (62163)			
MWP		REF (s)	A1B (%)
Annual	BoBWA-F	9	-3
	MORI	5	0
Winter	BoBWA-F	11	0
	MORI	6	1
Spring	BoBWA-F	9	-4
	MORI	5	-2
Summer	BoBWA-F	8	-5
	MORI	5	-1
Autumn	BoBWA-F	9	-3
	MORI	5	0

Tableau 14 - Évolution de la direction moyenne des vagues à la bouée Brittany pour une projection à l'horizon 2061-2100. Les scénarios B1, A1B et A2 sont comparés au scénario de contrôle REF. Les nuances de bleu montrent les évolutions négatives et les nuances de rouge les évolutions positives.

MWD		Evolution [1961-2000 => 2061-2100] near Brittany buoy location (62163)			
		REF (°N)	REF - B1 (°N)	REF - A1B (°N)	REF - A2 (°N)
Annual	BoBWA-F	290	0	2	1
	Morellato	280	0	0	1
Winter	BoBWA-F	290	-2	2	-4
	Morellato	280	-1	-4	-2
Spring	BoBWA-F	300	2	2	4
	Morellato	280	3	3	3
Summer	BoBWA-F	300	6	8	8
	Morellato	280	3	3	5
Autumn	BoBWA-F	290	-2	-1	-2
	Morellato	280	1	1	1

ÉTÉ

L'été est la saison pour laquelle les modifications sur les paramètres de vagues sont les plus prononcées. Une baisse de la hauteur significative des vagues est notable sur les deux périodes d'analyse (entre 1961-2000 et 2061-2100 et entre 1975-1996 et 2075-2096) et pour les trois jeux de données (Tableau 12, Tableau 11).

Cette baisse est d'autant plus marquée que le scénario est pessimiste :

- dans les données BOBWA, la hauteur significative moyenne du scénario REF (2m en moyenne sur le Golfe de Gascogne) diminue respectivement de 5 %, 8 % et 12 % pour les scénarios B1, A1B et A2 (Figure 47) ;
- dans les données MORELLATO, la diminution des hauteurs significatives est moins amplifiée pour les scénarios les plus pessimistes et reste relativement constante (de 10 % à 12 %, cf. Figure 47).

Pour les vagues les plus fortes, la baisse des hauteurs significatives est amplifiée (cf. Figure 48). A la bouée Brittany, la hauteur des vagues supérieures au quantile 95 (respectivement de 3,5 m et 3,75 m pour BOBWA et MORELLATO) diminue d'environ 18 % pour le scénario A2 (dans les données BOBWA et MORELLATO).

Les périodes moyennes des vagues estivales présentent aussi une baisse mais relativement faible (5 % dans BOBWA et 1 % dans MORI pour le scénario A1B, cf. Tableau 13).

Concernant les directions (cf. Tableau 14), une rotation horaire globale des vagues estivales est observée. On note une rotation en moyenne de 6° (B1) à 8° (A2) vers le Nord à la bouée Brittany pour le jeu BOBWA, et d'une manière moins marquée, une rotation de 3° (B1) à 5° (A2) pour la projection MORELLATO (cf. Figure 49).

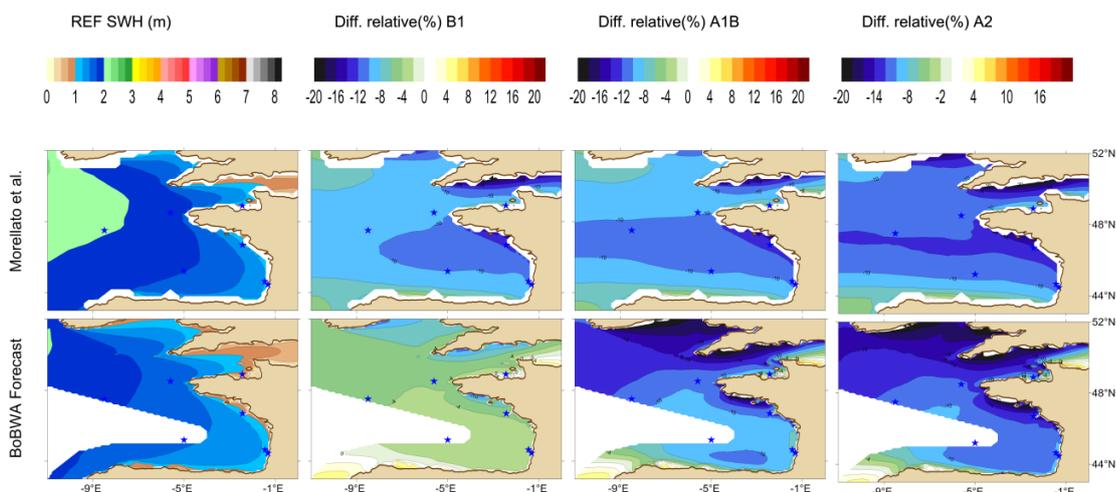


Figure 47 - Cartes d'évolutions relatives des hauteurs de vagues en été pour les 3 scénarios de GES entre 2061-2100 et 1961-2000.

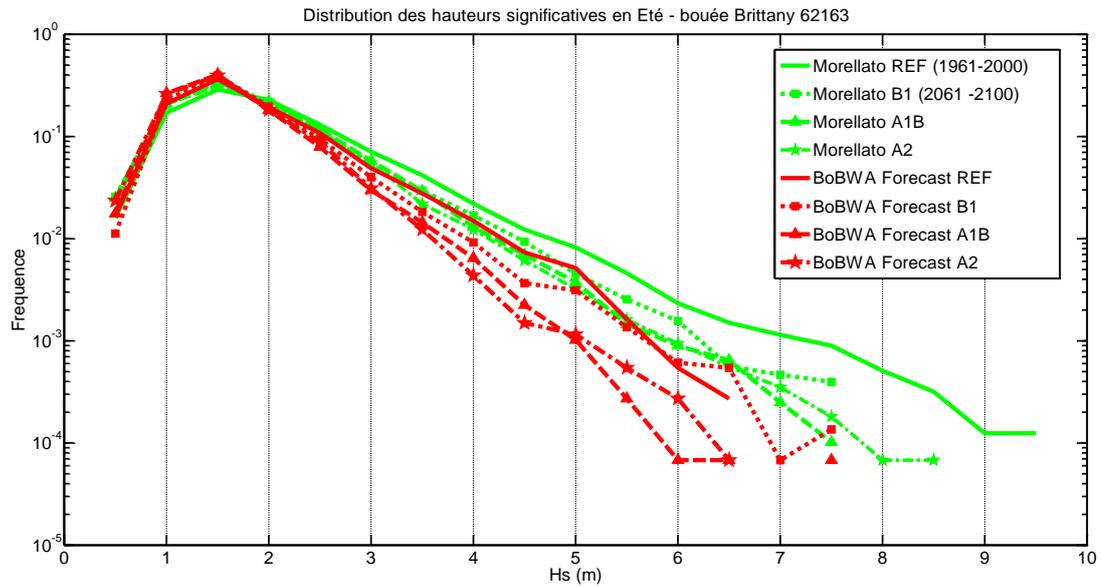


Figure 48 - Distribution des hauteurs significatives de vagues en été à la bouée Brittany pour le scénario de contrôle (trait plein) et les trois projections (pointillées).

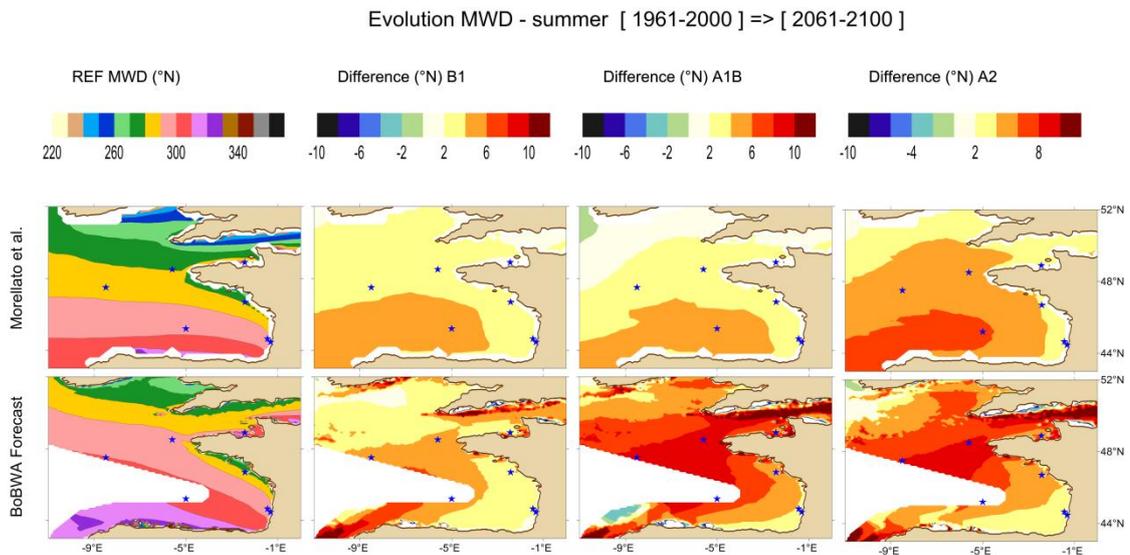


Figure 49 - Cartes d'évolutions relative des directions des vagues en été pour les 3 scénarios de GES entre 2061-2100 et 1961-2000.

Automne et Printemps

Pour ces saisons, on retrouve une baisse des hauteurs significatives de vagues, toujours plus marquée à mesure que les scénarios de GES sont pessimistes. Cette

baisse est cependant moins importante qu'en été. A la bouée Brittany, elle est de 10 % au printemps et de 6 % en automne pour le scénario le plus pessimiste (A2).

En automne, on remarque, toutefois, une baisse plus prononcée le long de la côte Aquitaine et de la côte nord de l'Espagne dans les données BOBWA, en particulier pour les vagues les plus fortes. La Figure 50 montre les différences relatives sur les vagues supérieures au quantile 95. Le long de la côte Aquitaine, les données BOBWA présentent une baisse de l'ordre de 16 %.

Pour les périodes, on note une très légère baisse dans les données MORI et BOBWA, de manière plus marquée au printemps (de l'ordre de 2 % à 4 % pour le scénario A1B, cf. Tableau 13). Néanmoins, cette diminution reste moins marquée qu'en été.

Pour les directions, aucune évolution notable ne ressort.

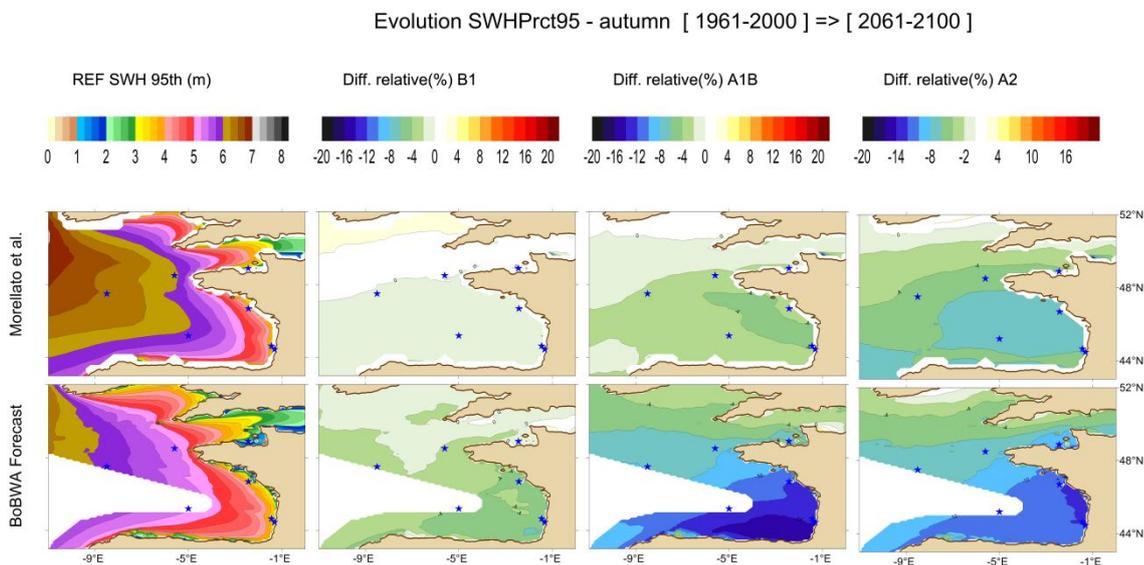


Figure 50 - Cartes d'évolutions relative des quantiles 95 des hauteurs de vagues automnales (Hs-95) pour les trois scénarios de GES entre 2061-2100 et 1961-2000.

Hiver

En hiver, les évolutions sont nettement moins marquées : entre 0 % et - 4 % pour les hauteurs moyennes et supérieures au quantile 95, et entre 0 % et + 1 % pour les périodes (au niveau de la bouée Brittany).

Cependant, dans les données MORELLATO, on remarque une légère hausse des hauteurs significatives supérieures au quantile 95, dans la partie nord du Golfe de Gascogne (Sud Irlande ainsi que Nord Bretagne et Manche), entre + 2 % et + 4 % (cf. Figure 51). Cette hausse n'est pas reproduite dans les données BOBWA pour lesquelles on observe plutôt une baisse (de 0 % à - 4 %).

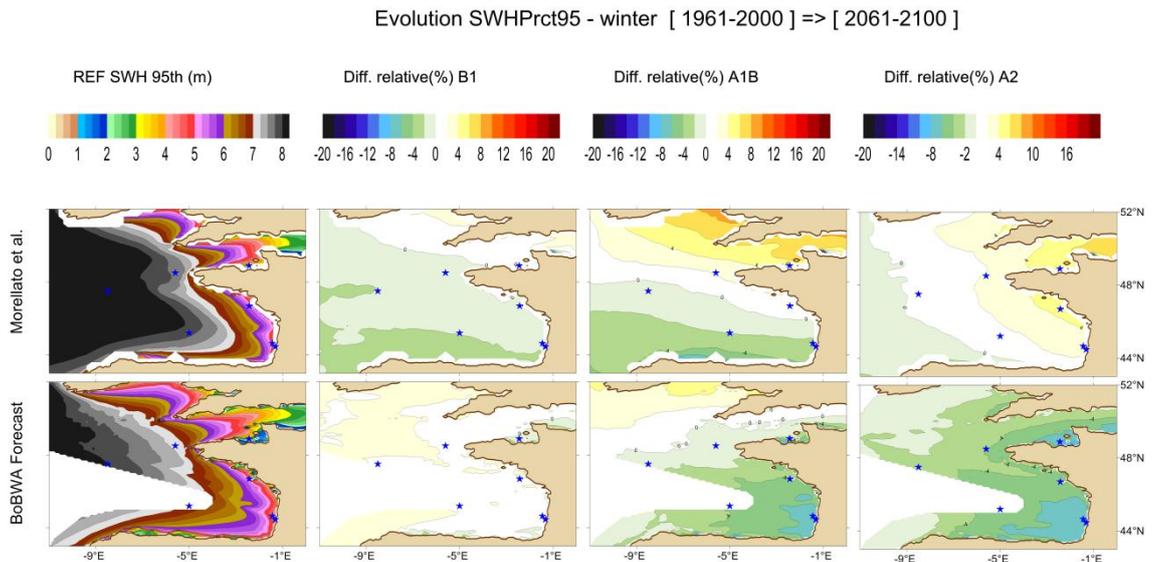


Figure 51 - Cartes d'évolutions relatives des quantiles 95 des hauteurs de vagues hivernales (Hs-95) pour les trois scénarios de GES entre 2061-2100 et 1961-2000.

Synthèse

Les principales évolutions saisonnières des vagues futures observées entre la fin du 20^{ème} siècle et la fin du 21^{ème} siècle sont les suivantes :

- en été, une baisse des hauteurs de vagues (de l'ordre de -5 à -12 % pour les Hs moyennes et jusqu'à -20 % pour les Hs-95) et des périodes moyennes (de l'ordre de -5 %). On note également une rotation des vagues vers le nord (de l'ordre de +3° à +8°) ;
- en automne et au printemps, on note également une légère baisse (moins marquée qu'en été) des hauteurs significatives (en moyenne de -6 %) et des périodes (de l'ordre de -2 % à -4 %). Au printemps, une légère rotation des directions vers le nord est également visible (de +3° à +4°) ;
- l'hiver est la saison pour laquelle les évolutions sont les moins prononcées.

5.3.2. Comparaison ponctuelle des évolutions

Pour l'analyse ponctuelle, on présente les diagrammes bivariés pour l'ensemble des points, uniquement pour la saison estivale qui a montré les modifications les plus importantes dans l'analyse spatiale. Pour les autres saisons, seuls les diagrammes à la bouée Gascogne sont présentés. Les modifications étant croissantes avec les scénarios les plus pessimistes, on ne regarde que les différences entre le scénario A2 et la référence. La quantité de données exploitables pour cette analyse est assez restreinte. En effet, les données de Mori et al. (2010) ne sont pas utilisées ici car l'analyse spatiale a montré que la résolution du modèle était insuffisante pour

reproduire correctement les vagues à l'intérieur du Golfe de Gascogne. De plus, pour les diagrammes Hs/Tm, seules les données BOBWA sont exploitables car les données de Morellato et *al.* (2010) ne comprennent pas les périodes.

ÉTÉ

Pour la saison estivale, les diagrammes sont présentés sur la Figure 52 (Gascogne), la Figure 53 (Ouessant), la Figure 54 (Yeu) et la Figure 55 (Cap-Ferret). De manière générale, on observe, sur tous les points, une baisse de l'occurrence des vagues les plus énergétiques (avec de longues périodes et de longues directions) accompagnée d'une hausse de l'occurrence des vagues peu énergétiques.

Concernant les directions, les deux jeux de données montrent pour tous les points une rotation vers le nord. Pour les points les plus au nord (Ouessant et Yeu), le basculement a lieu autour de 280°. Au niveau de la bouée Yeu, on note une augmentation de l'occurrence des vagues entre 250° et 280° et une diminution entre 280° et 300°. Pour Ouessant, la gamme de variation est un peu plus large car le point est plus éloigné de la côte. En ce qui concerne les deux points les plus au sud (Gascogne et Cap-Ferret), la limite se situe plutôt autour de 300°. De même que pour les deux précédents points, la gamme de variation est un peu plus restreinte au niveau de Cap-Ferret dont la position est plus côtière (augmentation de l'occurrence entre 300° et 320° et diminution entre 280° et 300°).

En résumé, la diminution des hauteurs significatives et des périodes observée sur les cartes s'explique (pour les données BOBWA) par une baisse de l'occurrence des vagues les plus énergétiques du même ordre de grandeur selon la latitude et la position des points étudiés (hauturiers ou côtiers). On note également, dans les deux jeux de données utilisés, une rotation des vagues vers le nord qui se répercute (avec une amplitude plus faible) sur les points côtiers.

AUTRES SAISONS

Les diagrammes à la bouée Gascogne sont présentés sur la Figure 56 (hiver), la Figure 57 (automne) et la Figure 58 (printemps).

En hiver, les données BOBWA montrent une augmentation des vagues de type houle (avec des périodes plus longues). Pour les deux jeux de données, il ne ressort pas de modification nette des directions.

En automne et au printemps, les différences sont assez peu prononcées. Les changements observés entre les scénarios A2 et REF sont plus difficilement interprétables car les modifications d'occurrence sont de faibles intensités et on note plus de disparités entre les deux jeux de données et les points étudiés.

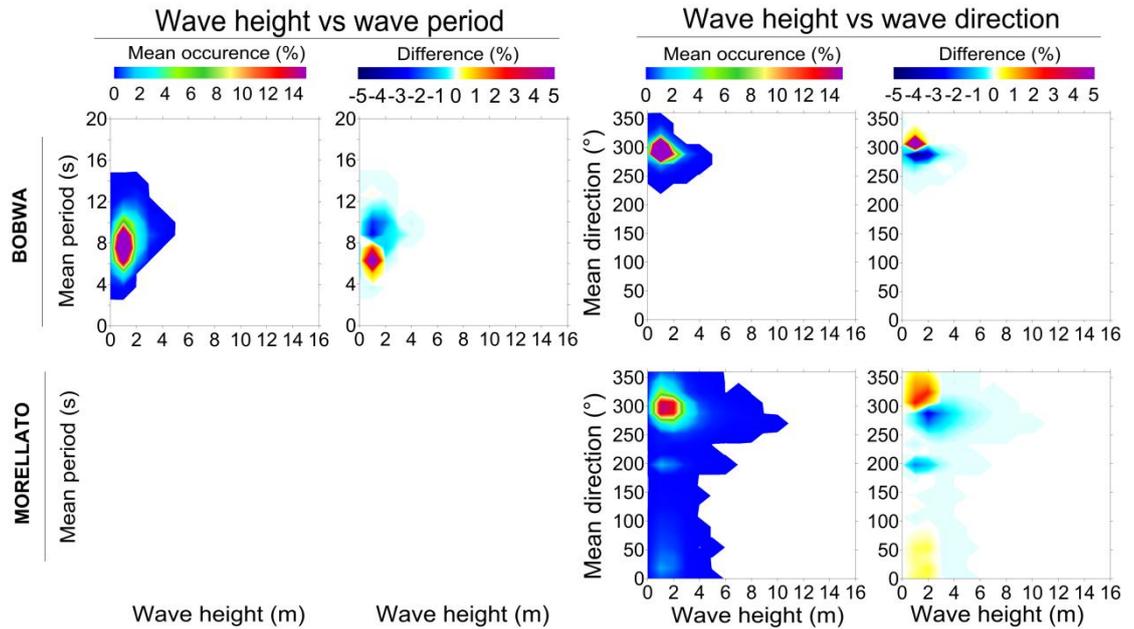


Figure 52 - Diagrammes bivariés à la bouée **Gascogne en été**. Les occurrences moyennes sont calculées à partir des scénarios REF et les différences sont calculées en soustrayant le diagramme A2 au REF.

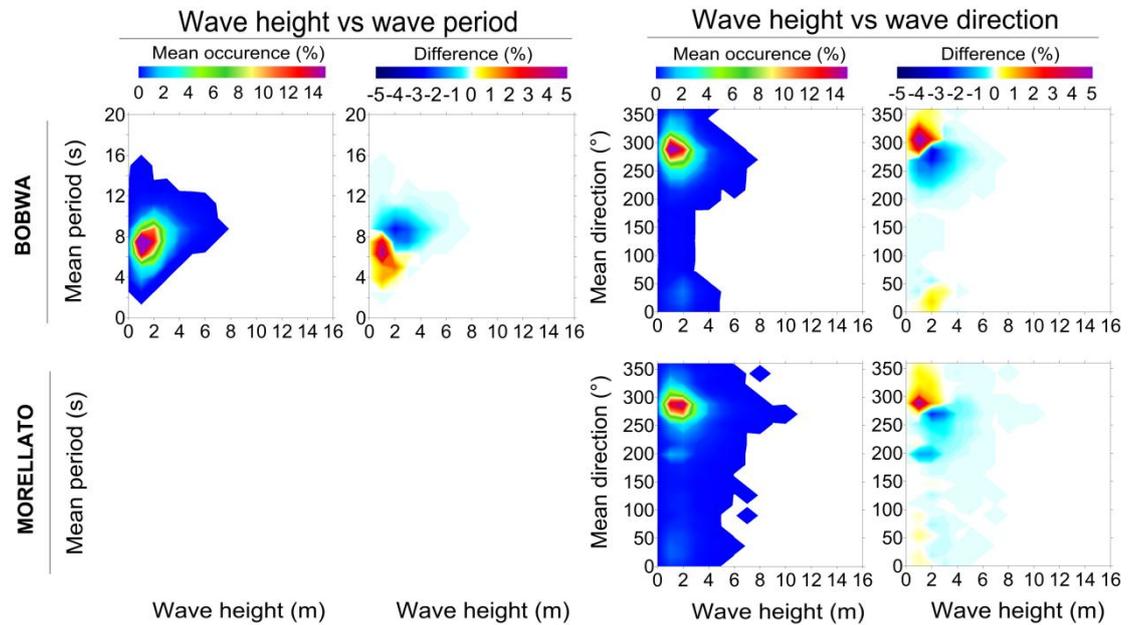


Figure 53 - Diagrammes bivariés à la bouée **Ouessant en été**. Les occurrences moyennes sont calculées à partir des scénarios REF et les différences sont calculées en soustrayant le diagramme A2 au REF.

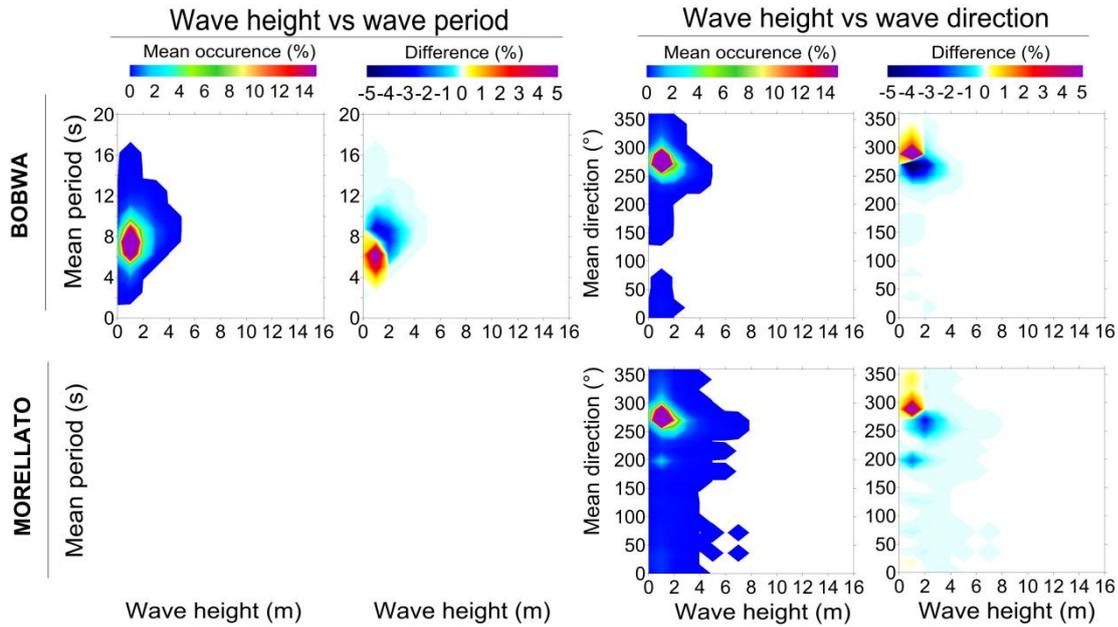


Figure 54 - Diagrammes bivariés à la bouée **Yeu en été**. Les occurrences moyennes sont calculées à partir des scénarios REF et les différences sont calculées en soustrayant le diagramme A2 au REF.

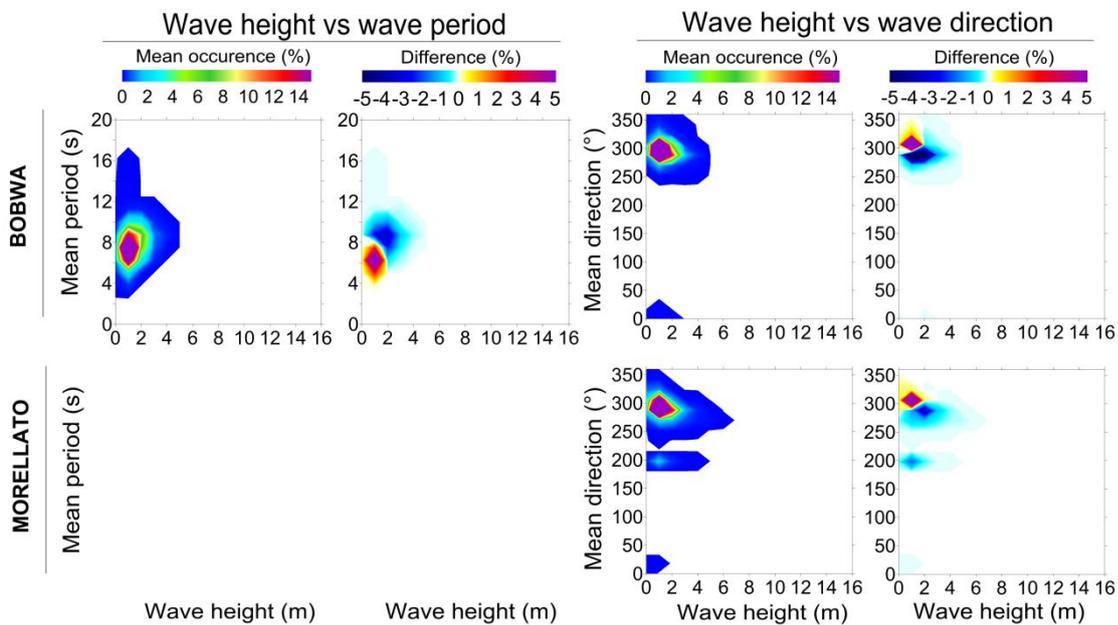


Figure 55 - Diagrammes bivariés à la bouée **Ferret en été**. Les occurrences moyennes sont calculées à partir des scénarios REF et les différences sont calculées en soustrayant le diagramme A2 au REF.

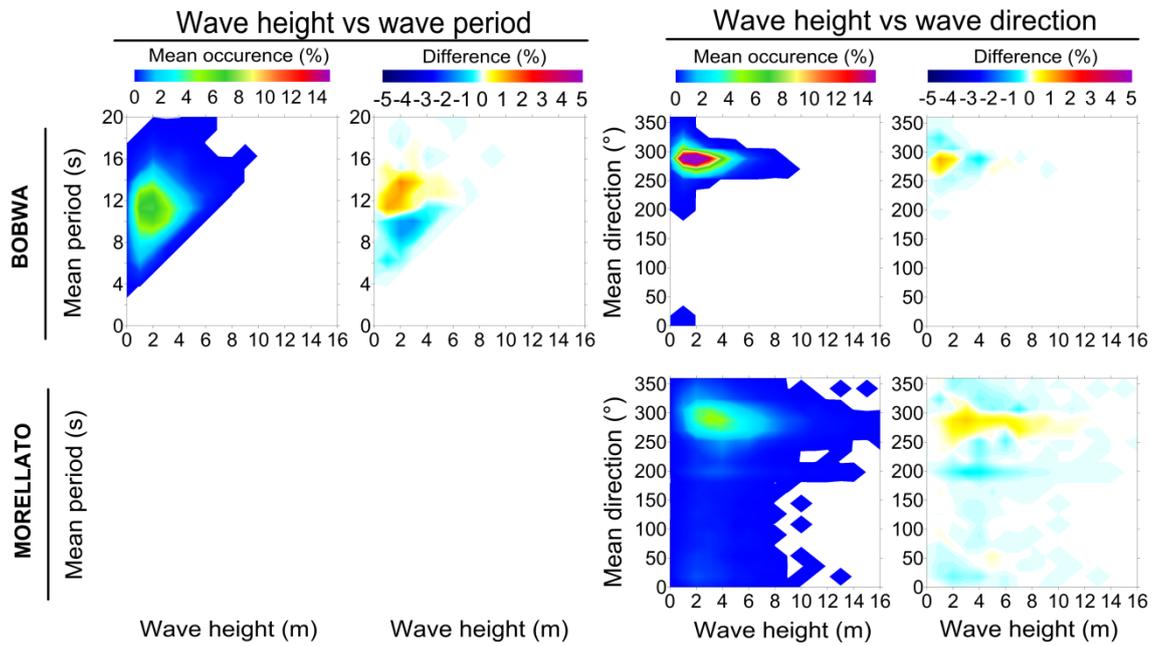


Figure 56 - Diagrammes bivariés à la bouée **Gascogne en hiver**. Les occurrences moyennes sont calculées à partir des scénarios REF et les différences sont calculées en soustrayant le diagramme A2 au REF.

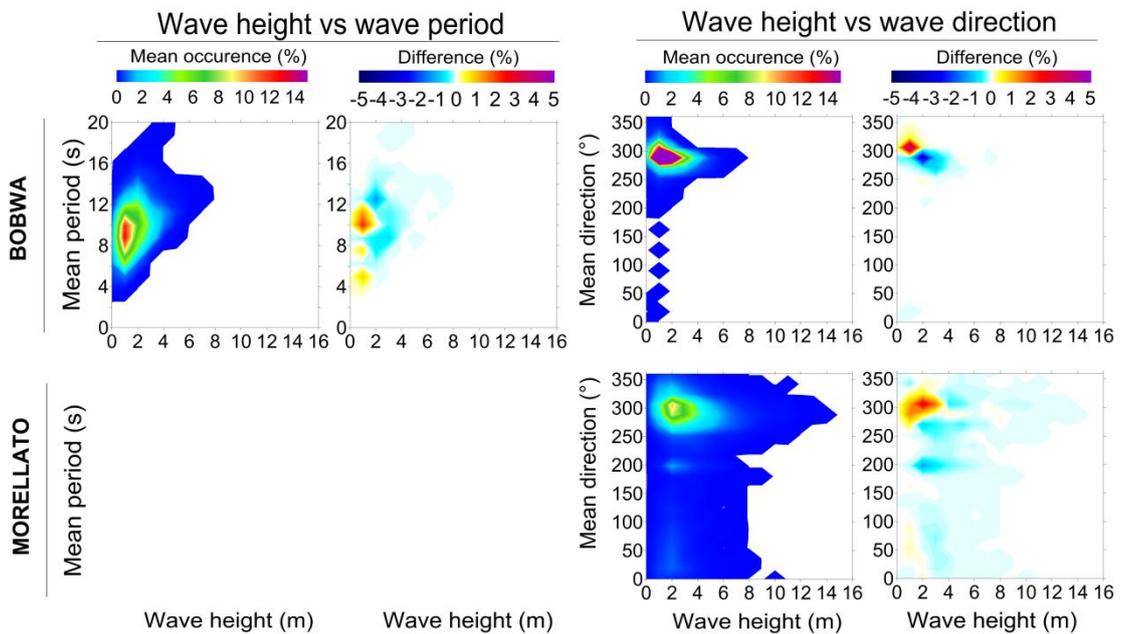


Figure 57 - Diagrammes bivariés à la bouée **Gascogne en automne**. Les occurrences moyennes sont calculées à partir des scénarios REF et les différences sont calculées en soustrayant le diagramme A2 au REF.

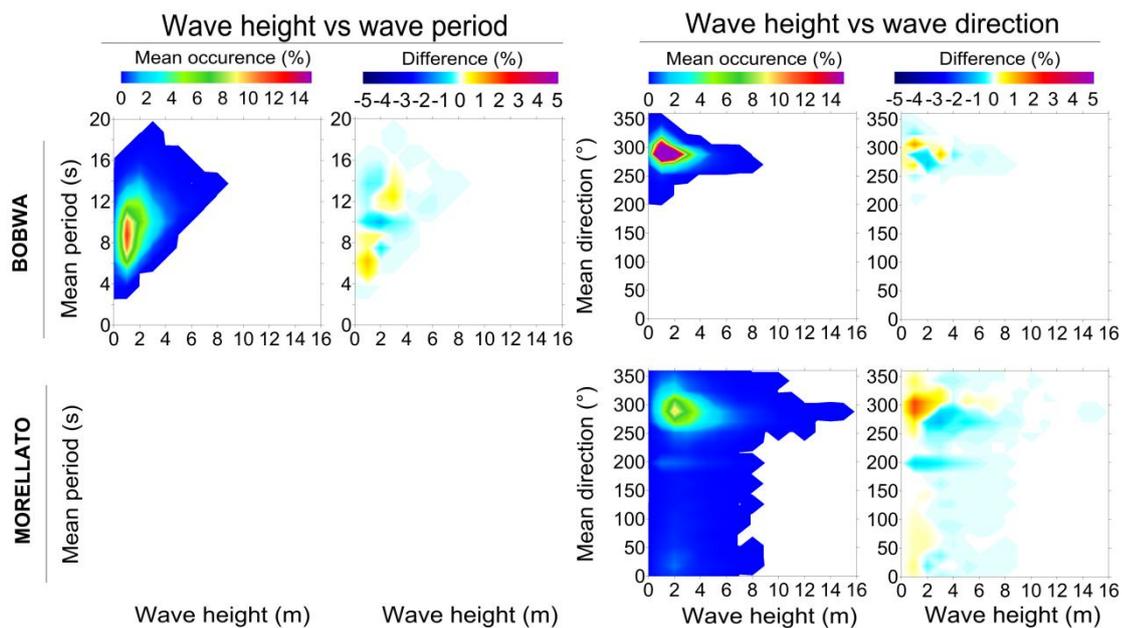


Figure 58 - Diagrammes bivariés à la bouée **Gascogne au printemps**. Les occurrences moyennes sont calculées à partir des scénarios REF et les différences sont calculées en soustrayant le diagramme A2 au REF.

6. Conclusions

Cette étude propose une intercomparaison de simulations rétrospectives et prospectives des vagues dans le Golfe de Gascogne. Pour les simulations rétrospectives, une analyse des performances et des tendances d'évolution sur la fin du 20^{ème} siècle a été réalisée. Les données utilisées sont BOBWA (Charles et *al.*, 2012a), BAD (Bertin and Dodet, 2010), ANEMOC (Benoit et *al.*, 2006), CERA-40 (Caires and Sterl, 2005) et ERA-INTERIM (Dee et *al.*, 2011). Pour les simulations prospectives (ou projections), les évolutions des climats de vagues entre la fin du 20^{ème} siècle et la fin du 21^{ème} siècle ont été étudiées à partir des données BOBWA (Charles et *al.*, 2012b), MORI (Mori et *al.*, 2010) et MORELLATO (Morellato et *al.*, 2010).

Pour les simulations rétrospectives, la **comparaison des simulations aux données de bouées** et l'analyse de la variabilité spatiale et saisonnière des différents modèles montrent que :

- au large, on observe une sous-estimation des hauteurs de vagues (Hs) par les modèles globaux et une surestimation par les modèles régionaux sur l'ensemble du Golfe de Gascogne, en particulier pour les quantiles les plus élevés. Parmi les modèles régionaux, BOBWA est celui qui représente le mieux tous les types de vagues (y compris les vagues de type tempête) dont les hauteurs sont surestimées par les deux autres modèles, en particulier ANEMOC ;
- en zone côtière, BOBWA montre les meilleures performances sur toutes les bouées étudiées. Les deux autres modèles tendent à surestimer les vagues les plus hautes (sauf à la bouée Minquiers). On note également une surestimation quasi systématique des périodes pour tous les jeux de données ;
- en Manche, les trois modèles régionaux tendent plutôt à sous-estimer les hauteurs de vague et présentent tous une rotation des directions de provenance d'environ 30° vers le nord. Ces différences par rapport aux observations sont vraisemblablement dues à la non prise en compte de la marée et des courants de marée qui ont un fort impact dans ce secteur ;
- les données IOWAGA restent les plus performantes mais ne couvrent actuellement qu'une dizaine d'années.

Les bons résultats des données BOBWA dans le Golfe de Gascogne peuvent notamment s'expliquer par les données de calibration (bouée Gascogne) qui sont toutes situées dans cette zone géographique.

Les **principales tendances actuelles** (significatives à plus de 95 %) observées de manière cohérente pour les différents jeux de données sur la fin du 20^{ème} siècle sont les suivantes :

- l'été est la saison pour laquelle les tendances les plus fortes ont pu être dégagées sur l'ensemble des jeux de données sur la période 1970-2001. Il ressort une augmentation des hauteurs pour les vagues moyennes (de + 0,5 à + 1 cm/an) et les vagues les plus hautes (+ 0,5 à + 2 cm/an pour Hs-90) et des périodes moyennes (+ 0,02 à + 0,04 s/an) sur l'ensemble du Golfe de Gascogne, ainsi qu'une légère rotation des directions vers le sud (de l'ordre de - 0,4° N/an) dans la partie nord du Golfe de Gascogne. Cette tendance s'explique par une augmentation de l'occurrence des vagues plus énergétiques de provenance Ouest-Nord-Ouest par rapport aux vagues moins énergétiques de provenance Nord-Ouest ;
- en automne, il ressort principalement une tendance à l'augmentation des hauteurs de vagues supérieures au quantile 90 (de l'ordre de 3 cm/an) sur la période 1970-2001 (et sur la période 1958-2001 mais avec une amplitude plus faible). On note une tendance à la hausse de l'occurrence des vagues de plus forte cambrure (avec de plus fortes hauteurs significatives mais sans augmentation particulière des périodes) par rapport aux vagues de type houle ;
- en hiver, les tendances sont moins marquées que sur les deux saisons précédentes. Toutefois, il se dégage une légère augmentation des hauteurs significatives et des périodes moyennes (+ 0,02 à + 0,04 s/an) sur la période 1958-2001 (plus ou moins significative selon les données). Celle-ci semble s'expliquer par une augmentation de l'occurrence des vagues longues de type houle dont la direction de provenance se situe entre 280° et 300° ;
- au printemps, aucune tendance nette n'est observée.

Les **principales évolutions futures** observées de manière cohérente pour les différents jeux de données entre la fin du 20^{ème} siècle et la fin du 21^{ème} siècle sont les suivantes :

- de nouveau, l'été est la saison pour laquelle on note les évolutions les plus nettes avec une baisse des hauteurs significatives (de - 5 % à - 12 %, jusqu'à - 20 % pour les vagues supérieures au quantile 95) et des périodes moyennes. Celle-ci s'explique par une occurrence moins importante des vagues les plus énergétiques. On note également une rotation vers le nord de la direction de provenance des vagues (de l'ordre de + 3 à + 8° N) suffisamment forte pour se répercuter (avec une amplitude plus faible) sur les zones côtières ;
- en automne et au printemps, on observe également une légère baisse des hauteurs significatives (de l'ordre de - 6 %) et des périodes (- 2 % à - 4 %), mais beaucoup moins marquée qu'en été ;
- l'hiver est la saison pour laquelle les évolutions sont les moins prononcées. On note cependant une légère diminution de la hauteur des vagues.

De manière générale, on observe dans tous les jeux de données :

- pour le climat actuel, une tendance globale à la hausse des hauteurs significatives, particulièrement marquée en été à partir des années 70 ;
- pour le climat futur, une tendance globale à la baisse des hauteurs significatives, également plus prononcée en été.

Les tendances observées sur la fin du 20^{ème} siècle ne semblent donc pas se poursuivre sur la fin du 21^{ème} siècle. Charles et al. (2012b) ont directement analysé les relations entre la modification des caractéristiques saisonnières des différents types de vagues et des vents à 10m. Ils ont montré que l'évolution des climats de vagues résultait de l'association complexe entre l'évolution des vents locaux et des vents à plus grande échelle. Il ressort de leur analyse que le noyau de vents forts de la partie centrale de l'Atlantique Nord montre une intensification et un décalage progressif vers le Nord-Est. Ils concluent que l'inversion de la tendance sur les hauteurs significatives des vagues pourrait s'expliquer par ce phénomène qui induirait (1) dans un premier temps, une augmentation des hauteurs de vagues dans le Golfe de Gascogne et, (2) dans un second temps, une diminution associée à une rotation horaire des directions.

Afin d'expliquer les tendances actuelles et les évolutions futures observées, différentes études tentent de relier les modifications sur les climats de vagues à la circulation atmosphérique générale qui dépend principalement des champs de pression. L'analyse des anomalies de pression (journalières, mensuelles ou annuelles) permet de mettre en évidence des modes de variabilité. Les deux principales techniques utilisées dans la littérature consistent à analyser :

- les indices de téléconnexion de l'Atlantique Nord détaillés dans Barnston and Livezey (1987). Il s'agit d'une analyse en composantes principales des anomalies de pression par rapport à la situation moyenne. Les deux principaux sont la NAO (North Atlantic Oscillation) et l'EA (East Atlantic Pattern). Les indices décrivent l'intensité du mode de téléconnexion ;
- les régimes de temps (Vautard, 1990). Ces derniers sont également calculés par une analyse en composantes principales des anomalies de pression suivie d'une classification avec un algorithme K-means. En Atlantique Nord, on distingue quatre régimes (ou classes) : régime zonal ou ZO (correspondant à NAO+), régime de l'anticyclone du Groënland ou GA (correspondant à NAO-), régime blocage ou BL, et régime dorsale ou AR. Les régimes de temps sont représentés sous forme d'occurrences (les anomalies journalières de circulation peuvent être reliées à l'un des quatre régimes de temps).

Différents travaux sont actuellement en cours sur ces sujets, notamment au LNHE et au BRGM.

Les **principales leçons** que l'on peut tirer de cette étude sur le Golfe de Gascogne sont les suivantes :

- aux échelles de temps courtes (évènementielles), les différences entre les jeux de données sont notables, en particulier pour les vagues les plus fortes. En ce

qui concerne les moyennes mensuelles, on note également des variations (notamment spatiales) entre les jeux de données. Pour une représentation fine des paramètres de vagues actuelles, la comparaison des performances a montré que, sur les bouées étudiées, les données BOBWA montrent les meilleurs résultats dans la majorité des cas ;

- en revanche, pour les études long-terme, il ressort, tout comme dans Caires et *al.* (2004), que les tendances actuelles et les évolutions futures les plus marquées et significatives sont représentées de manière assez similaire dans tous les jeux de données.

Notons cependant que la sélection d'un jeu de données par rapport à un autre reste conditionnée par le secteur étudié (hauturier/côtier et selon la latitude) et l'objectif poursuivi (cartes d'aléa, dimensionnement, analyse d'extrêmes, etc.). Dans le cas d'études de dimensionnement notamment, des précautions particulières doivent être prises avec les jeux de données (modèles) qui sous-estiment, même si leurs erreurs statistiques sont plus faibles. Dans le secteur de la Manche, pour lequel les performances des données (modèles) analysées sont de moins bonne qualité (notamment à cause de la non prise en compte de la marée et des courants de marée), les sorties de modèles doivent également être utilisées avec beaucoup de précautions. Les données ANEMOC 2, qui seront disponibles prochainement, devraient améliorer cet aspect par la prise en compte des interactions avec la marée et les courants de marée dans le modèle de vagues. Rappelons que dans tous les cas, les mesures restent la référence par rapport aux sorties de modèles.

7. Bibliographie

- Ardhuin F., Chapron B., Collard F., 2009 : Strong decay of steep swells observed across oceans. *Geophysical Research Letters* 36 (6), art. no. L06607. doi:10.1029/2008GL037030
- Bacon, S. and D.J.T Carter, 1991: *Wave climate changes in the north Atlantic and North Sea*. *International Journal of Climatologie* 11, 545-558.
- Bacon, S. and D.J. Carter, 1993: A connection between mean wave height and atmospheric pressure gradient in the North Atlantic. *Int. J. Climatol.*, 13, 423-436.
- Benoit M., Lafon F., et Goasguen G., 2006 : Constitution et exploitation d'une base de données d'états de mer le long des côtes Françaises par simulation numérique sur 23 ans. Actes des IXèmes Journées Nationales Génie Côtier Génie Civil, 12-14 septembre 2006, Brest (France), pp 21-30. doi:10.5150/jngcgc.2006.003-B
- Benoit M., and Lafon F., 2004 : A nearshore wave atlas along the coasts of France based on the numerical modeling of wave climate over 25 years. *Proc. 29th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'2004), Lisbonne (Portugal)*, 714-726.
- Benoit M., Marcos F., and Becq F., 1996 : Development of a third generation shallow water wave model with unstructured spatial meshing. *Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Eng. (ICCE'1996), Orlando (Floride, USA)*, 465-478.
- Bertin, X., et Dodet, G., 2010: Variabilité du climat de houle dans le Golfe de Gascogne au cours des six dernières décennies. XIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil. Les Sables d'Olonne, 22-25 juin 2010. DOI :10.5150/jngcgc.2012.005-B.
- Butel, R., H. Dupuis, P. Bonneton, 2002 : Spatial variability of wave conditions on the french atlantic coast using in-situ data, *Journal of Coastal Research*, Special issue 36, p. 96-108, 2002
- Booij N., Ris R., and Holthuijzen L., 1999: A third generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *J. Geophys. Res.* 104(C4) : 7649-7666.
- Dodet G., Bertin X., and Taborda R., 2010 : Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. *Ocean Modelling* 31, pp 120-131. doi:10.1016/j.ocemod.2009.10.010
- Caires S., Sterl. A., Bidlot J.R., Graham N., and Swail V., 2004: Intercomparison of different wind wave reanalyses. *J. Climate*, 17, 1893-1913.
- Caires, S., A. Sterl, 2005: A New Nonparametric Method to Correct Model Data: Application to Significant Wave Height from the ERA-40 Re-Analysis. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 22, 443–459. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH1707.1>

Caires S., Swail V.R. and Wang X.L., 2006 : Projection and analysis of extreme wave climate. *J. Climate*, 19: 5581-5605.

Charles E., Idier D., Thiébot J., Le Cozannet G., Pedreros R., Ardhuin F., and Planton S., 2012 (a): Present Wave Climate in the Bay of Biscay: Spatiotemporal Variability and Trends from 1958 to 2001. *J. Climate*, **25**, 2020–2039. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00086.1>

Charles E., Idier D., Delecluse P., Déqué M. and Le Cozannet G., 2012 (b): Climate change impact on waves in the Bay of Biscay, France. *Ocean Dynamics*, June 2012, Volume 62, Issue 6, pp 831-848.

Compo G.P. et al., 2011 : The Twentieth century reanalysis project, *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 137, 1-28, doi:10.1002/qj.776.

Cox, A. T., and V. R. Swail, 2001: A global wave hindcast over the period 1958–1997: Validation and climate assessment. *J. Geophys. Res.*, **106** (C2), 2313–2329.

Debenard J.B. and Roed L.P., 2008: Future wind, wave and storm surge climate in the northern Seas: a revisit. *Tellus A*, 60(3) : 427-438.

Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balsameda MA, Balsamo G, Bauer P, Bechtold P, Beljaars ACM, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Delsol C, Dragani R, Fuentes M, Geer AJ, Haimberger L, Healy SB, Hersbach H, Hólm EV, Isaksen I, Kallberg P, Köhler M, Matricardi M, McNally AP, Monge-Sanz BM, Morcrette J-J, Park B-K, Peubey C, de Rosnay P, Tavolato C, Thépaut J-N, Vitart F., 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **137**: 553–597. DOI:10.1002/qj.828

Dupuis, H., D. Michel, A. Sottolichio, 2006 : Wave climate evolution in the Bay of Biscay over two decades. *Journal of marine systems* 63 (2006) 105-114.

Izaguirre C., Camus P., Menendez M., Mendez F. and Losada I., 2011 : Projection of extreme marine climate in coastal areas using statistical downscaling. In *Geophysical Research Abstracts*, volume 13, European Geosciences union.

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woolen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janoviac J., Mo K.C., Ropelevski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Roy Jenne R., Joseph H D., 1996 : *The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project*. *Bull. American Met. Soc.* 77, pp 437-470.

KERGADALLAN X., SANQUER R., LE BERRE A., AMIS G., 2012 : Fiches synthétiques de mesure des états de mer. Rapport du CETMEF, 394p.

Komen, G. J., L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, and P. A. E. M. Janssen, 1994: Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press, 556 pp., doi:10.2277/0521577810.

Le Cozannet G., Lecacheux S., Delvallée E., Desramaut N., Oliveros C., and Pedreros R., 2010 : Teleconnection pattern influence on sea-wave climates in the Bay of Biscay. *J. Climate*, **24**, 641–652. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2010JCLI3589.1>

James Leake, Judith Wolf, Jason Lowe, Peter Stansby, George Jacoub, Robert Nicholls, Mustafa Mokrech, Sophie Nicholson-Cole, Mike Walkden, Andrew Watkinson and Susan Hanson, 2007: Predicted Wave Climate for the UK: Towards an Integrated Model of Coastal Impacts of Climate Change. In proceedings of the 10th International Conference on Estuarine and Coastal modeling congress 2007, pages 393-406, ASCE.

Magne, R., Ardhuin, F., Roland, A., 2010. Prévisions et rejeux des états de mer du globe à la plage (waves forecast and hindcast from global ocean to the beach). *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 14, 149–162.

Morellato D., Benoit M., Tiberi-Wadier A.L., 2010 : Etats de mer et changement climatique – simulation des états de mer dans l’océan Atlantique de 1960 à 2100 pour trois scénarios de changement climatique. Actes des Journées « Impact du changement climatique sur les Risques Côtiers », Orléans nov. 2010.

Mori N., Yasuda T., Mase H., Tom T. and Oku Y., 2010: Projection of extreme wave climate change under global warming. *Hydrological Research letters*, 4: 15-19.

Swail, V. R., and A. T. Cox, 2000: On the use of NCEP–NCAR reanalysis surface marine wind fields for a long-term North Atlantic wave hindcast. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 532– 545.

Swail V.R. , Cardone V.J., Ferguson M., Gummer D.J., Harris E.L., Orelup E.A. and Cox A.T., 2006: The MSC50 wind and wave reanalysis. 9th International Workshop On Wave Hindcasting and Forecasting September 25-29, 2006 Victoria, B.C. Canada

Taylor K. ,2001 : Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2001, V106, D7.

Tolman, H. L., 2009: User manual and system documentation of wavewatch III version 3.14. Technical Note 276, NOAA / NWS / NCEP / MMAB, 194 pp.

Uppala, S. M., et al., 2005: The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131 2961–3012, doi:10.1256/qj.04.176

Wang, X. L. and V. R. Swail, 2001: Changes of extreme wave heights in northern hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes. *J. Climate*, 14, 2204–2221, doi:10. 1175/1520-0442(2001)014h2204:COEWHli2.0.CO;2.

Wang, X. L. and V. R. Swail, 2002: Trends of Atlantic wave extremes as simulated in a 40- Yr wave hindcast using kinematically reanalyzed wind fields. *J. Climate*, 15, 1020 1035, doi:10.1175/1520-0442(2002)015h1020:TOAWEAi2.0.CO;2.

Wang, X. L., F. W. Zwiers, and V. R. Swail, 2004: North Atlantic Ocean wave climate change scenarios for the twenty-first century. *J. Climate*, 17, 2368–2383, doi:10.1175/1520-0442(2004)017h2368:NAOWCCi2.0.CO;2.

Wang, X. L. and V. R. Swail, 2005: Historical and possible future changes of wave heights in northern hemisphere oceans. *Atmosphere– Ocean Interactions*, W. Perrie, Ed., *Advances in Fluid Mechanics Series*, Vol. 39, Wessex Institute of Technology Press, 300 pp.

Wang, X. L. and V. R. Swail, 2006: Climate change signal and uncertainty in projections of ocean wave heights. *Clim. Dynam.*, 26, 109–126, doi:10.1007/s00382-005-0080-x.

Wang, X. L., Feng Y. and V. R. Swail, 2012 : North Atlantic wave height trends as reconstructed from the 20th century reanalysis. *Geophysical Research Letters*, vol. 39, L18705, doi:10.1029/2012GL053381.

Weisse, R. and Günther, H., 2007: Wave climate and long-term changes for the Southern North Sea obtained from a high-resolution hindcast 1958-2002. *Ocean Dynamics*. DOI 10.1007/s10236-006-0094-x

Woolf, D. K., P. G. Challenor, and P. D. Cotton, 2002: Variability and predictability of the North Atlantic wave climate. *J. Geophys. Res.*, 107 (C10), 3145, doi: 10.1029/2001JC001124.

Annexe 1

Sélection de cartes de l'Atlas

L'annexe 1 présente une sélection des cartes réalisées dans l'atlas. Une version complète de celui-ci est jointe à ce rapport sous forme d'un CD-ROM.

Ici, on ne présente que les cartes les plus pertinentes qui ont servi à étayer l'analyse :

- les moyennes annuelles et mensuelles des paramètres Hs, Hs-90, Tm, et Dm, sur la période 1979-2001 qui est commune à tous les jeux de données ;
- les tendances d'évolution des paramètres Hs, Hs-90, Tm, et Dm sur les périodes pour lesquelles les tendances les plus fortes ont été constatées (1) en été, au printemps et en automne sur la période 1970-2001 (2) en hiver sur la période 1958-2001 ;
- les évolutions sur les paramètres Hs, Hs-90, Tm, et Dm entre 1961-2000 et 2061-2100 pour le scénario A2 (avec les données BOBWA et MORELLATO uniquement).

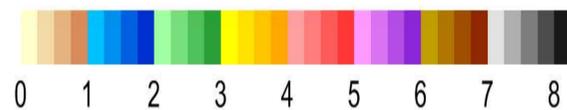
Annual - Period 1979-2001

Significant wave height (m)

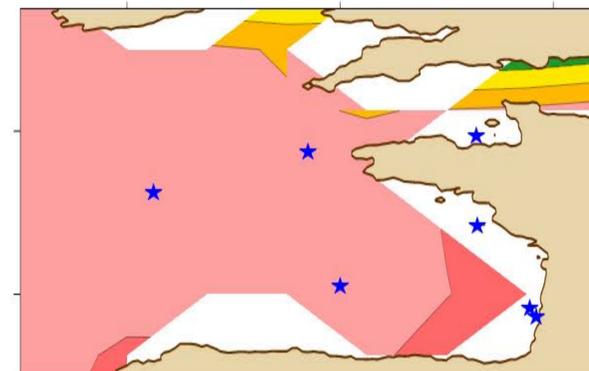
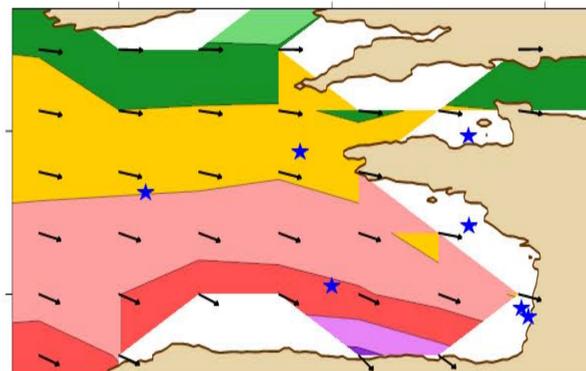
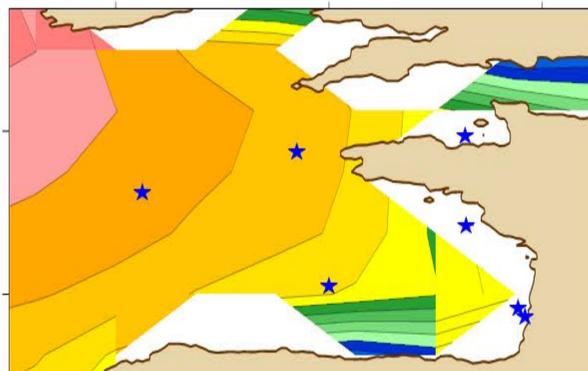
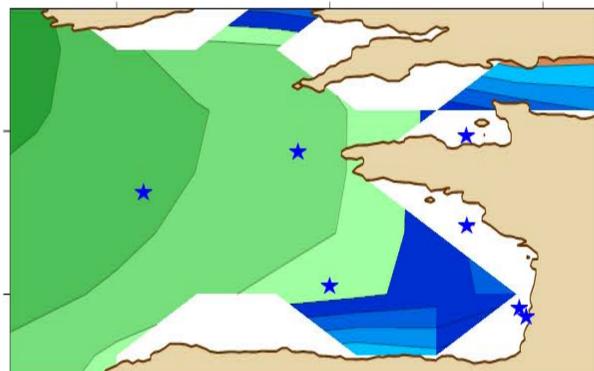
Significant wave height 90th (m)

Mean wave Direction ($^{\circ}$ N)

Mean wave Period (s)



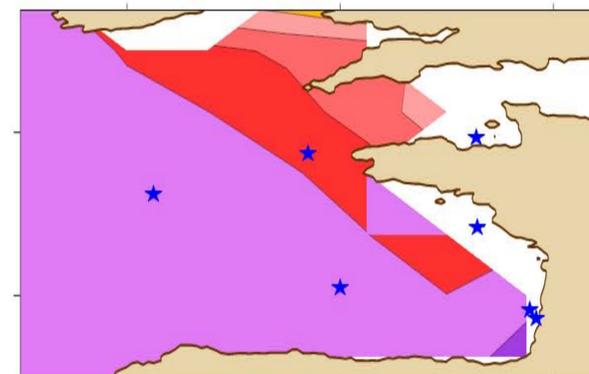
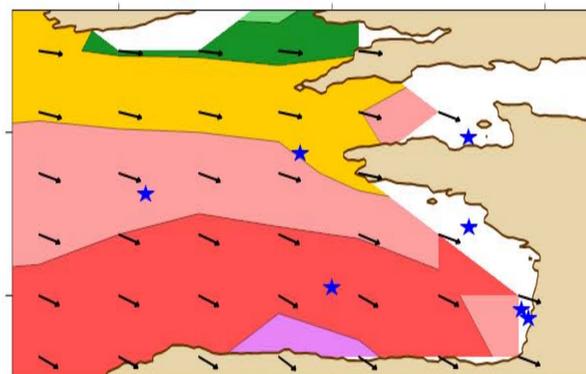
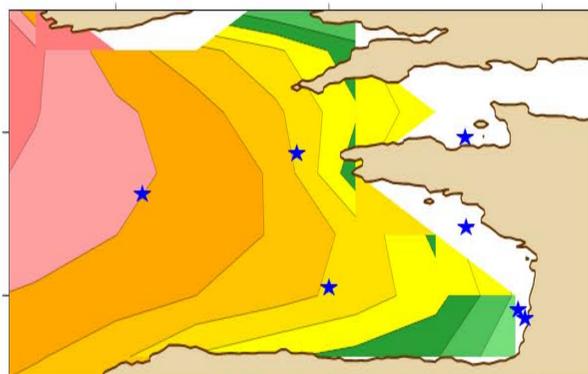
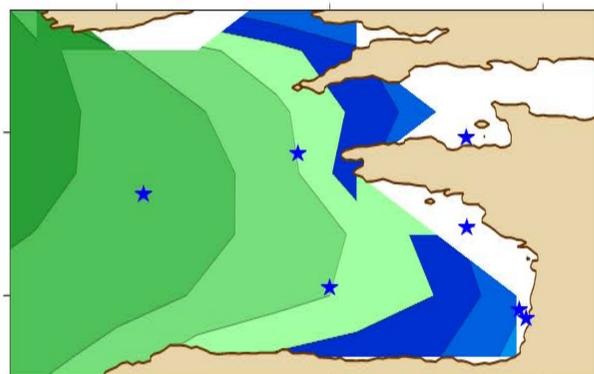
C-ERA40



49°N

45°N

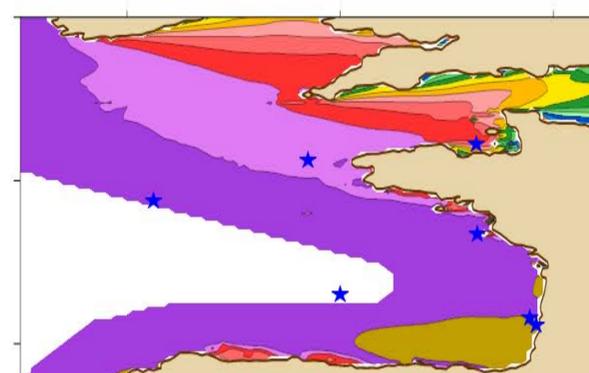
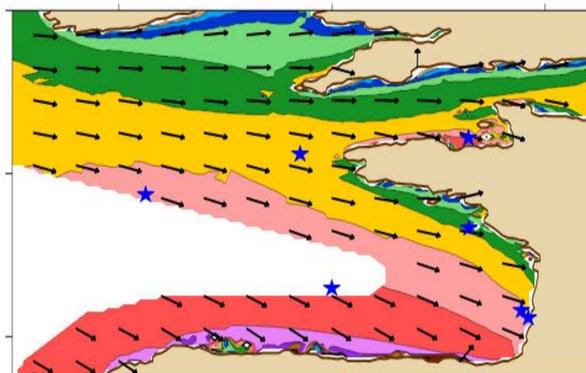
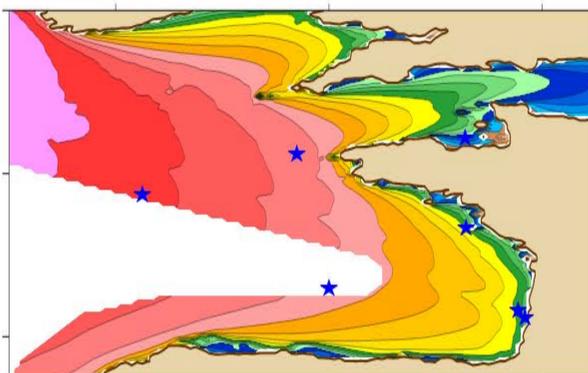
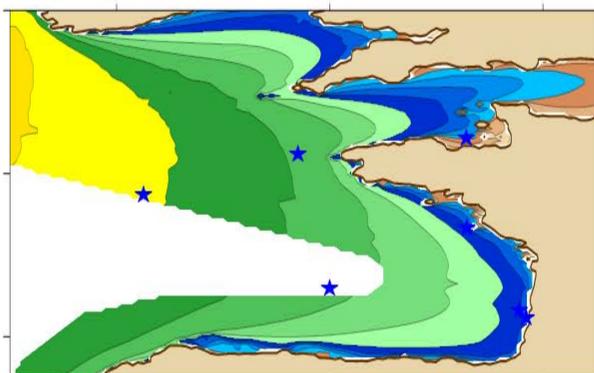
ERA-INTERIM



49°N

45°N

BoBWA

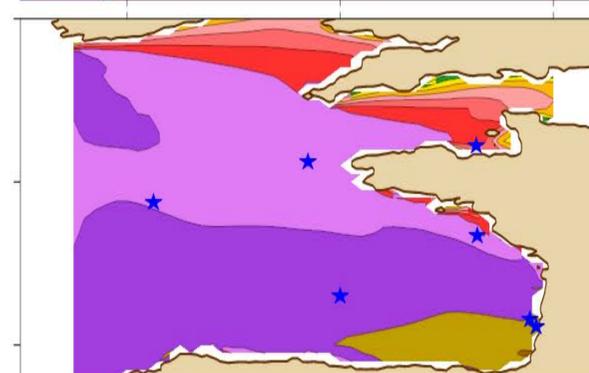
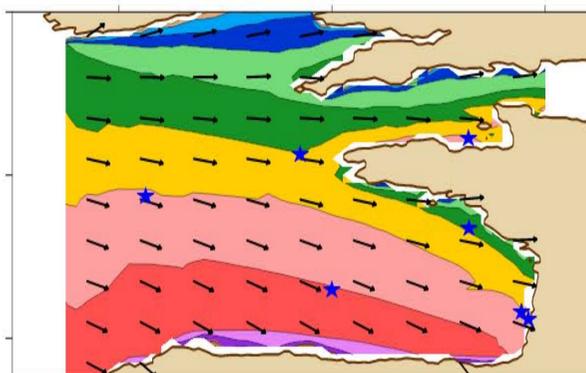
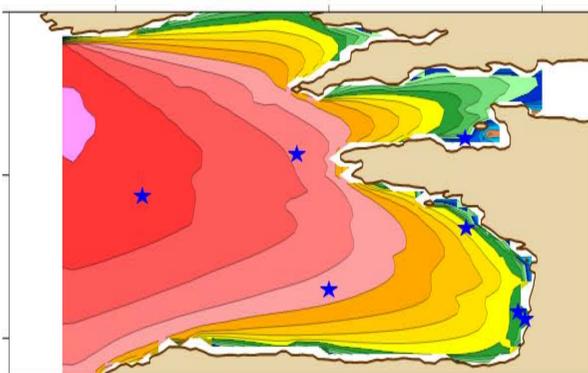
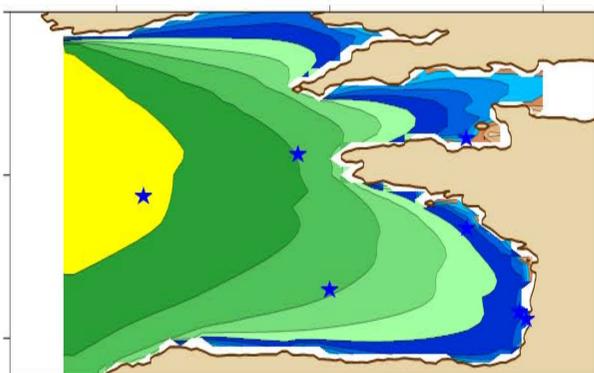


52°N

48°N

44°N

X.Bertin

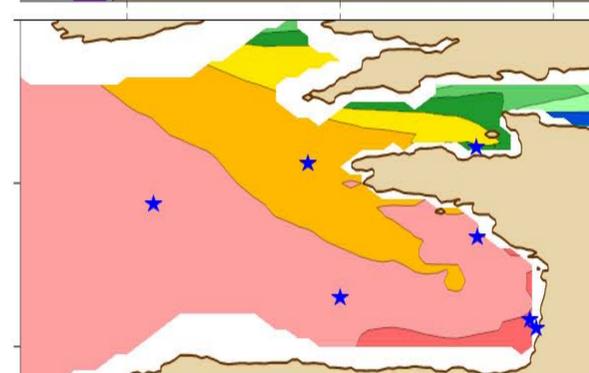
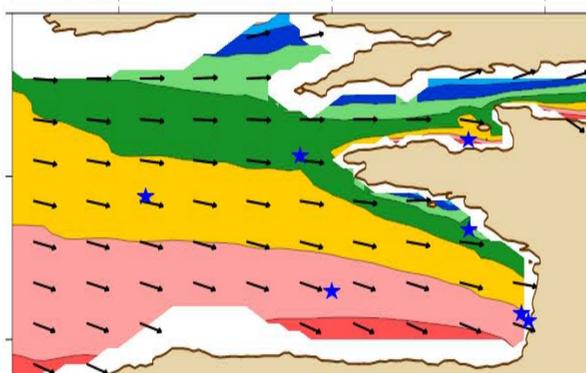
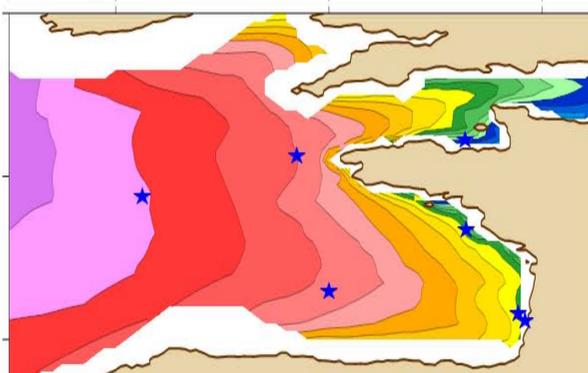
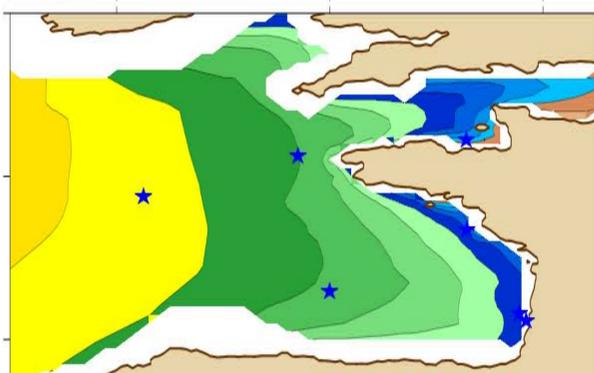


52°N

48°N

44°N

ANEMOC



52°N

48°N

44°N

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

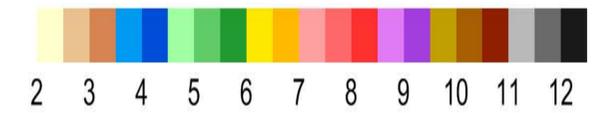
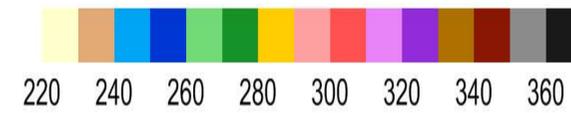
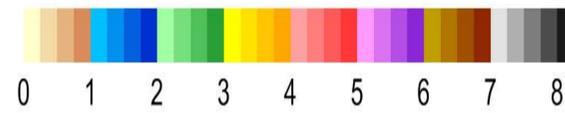
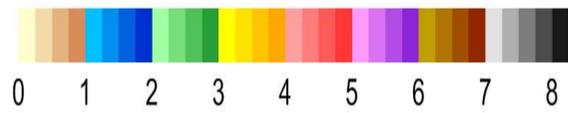
Summer - Period 1979-2001

Significant wave height (m)

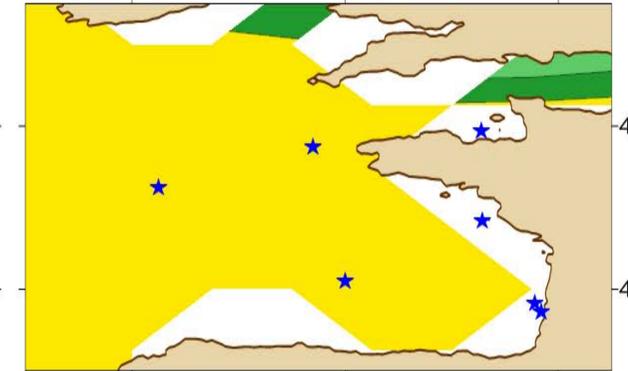
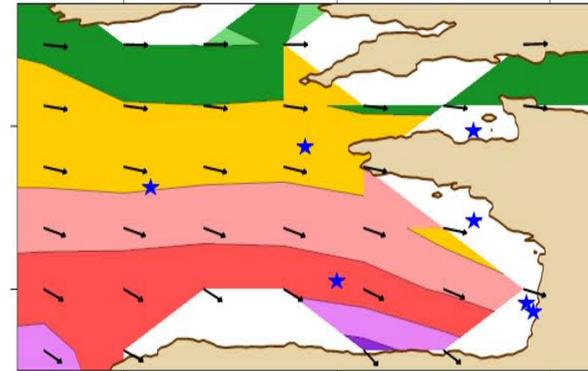
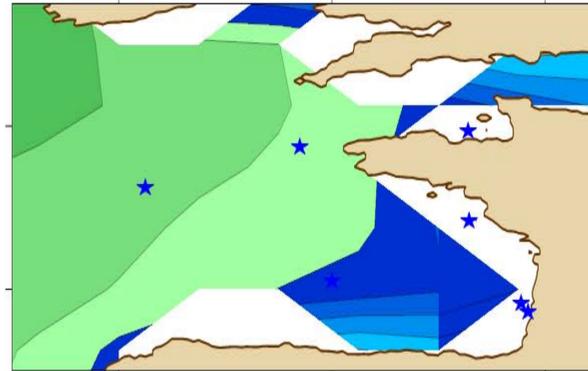
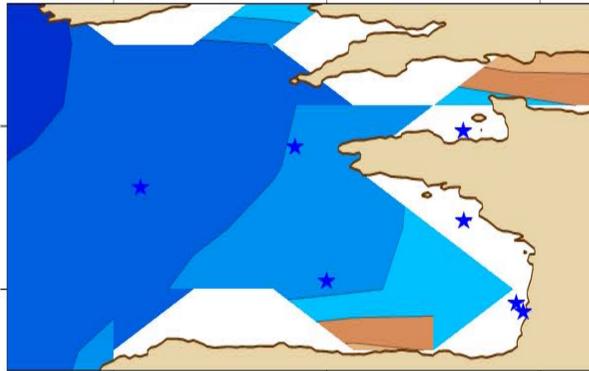
Significant wave height 90th (m)

Mean wave Direction ($^{\circ}$ N)

Mean wave Period (s)



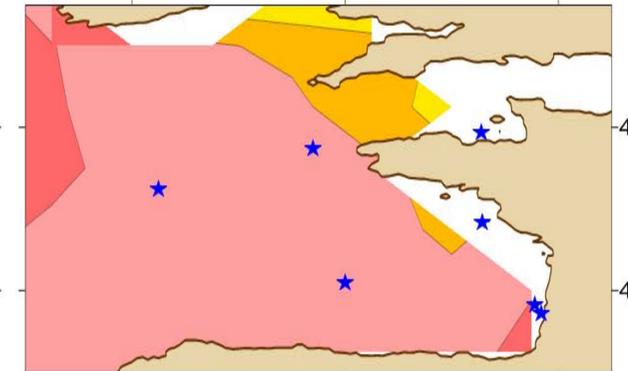
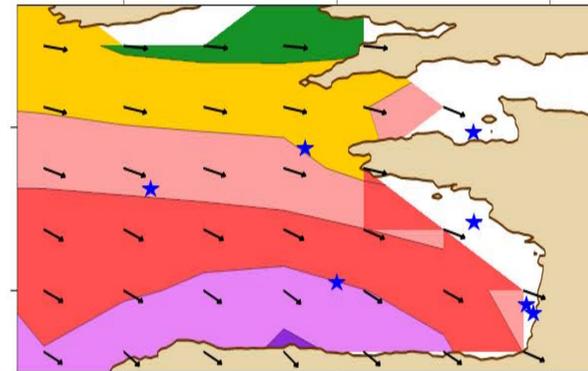
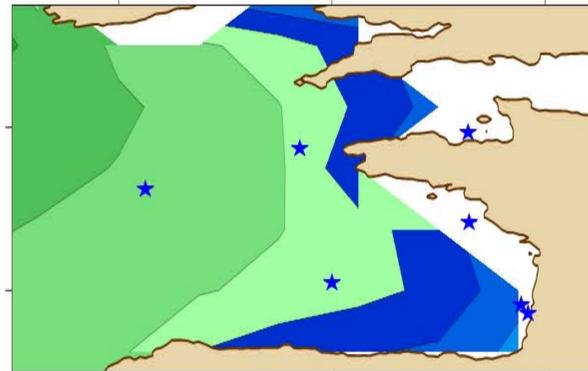
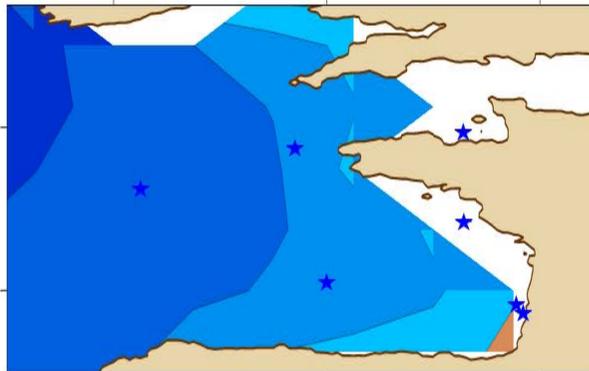
C-ERA40



49°N

45°N

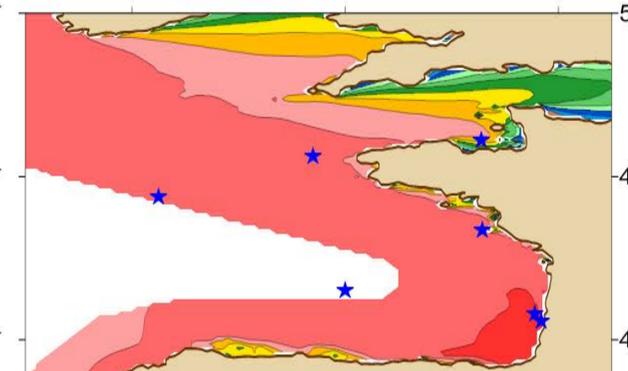
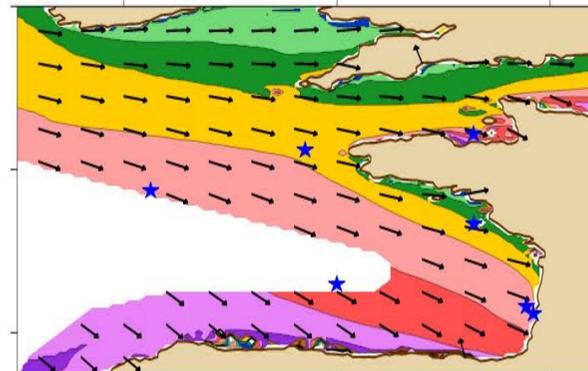
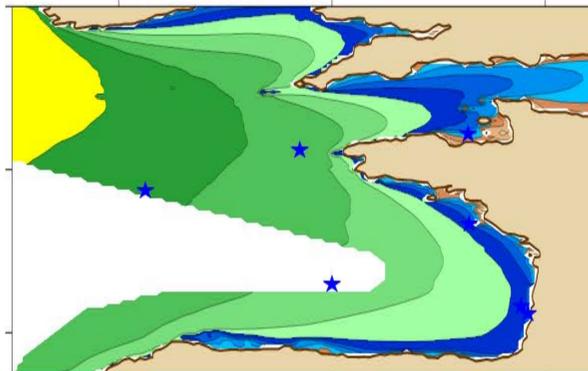
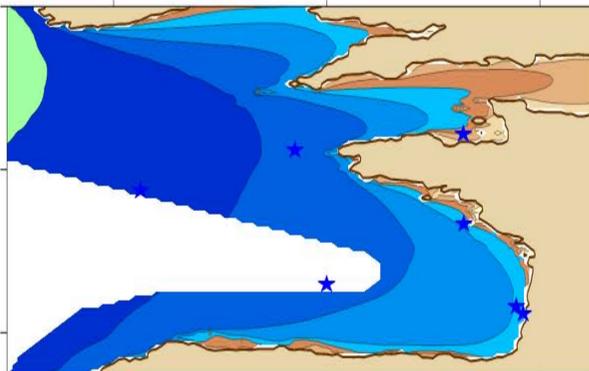
ERA-INTERIM



49°N

45°N

BoBWA

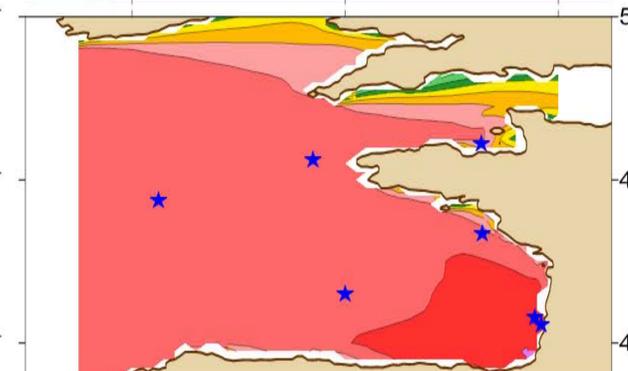
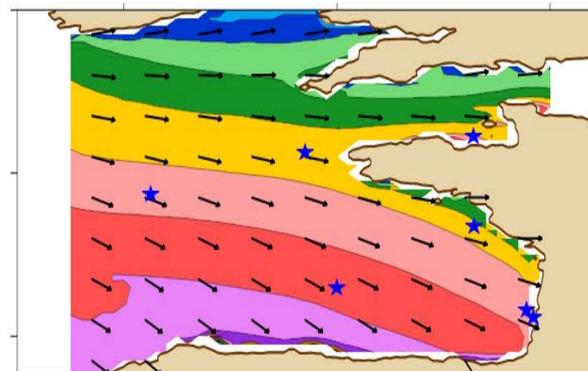
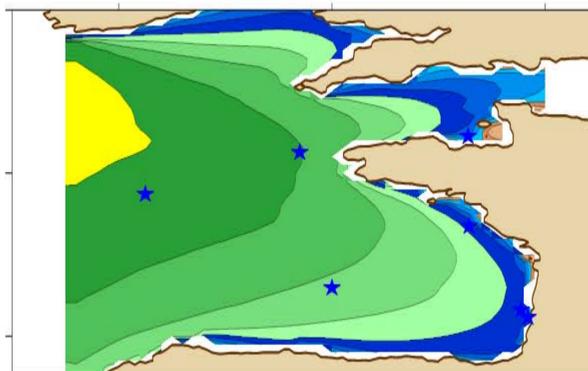
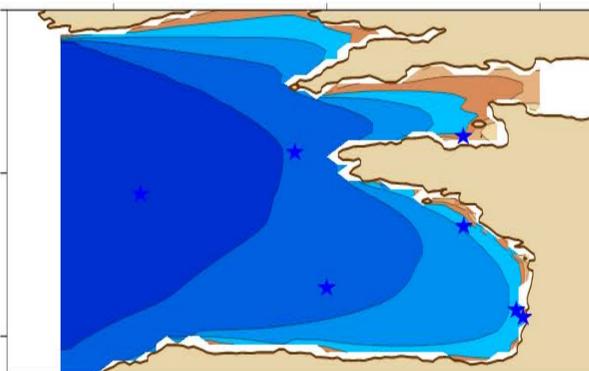


52°N

48°N

44°N

X.Bertin

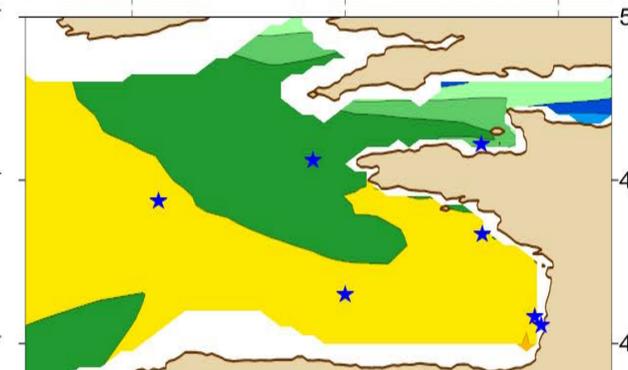
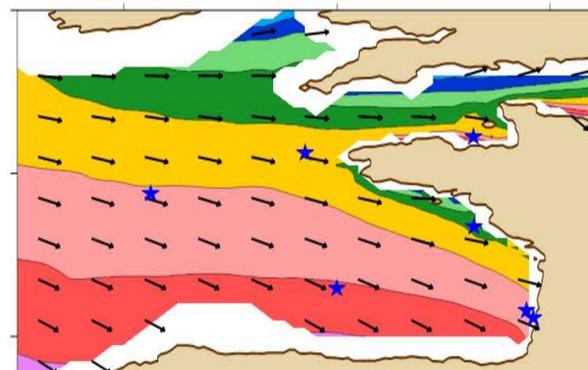
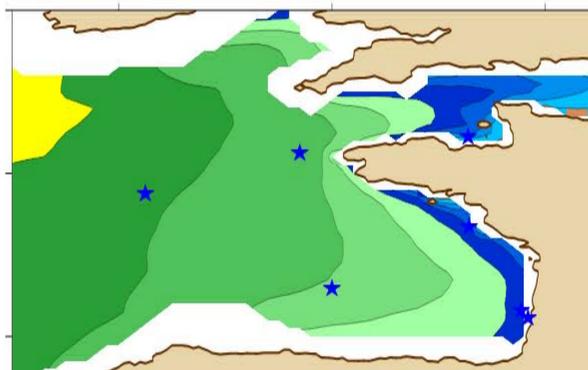
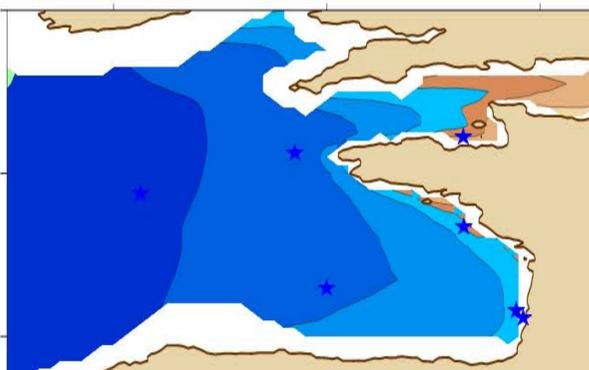


52°N

48°N

44°N

ANEMOC



52°N

48°N

44°N

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

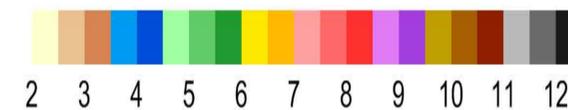
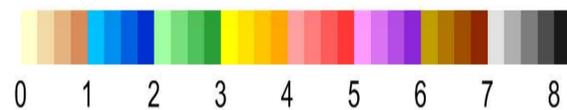
Autumn - Period 1979-2001

Significant wave height (m)

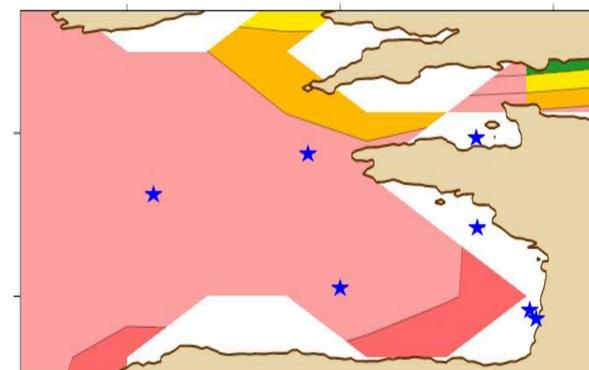
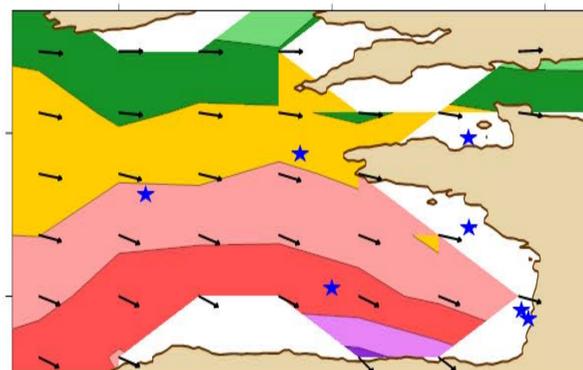
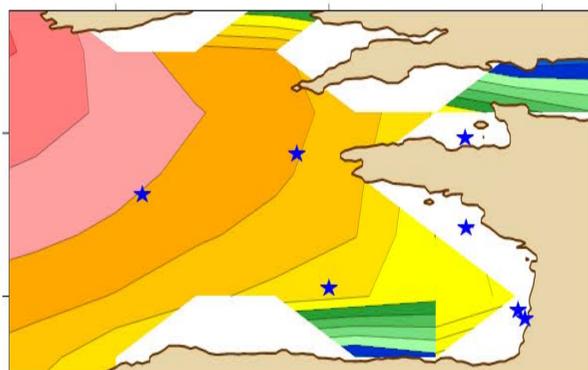
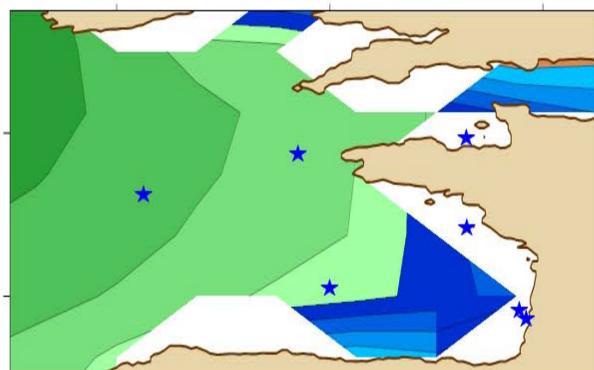
Significant wave height 90th (m)

Mean wave Direction ($^{\circ}$ N)

Mean wave Period (s)



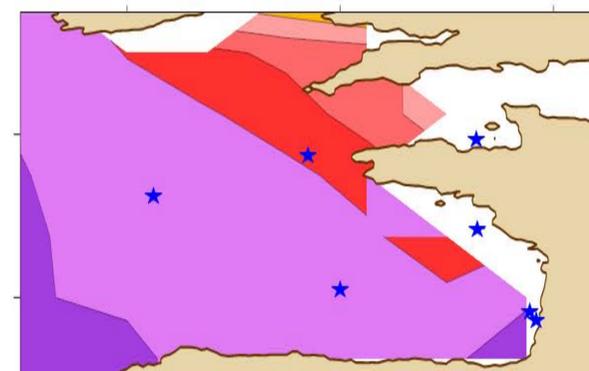
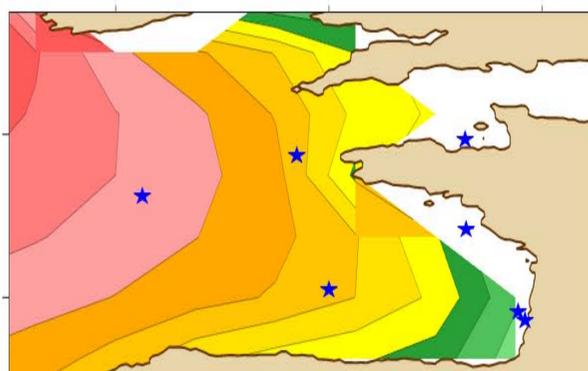
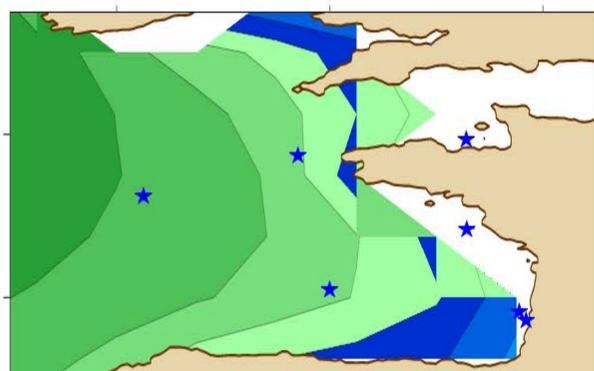
C-ERA40



49°N

45°N

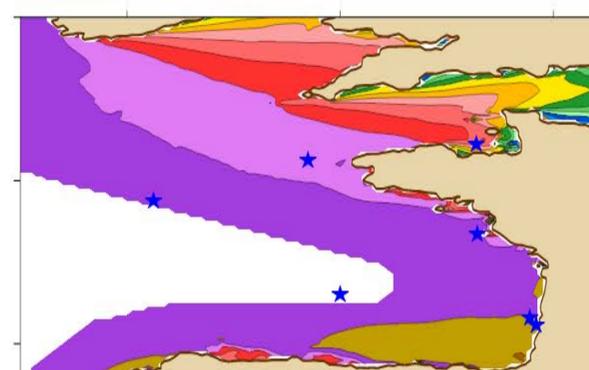
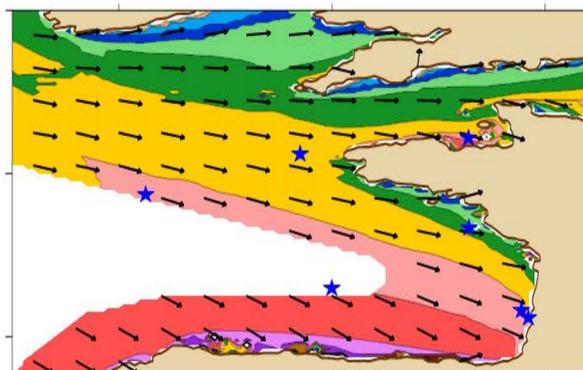
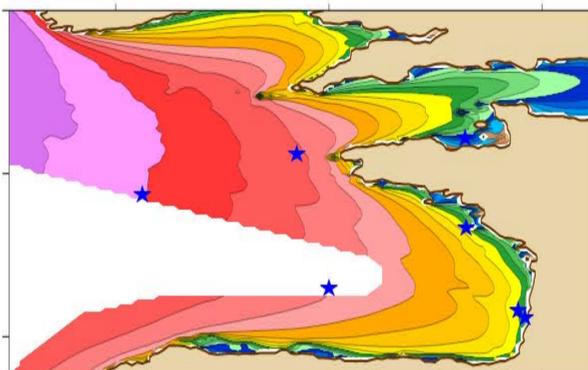
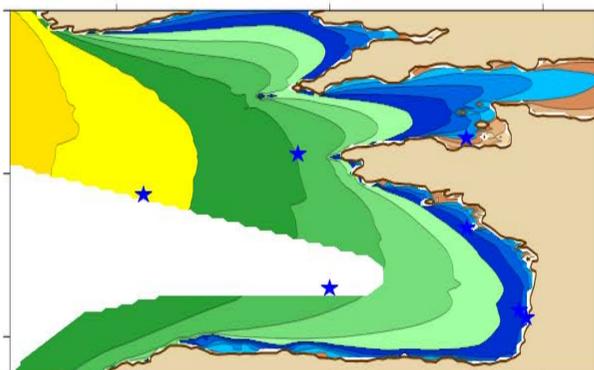
ERA-INTERIM



49°N

45°N

BoBWA

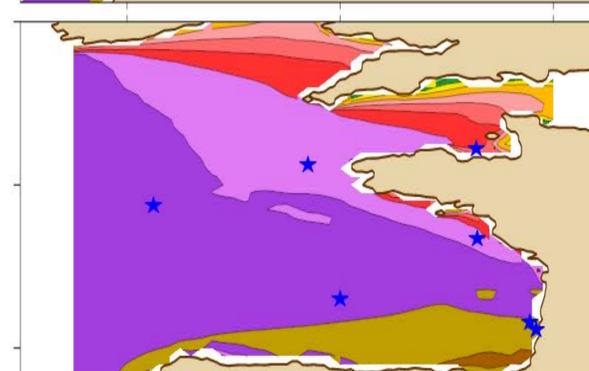
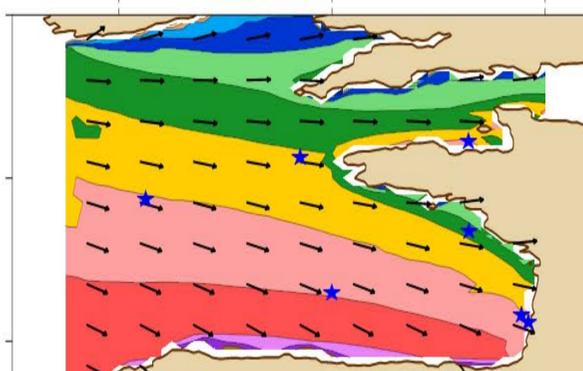
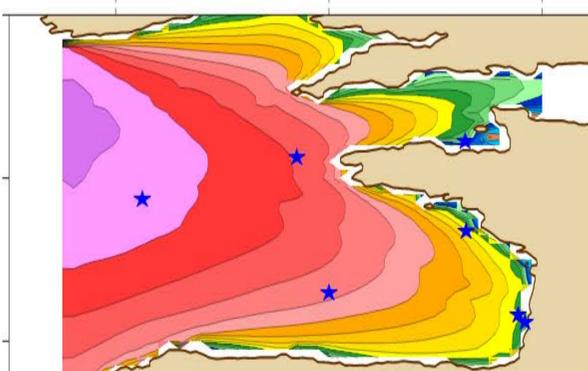
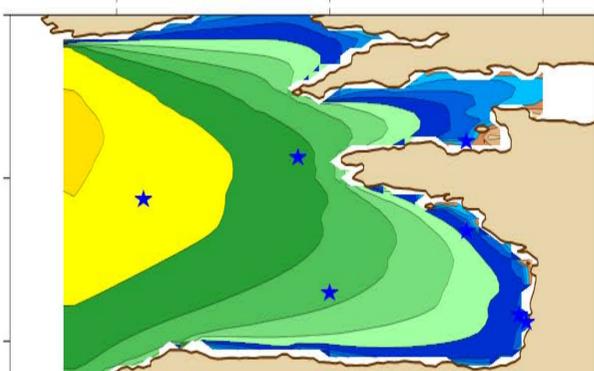


52°N

48°N

44°N

X.Bertin

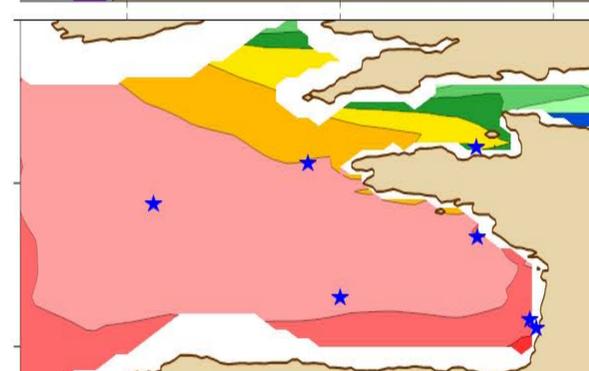
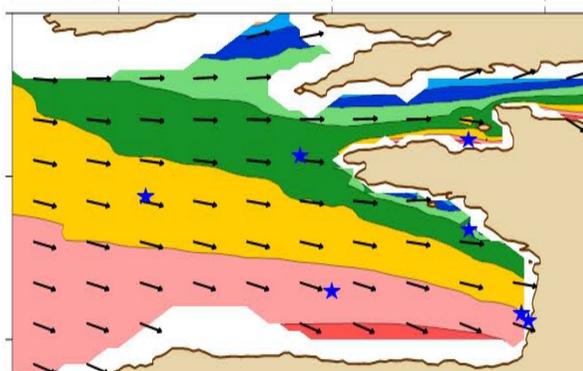
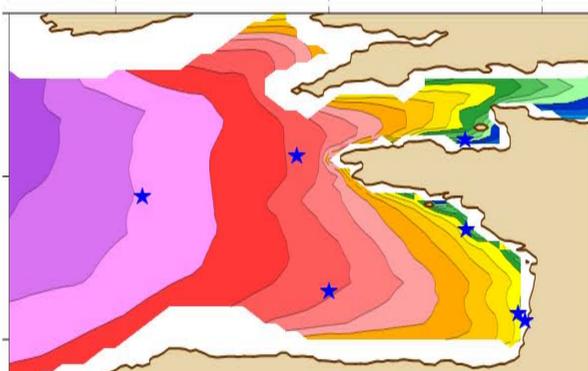
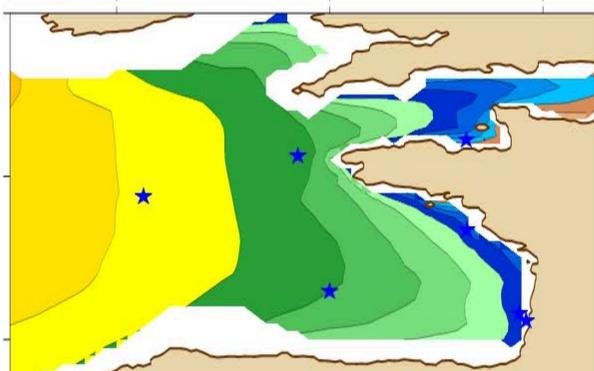


52°N

48°N

44°N

ANEMOC



52°N

48°N

44°N

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

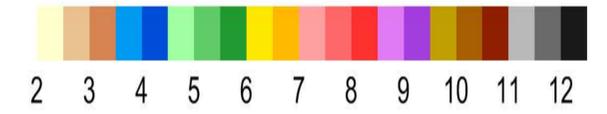
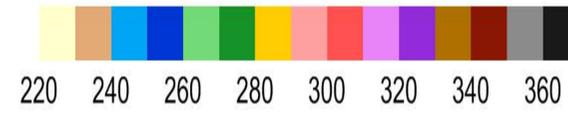
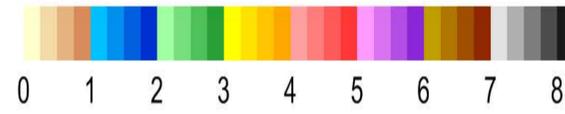
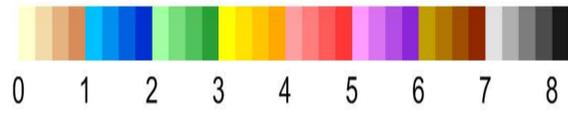
Winter - Period 1979-2001

Significant wave height (m)

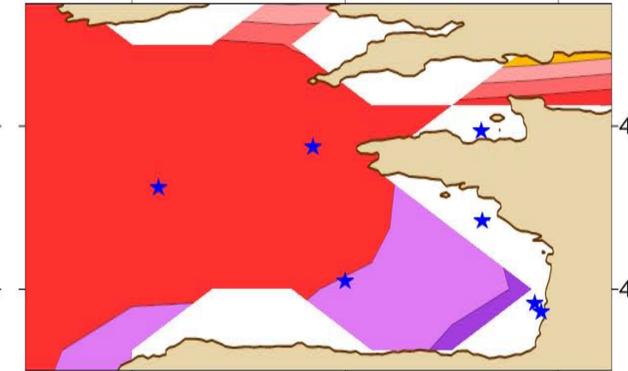
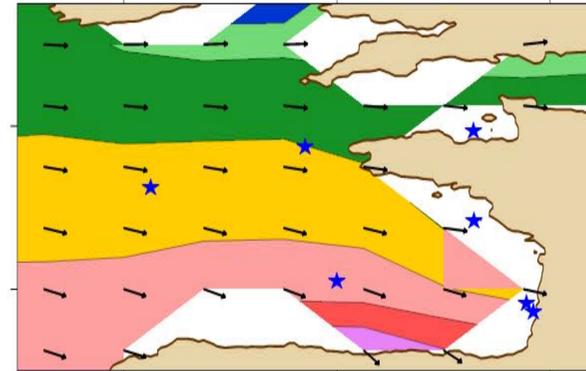
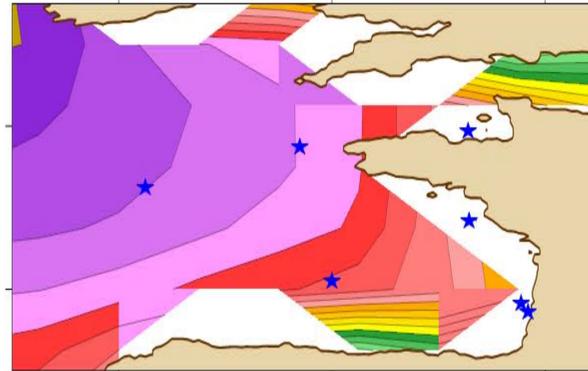
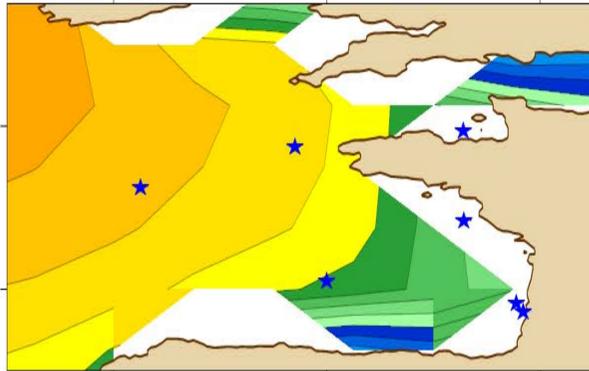
Significant wave height 90th (m)

Mean wave Direction ($^{\circ}$ N)

Mean wave Period (s)



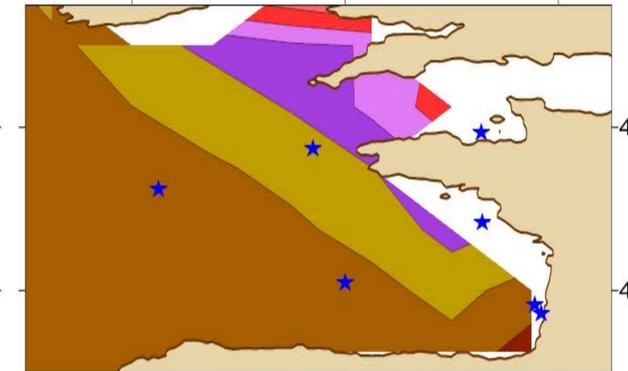
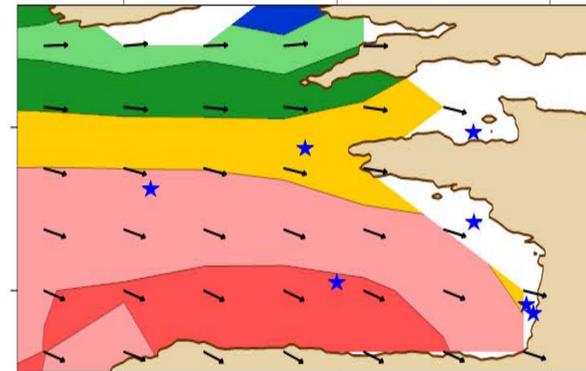
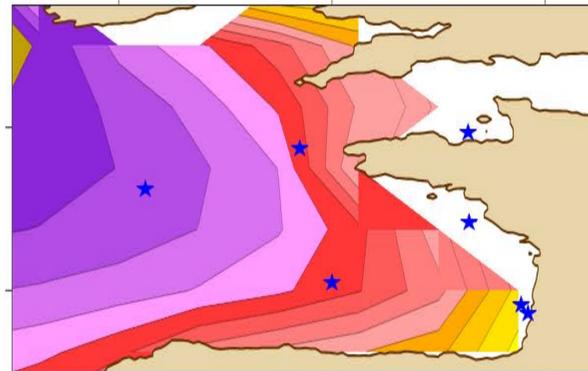
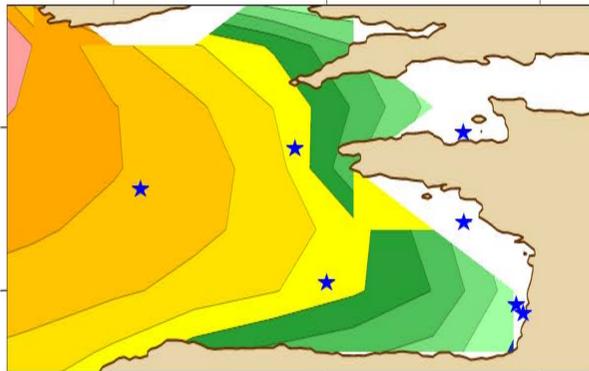
C-ERA40



49°N

45°N

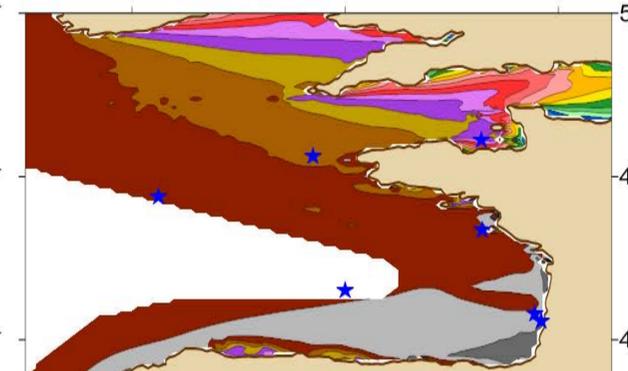
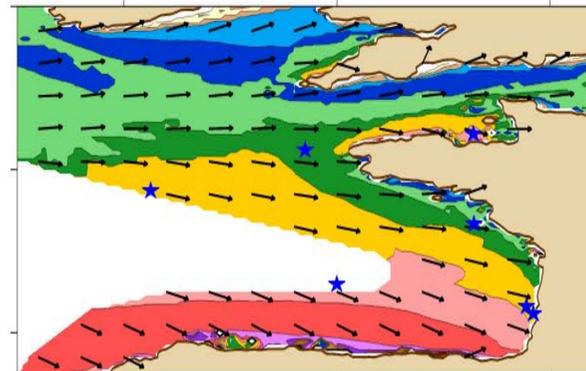
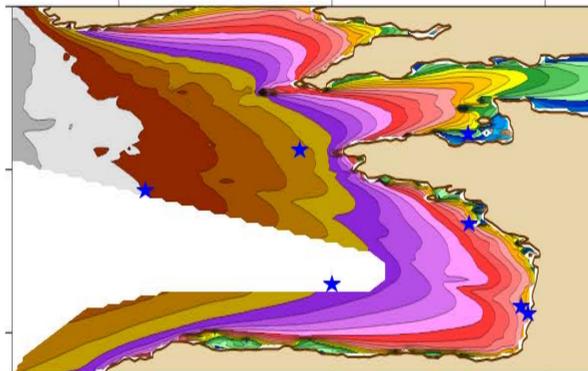
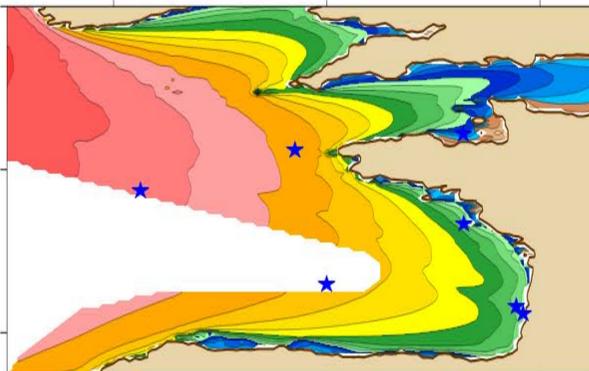
ERA-INTERIM



49°N

45°N

BoBWA

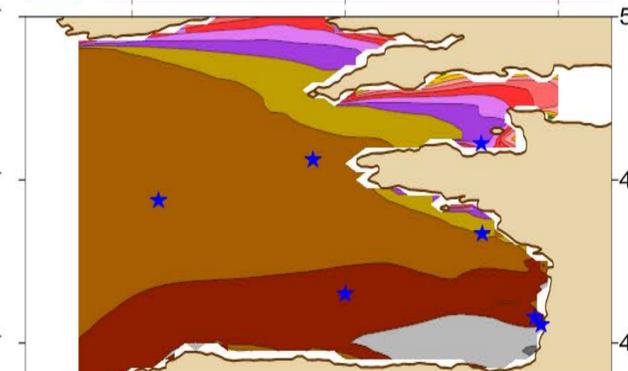
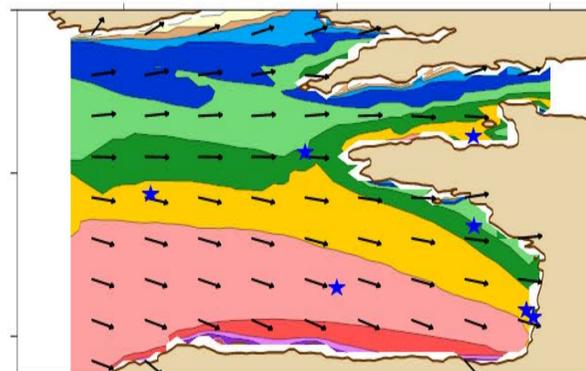
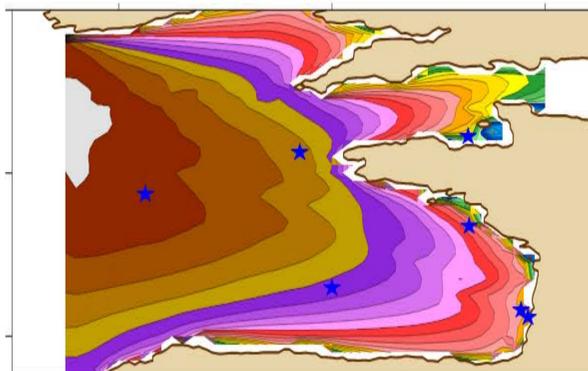
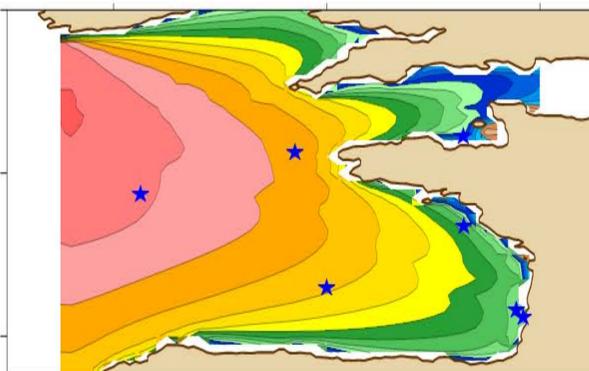


52°N

48°N

44°N

X.Bertin

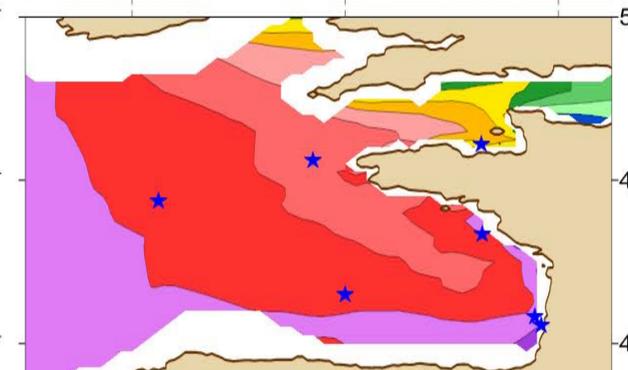
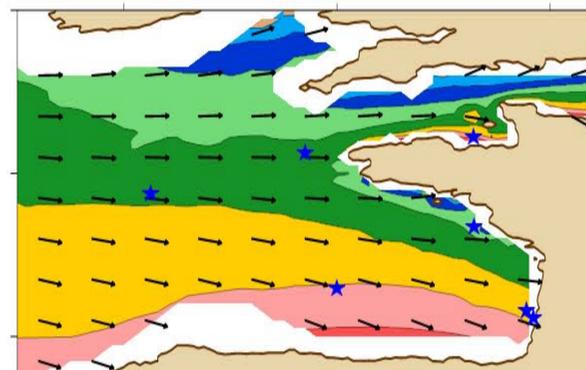
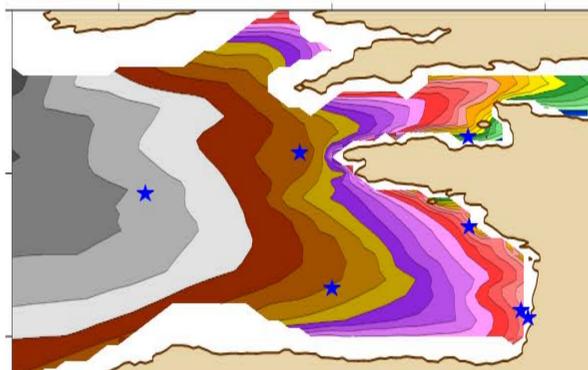
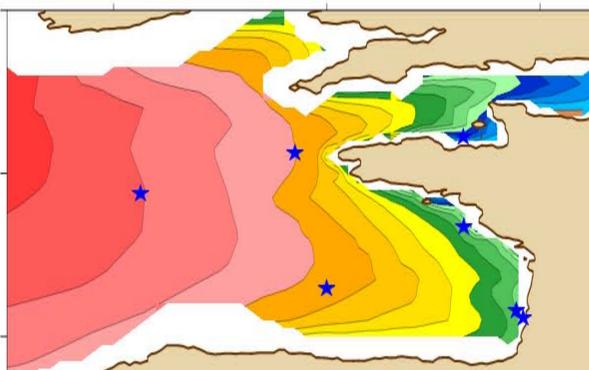


52°N

48°N

44°N

ANEMOC



52°N

48°N

44°N

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

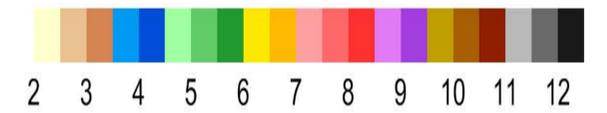
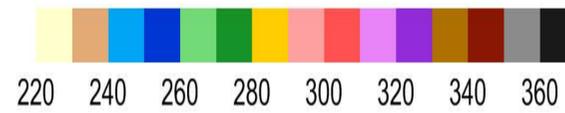
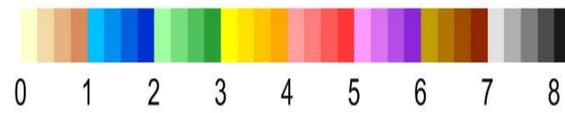
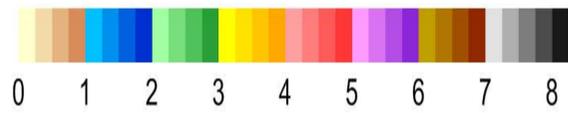
Spring - Period 1979-2001

Significant wave height (m)

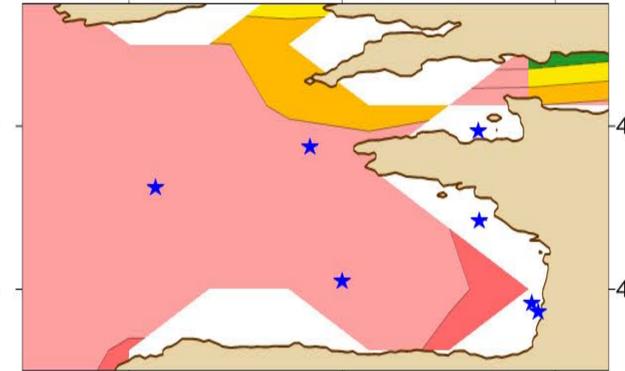
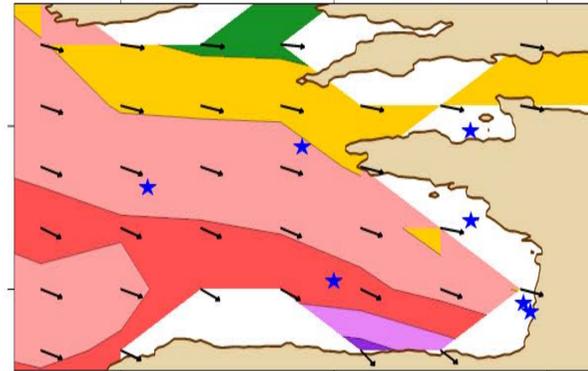
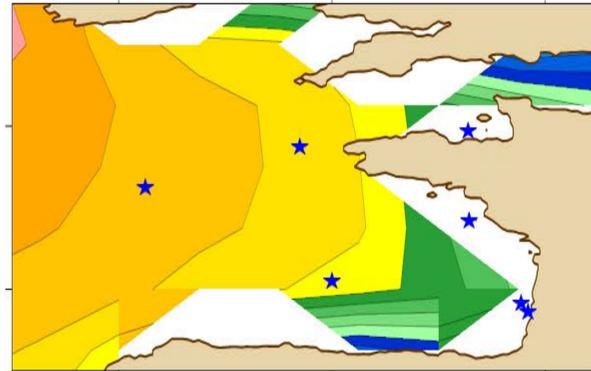
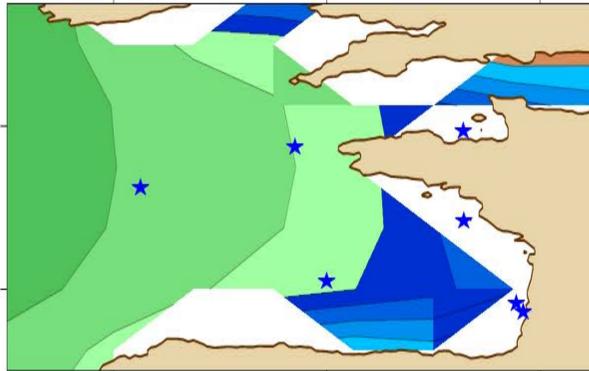
Significant wave height 90th (m)

Mean wave Direction ($^{\circ}$ N)

Mean wave Period (s)



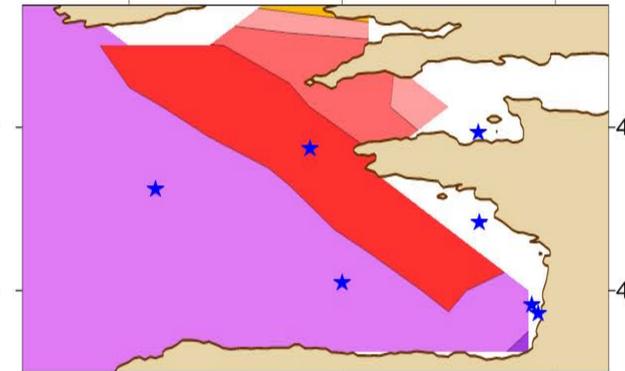
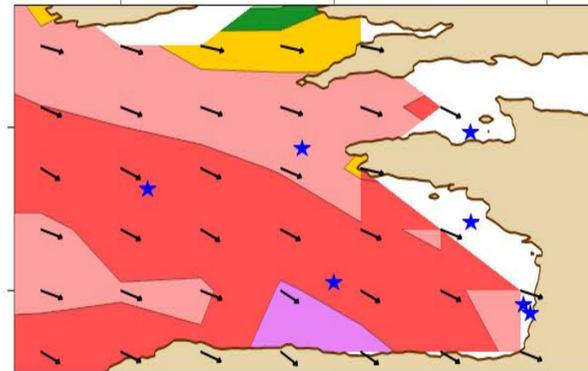
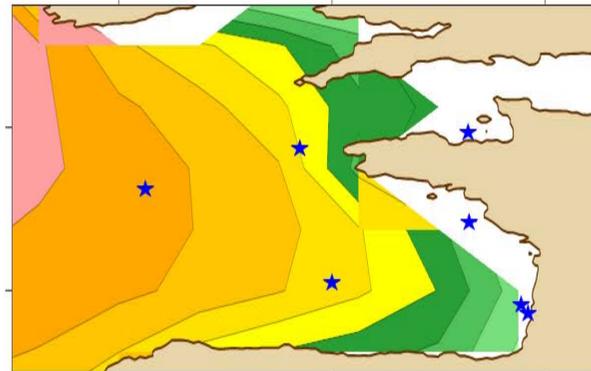
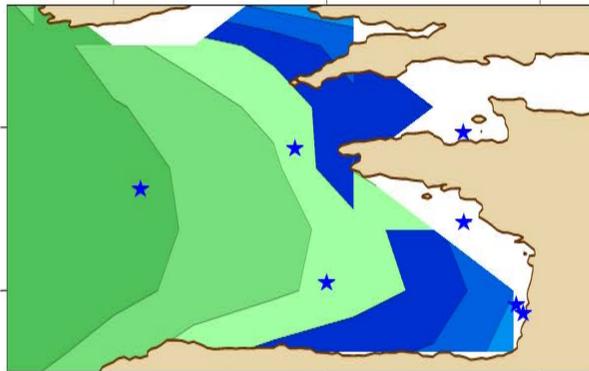
C-ERA40



49°N

45°N

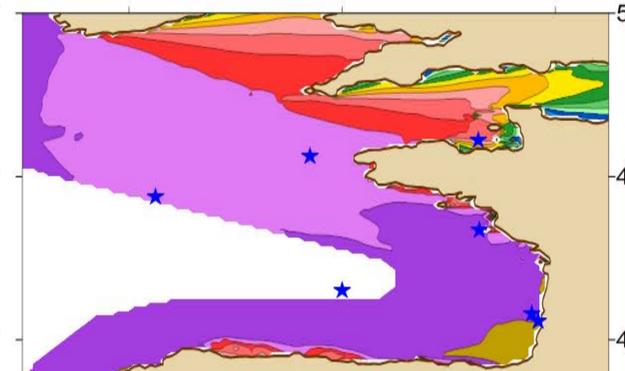
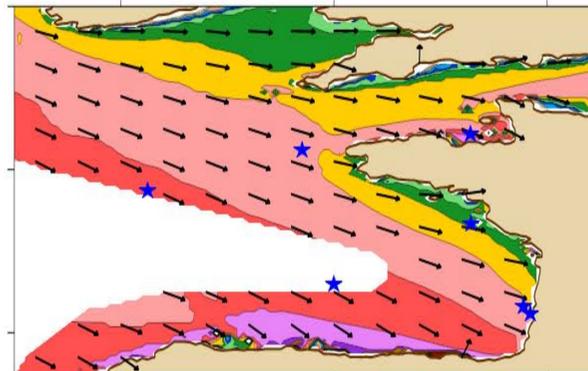
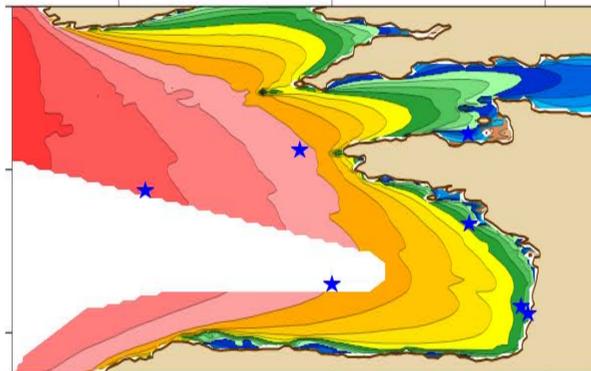
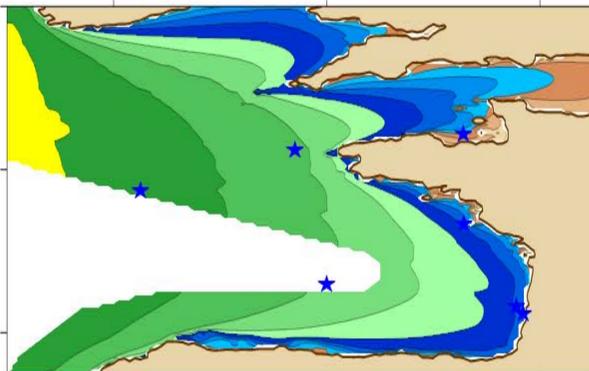
ERA-INTERIM



49°N

45°N

BoBWA

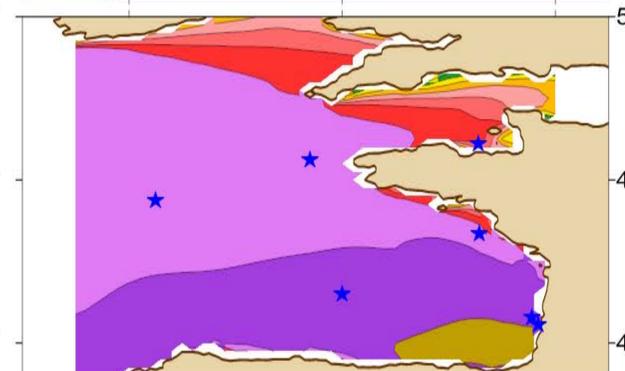
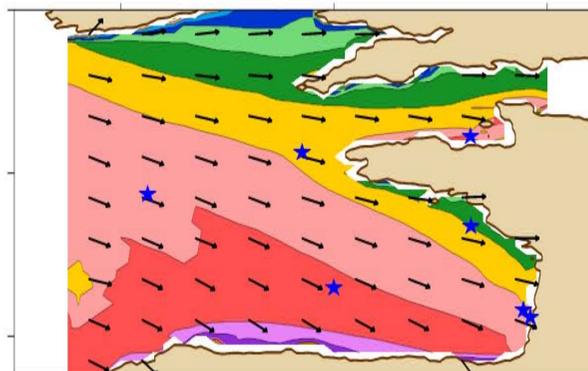
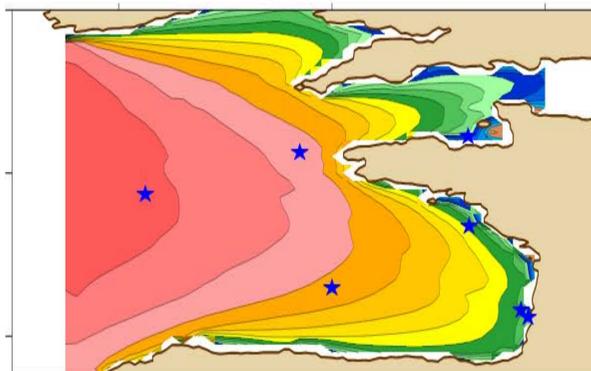
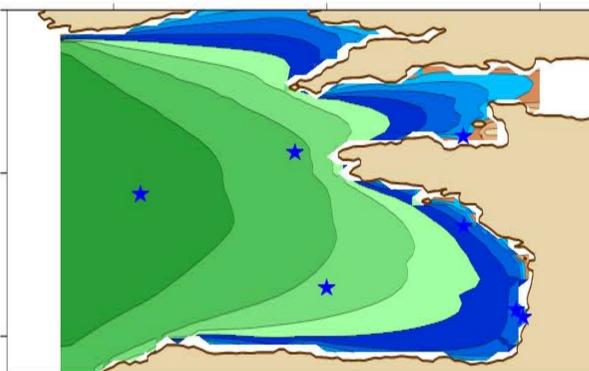


52°N

48°N

44°N

X.Bertin

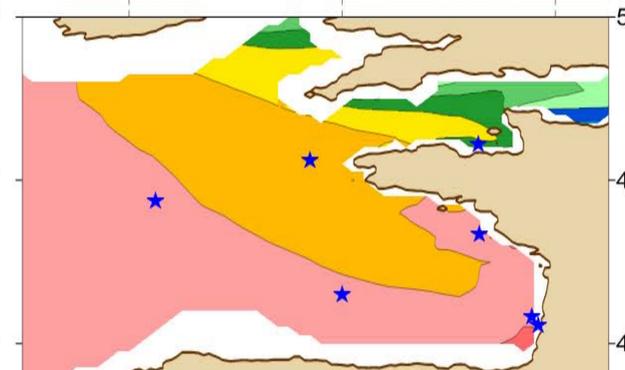
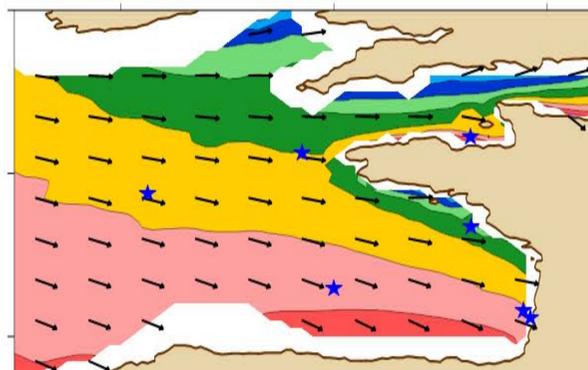
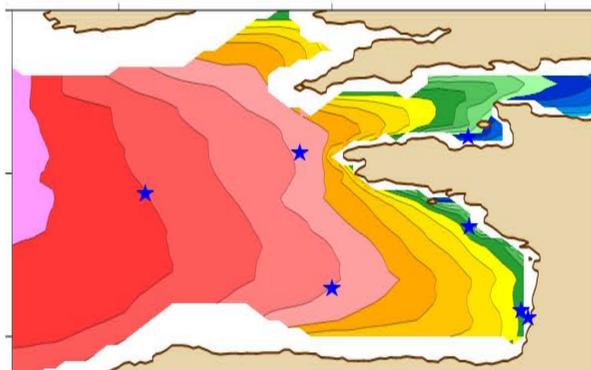
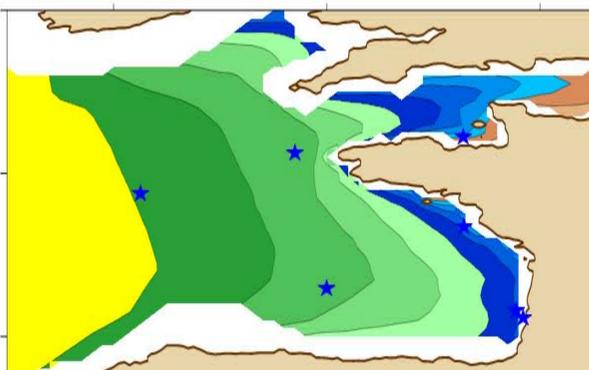


52°N

48°N

44°N

ANEMOC



52°N

48°N

44°N

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

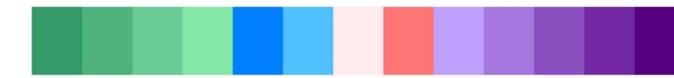
SWH - summer 1970-2001

Mean of Significant Wave Height (m)

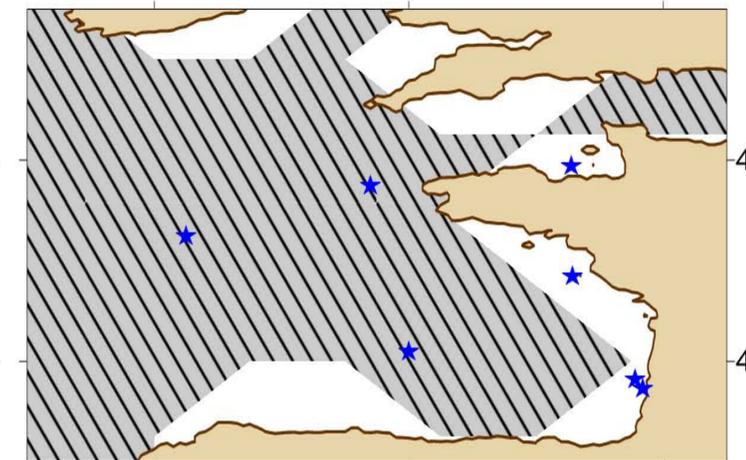
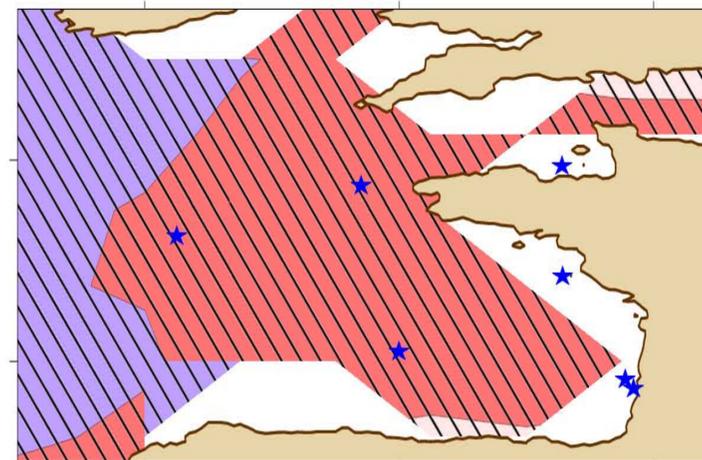
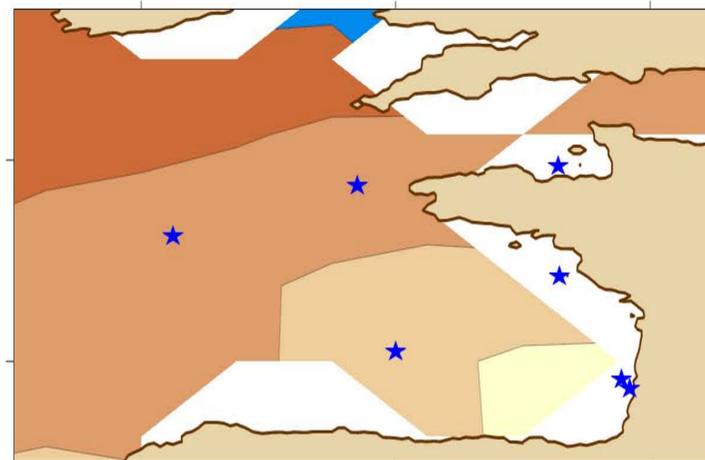
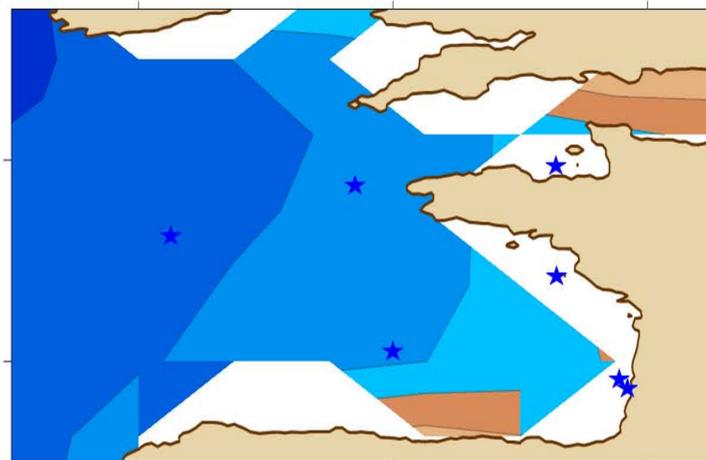
Normalized standard deviation (%)

Linear trend (cm/yr)

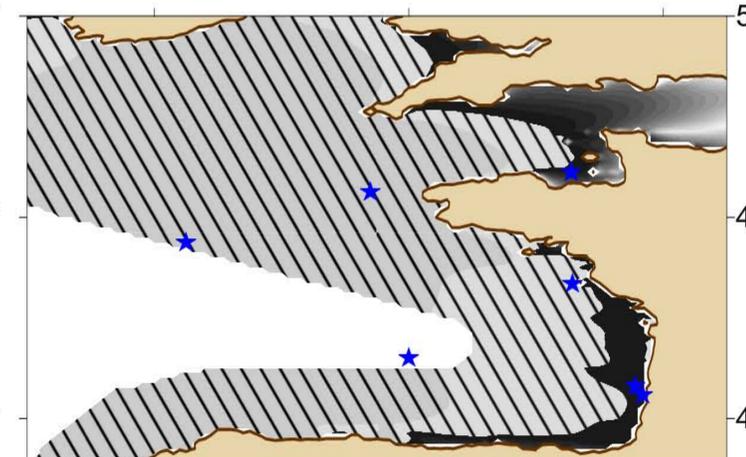
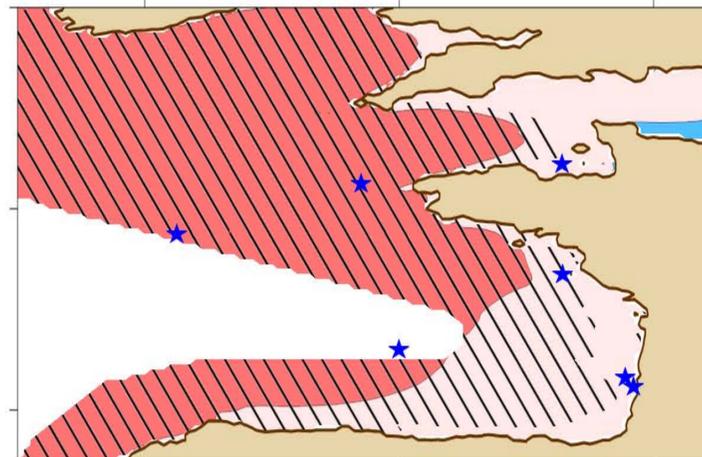
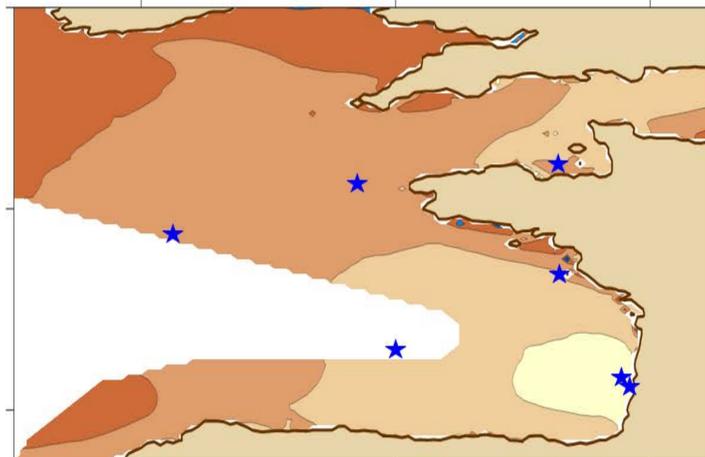
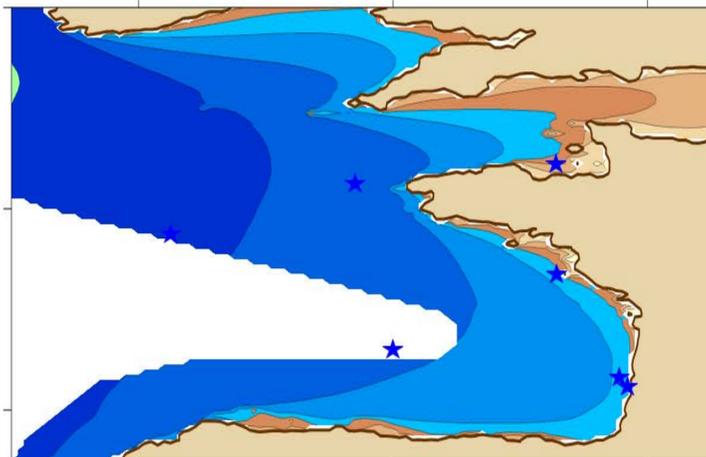
Probability-value (Student's T-test)



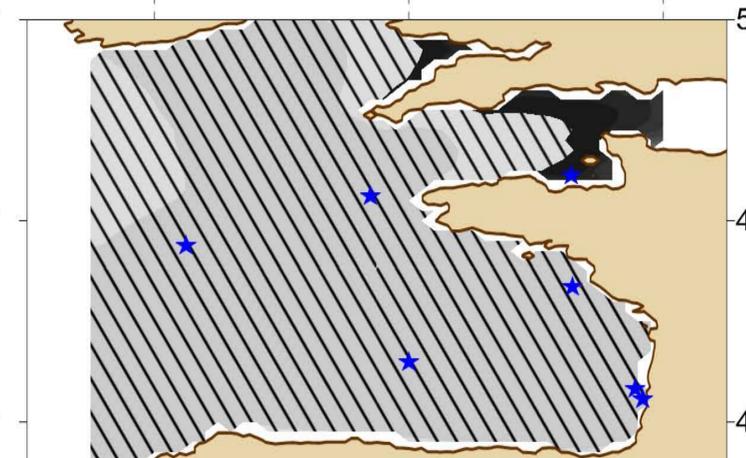
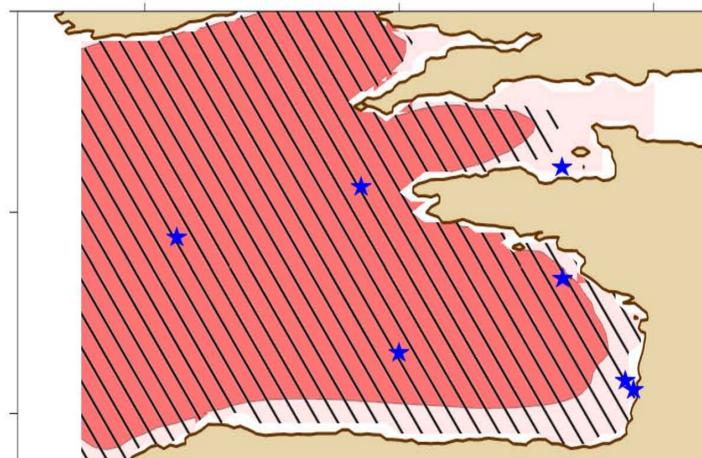
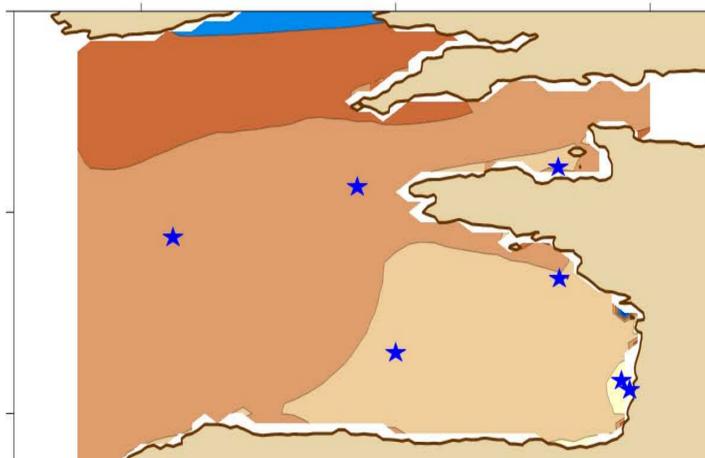
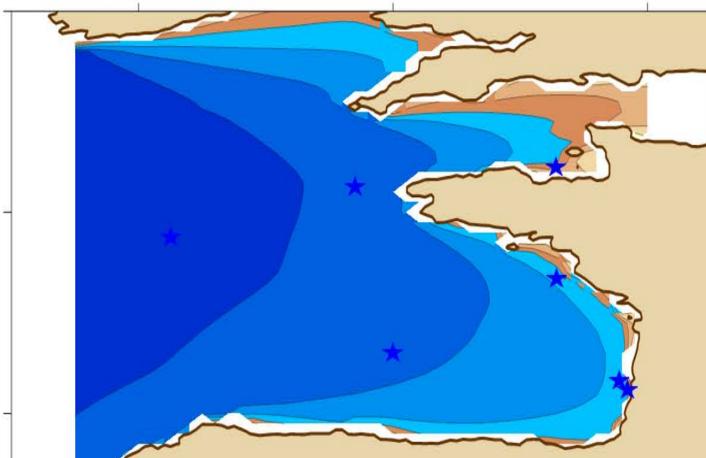
C-ERA40



BoBWA



X.Bertin



-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

SWHPrct90 - summer 1970-2001

Significant Wave Height 90th (m)

Normalized standard deviation (%)

Linear trend (cm/yr)

Probability-value (Student's T-test)



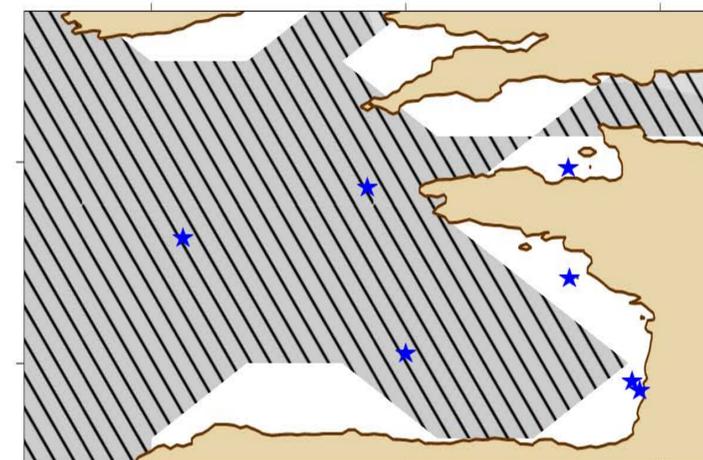
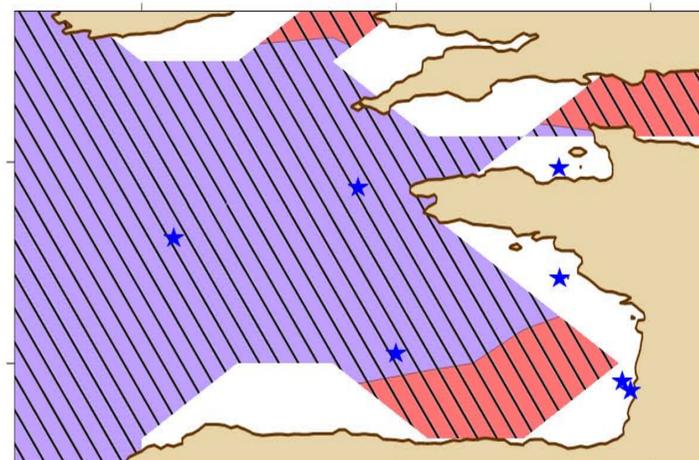
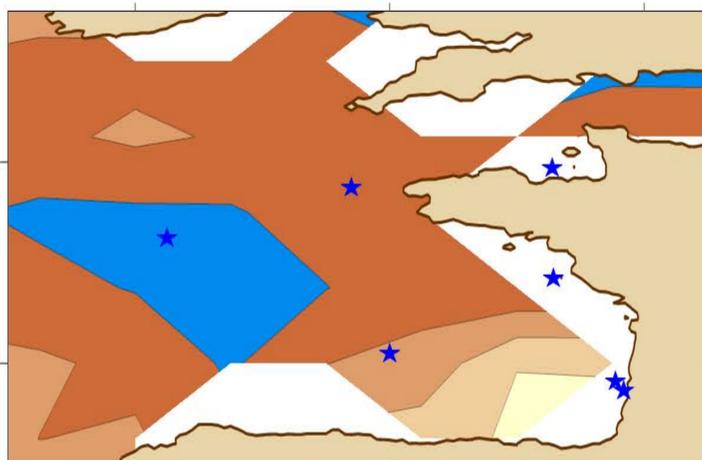
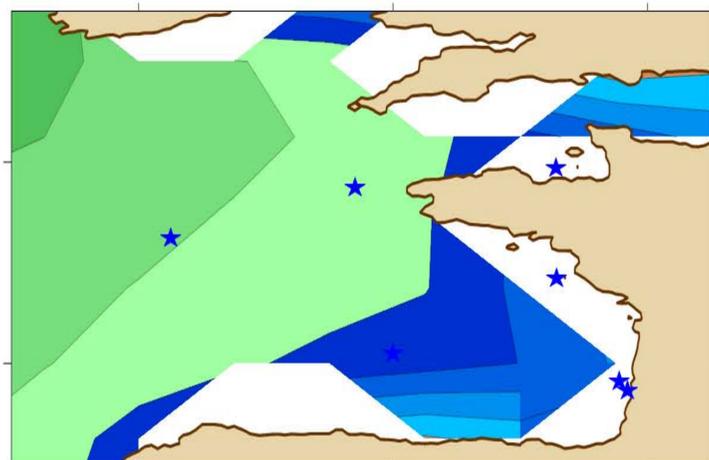
0 1 2 3 4 5 6 7 8

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24

-4 -3 -2 -1 0 1 2 3

0 0.15 0.3 0.45 0.6 0.75 0.9

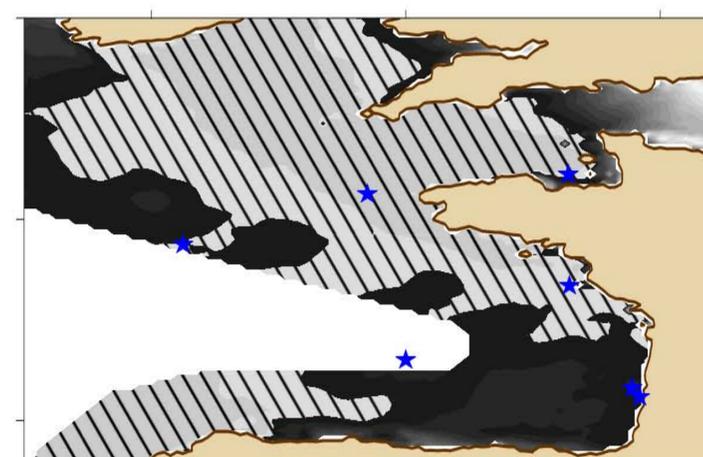
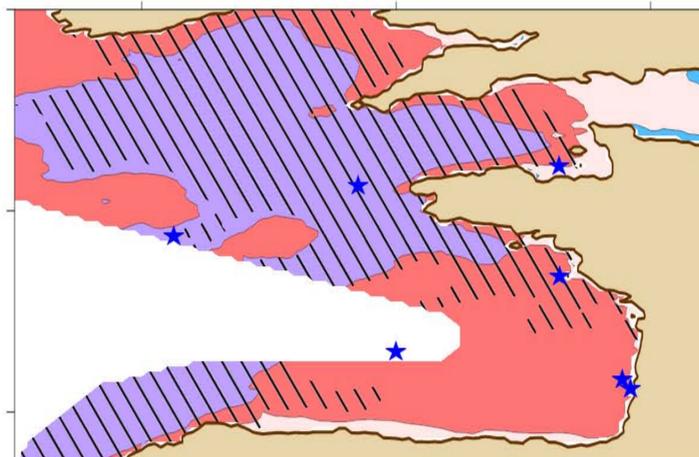
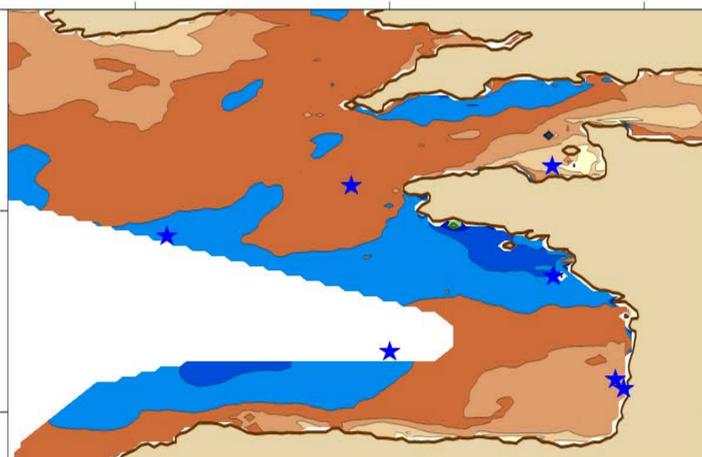
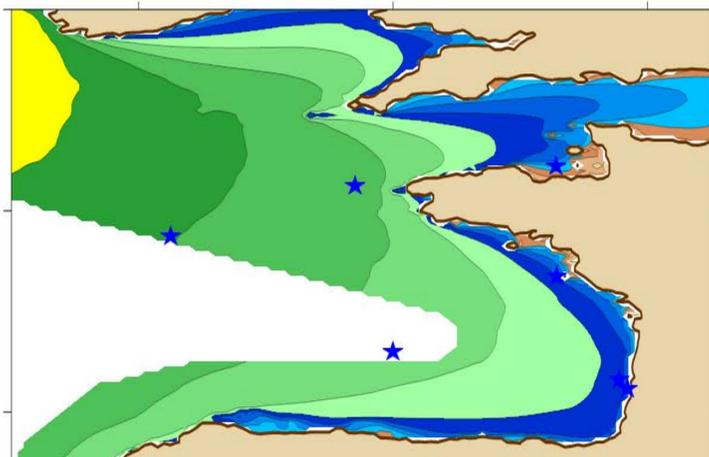
C-ERA40



49°N

45°N

BoBWA

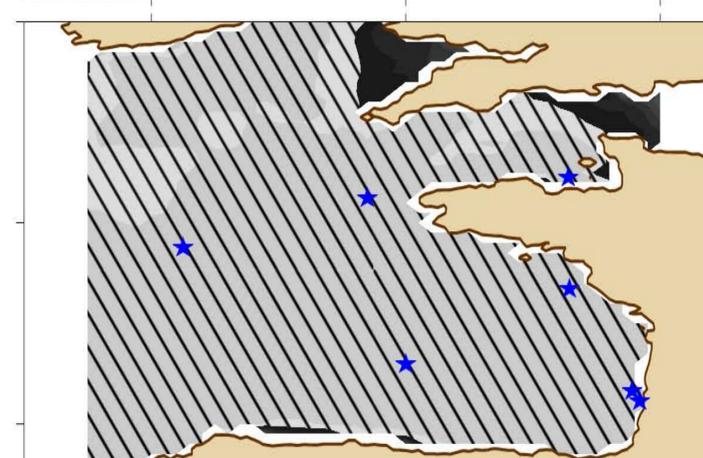
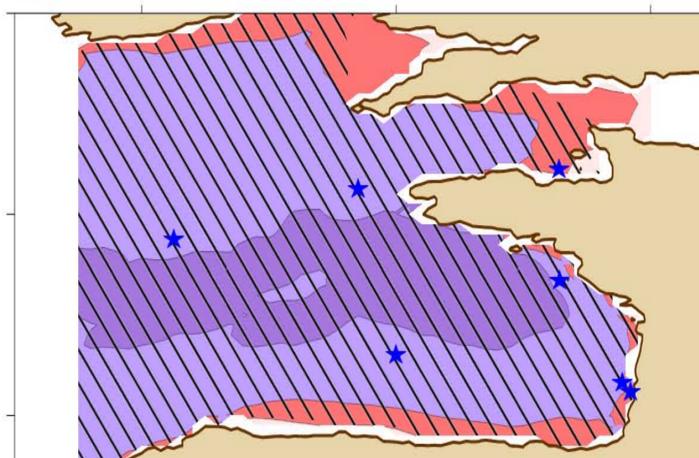
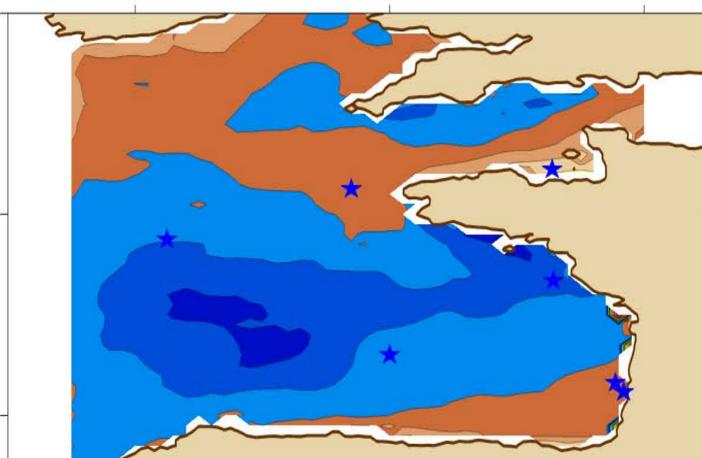
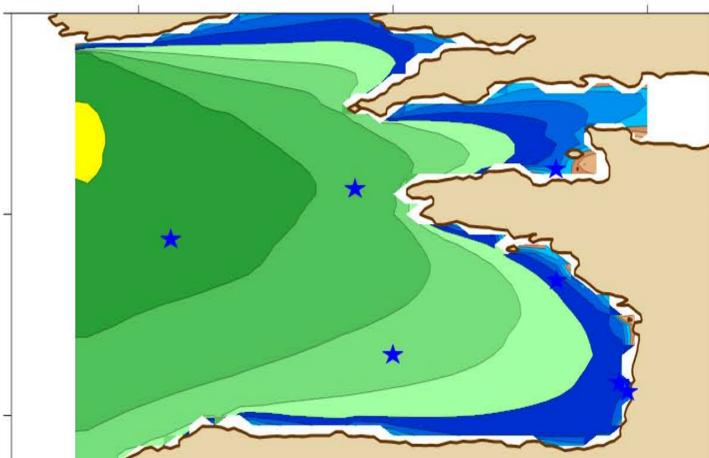


52°N

48°N

44°N

X.Bertin



52°N

48°N

44°N

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

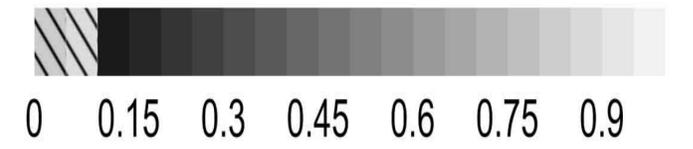
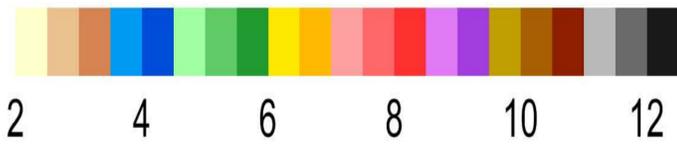
MWP - summer 1970-2001

Mean of Wave Period (s)

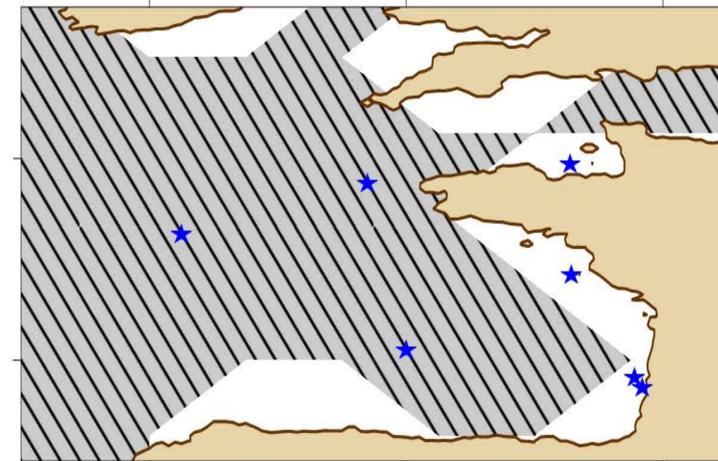
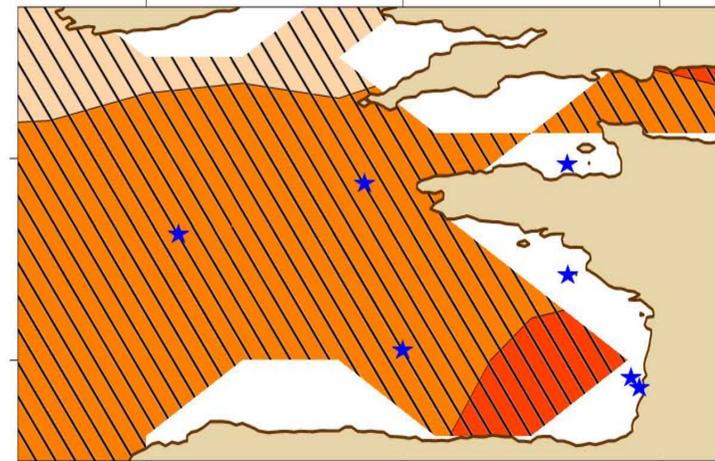
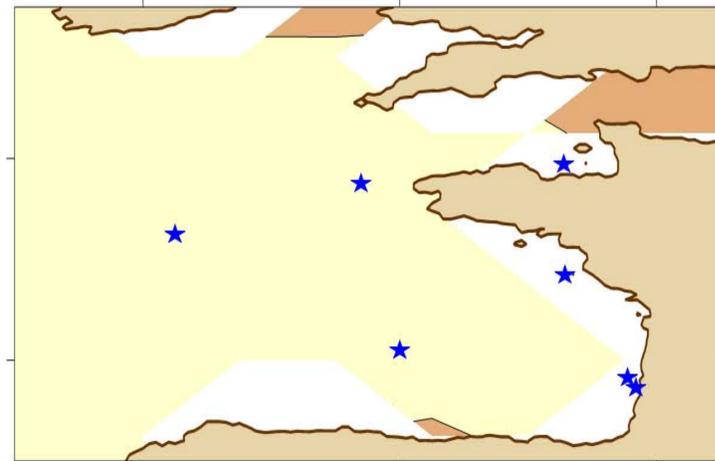
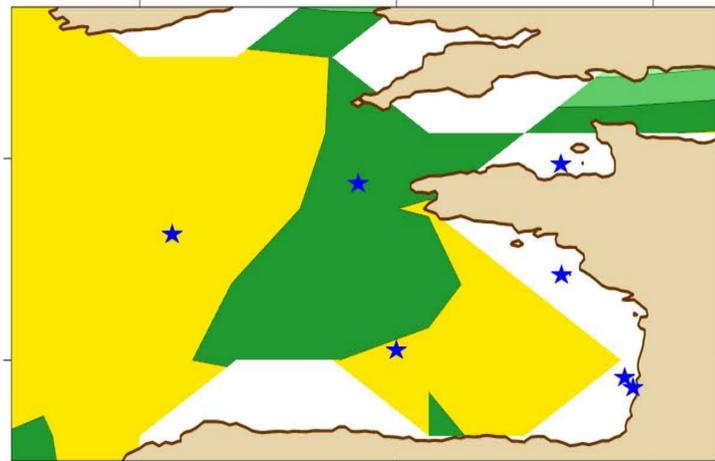
Normalized standard deviation (%)

Linear trend (s/yr)

Probability-value (Student's T-test)



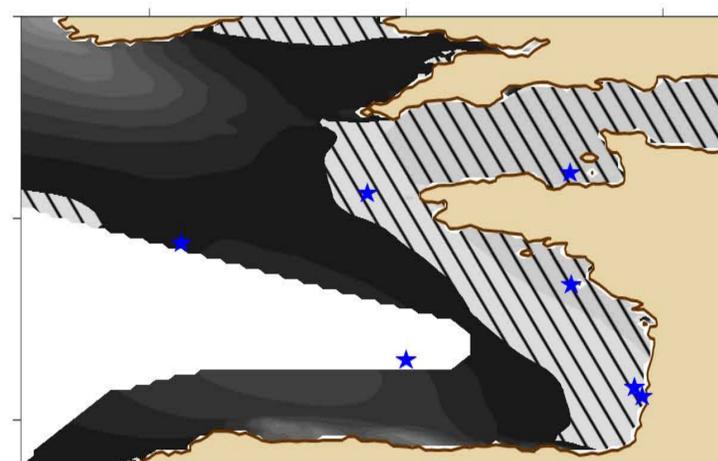
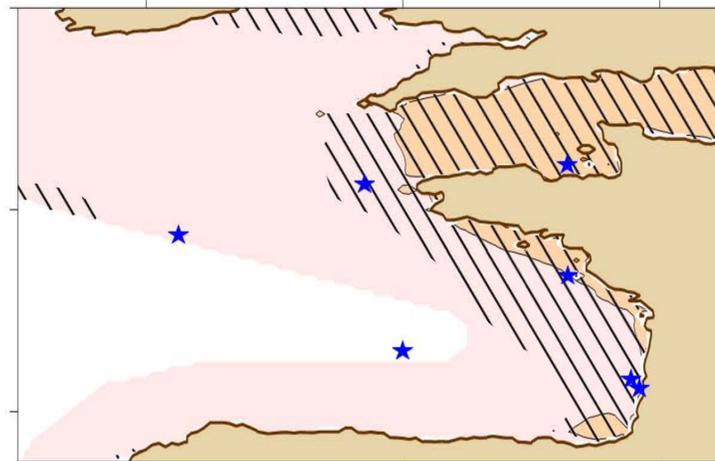
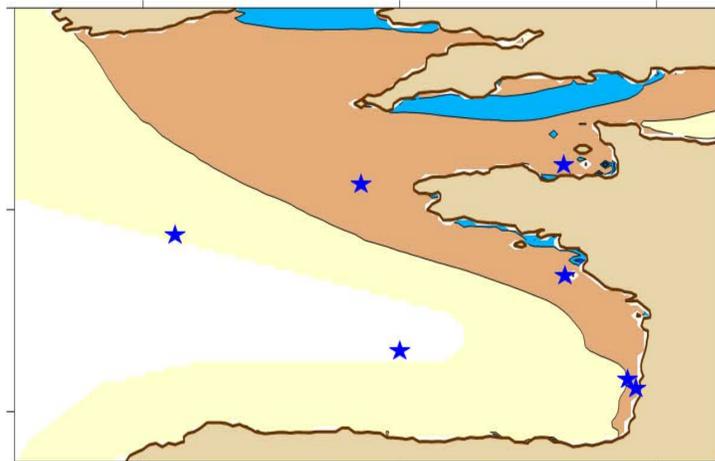
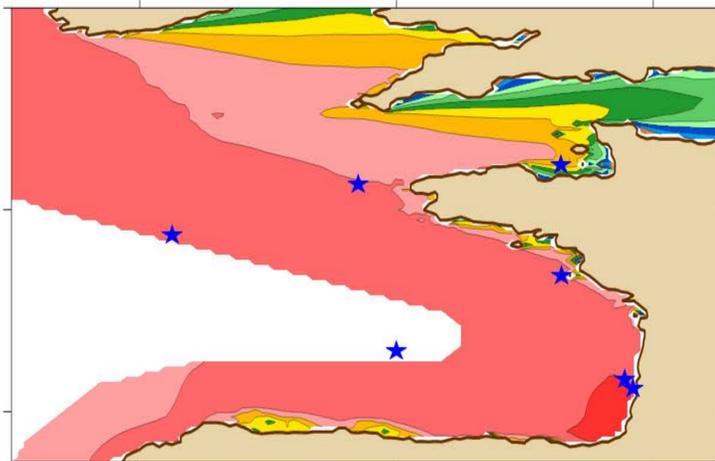
C-ERA40



49°N

45°N

BoBWA

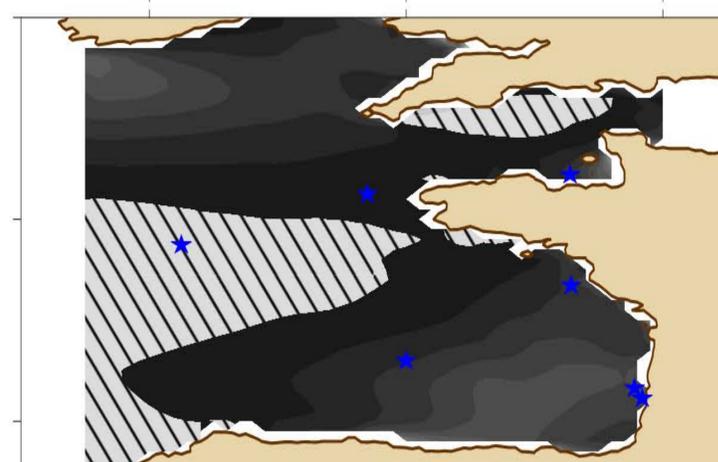
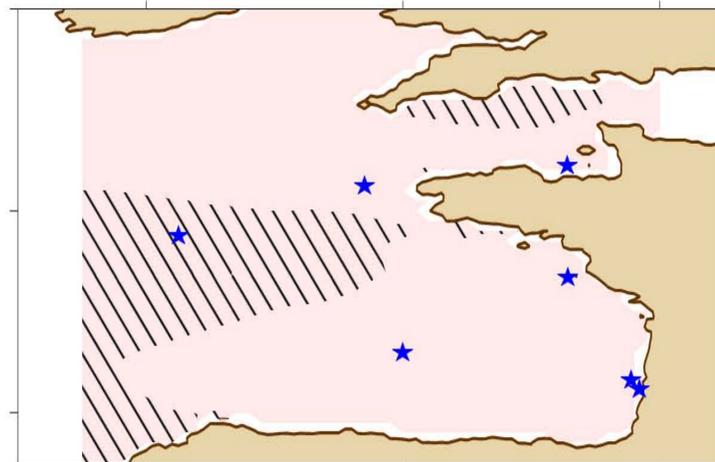
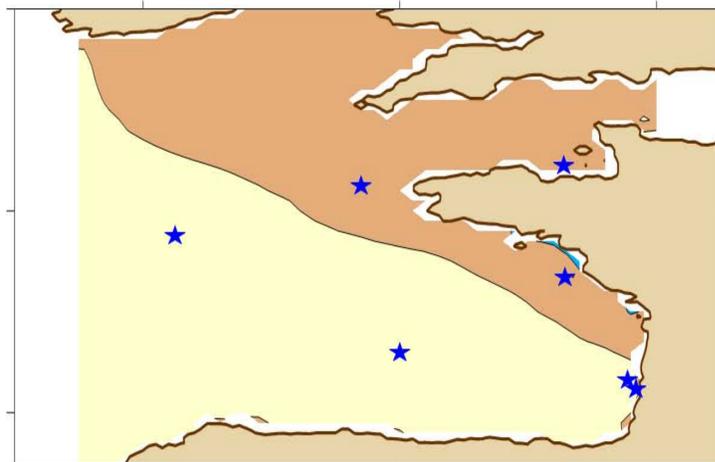
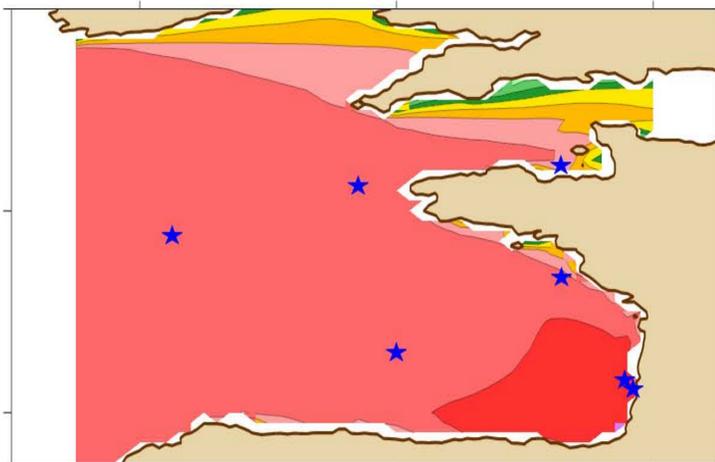


52°N

48°N

44°N

X.Bertin



52°N

48°N

44°N

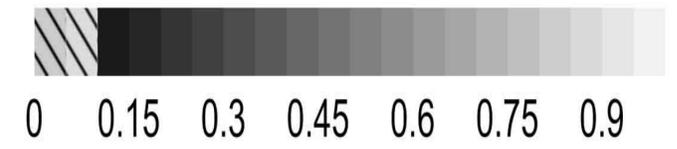
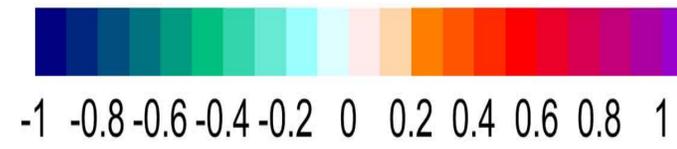
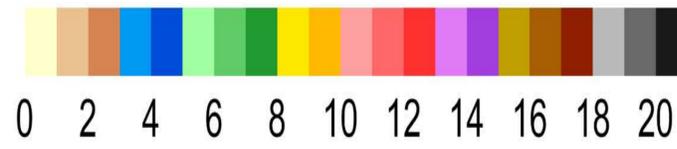
MWD - summer 1970-2001

Mean of Wave Direction (s)

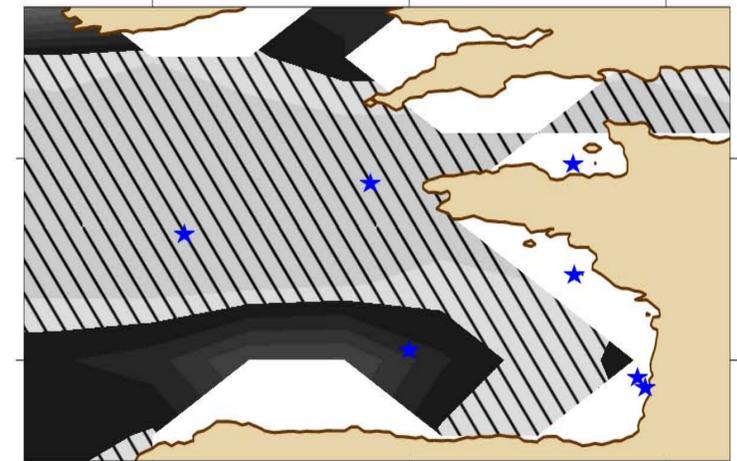
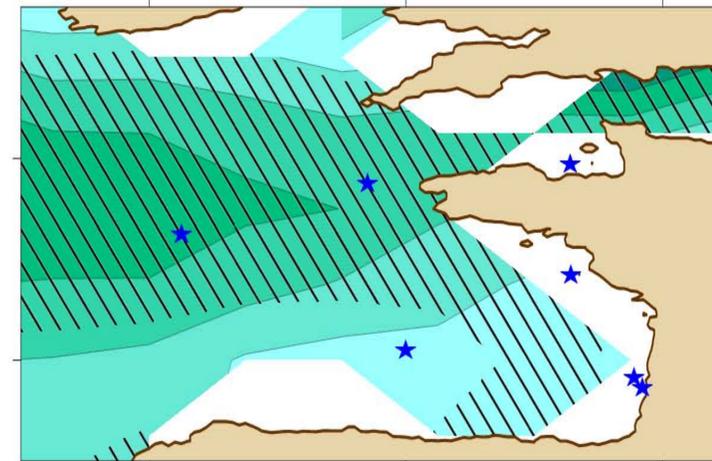
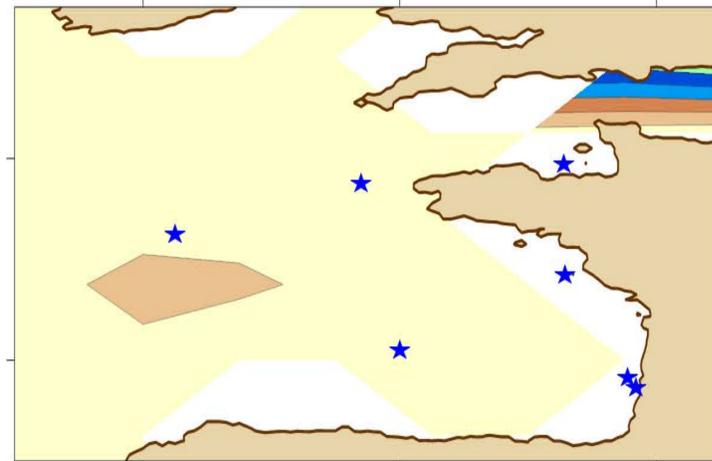
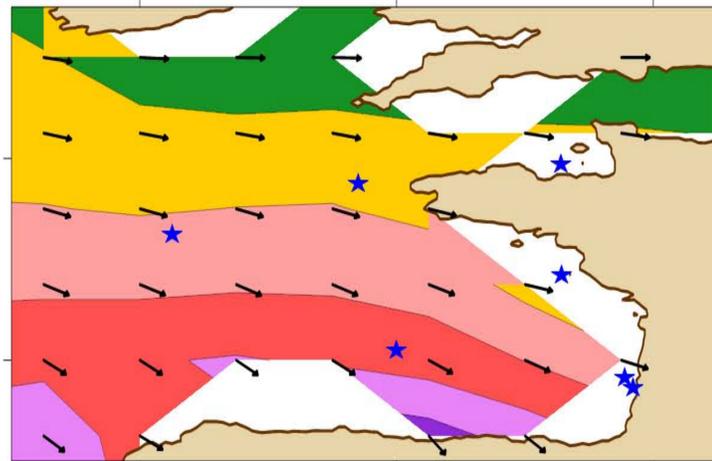
Normalized standard deviation (%)

Linear trend (°/yr)

Probability-value (Student's T-test)



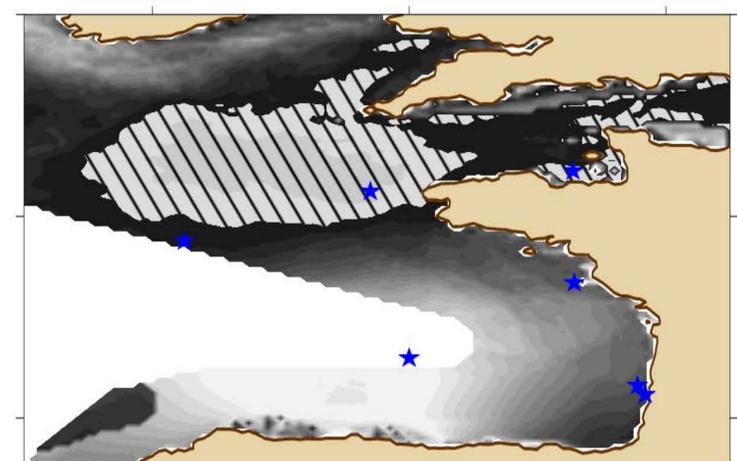
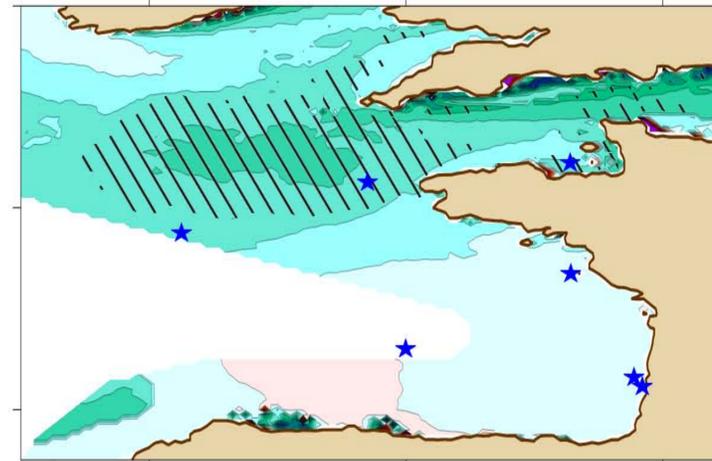
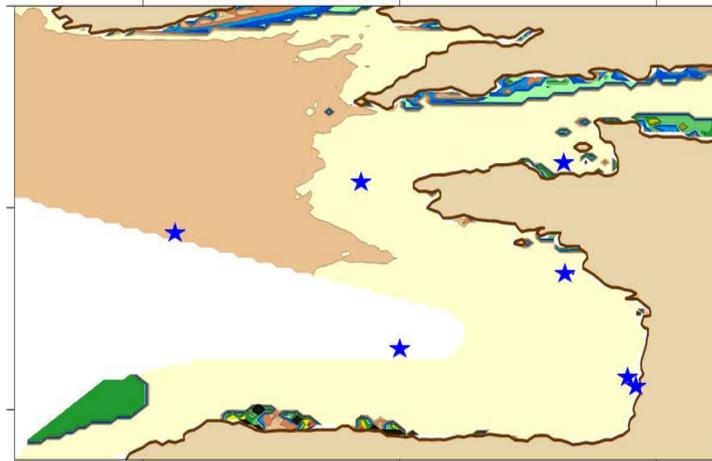
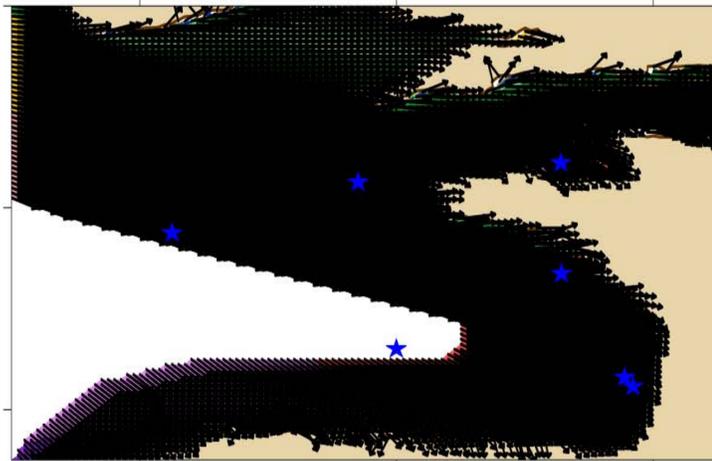
C-ERA40



49°N

45°N

BoBWA

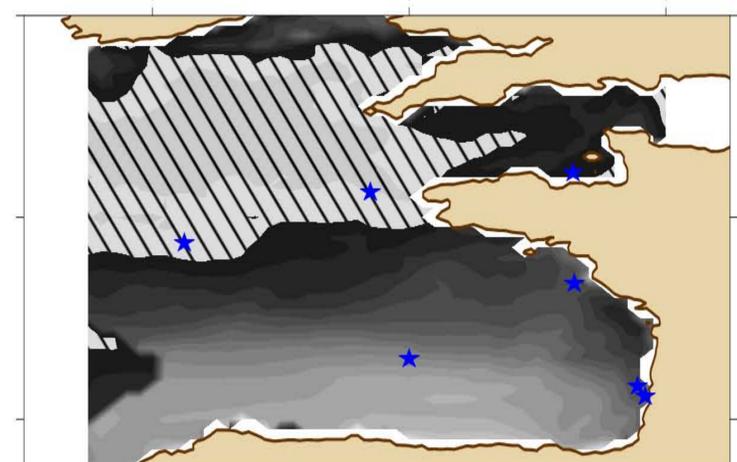
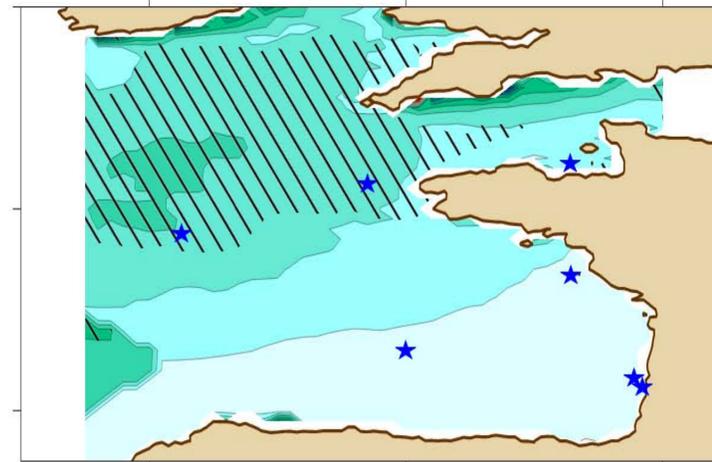
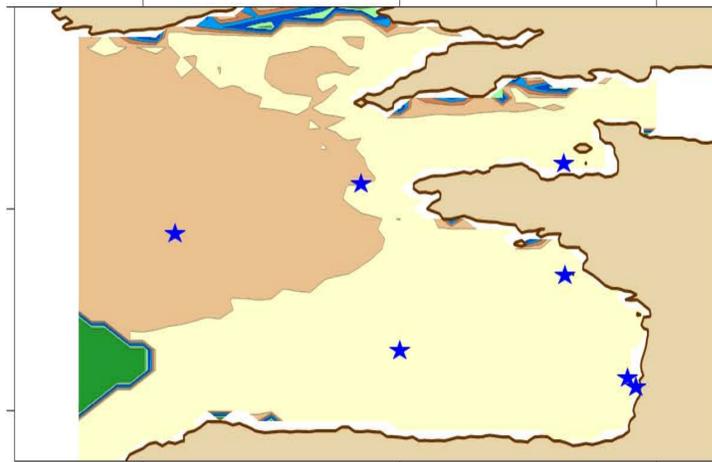
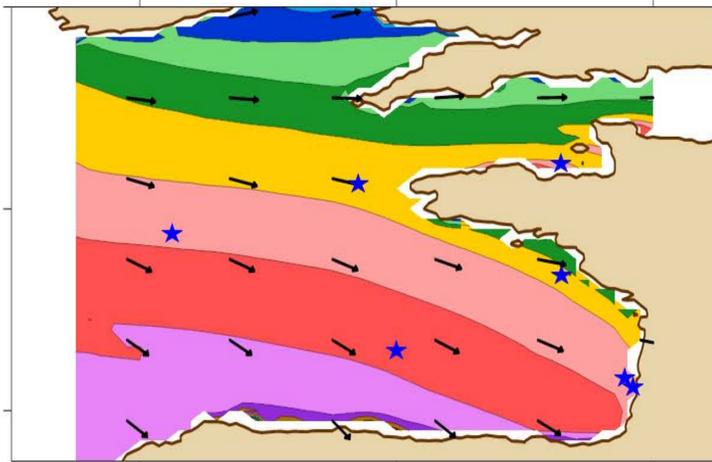


52°N

48°N

44°N

X.Bertin



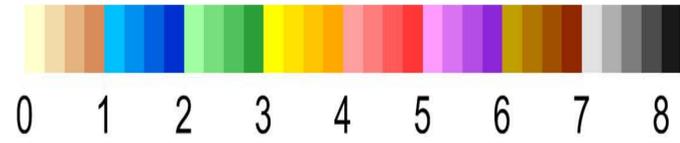
52°N

48°N

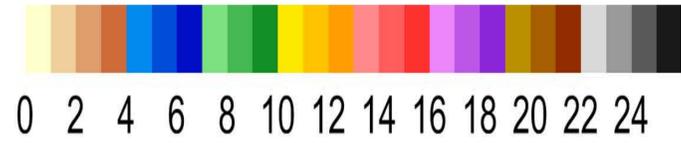
44°N

SWH - autumn 1970-2001

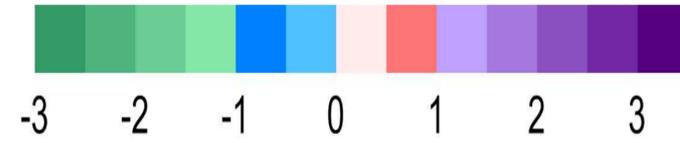
Mean of Significant Wave Height (m)



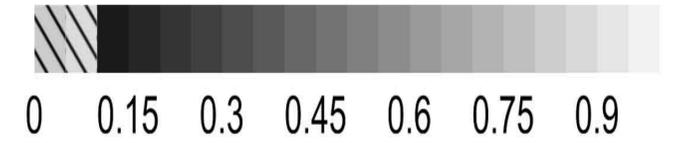
Normalized standard deviation (%)



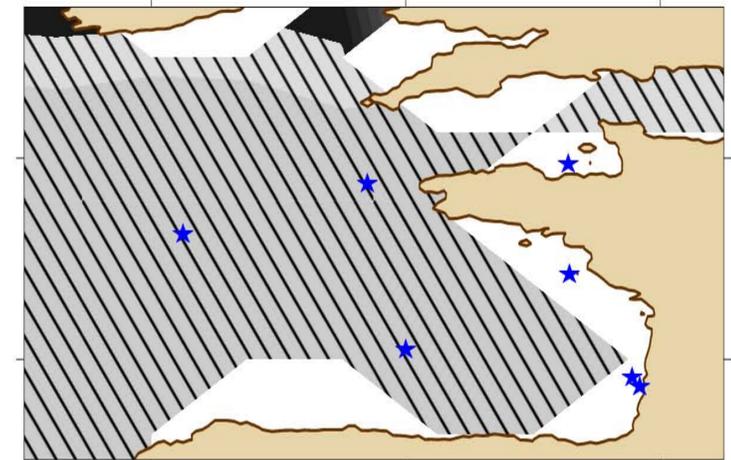
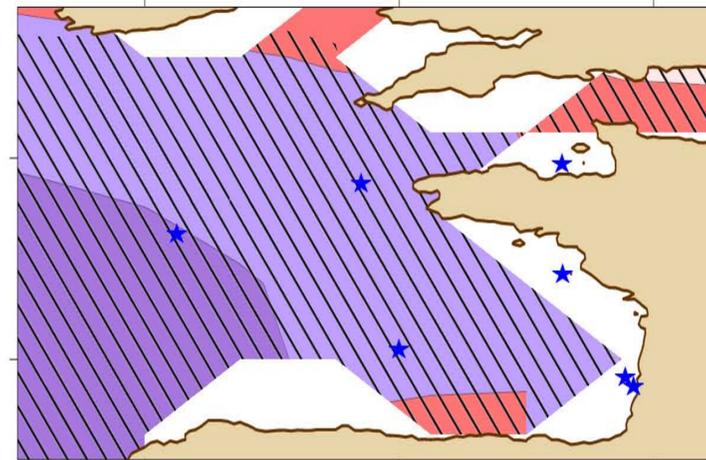
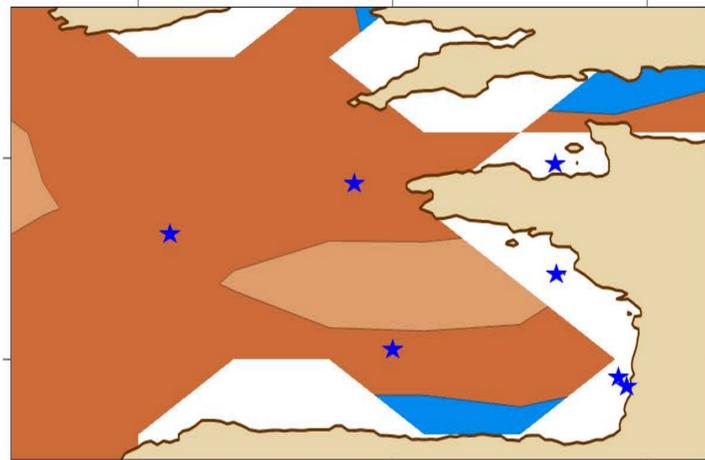
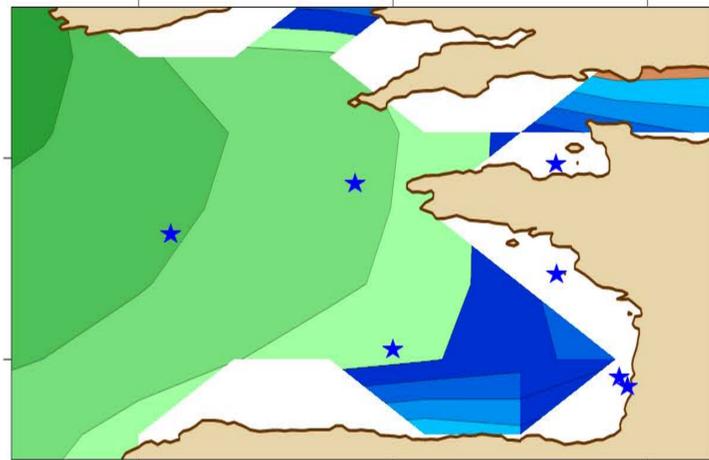
Linear trend (cm/yr)



Probability-value (Student's T-test)



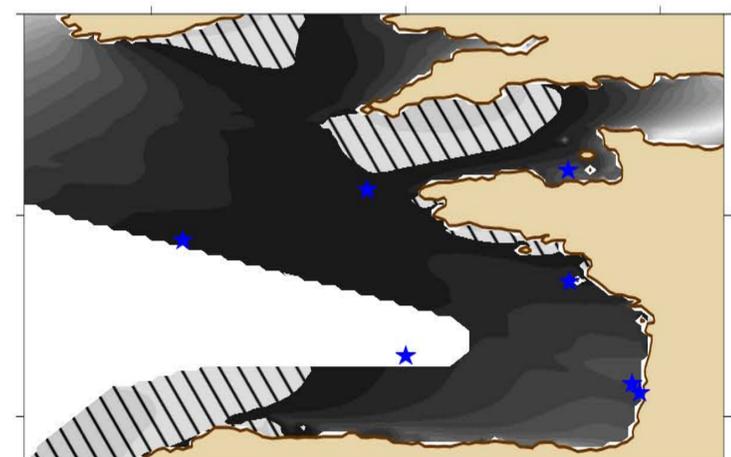
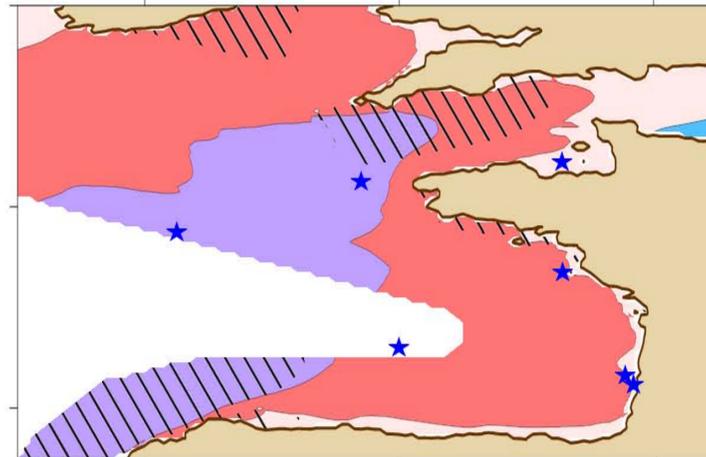
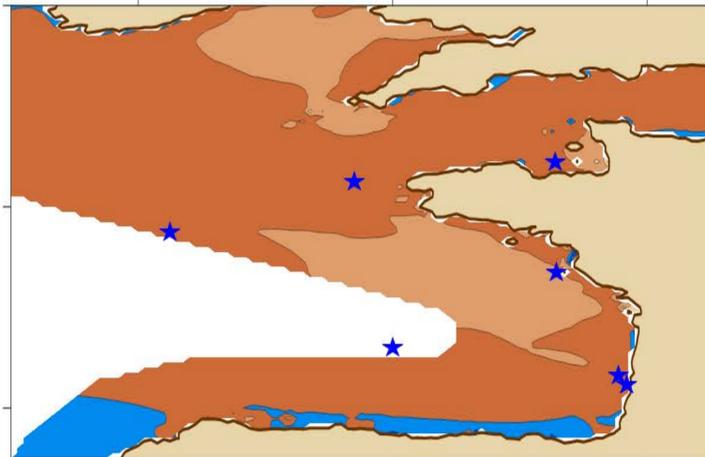
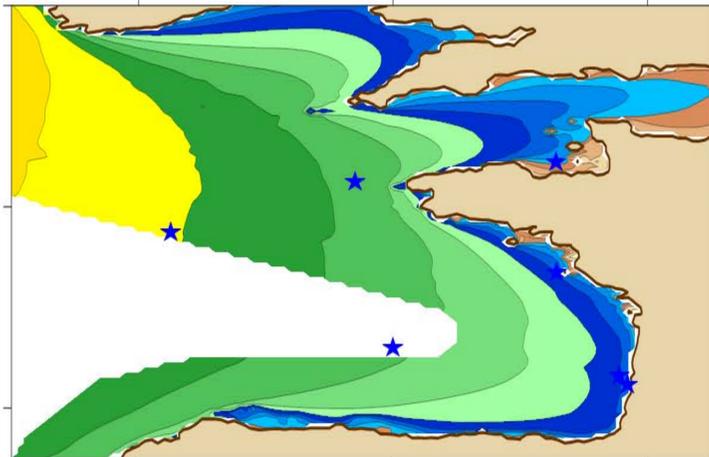
C-ERA40



49°N

45°N

BoBWA

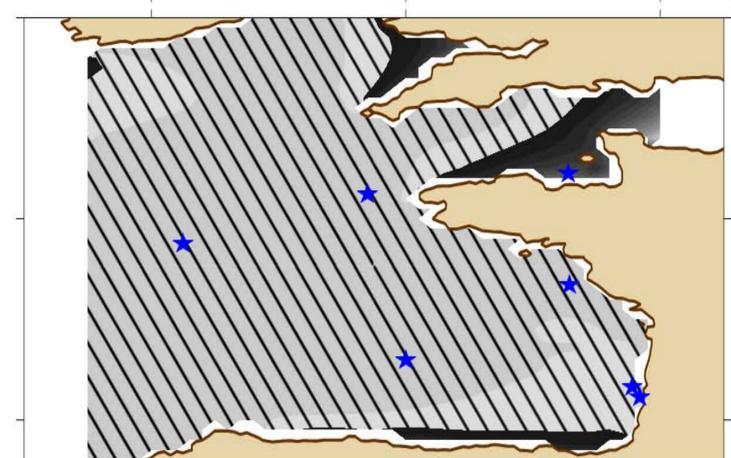
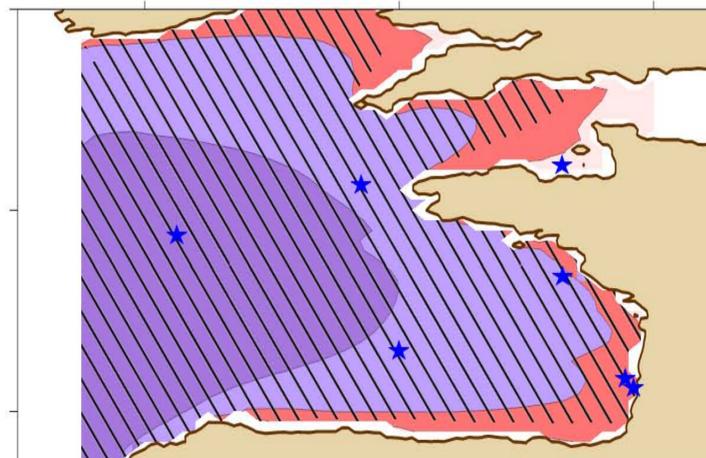
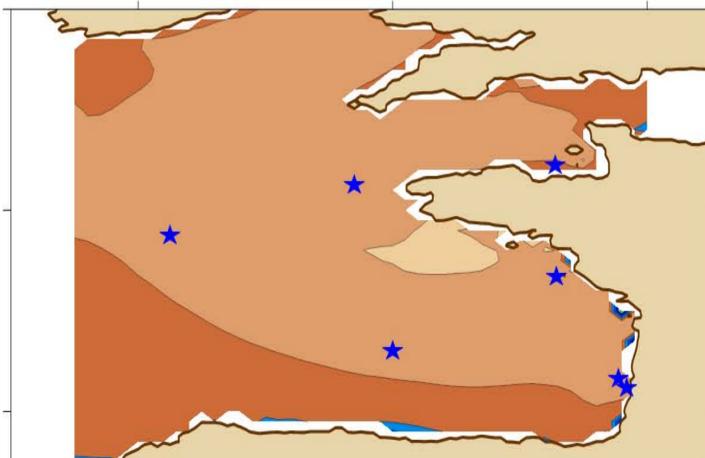
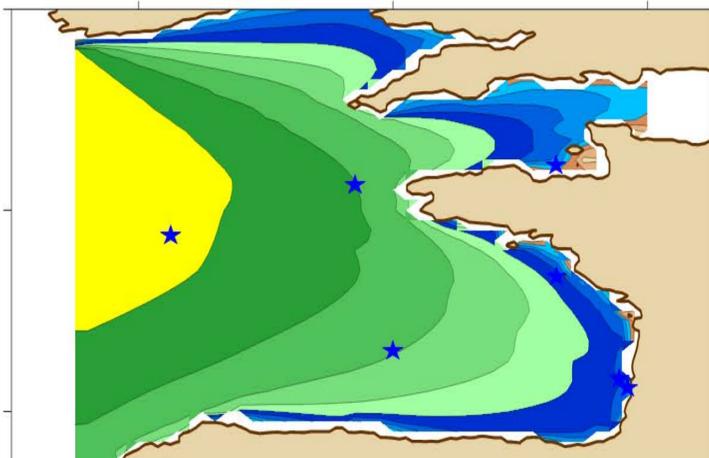


52°N

48°N

44°N

X.Bertin



52°N

48°N

44°N

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

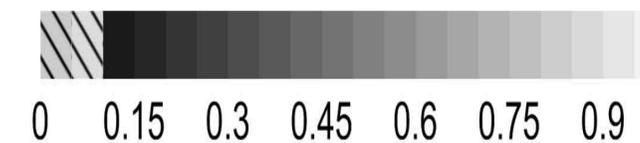
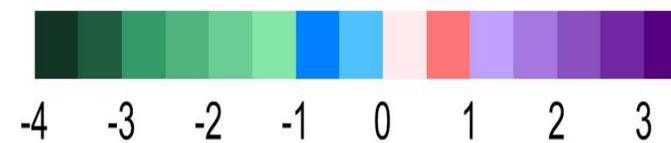
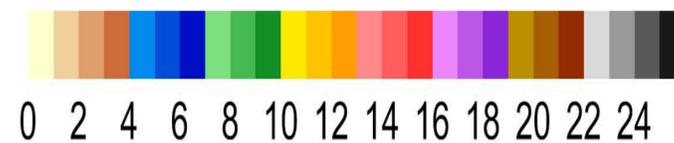
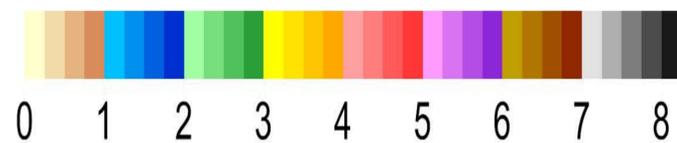
SWHPrct90 - autumn 1970-2001

Significant Wave Height 90th (m)

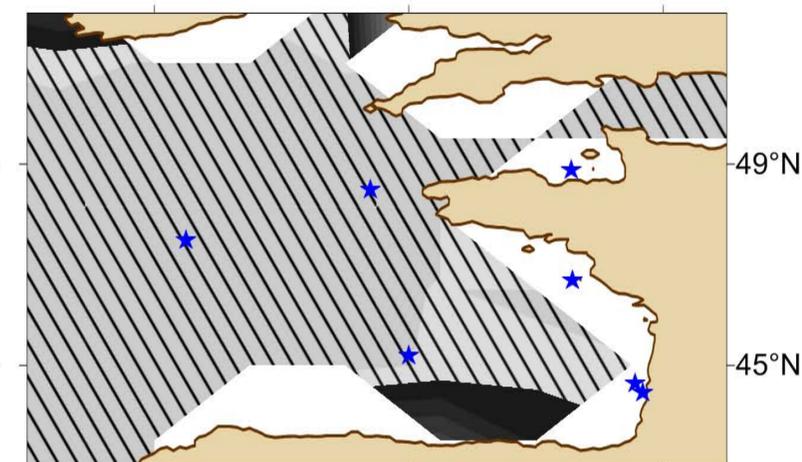
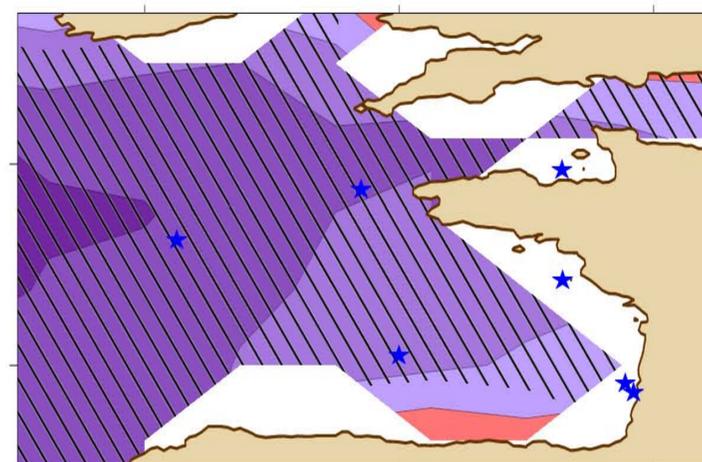
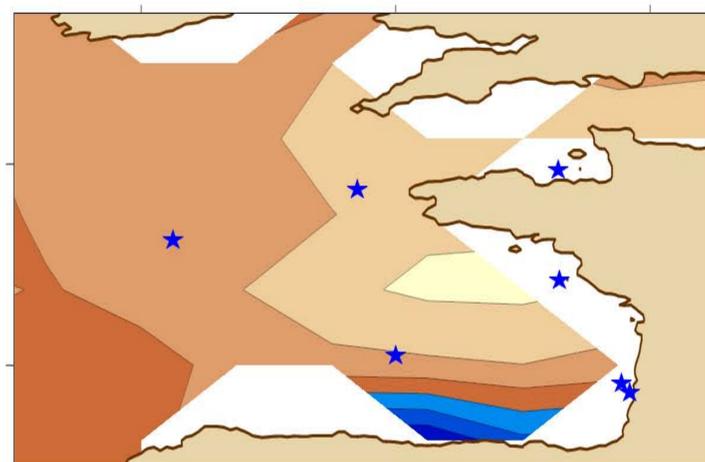
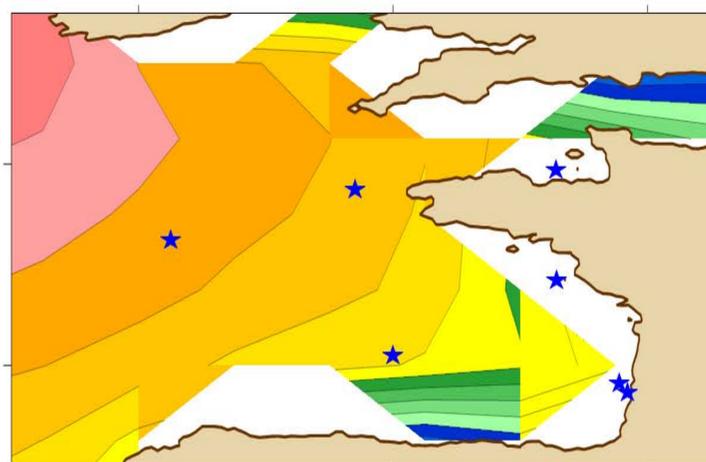
Normalized standard deviation (%)

Linear trend (cm/yr)

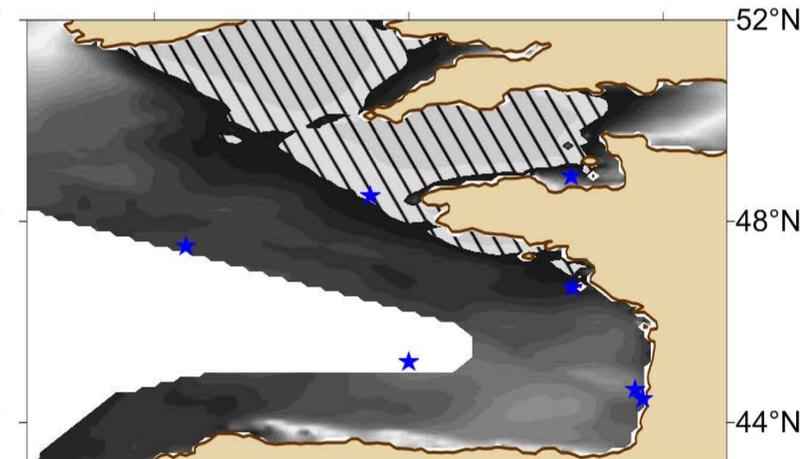
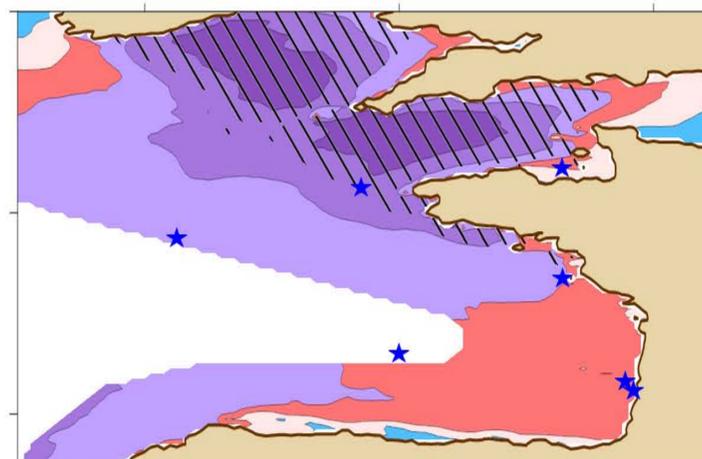
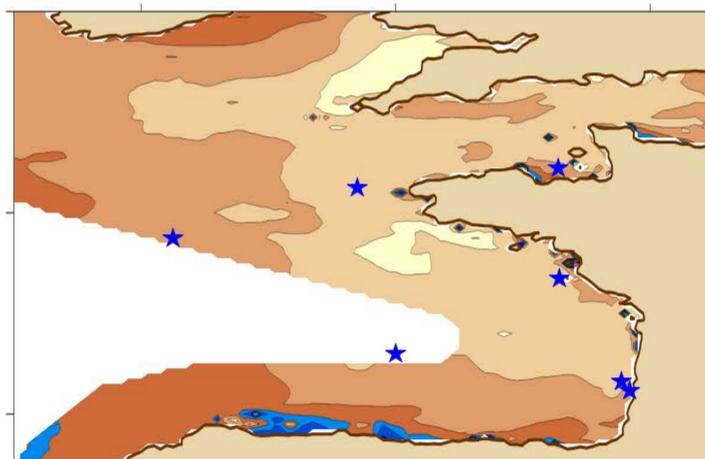
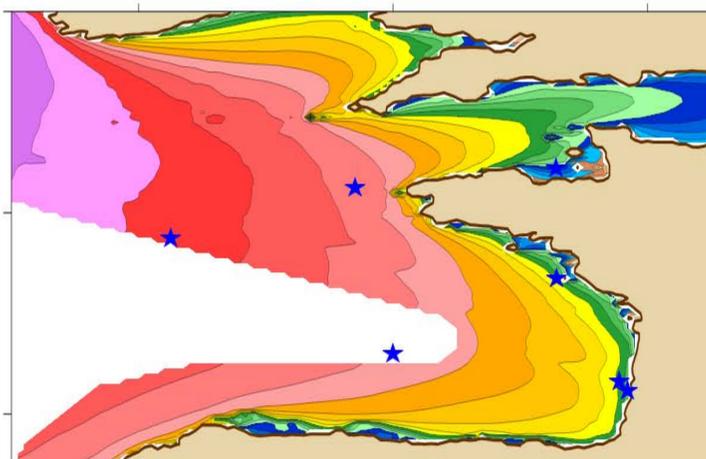
Probability-value (Student's T-test)



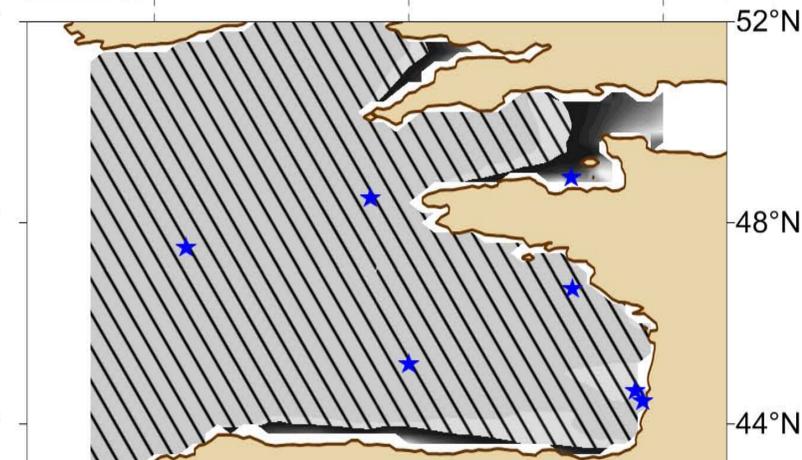
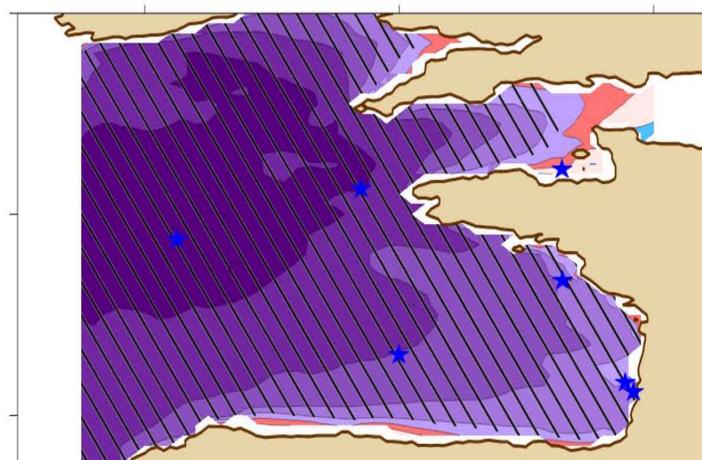
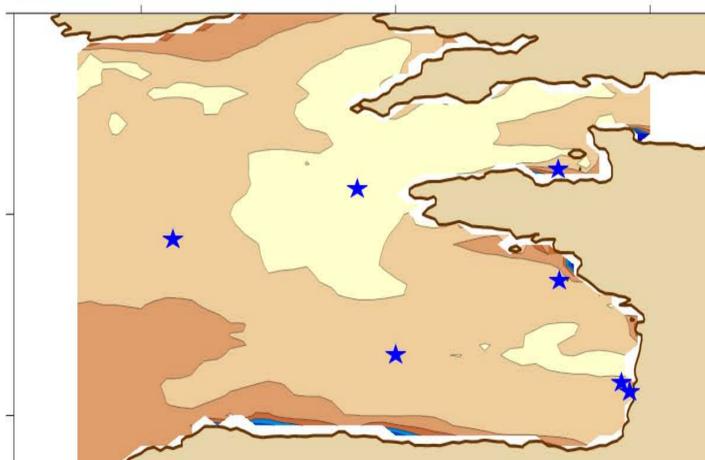
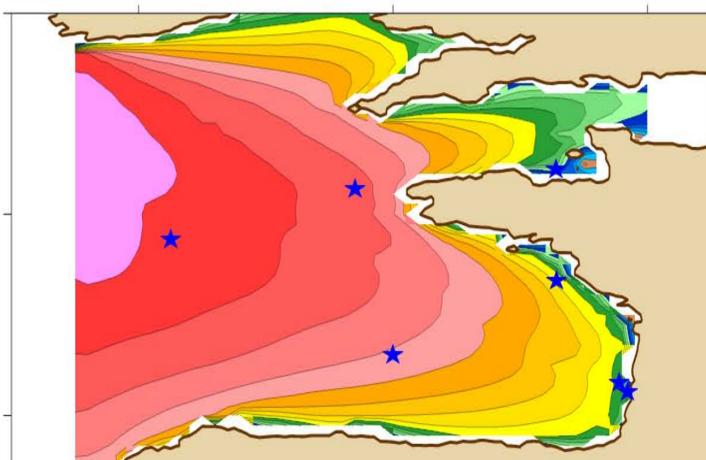
C-ERA40



BoBWA



X.Bertin



-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

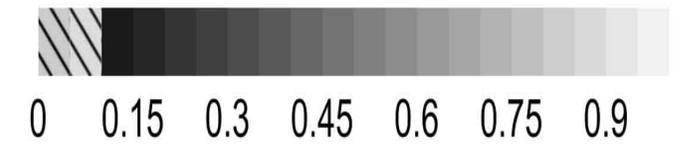
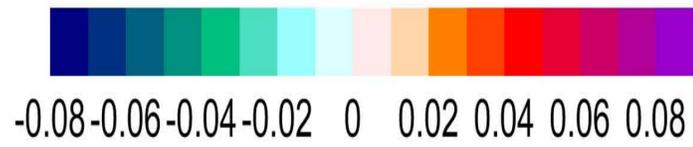
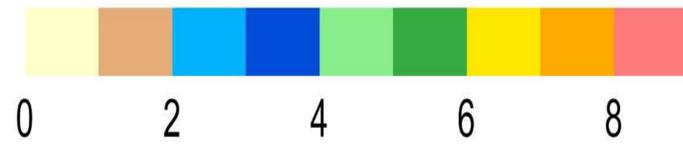
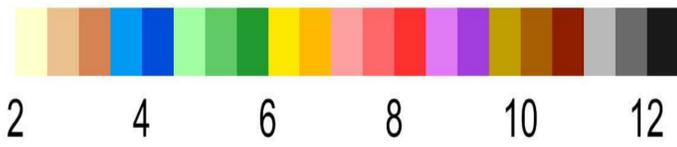
MWP - autumn 1970-2001

Mean of Wave Period (s)

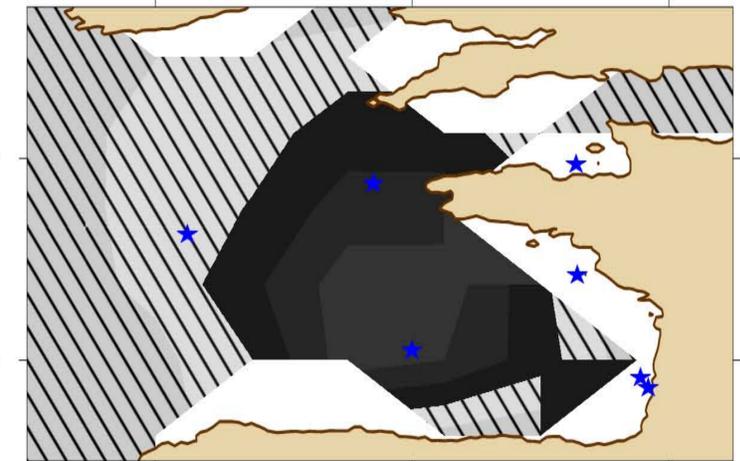
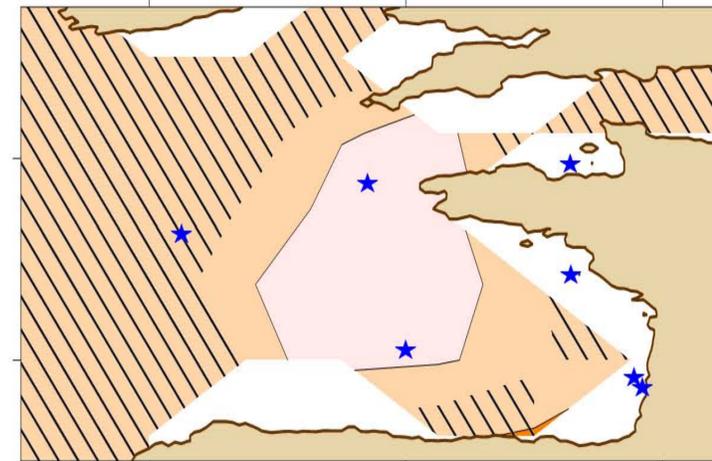
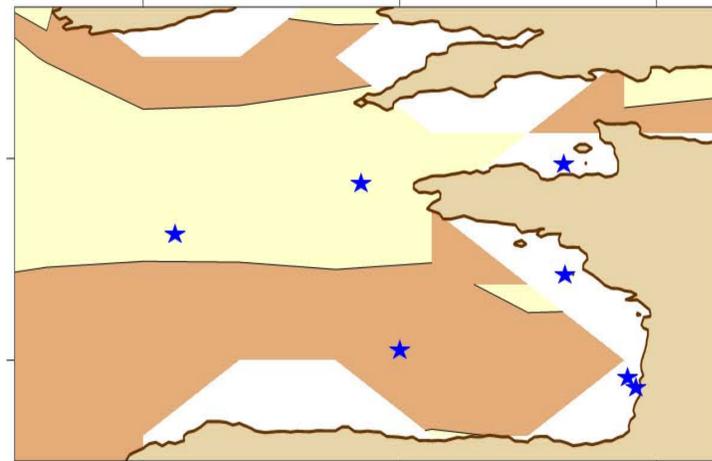
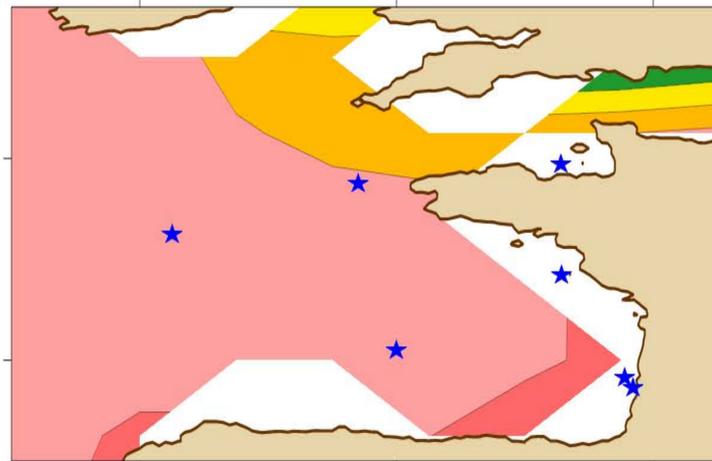
Normalized standard deviation (%)

Linear trend (s/yr)

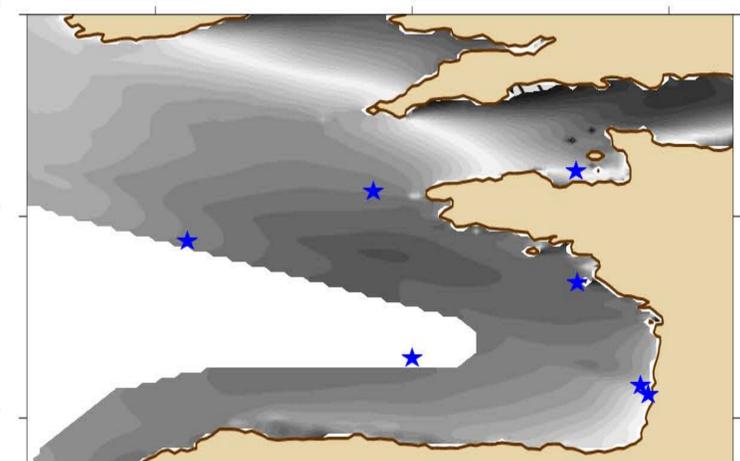
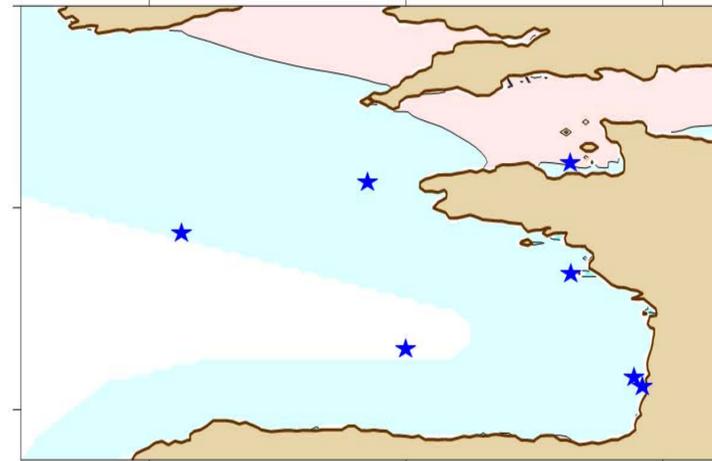
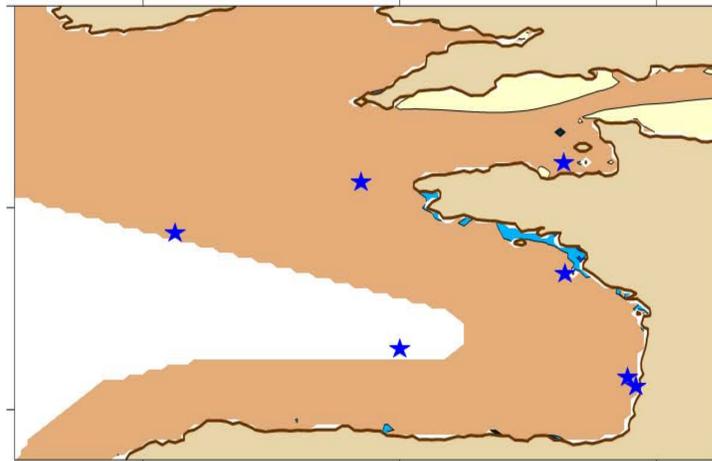
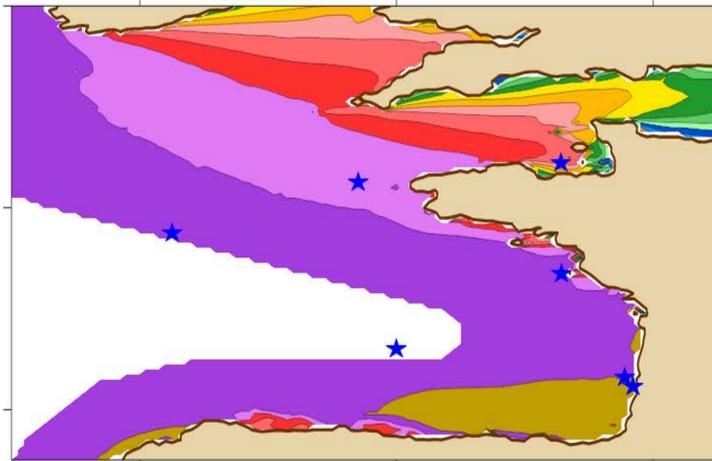
Probability-value (Student's T-test)



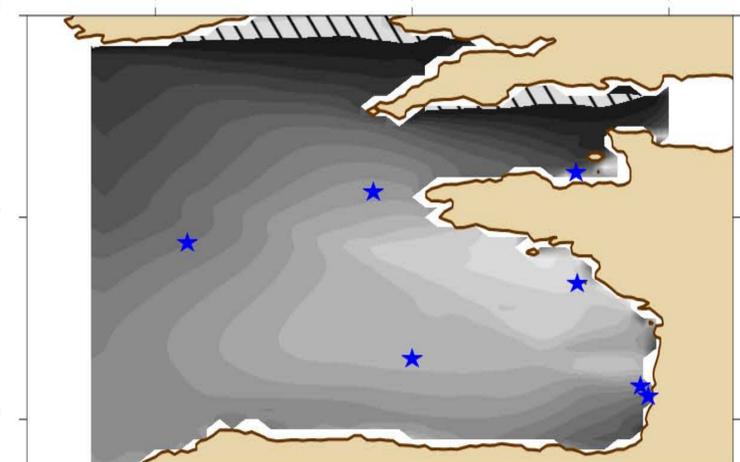
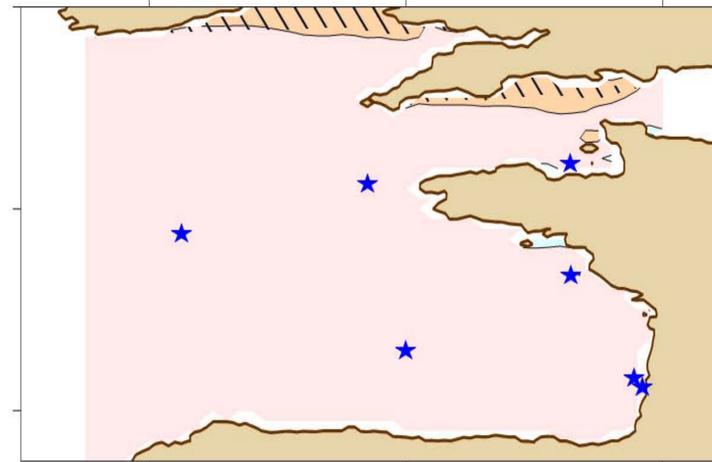
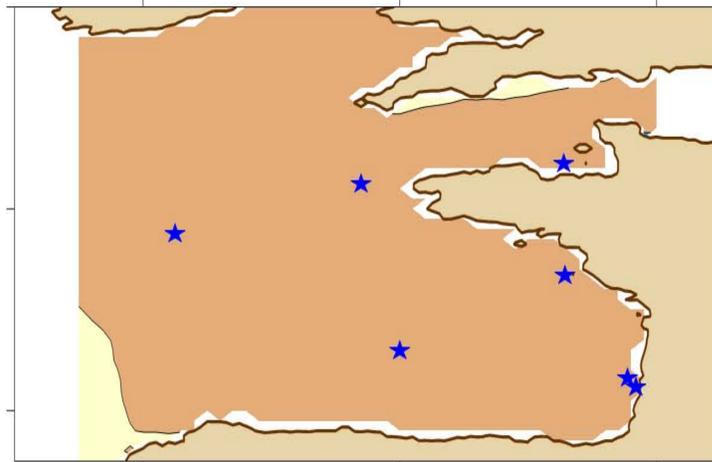
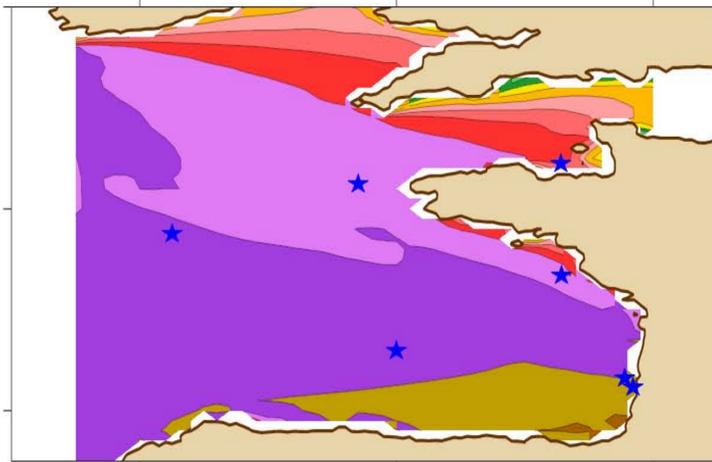
C-ERA40



BoBWA



X.Bertin



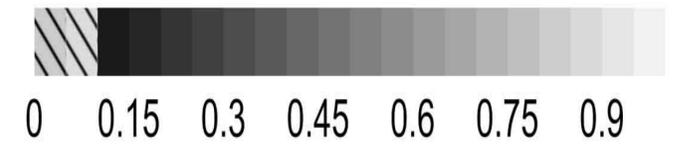
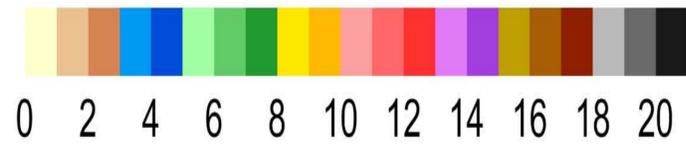
MWD - autumn 1970-2001

Mean of Wave Direction (s)

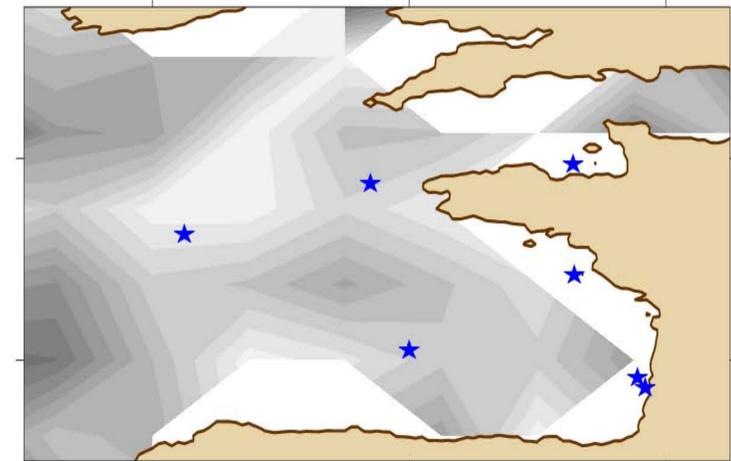
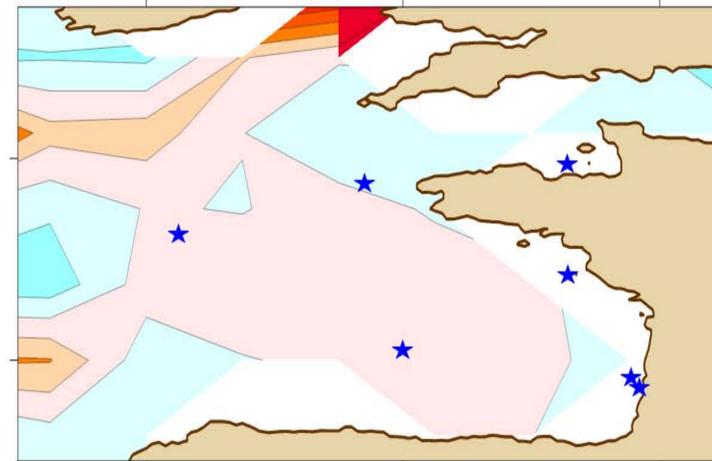
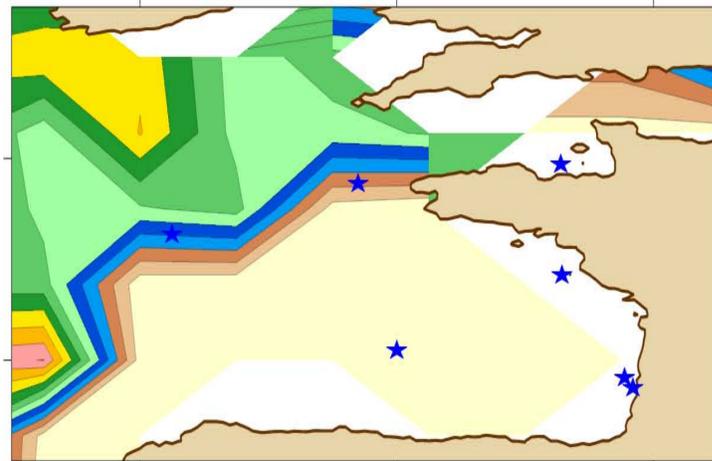
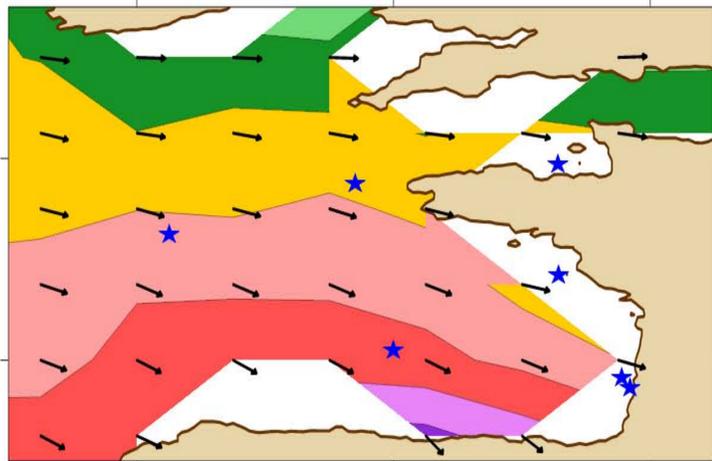
Normalized standard deviation (%)

Linear trend (°/yr)

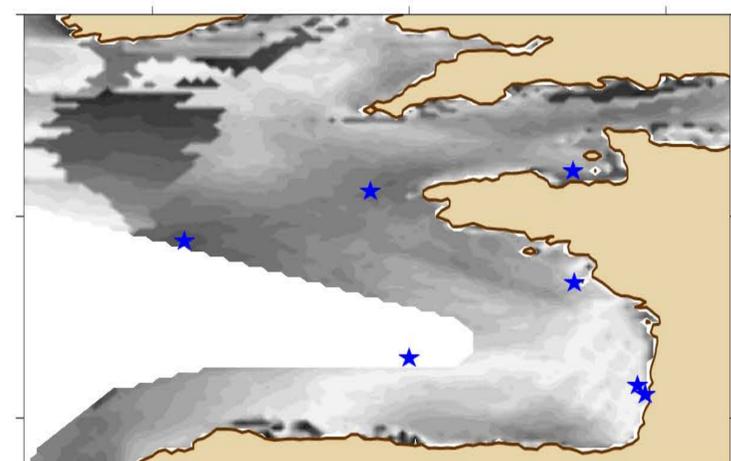
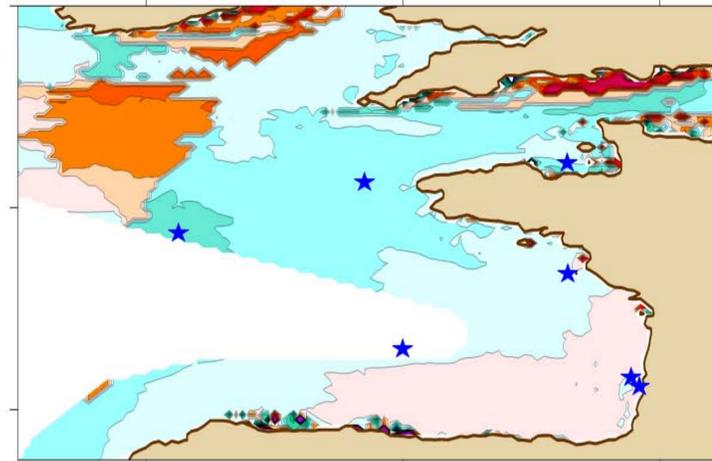
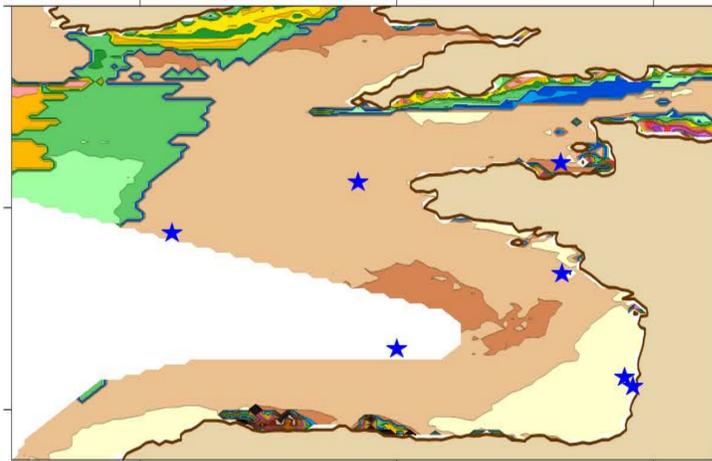
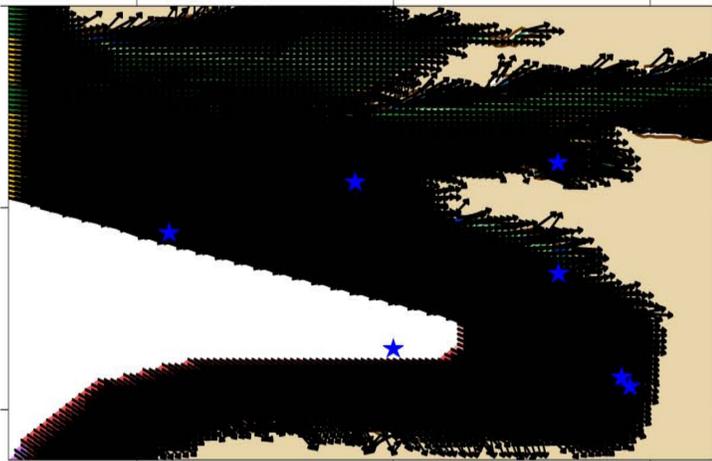
Probability-value (Student's T-test)



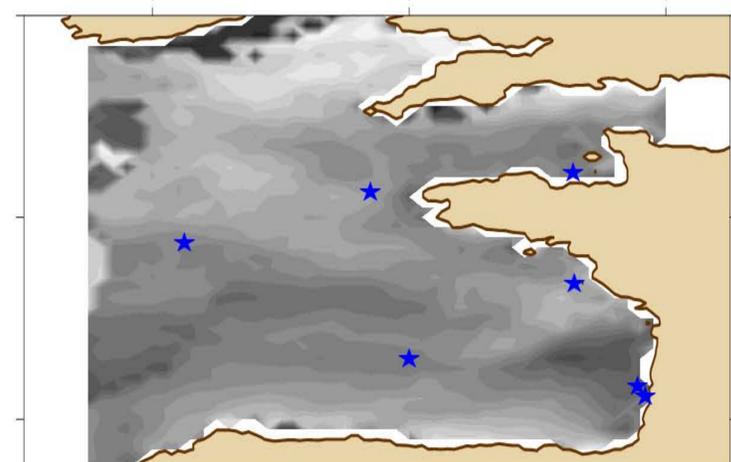
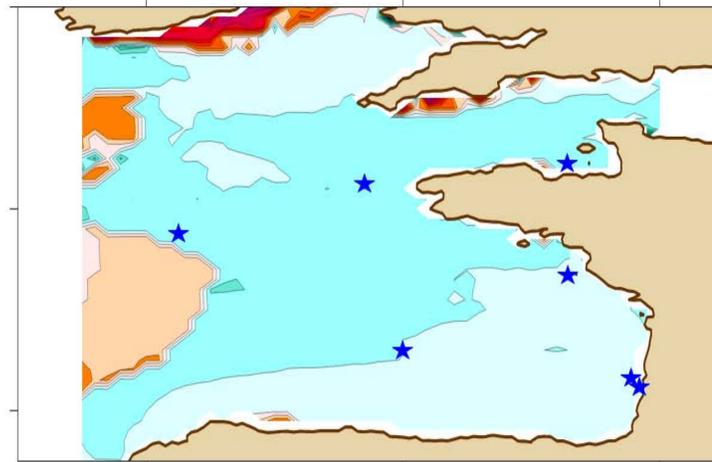
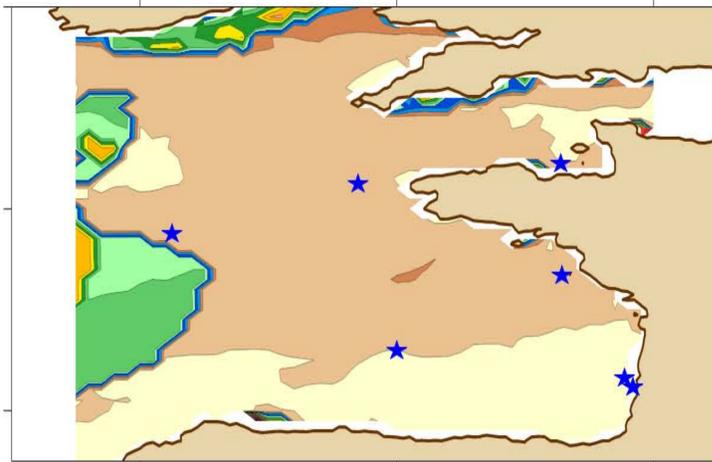
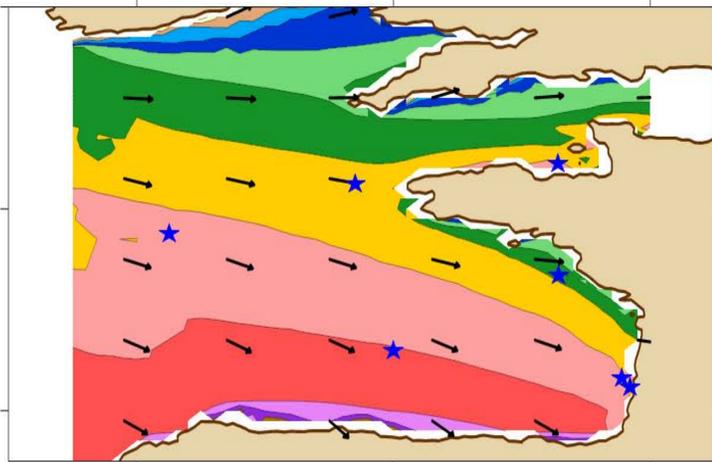
C-ERA40



BoBWA



X.Bertin



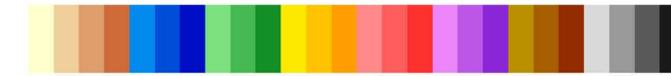
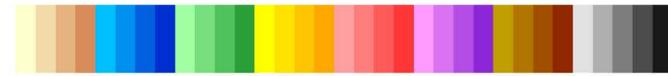
SWH - winter 1958-2001

Mean of Significant Wave Height (m)

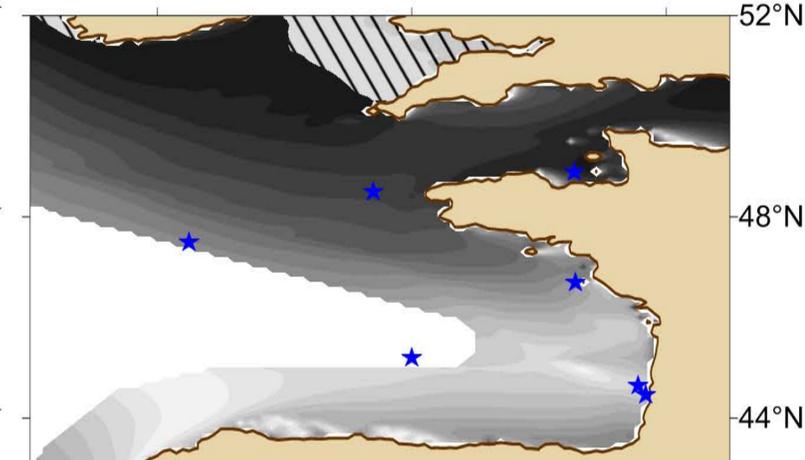
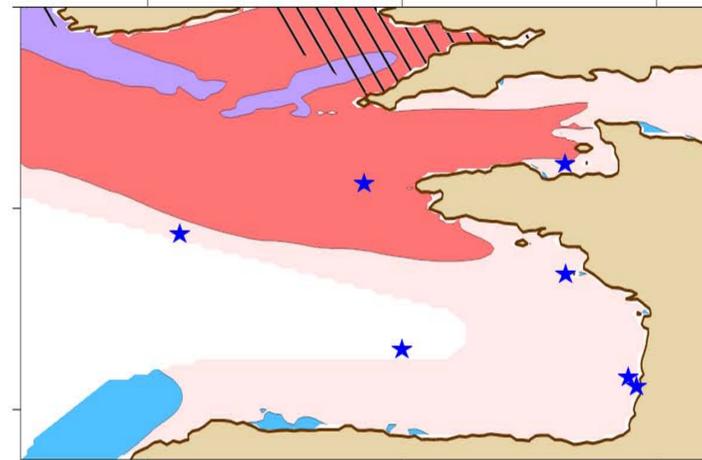
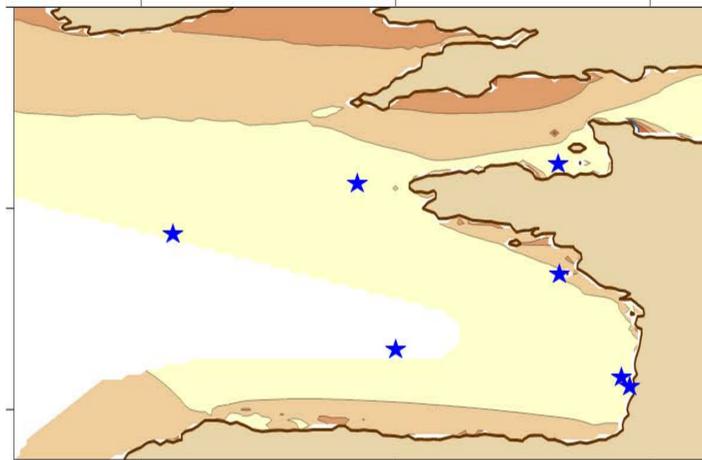
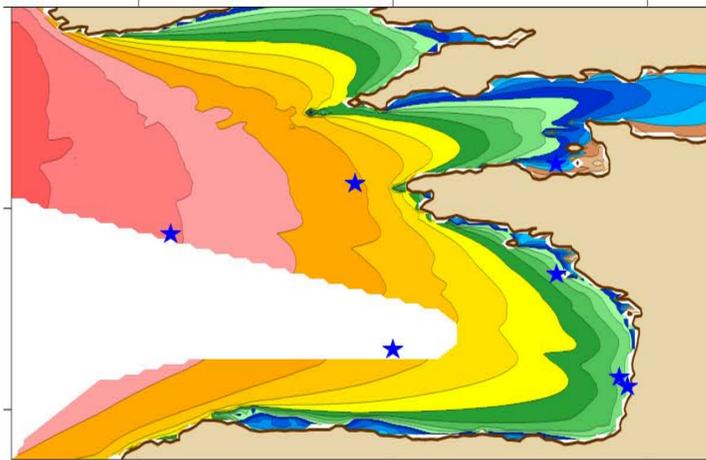
Normalized standard deviation (%)

Linear trend (cm/yr)

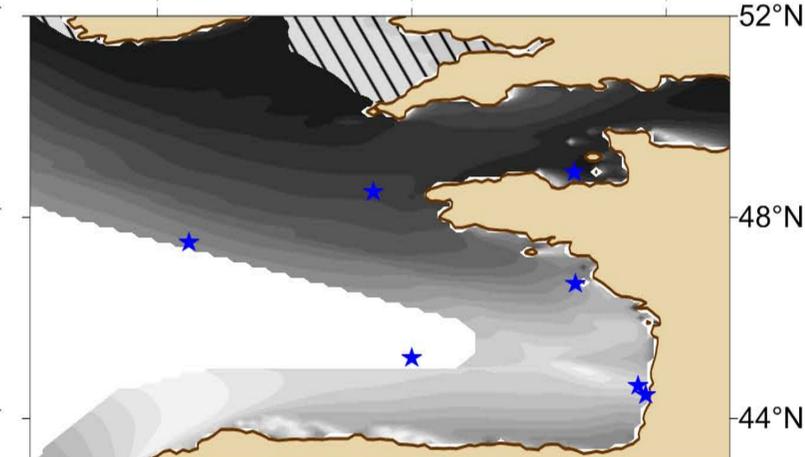
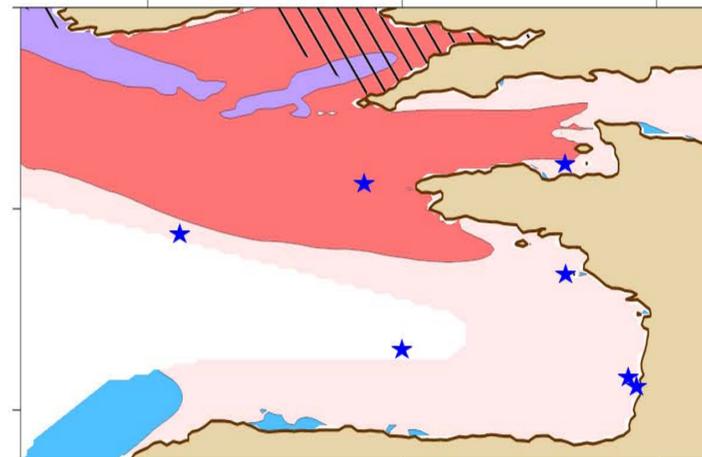
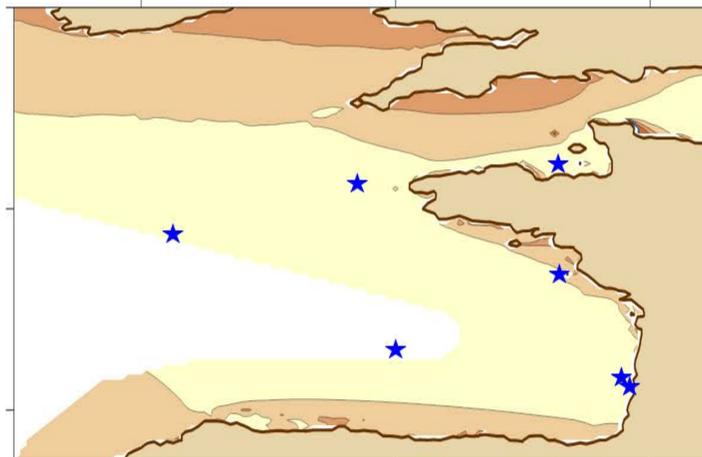
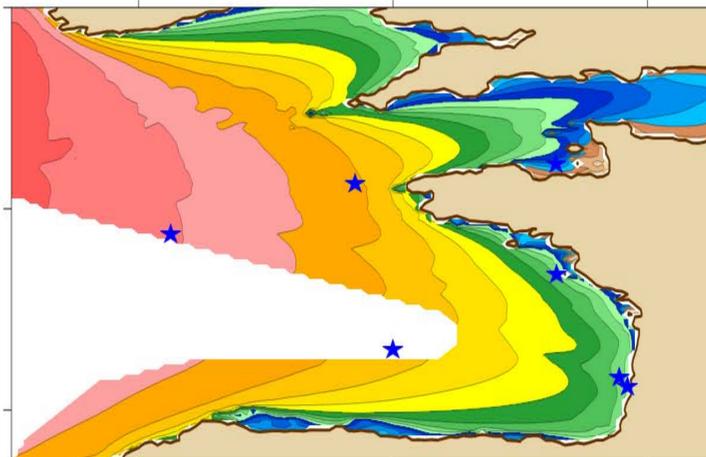
Probability-value (Student's T-test)



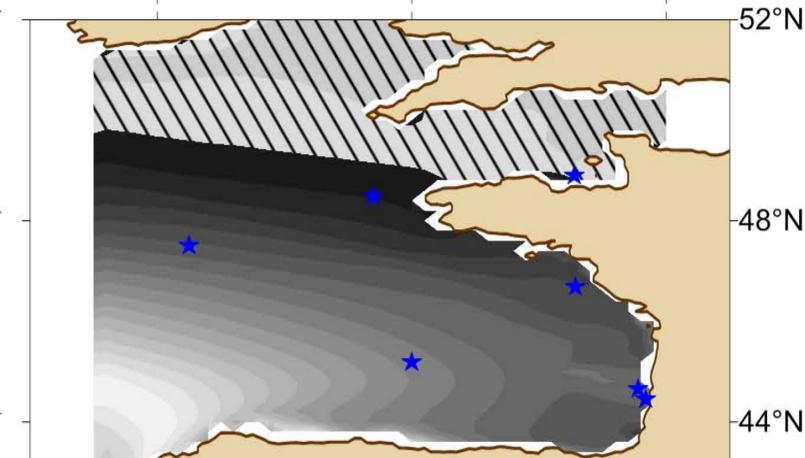
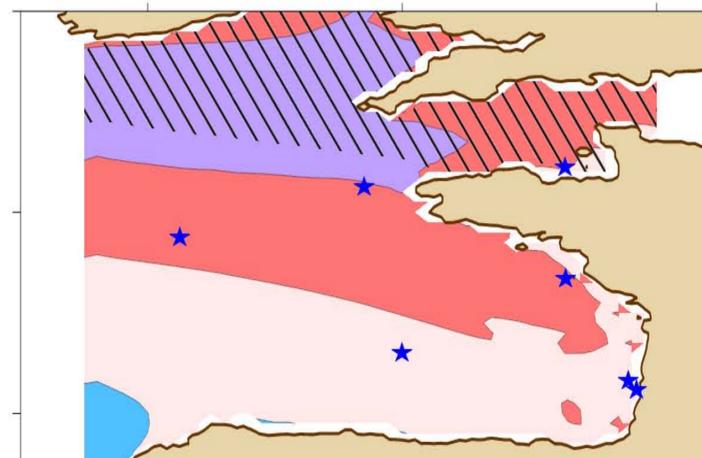
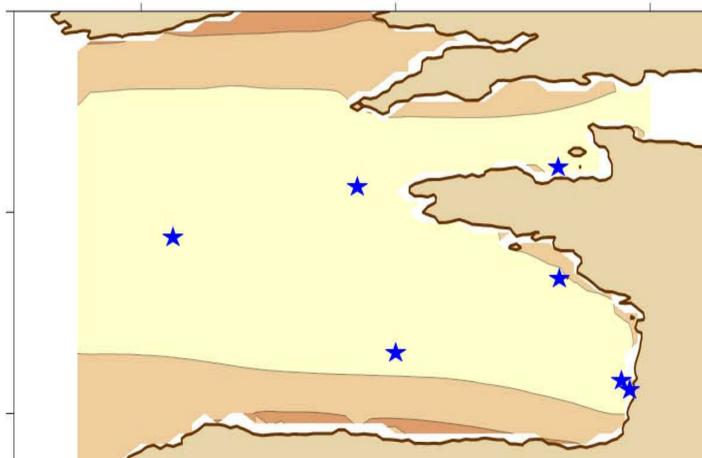
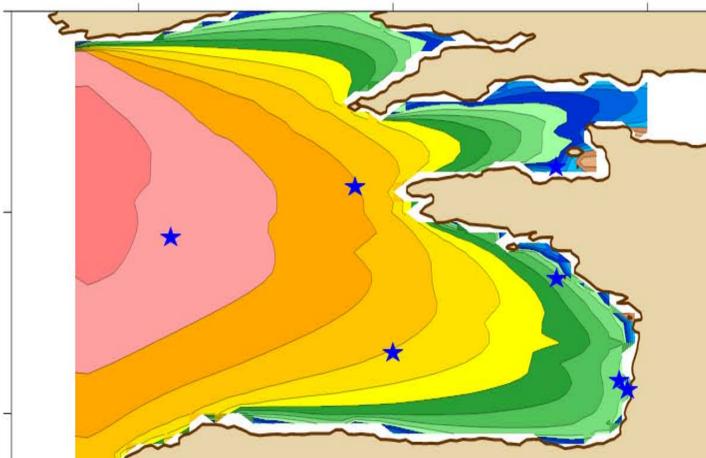
C-ERA40



BoBWA



X.Bertin



-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

52°N

48°N

44°N

52°N

48°N

44°N

52°N

48°N

44°N

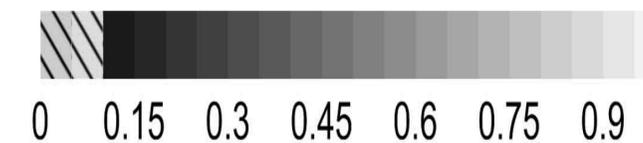
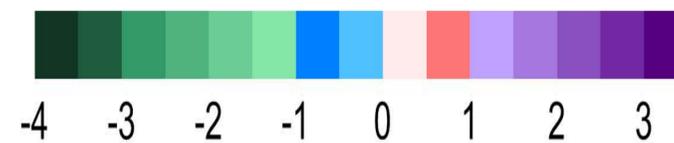
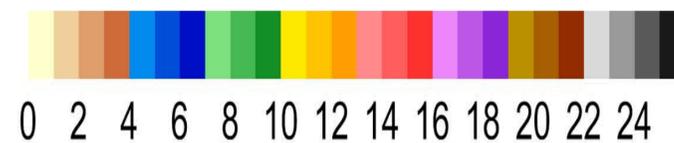
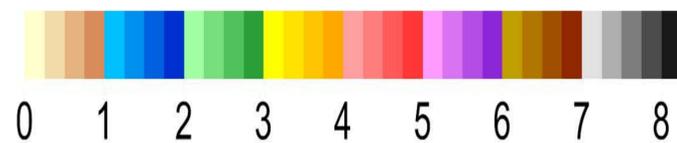
SWHPrct90 - winter 1958-2001

Significant Wave Height 90th (m)

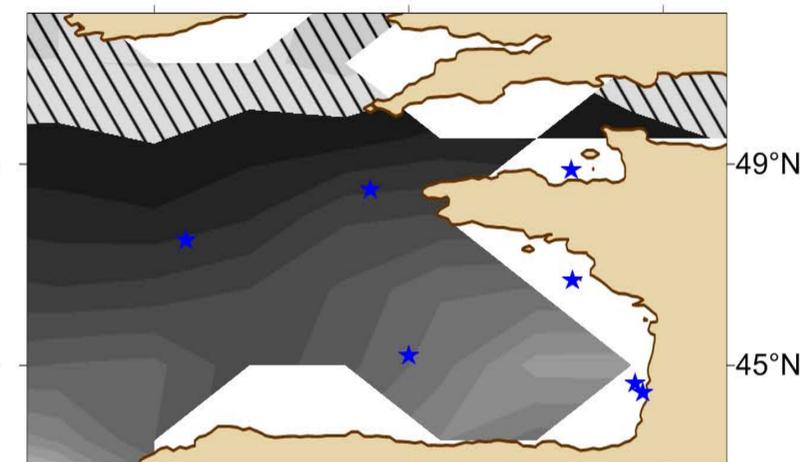
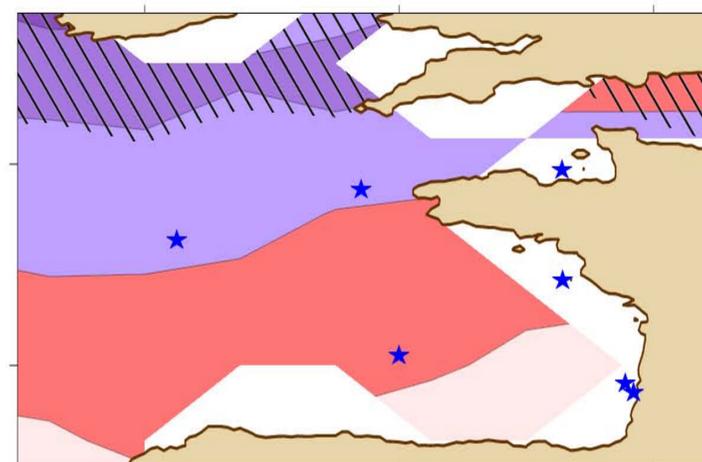
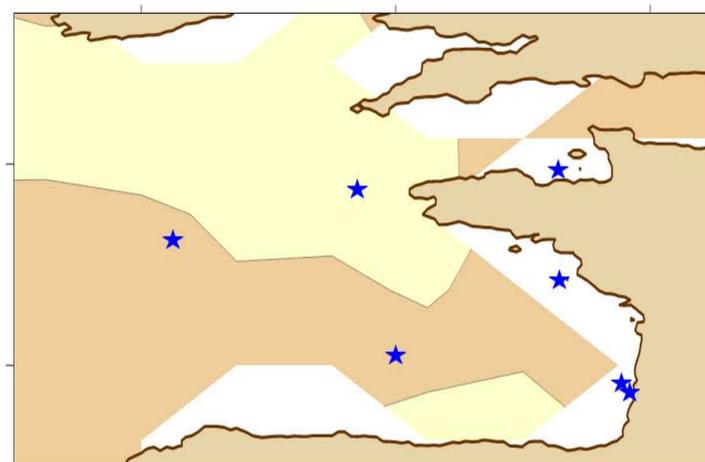
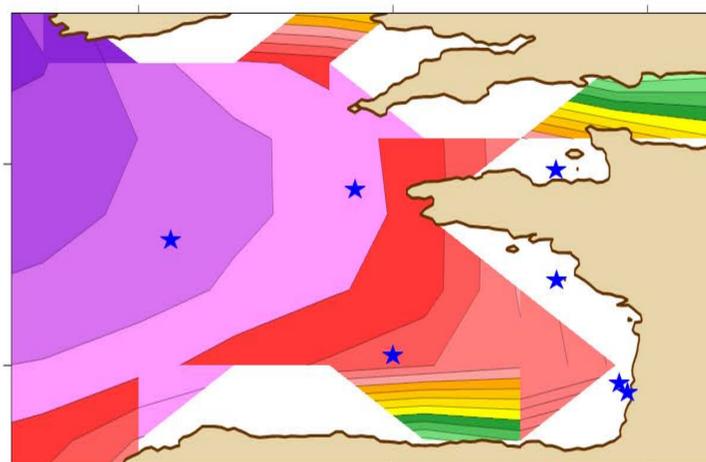
Normalized standard deviation (%)

Linear trend (cm/yr)

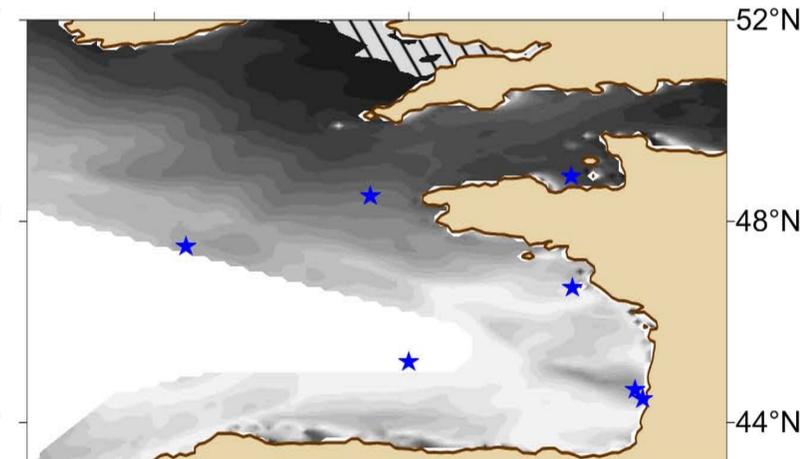
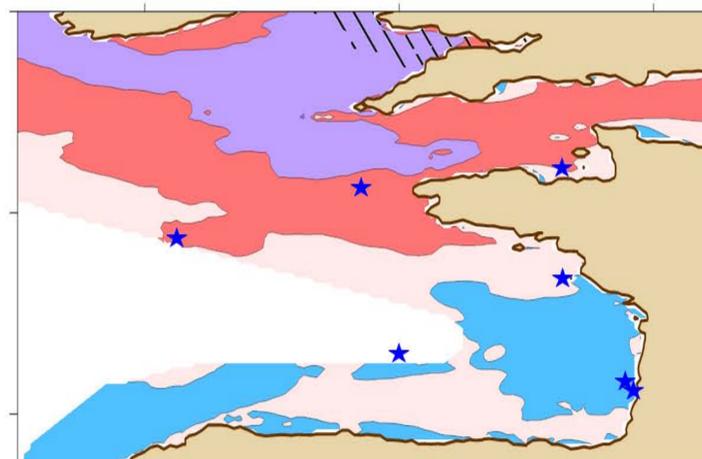
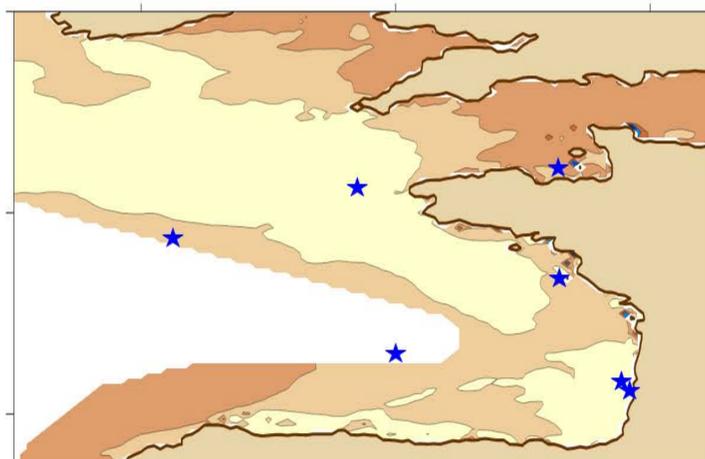
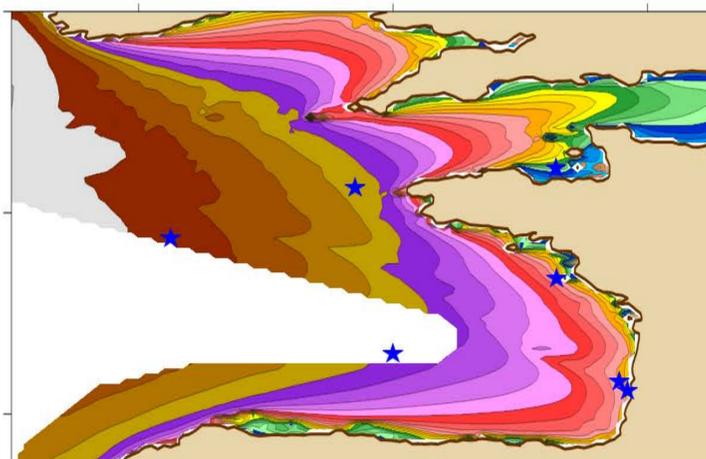
Probability-value (Student's T-test)



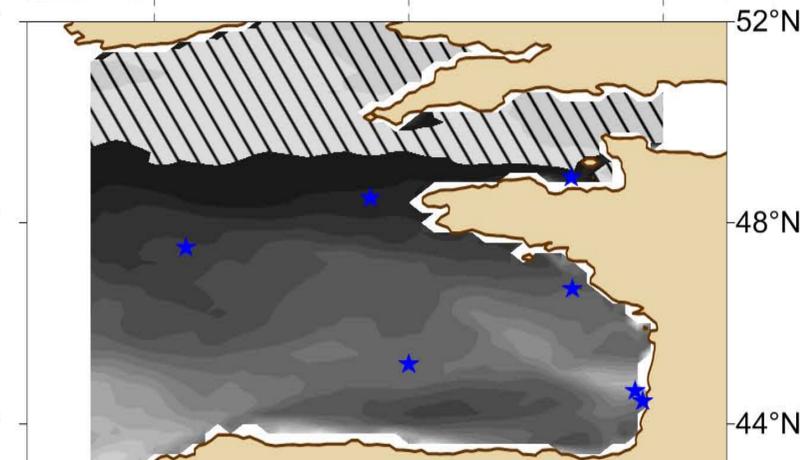
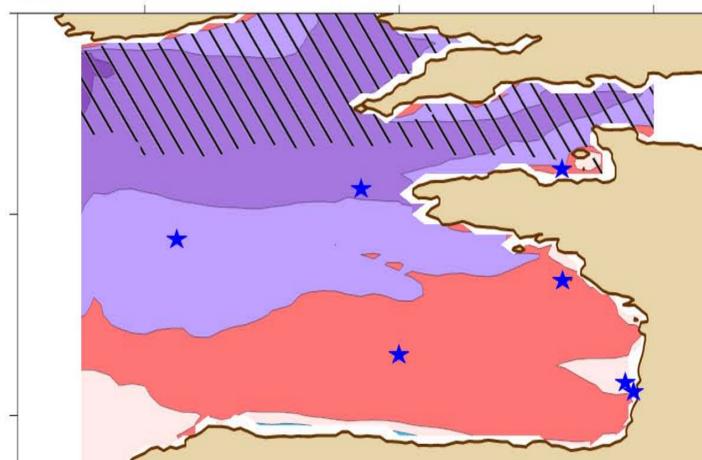
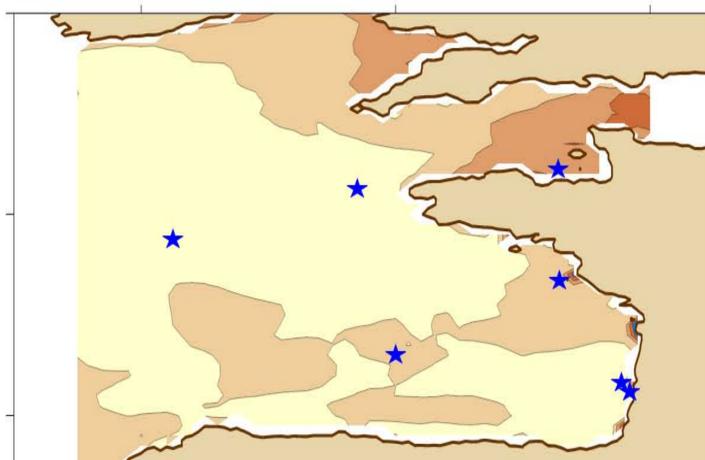
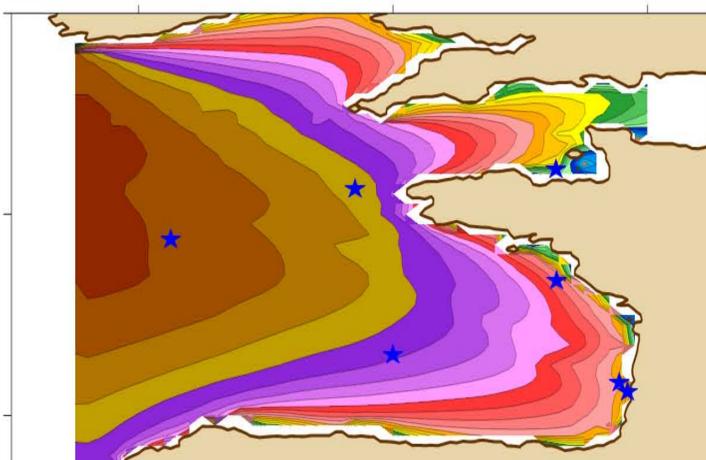
C-ERA40



BoBWA



X.Bertin



-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

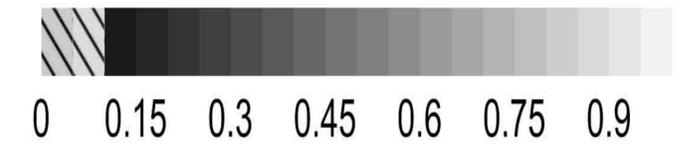
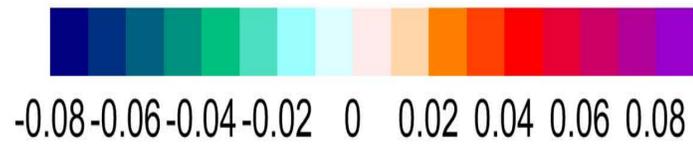
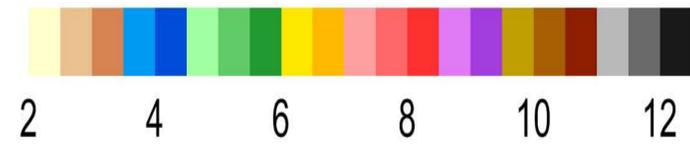
MWP - winter 1958-2001

Mean of Wave Period (s)

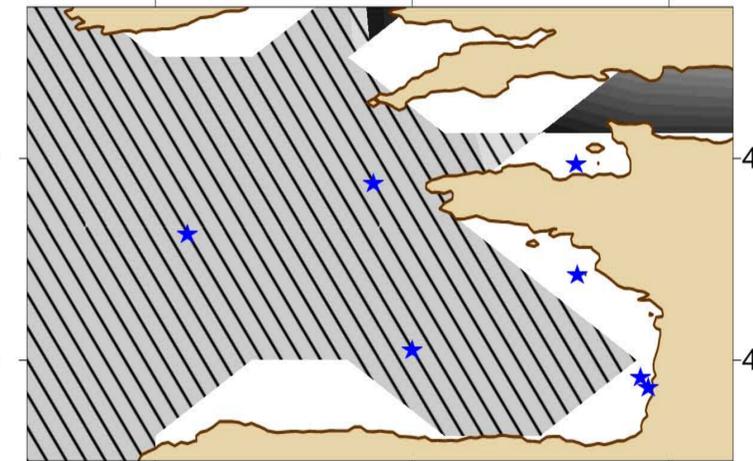
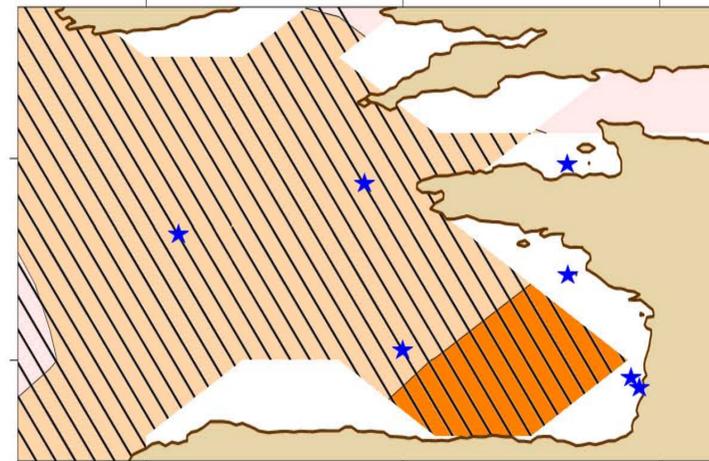
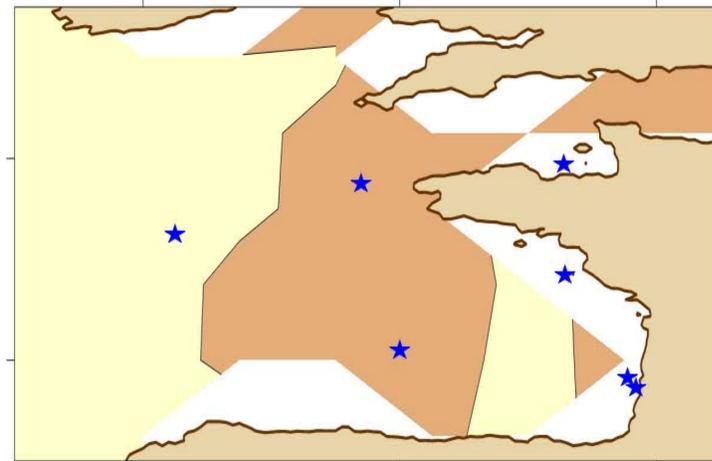
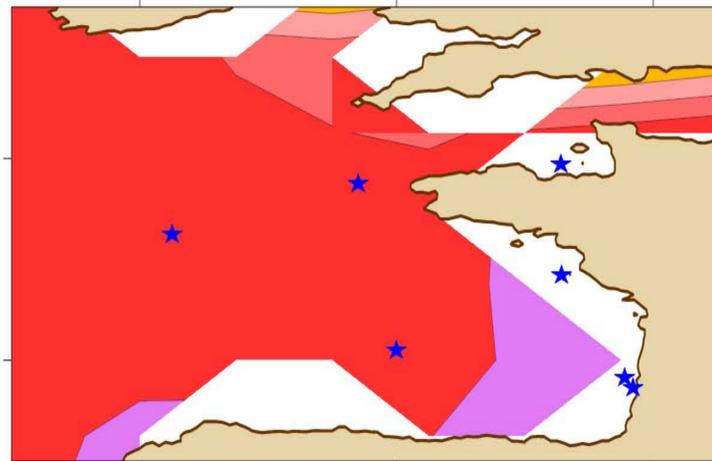
Normalized standard deviation (%)

Linear trend (s/yr)

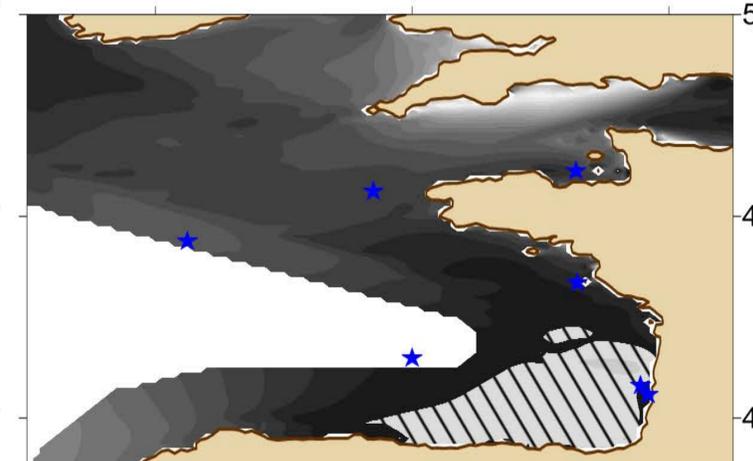
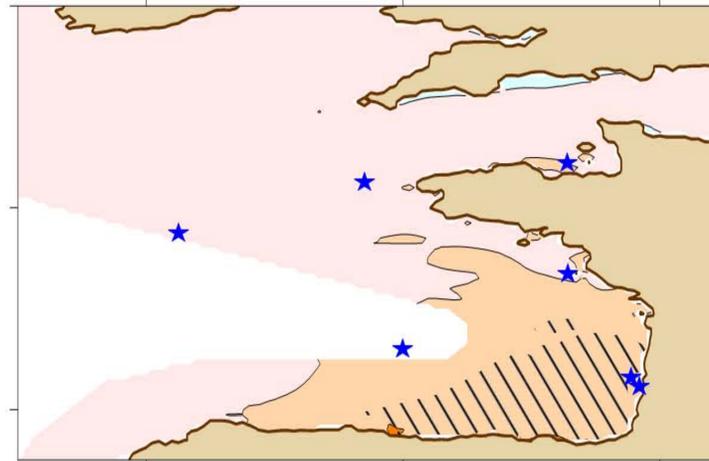
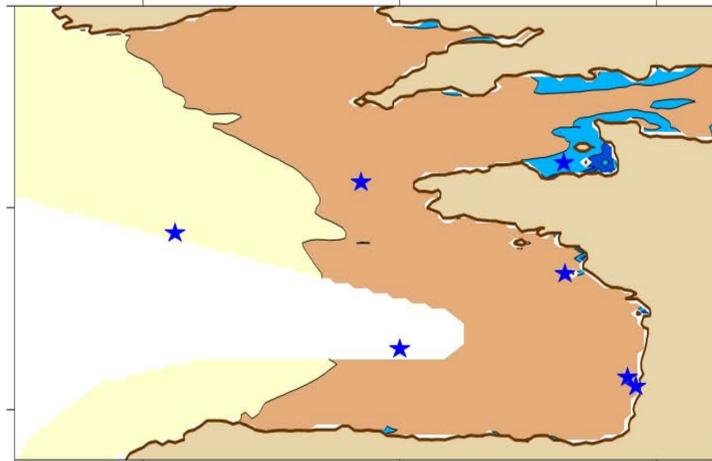
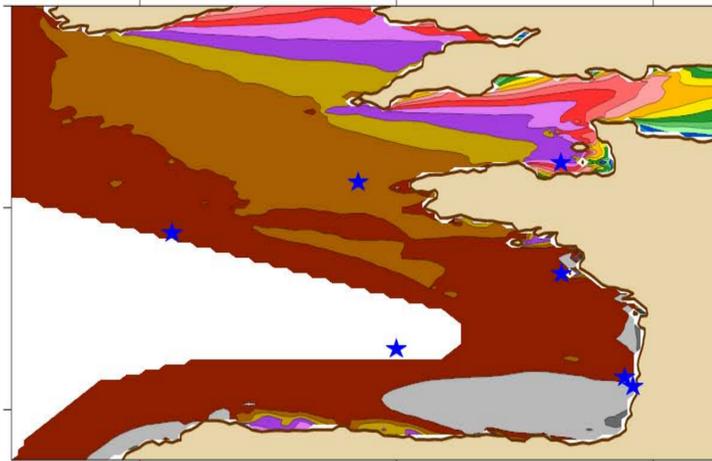
Probability-value (Student's T-test)



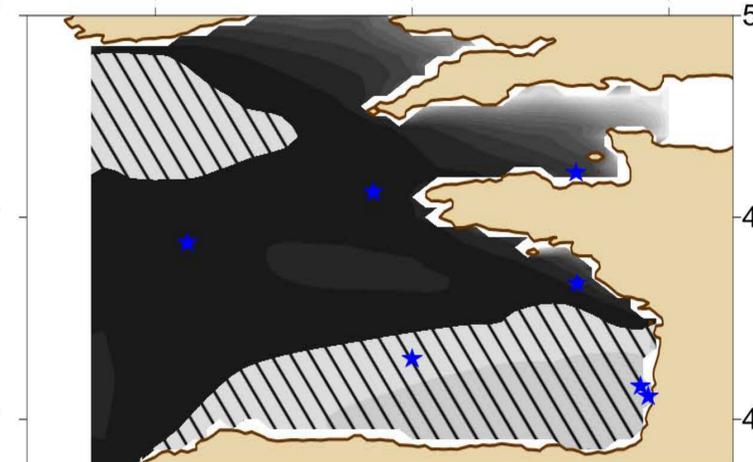
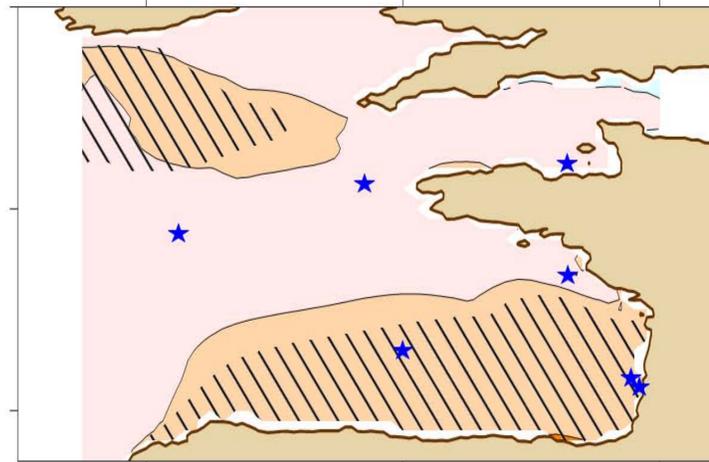
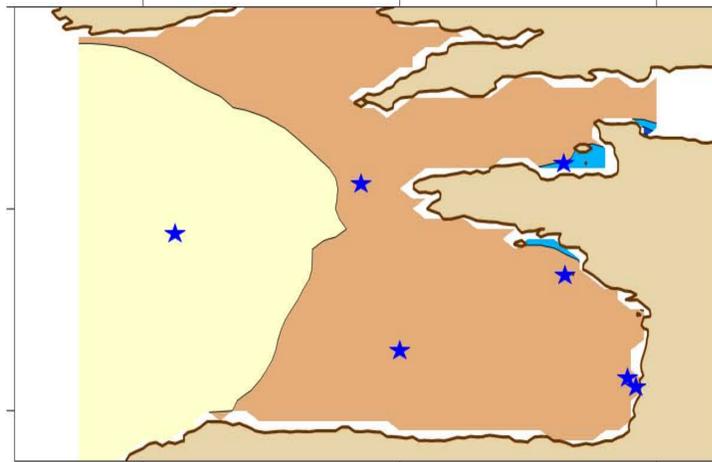
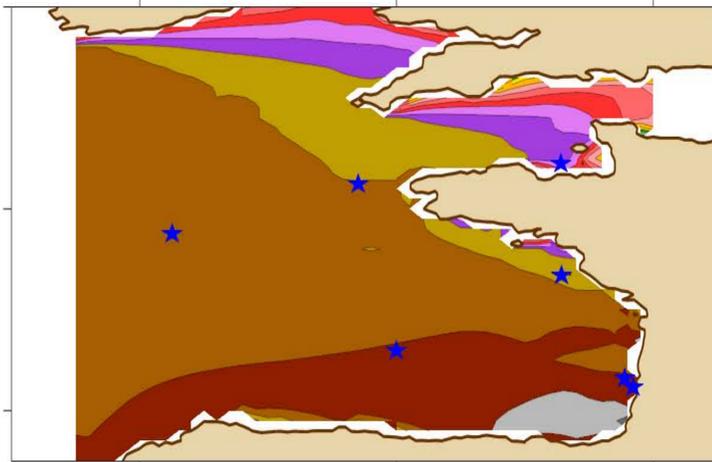
C-ERA40



BoBWA



X.Bertin



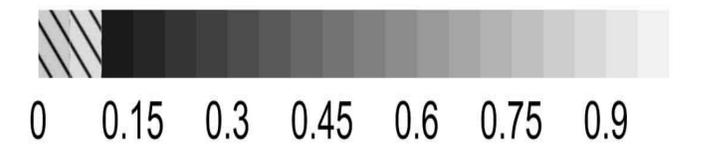
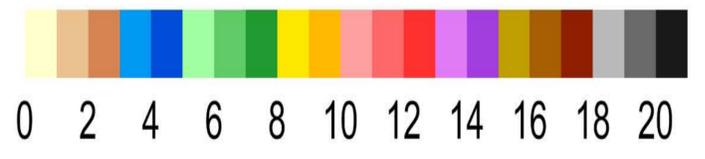
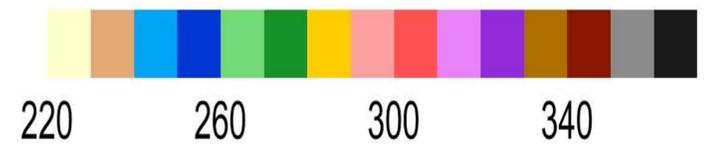
MWD - winter 1958-2001

Mean of Wave Direction (s)

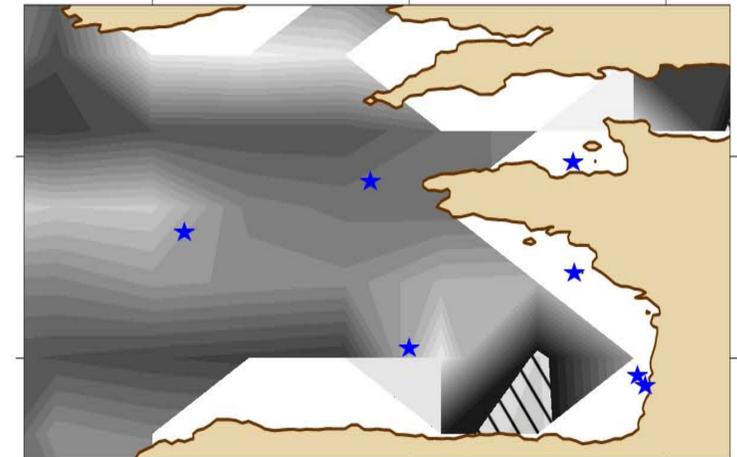
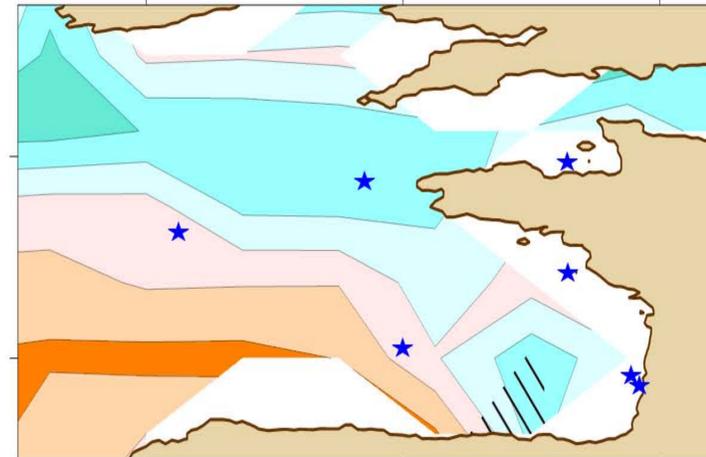
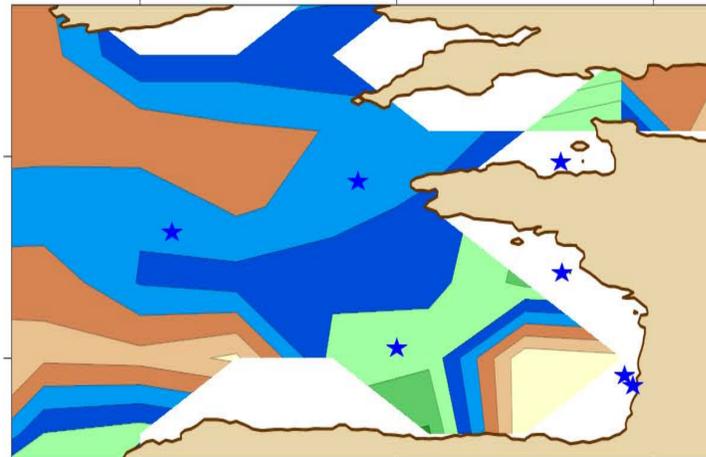
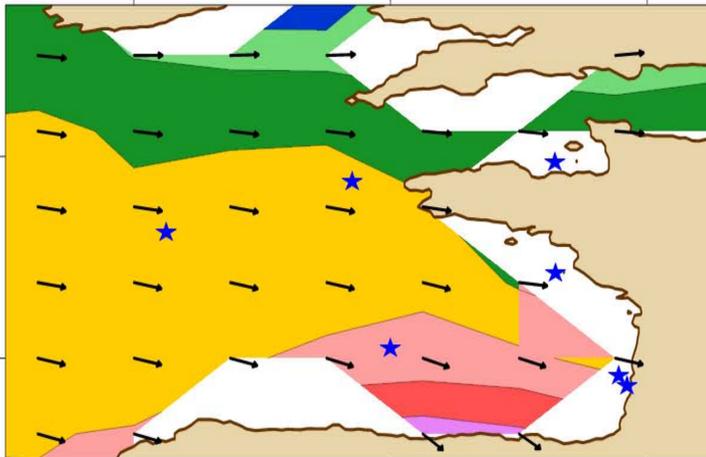
Normalized standard deviation (%)

Linear trend (°/yr)

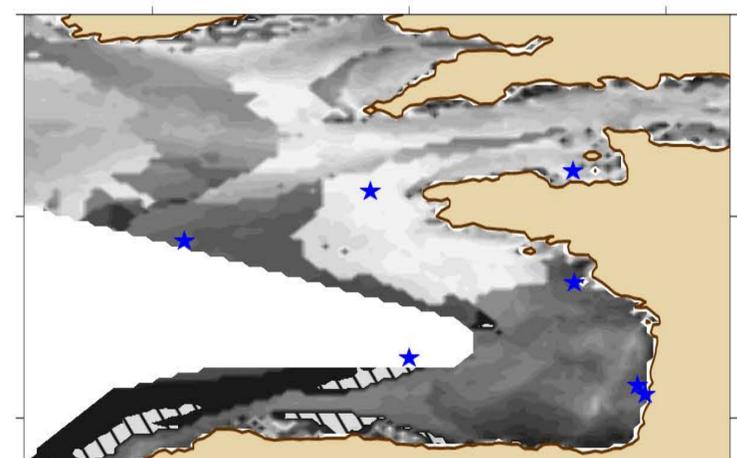
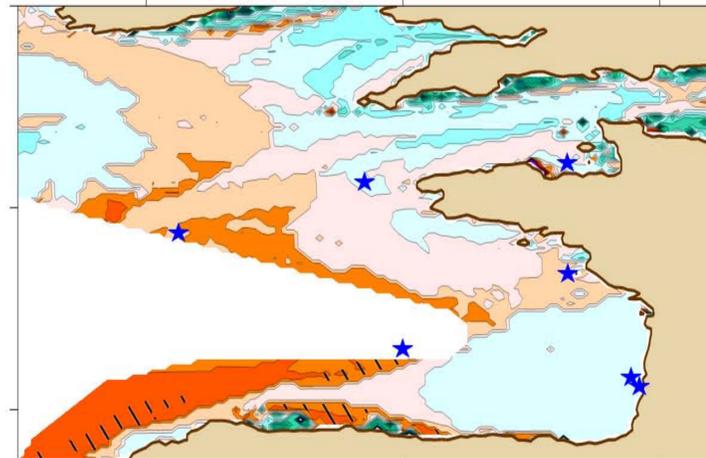
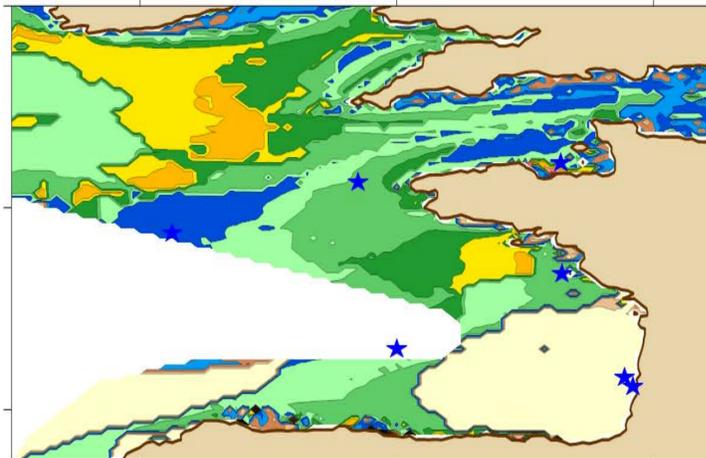
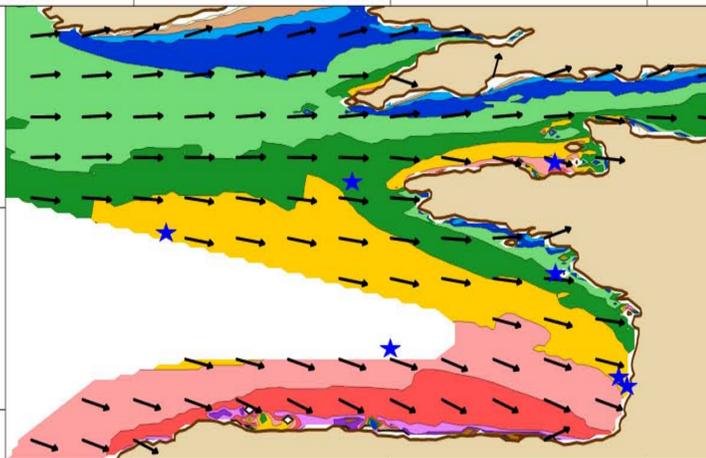
Probability-value (Student's T-test)



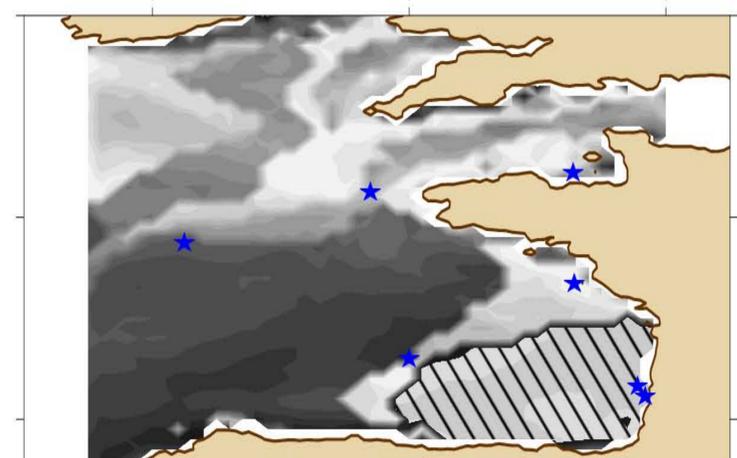
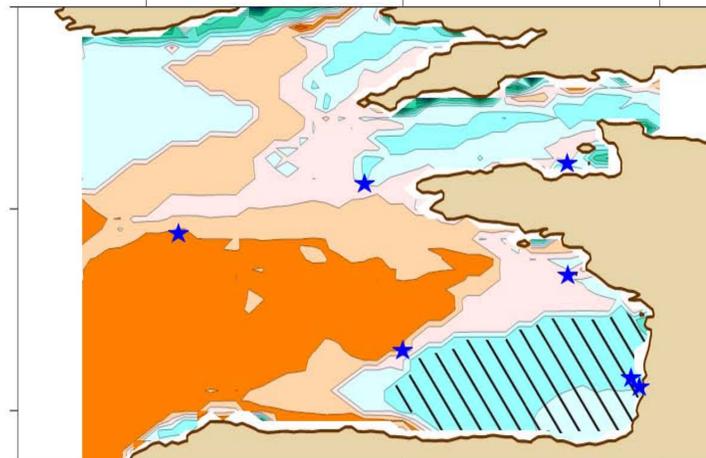
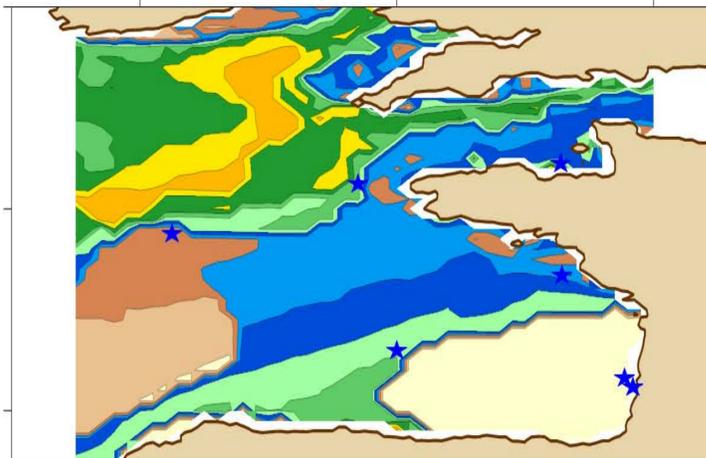
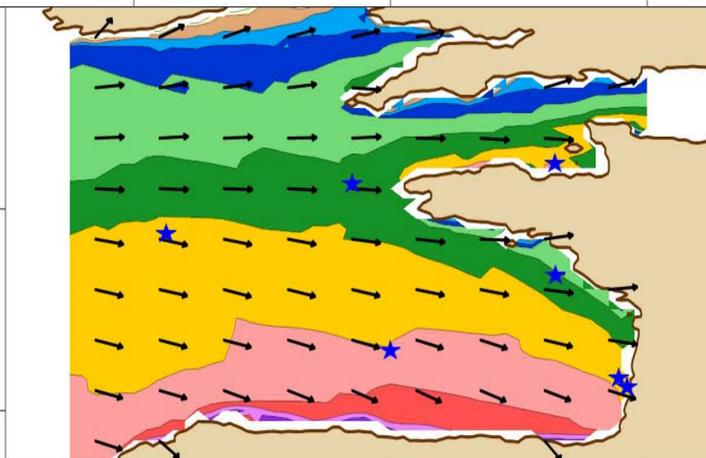
C-ERA40



BoBWA



X.Bertin



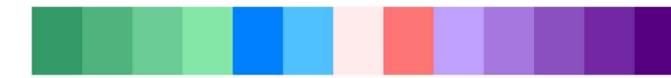
SWH - spring 1970-2001

Mean of Significant Wave Height (m)

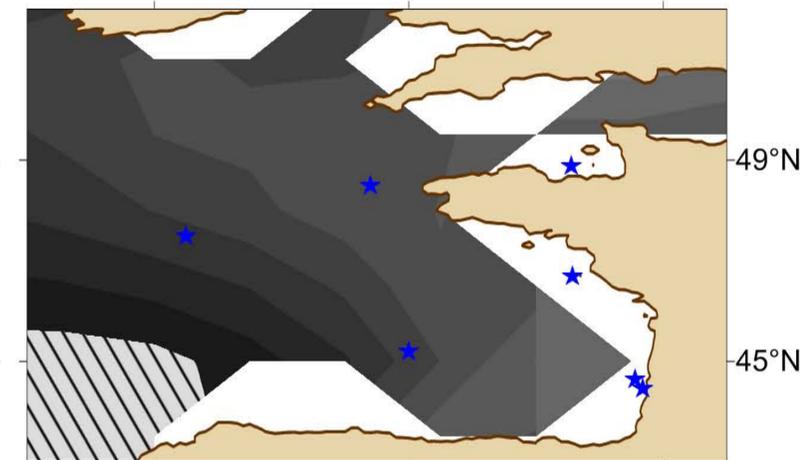
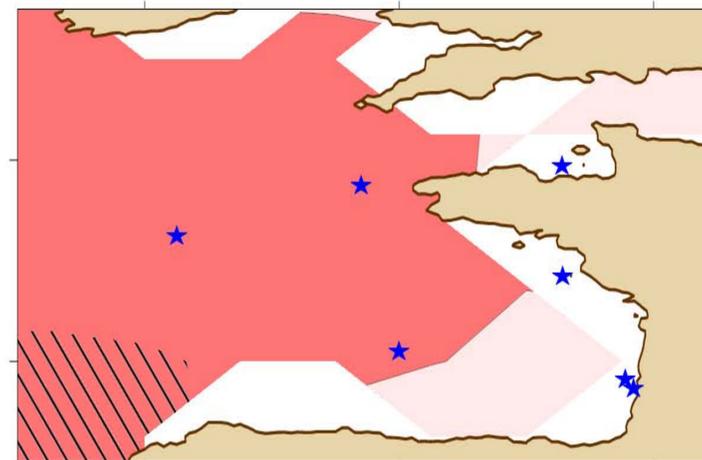
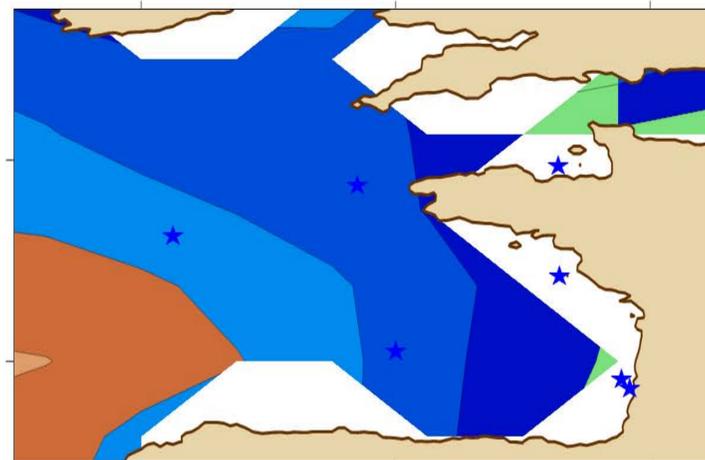
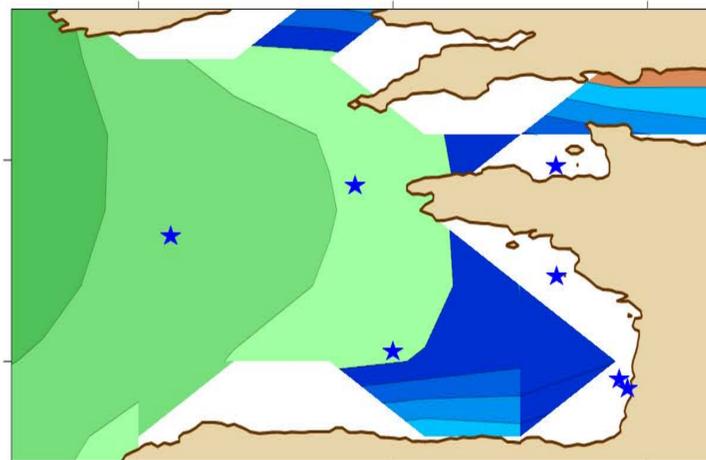
Normalized standard deviation (%)

Linear trend (cm/yr)

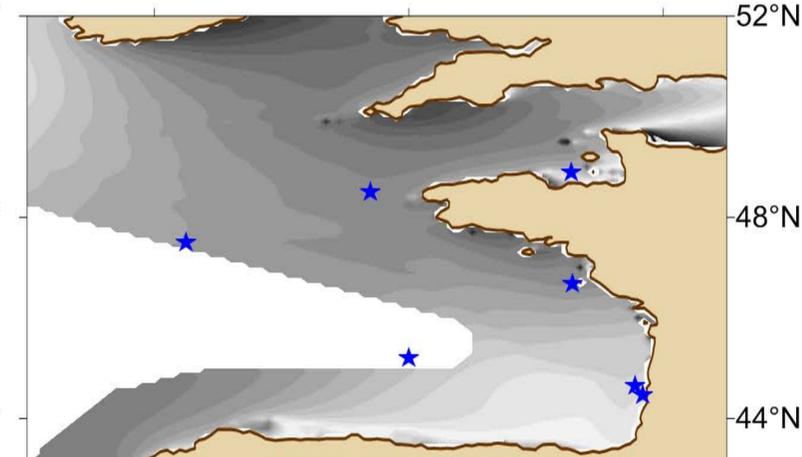
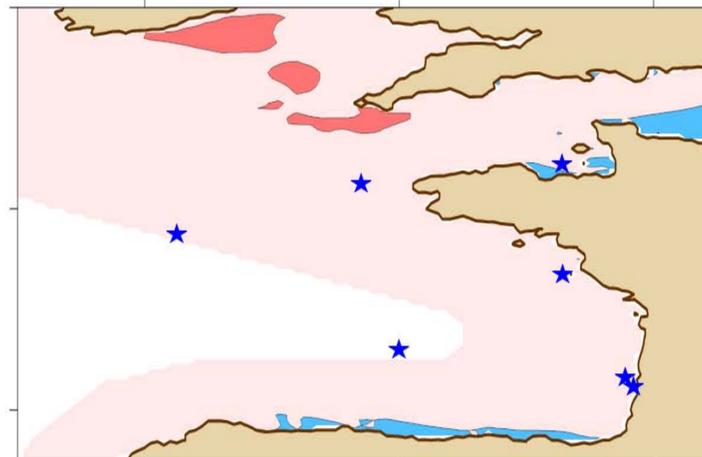
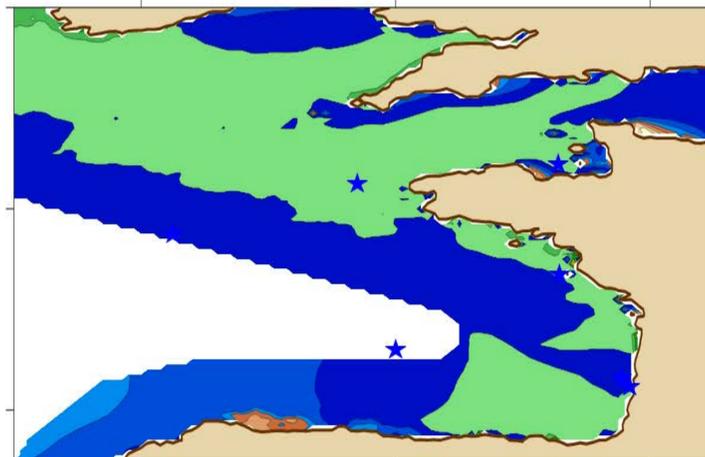
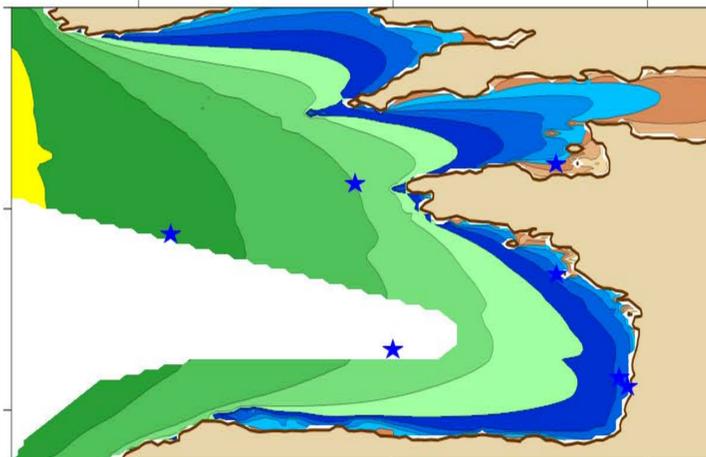
Probability-value (Student's T-test)



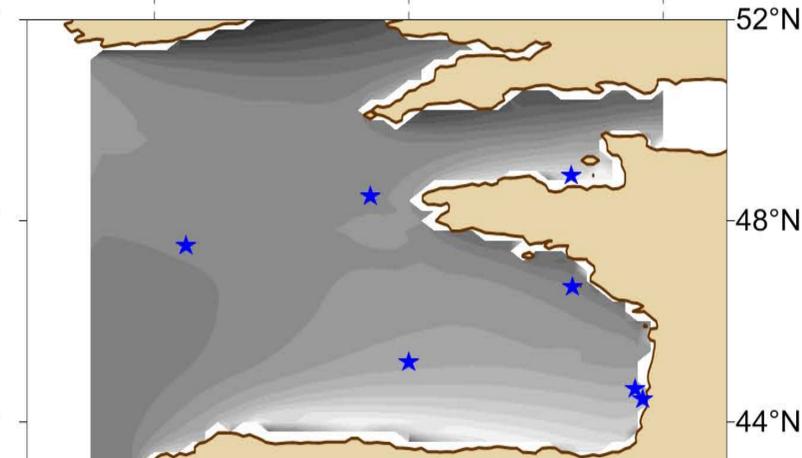
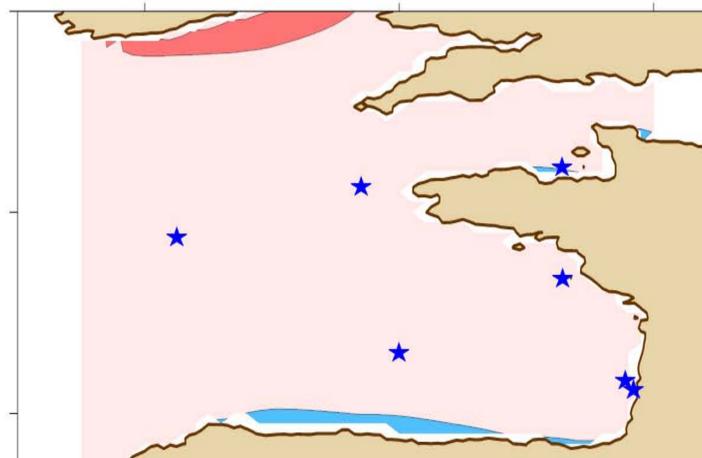
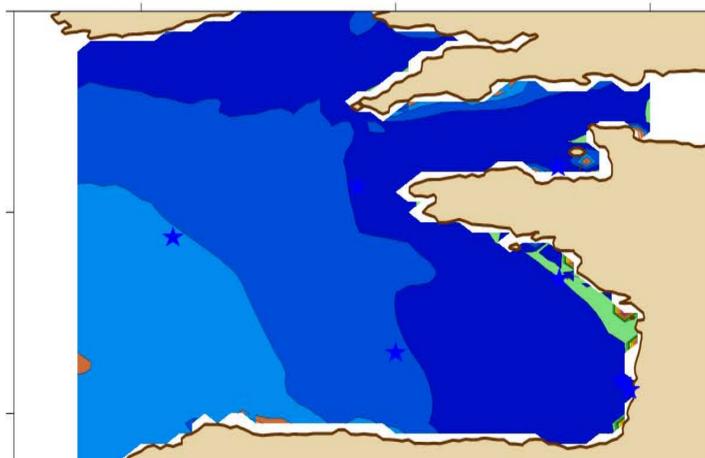
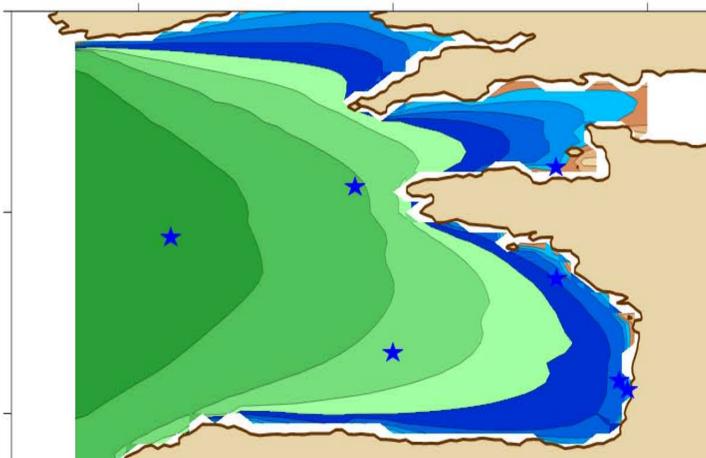
C-ERA40



BoBWA



X.Bertin



-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

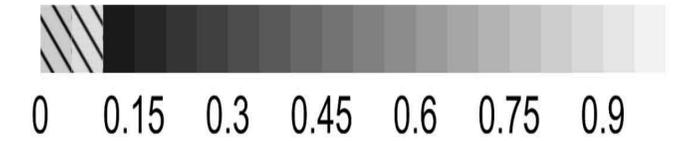
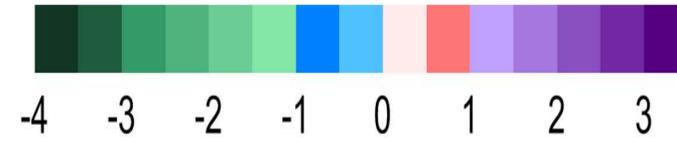
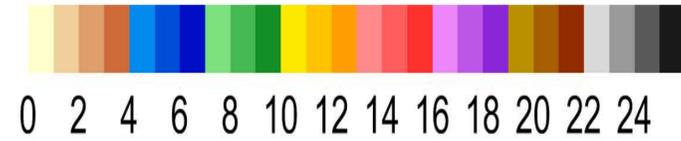
SWHPrct90 - spring 1970-2001

Significant Wave Height 90th (m)

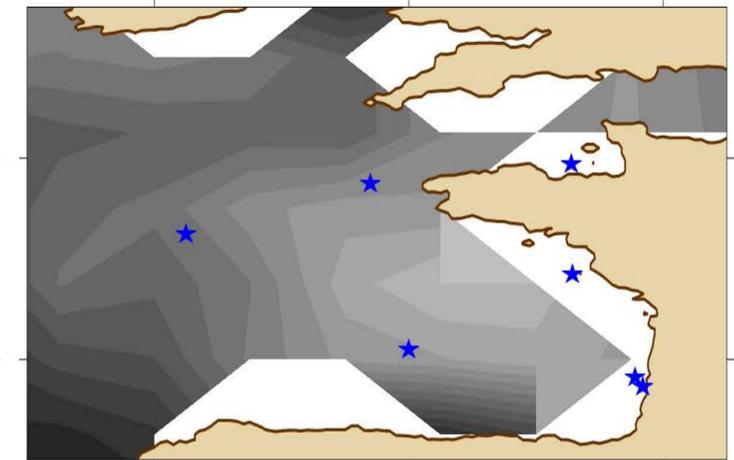
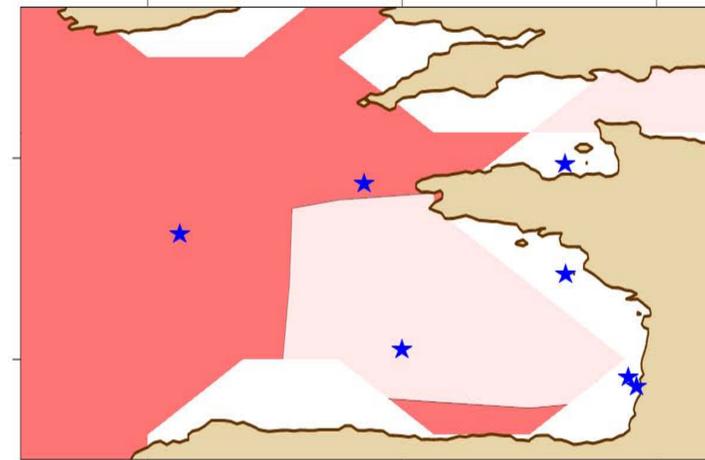
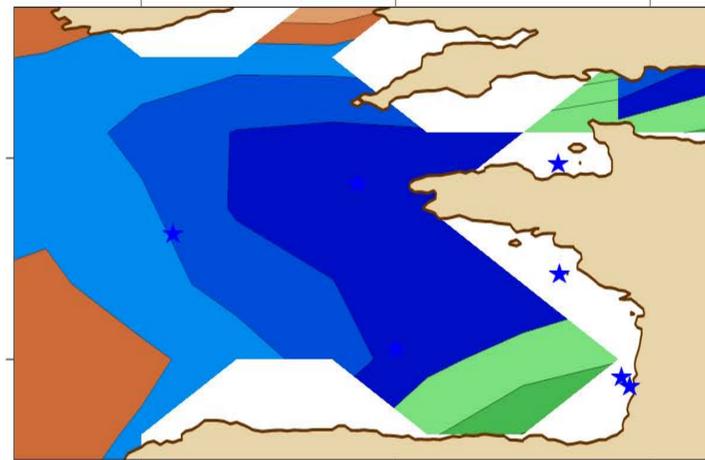
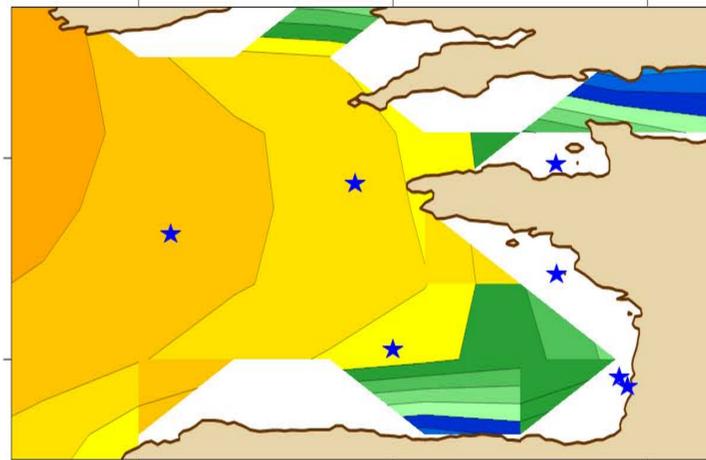
Normalized standard deviation (%)

Linear trend (cm/yr)

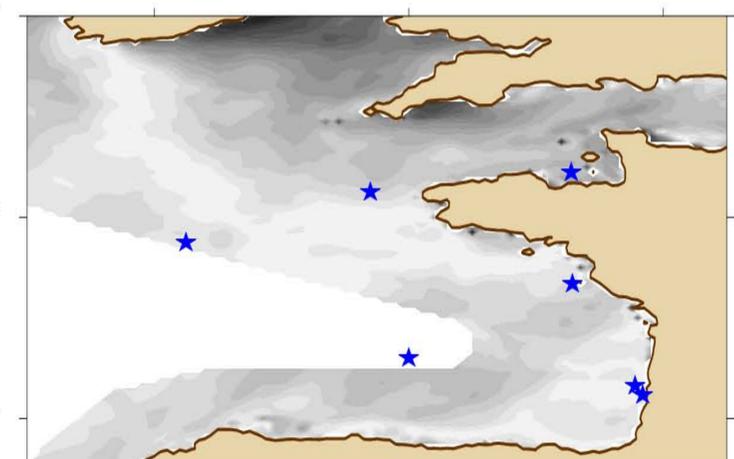
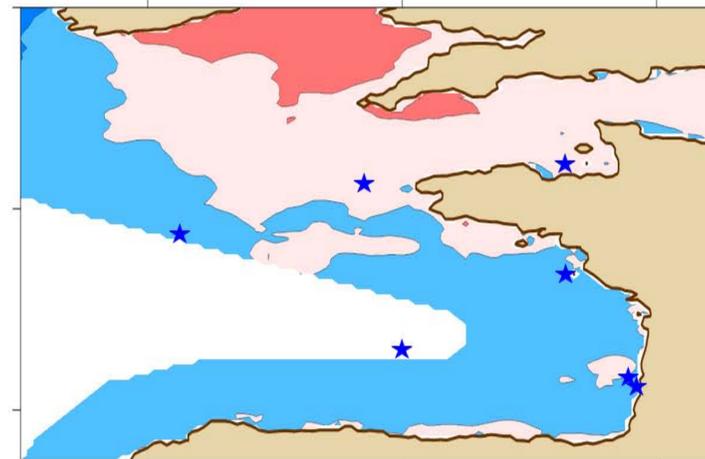
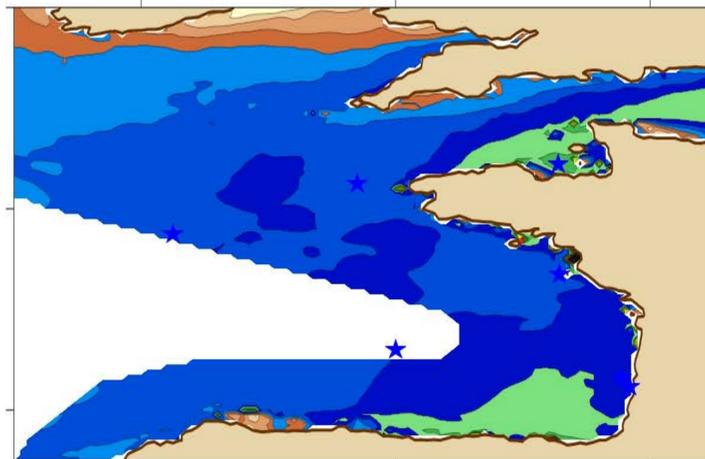
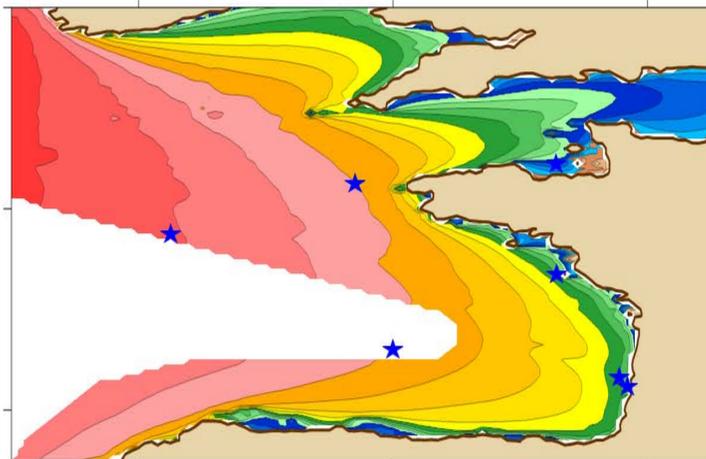
Probability-value (Student's T-test)



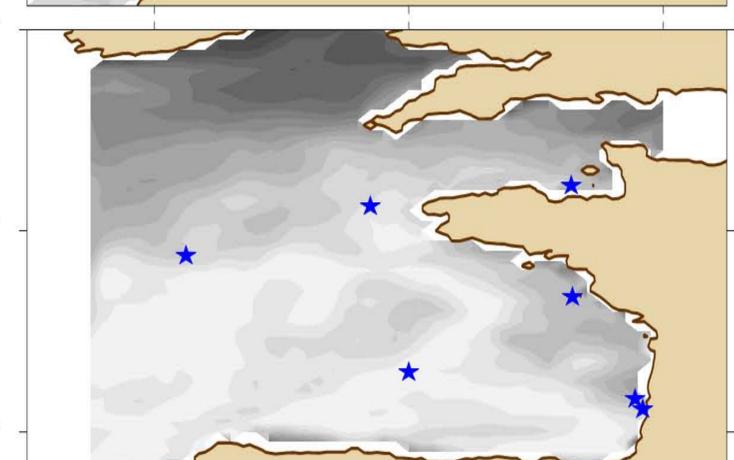
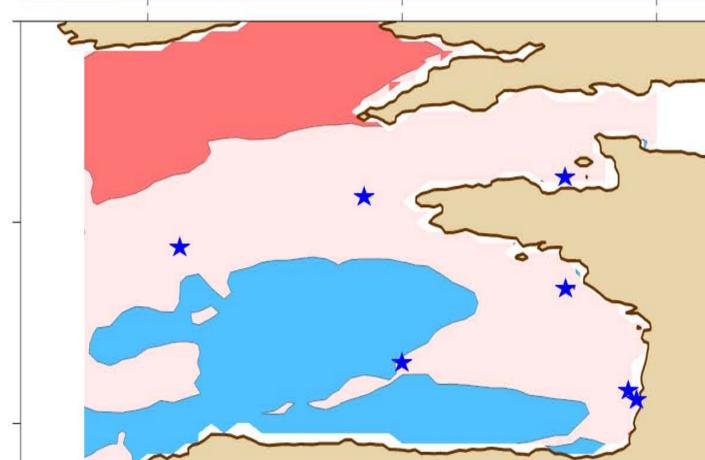
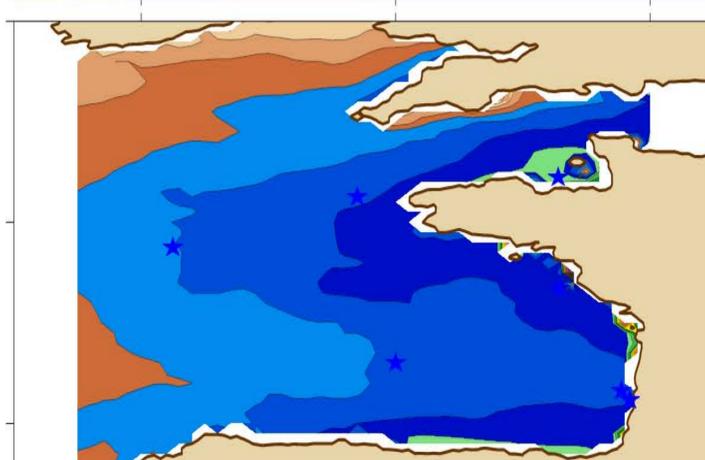
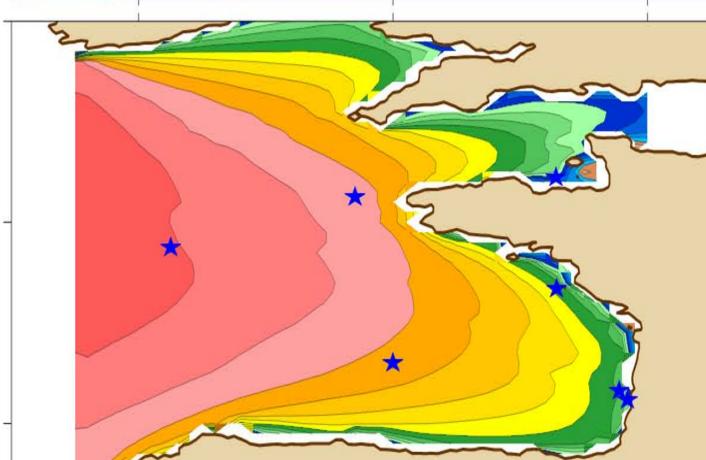
C-ERA40



BoBWA



X.Bertin



-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

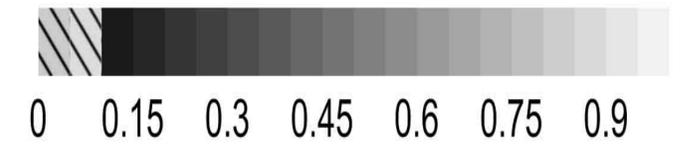
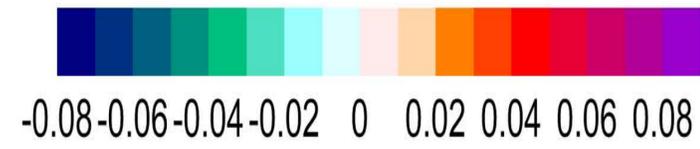
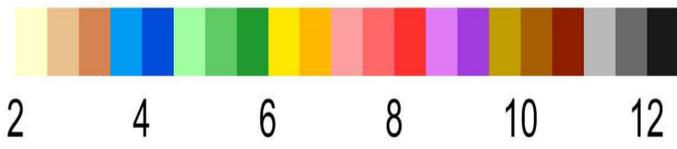
MWP - spring 1970-2001

Mean of Wave Period (s)

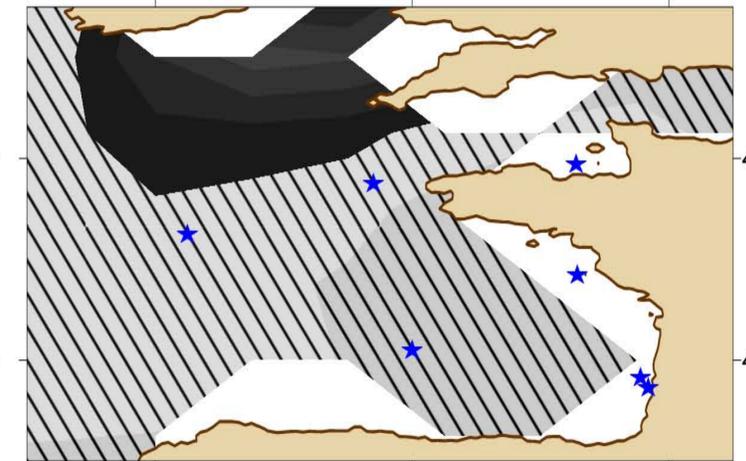
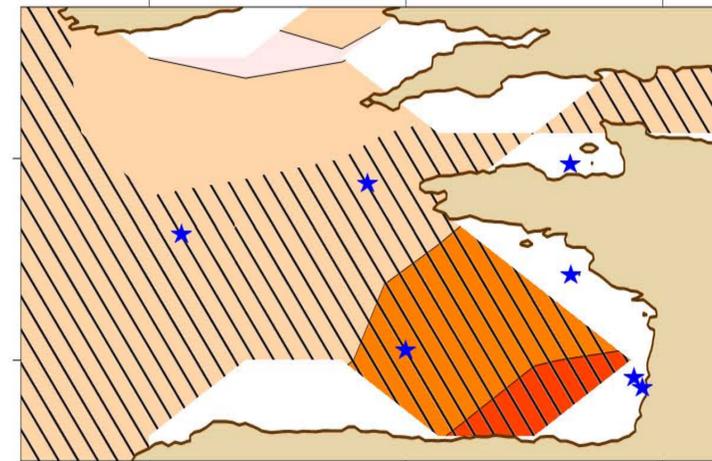
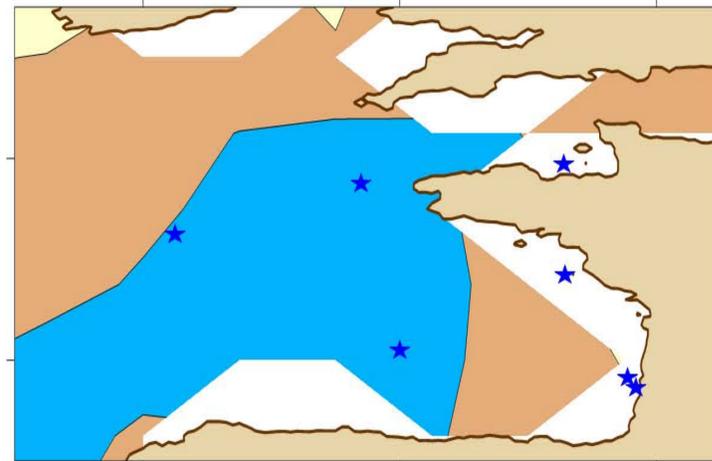
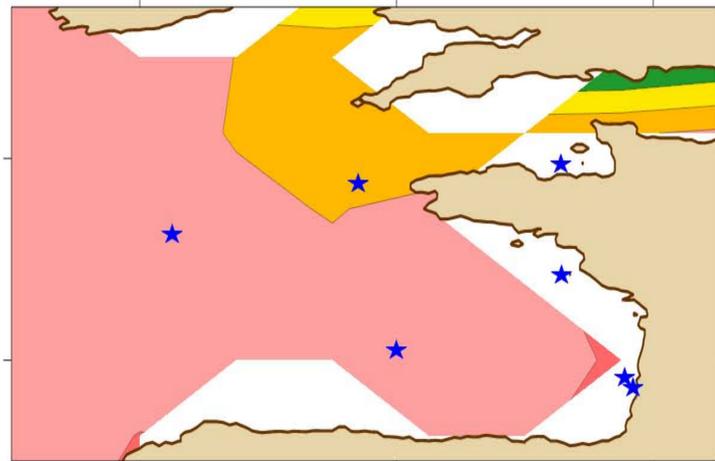
Normalized standard deviation (%)

Linear trend (s/yr)

Probability-value (Student's T-test)



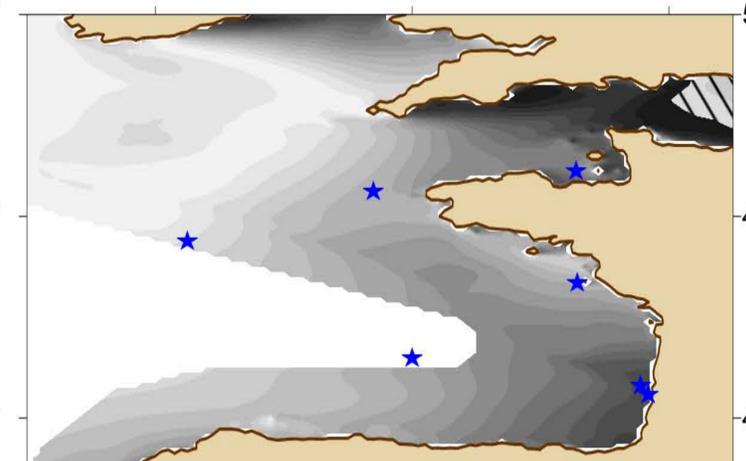
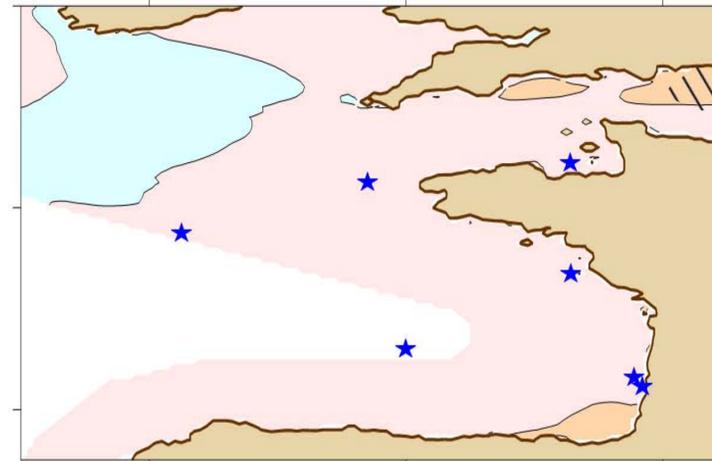
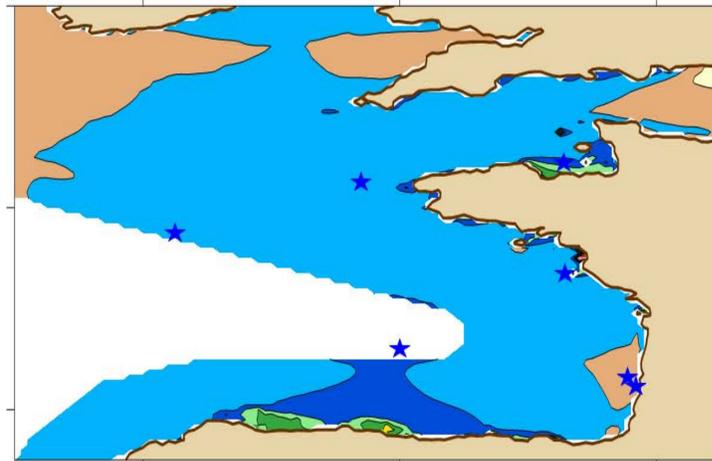
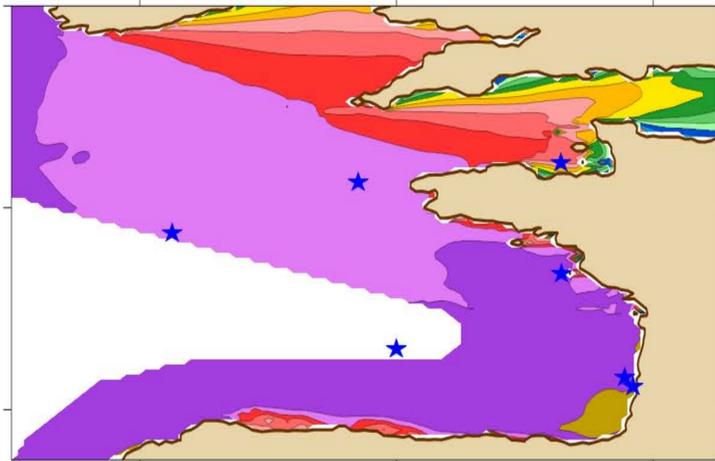
C-ERA40



49°N

45°N

BoBWA

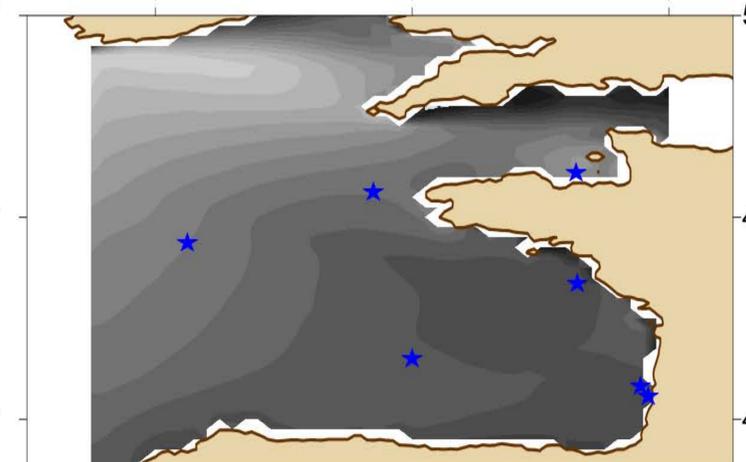
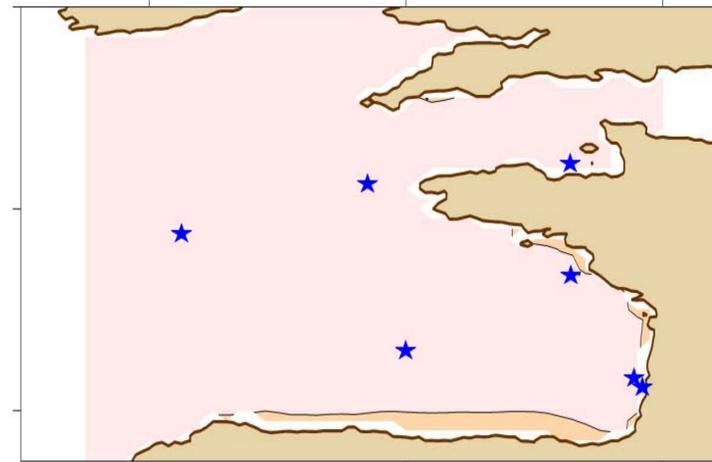
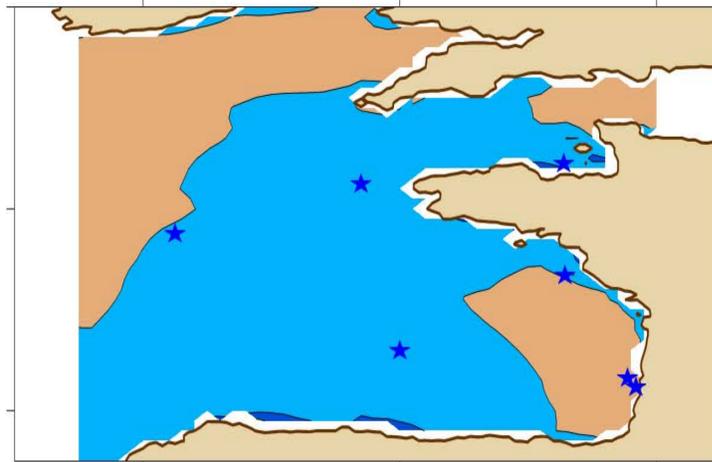
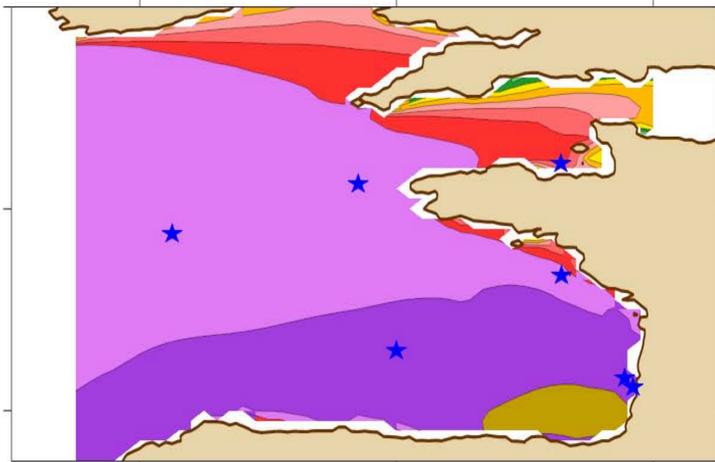


52°N

48°N

44°N

X.Bertin



52°N

48°N

44°N

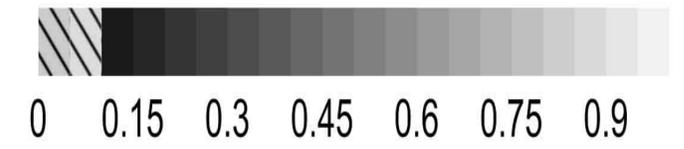
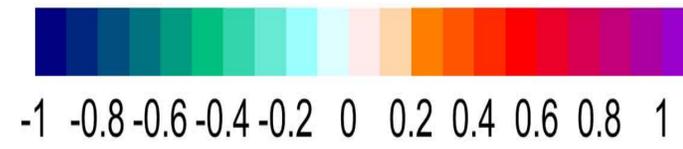
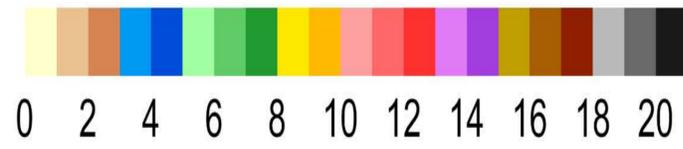
MWD - spring 1970-2001

Mean of Wave Direction (s)

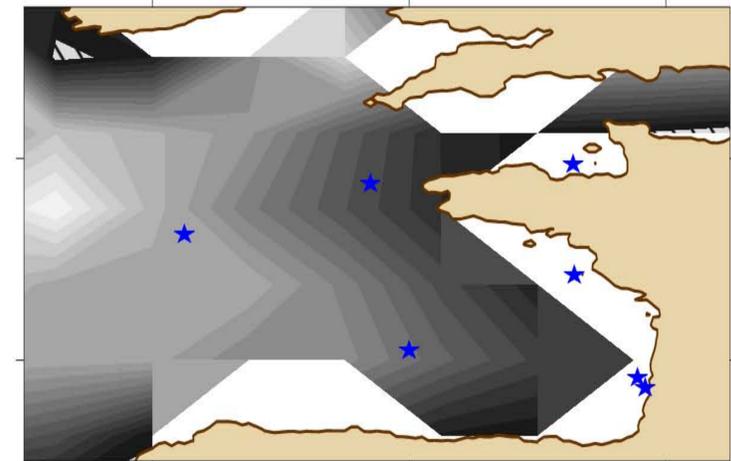
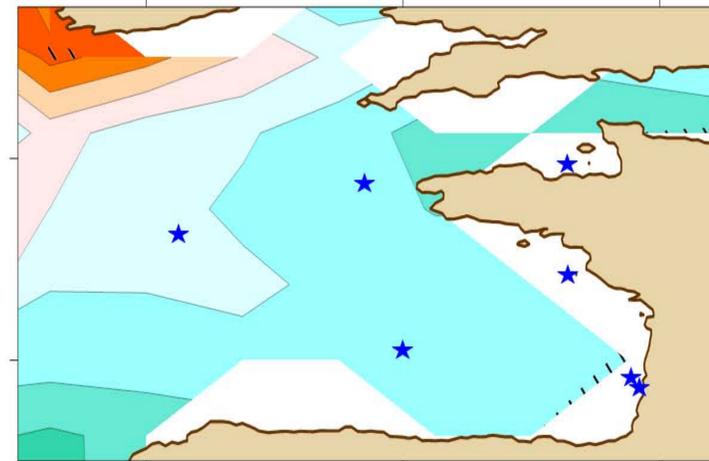
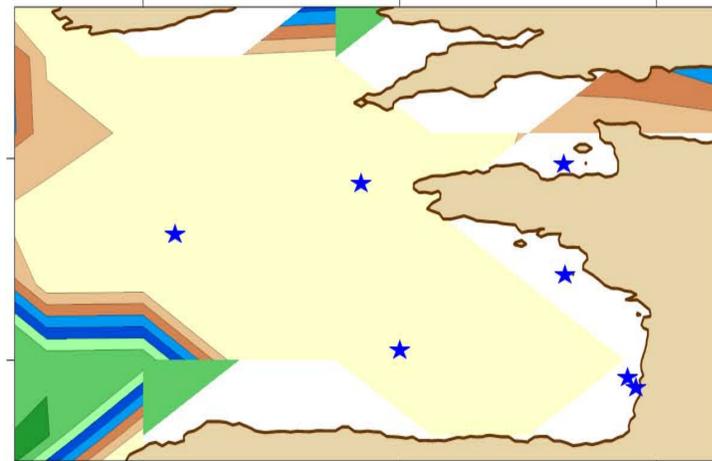
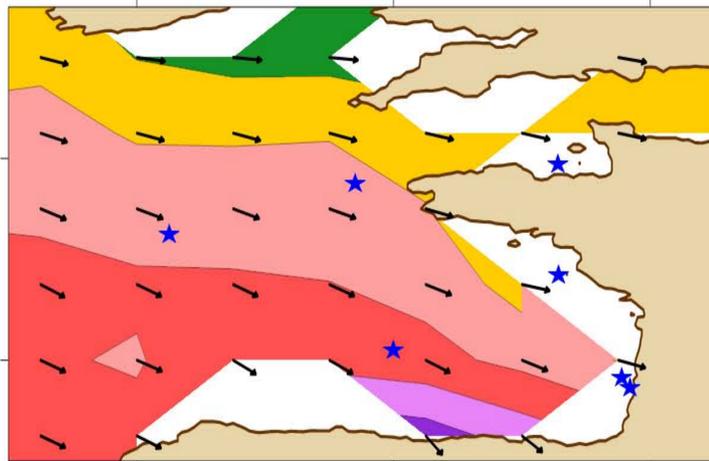
Normalized standard deviation (%)

Linear trend (°/yr)

Probability-value (Student's T-test)



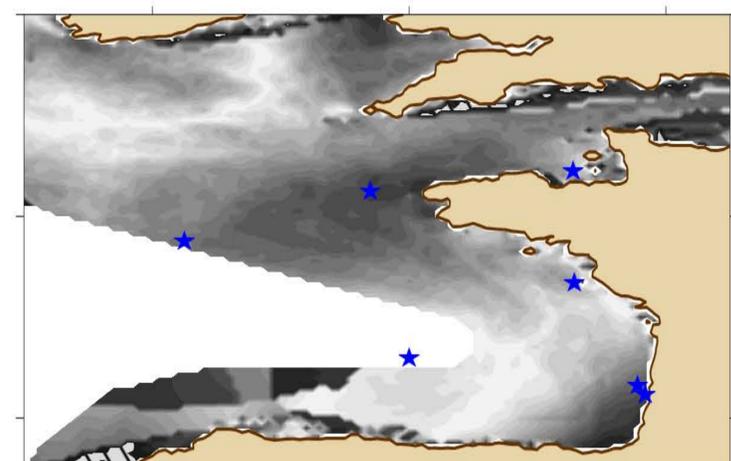
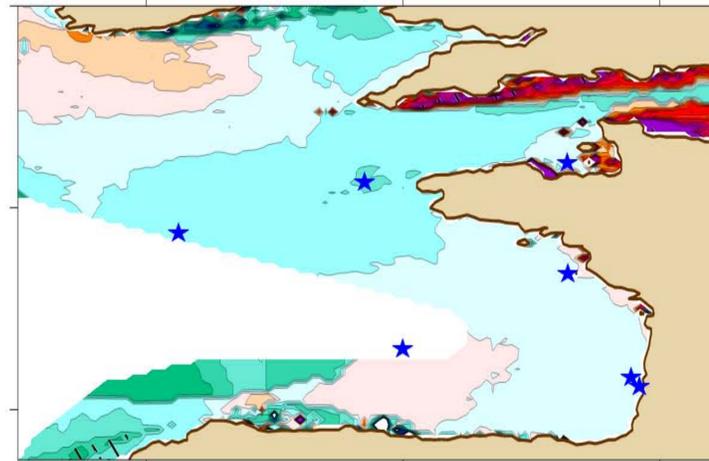
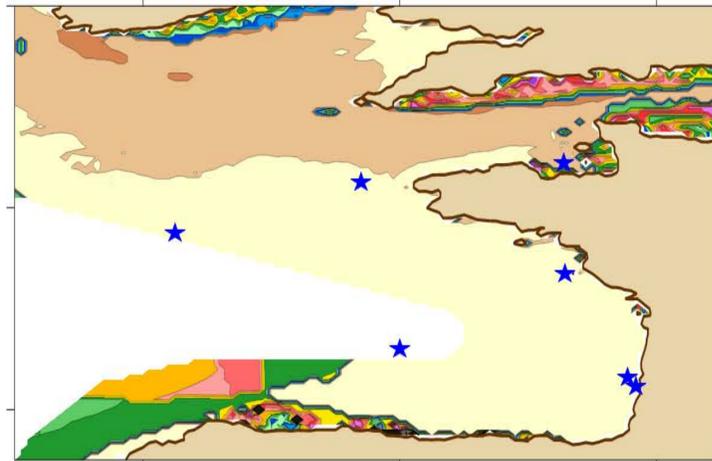
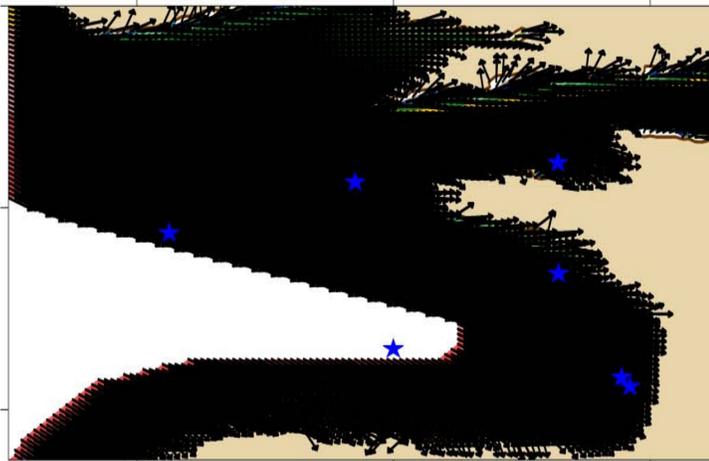
C-ERA40



49°N

45°N

BoBWA

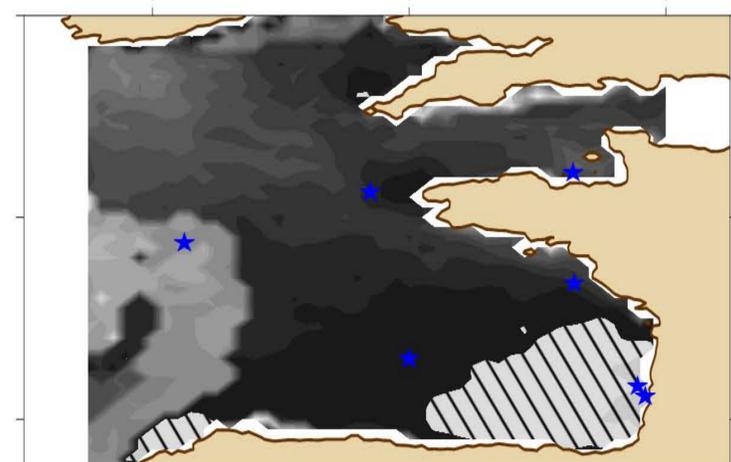
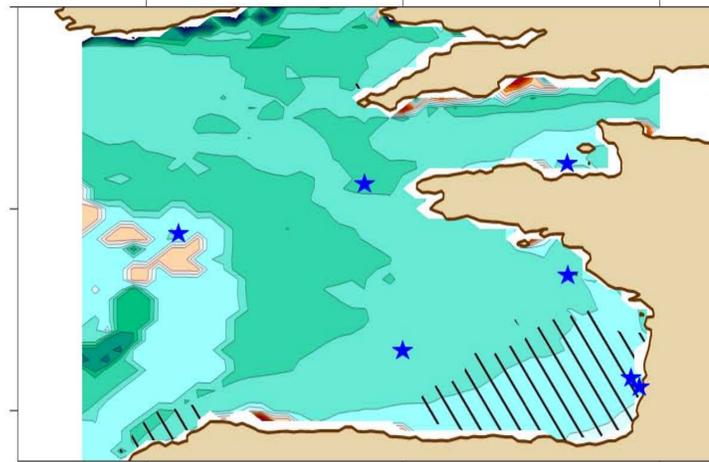
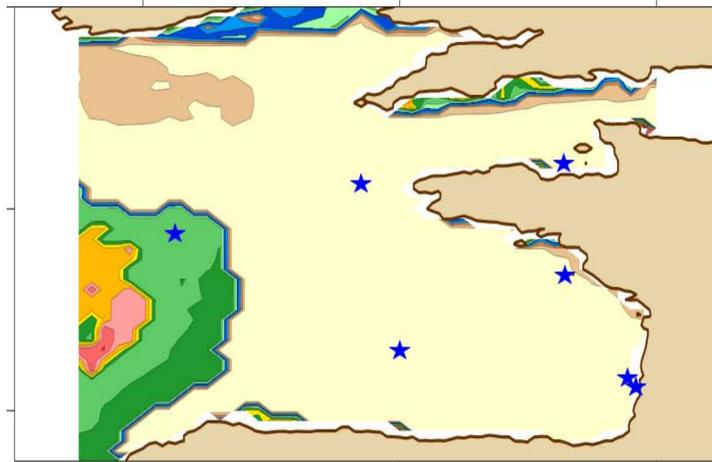
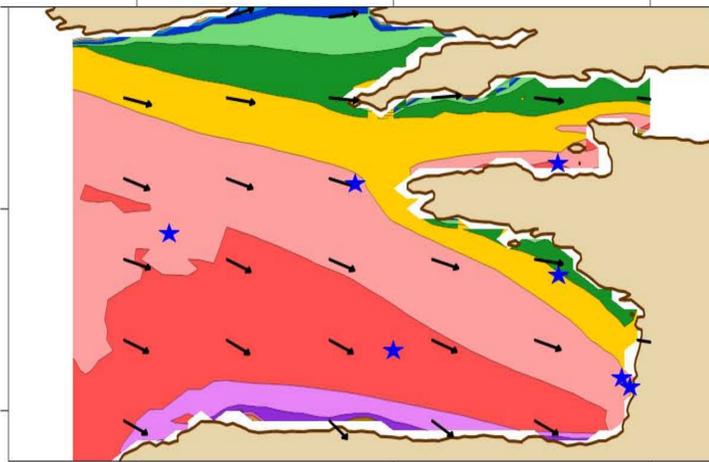


52°N

48°N

44°N

X.Bertin



52°N

48°N

44°N

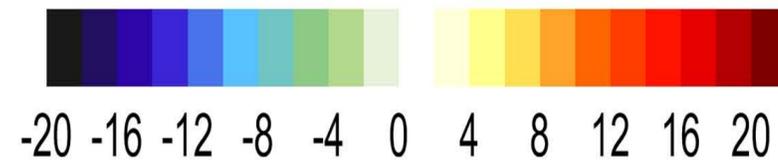
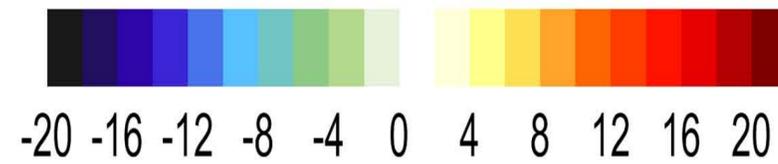
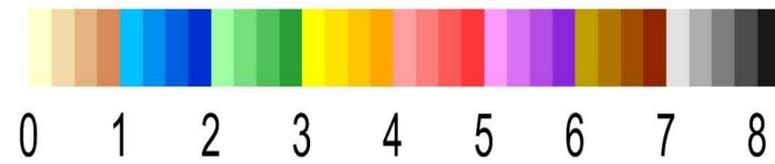
Evolution SWH - summer [1961-2000] => [2061-2100]

REF SWH (m)

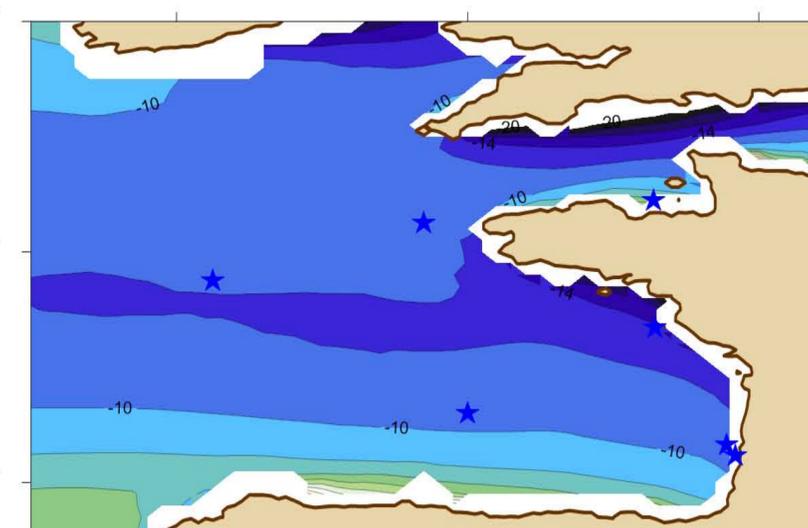
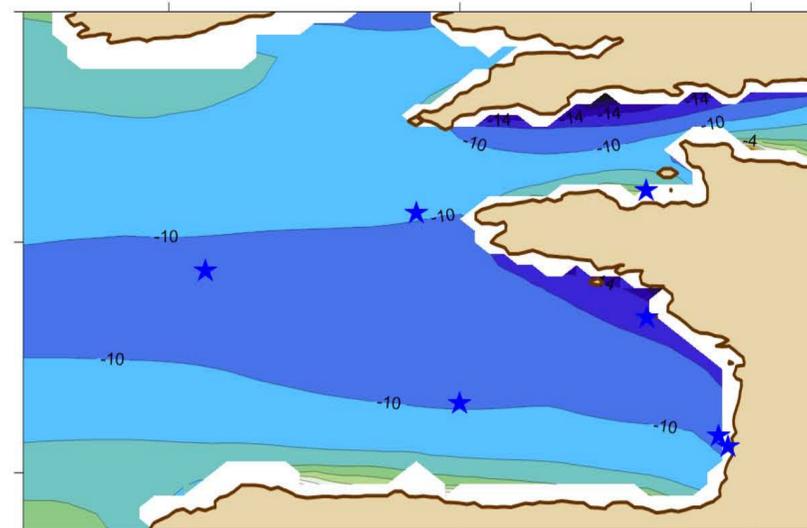
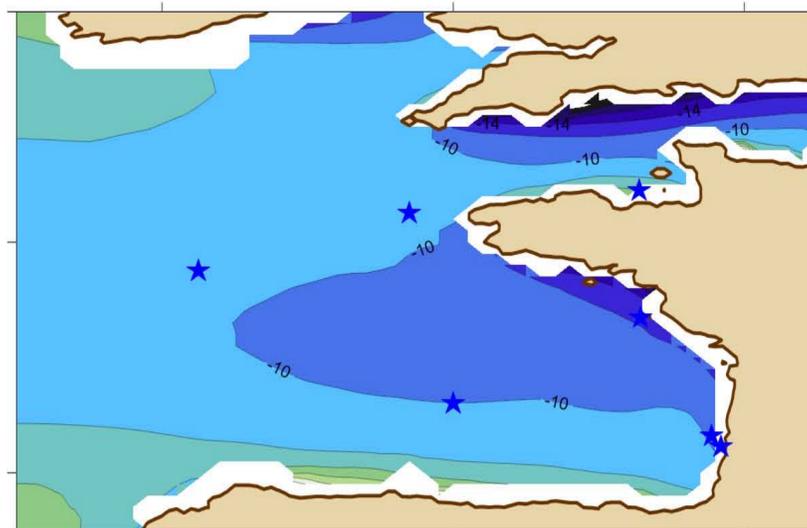
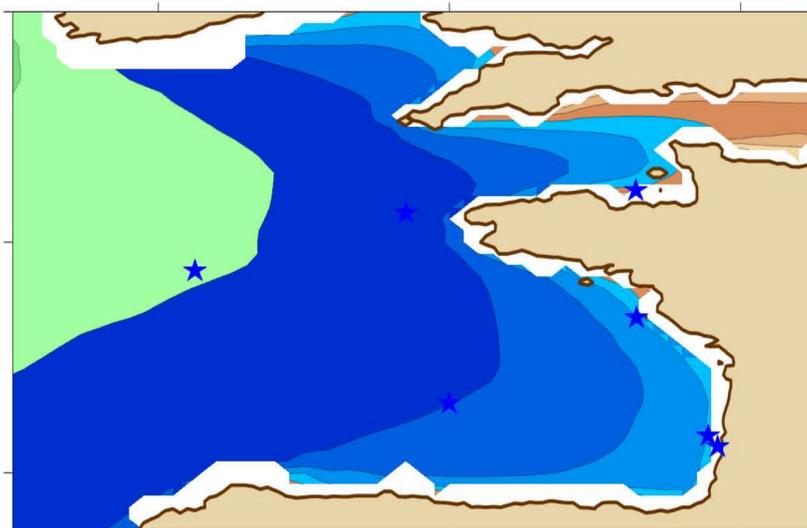
Diff. relative(%) B1

Diff. relative(%) A1B

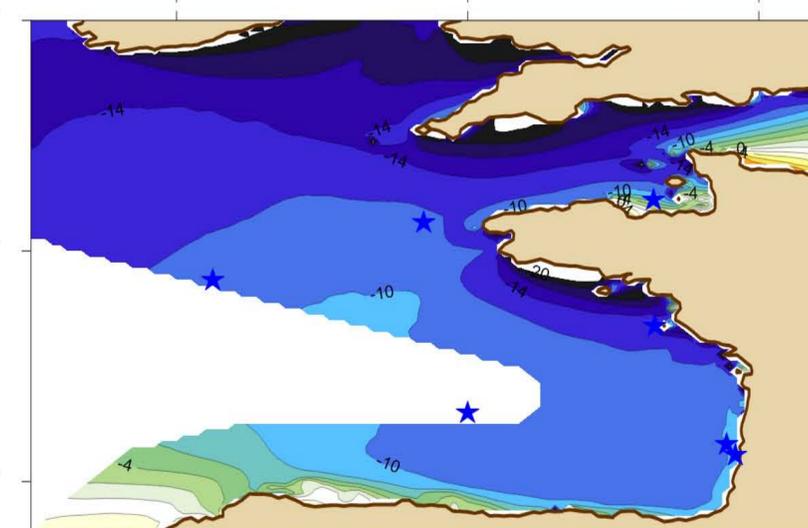
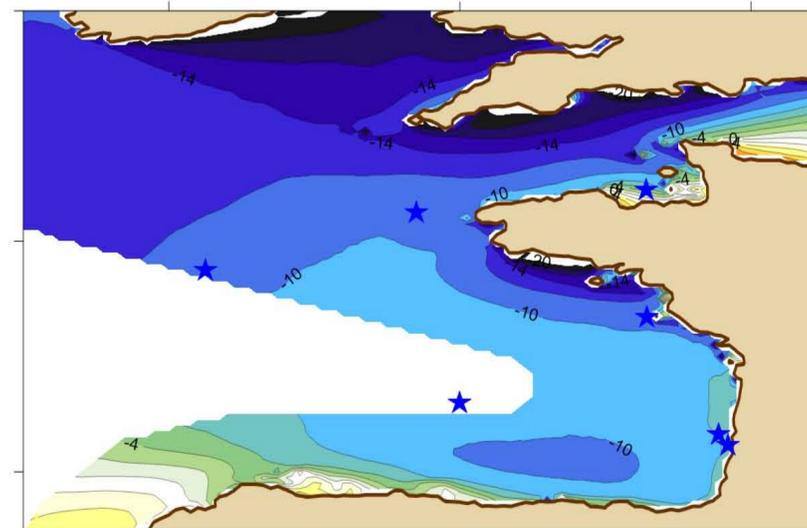
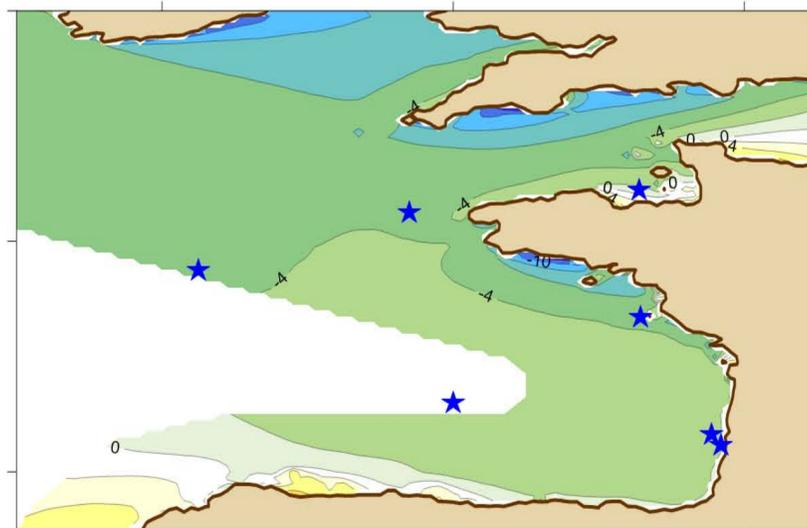
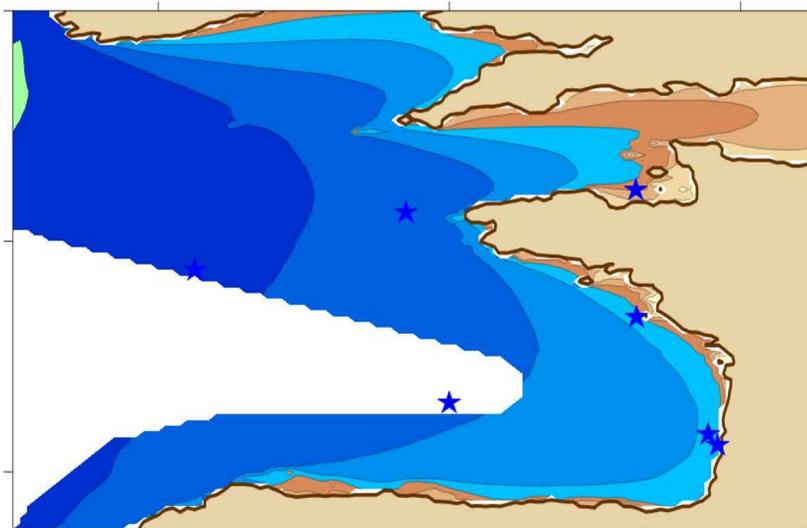
Diff. relative(%) A2



Morellato et al.



BoBWA Forecast



-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

52°N

48°N

44°N

52°N

48°N

44°N

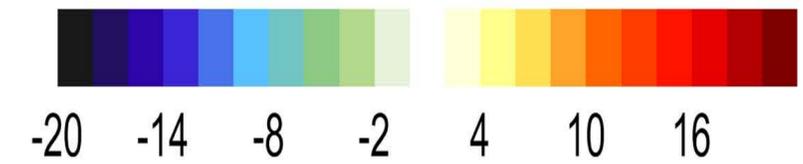
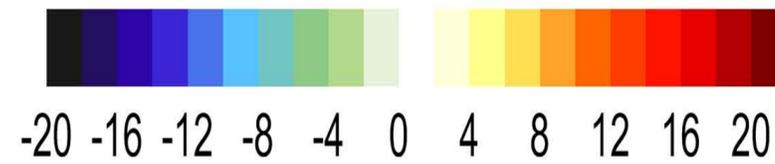
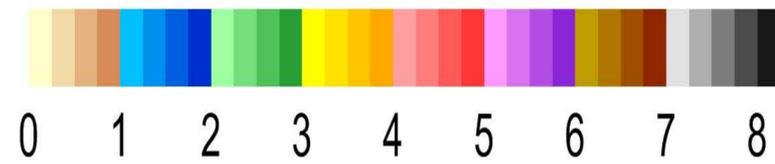
Evolution SWH - autumn [1961-2000] => [2061-2100]

REF SWH (m)

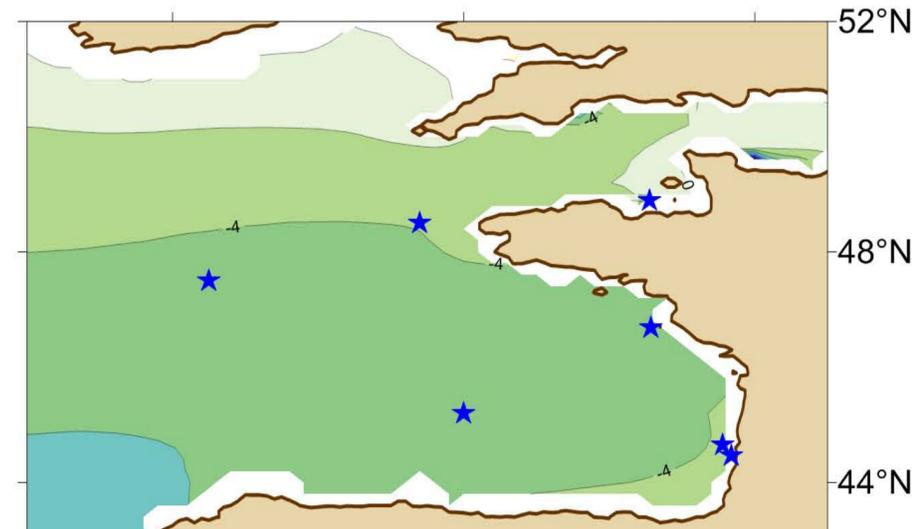
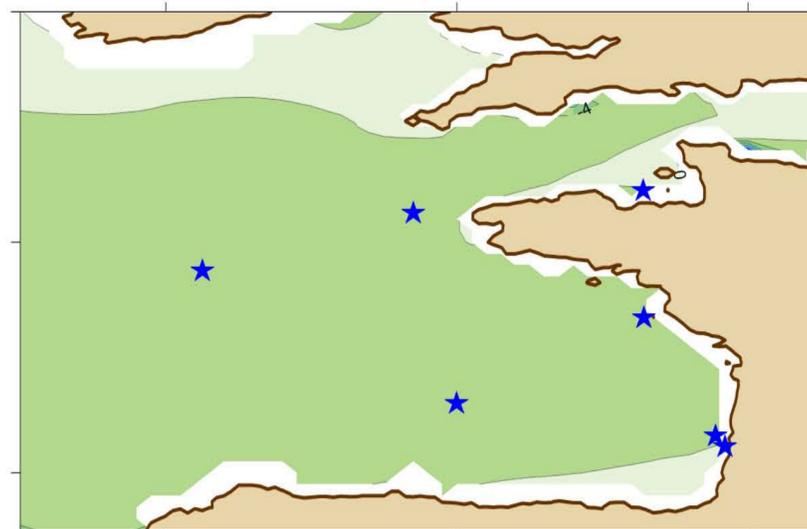
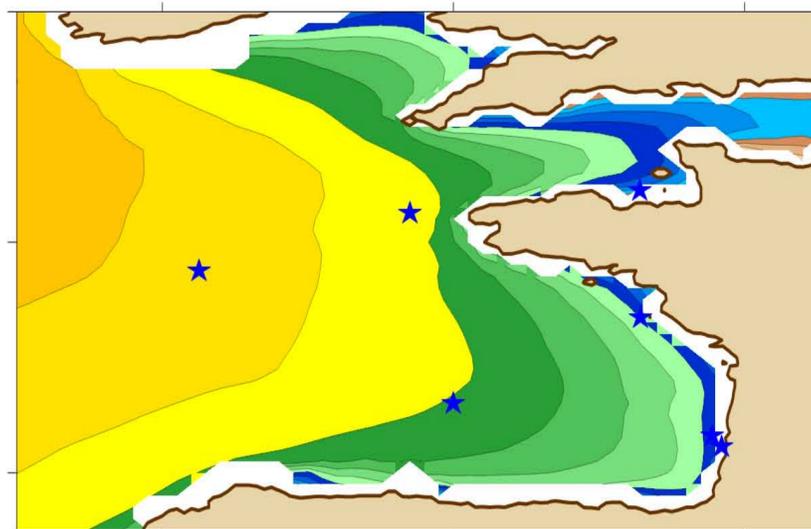
Diff. relative(%) B1

Diff. relative(%) A1B

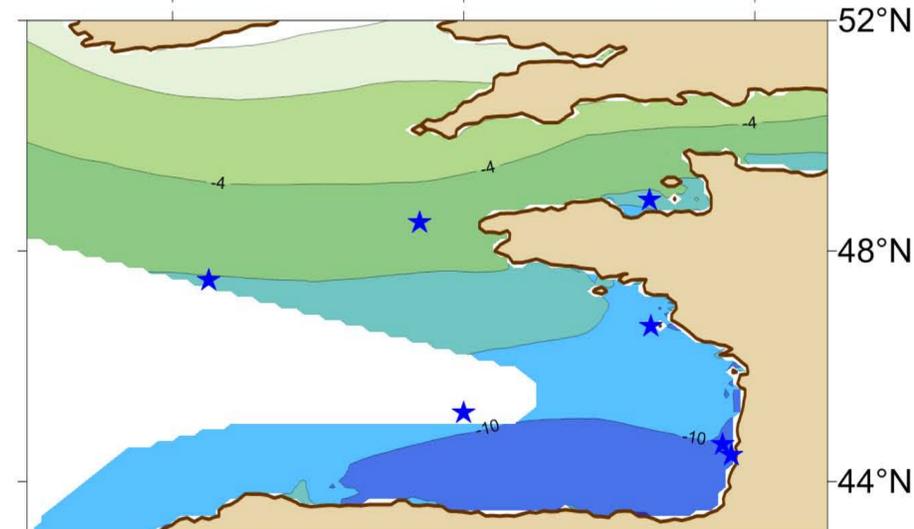
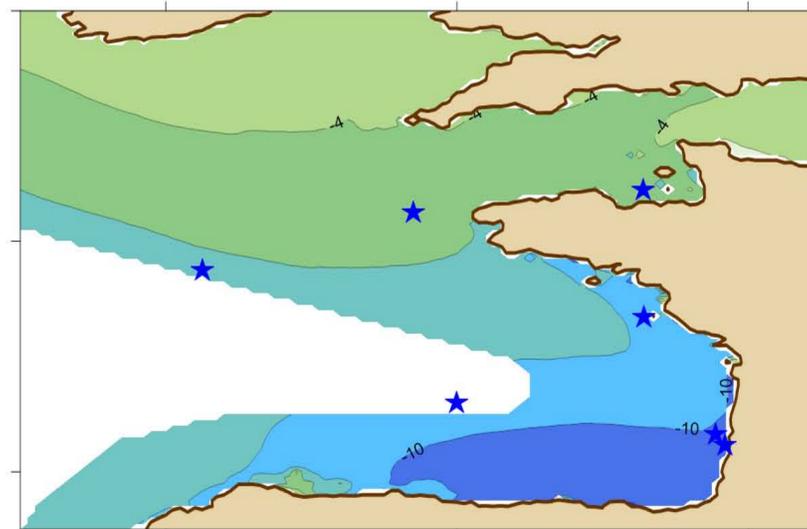
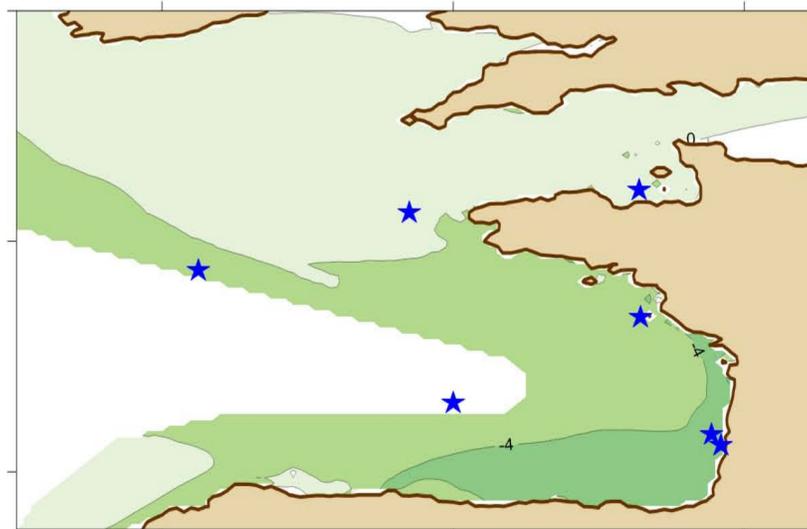
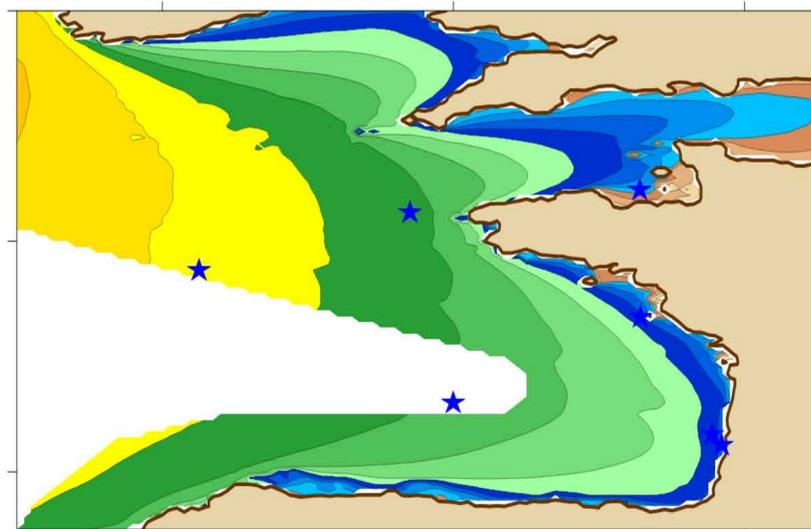
Diff. relative(%) A2



Morellato et al.



BoBWA Forecast



-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

52°N

48°N

44°N

52°N

48°N

44°N

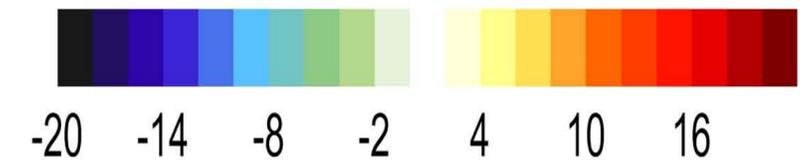
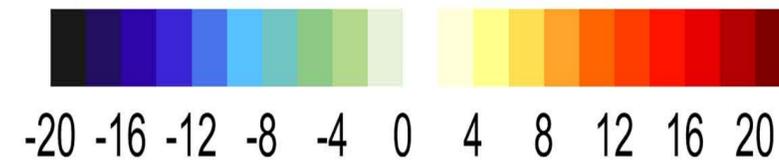
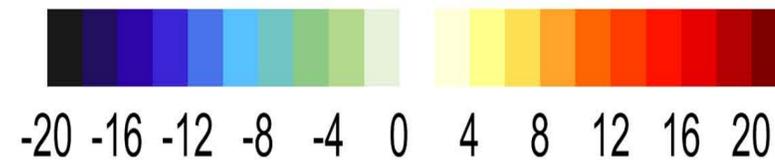
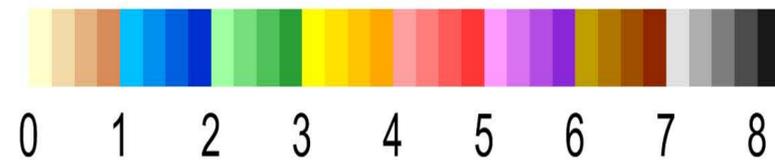
Evolution SWH - winter [1961-2000] => [2061-2100]

REF SWH (m)

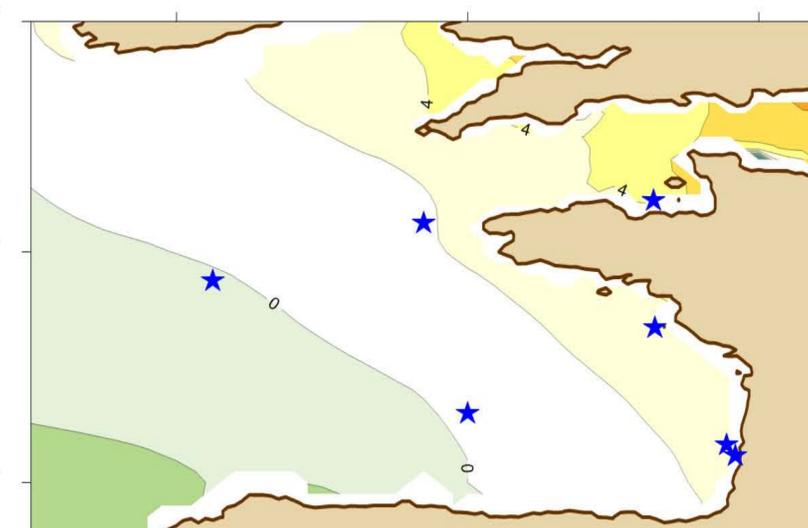
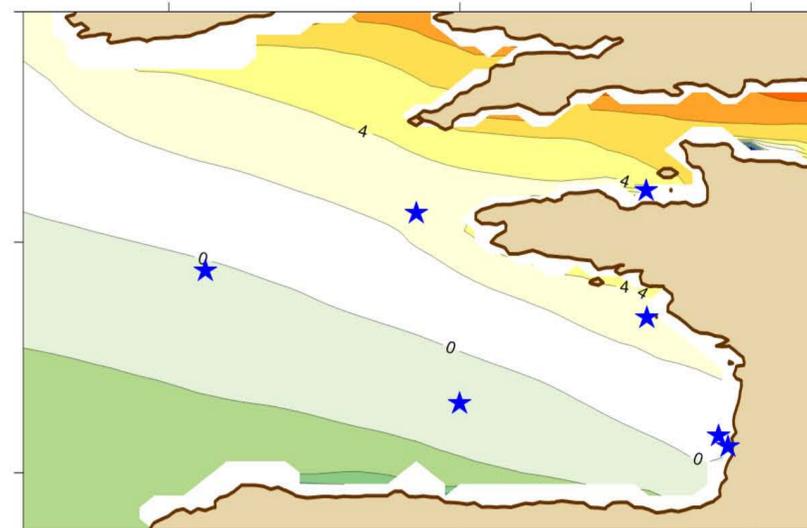
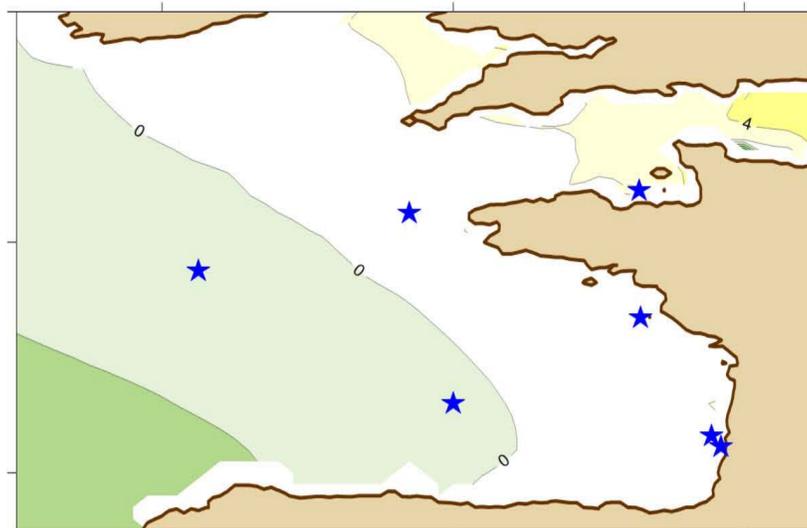
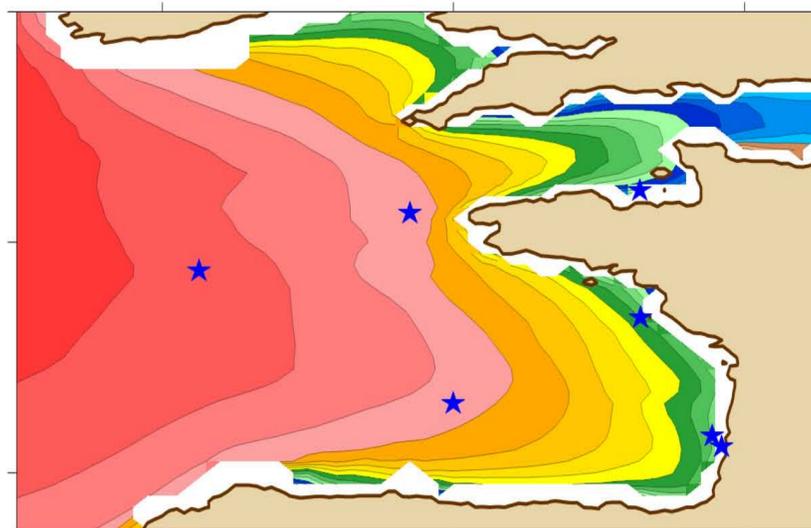
Diff. relative(%) B1

Diff. relative(%) A1B

Diff. relative(%) A2



Morellato et al.

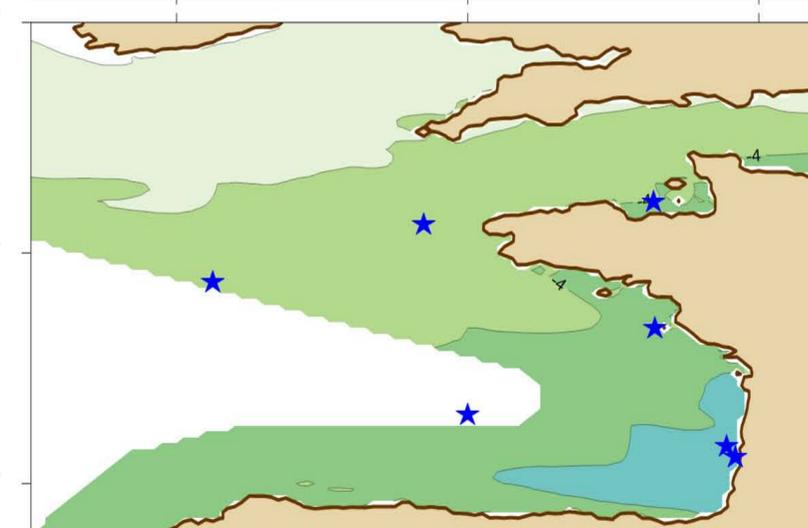
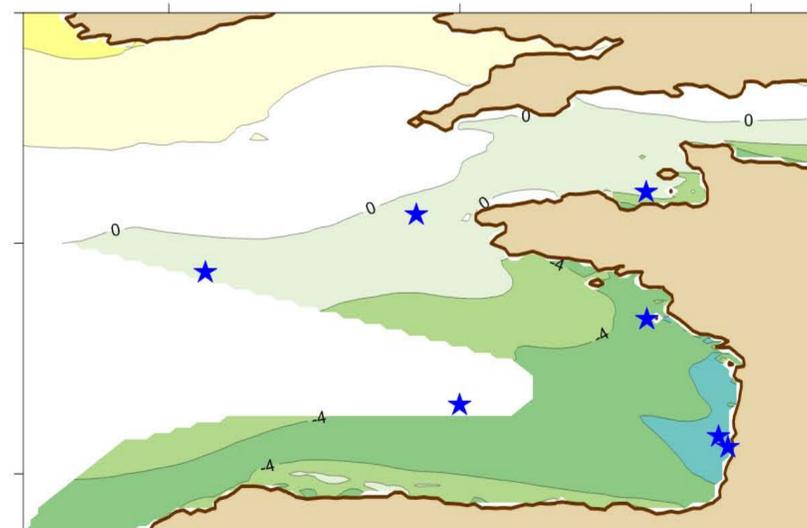
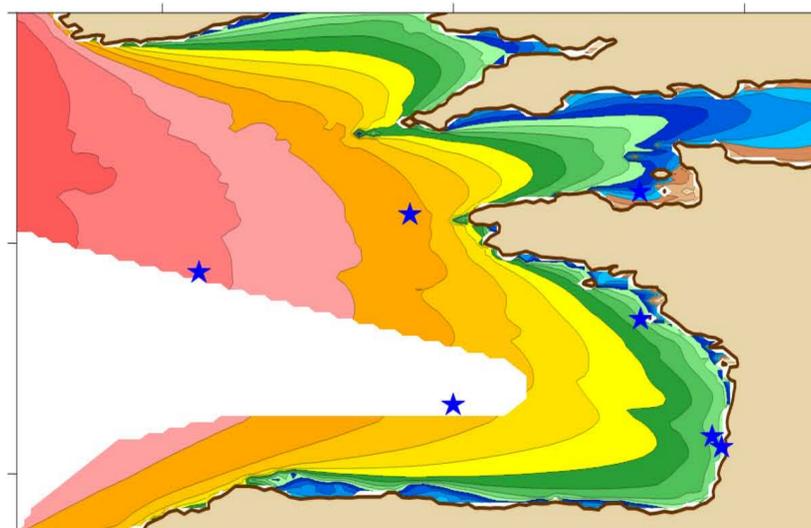


52°N

48°N

44°N

BoBWA Forecast



52°N

48°N

44°N

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

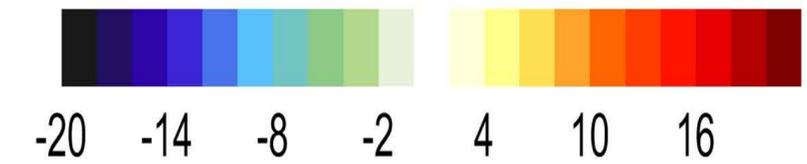
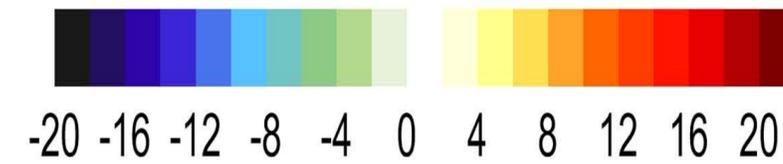
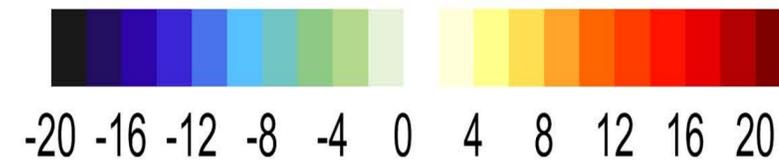
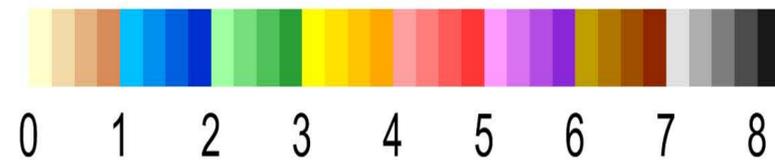
Evolution SWH - spring [1961-2000] => [2061-2100]

REF SWH (m)

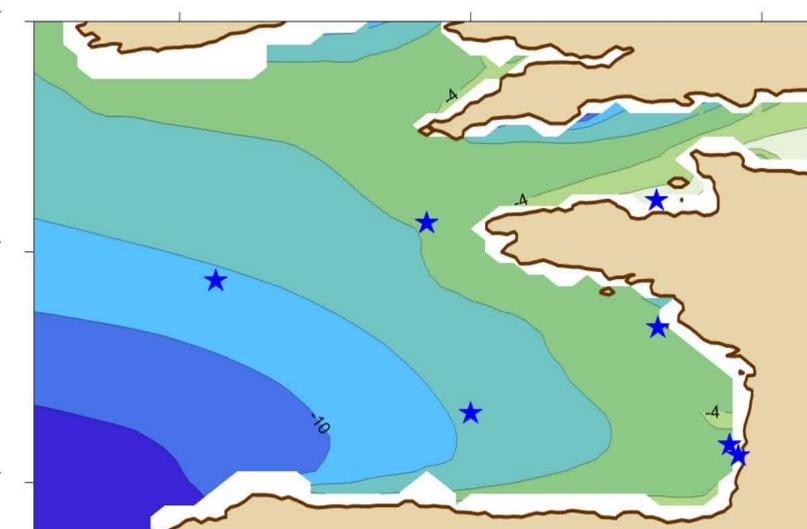
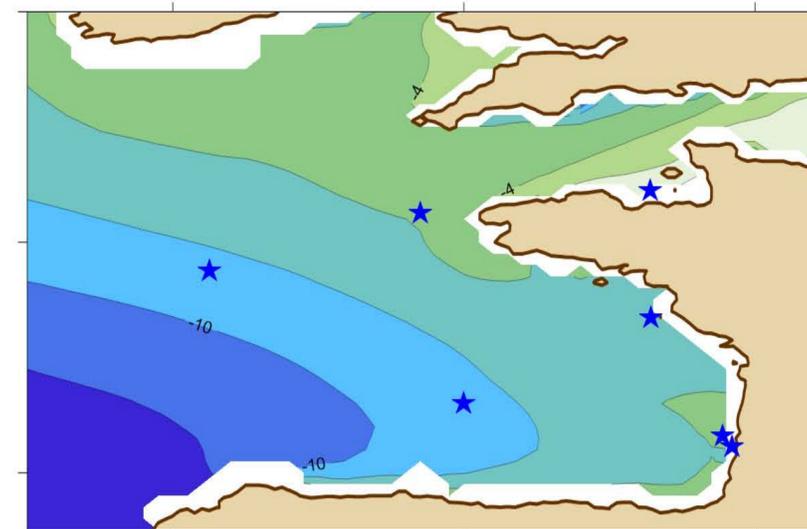
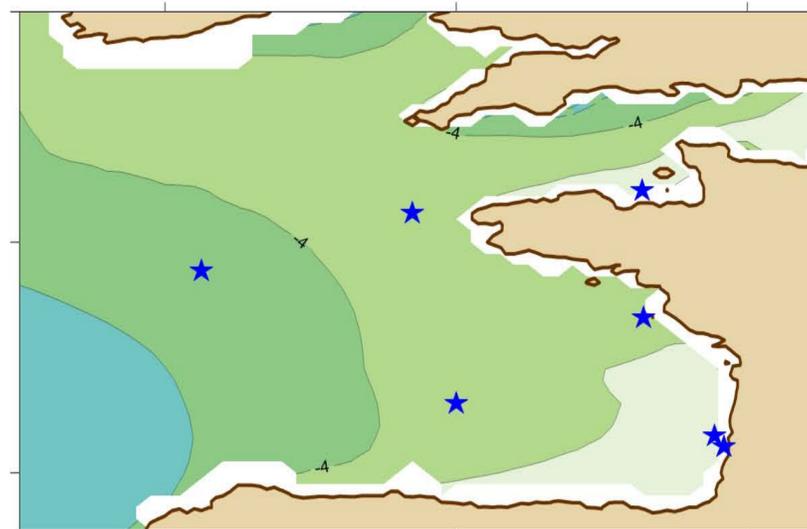
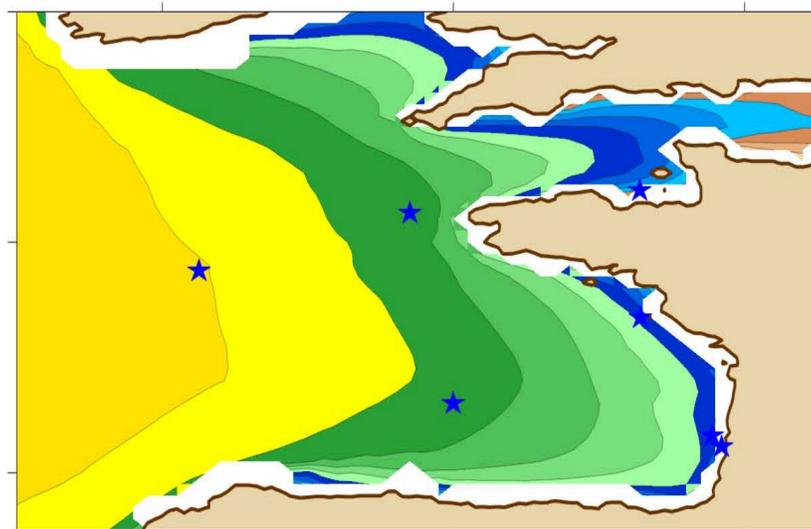
Diff. relative(%) B1

Diff. relative(%) A1B

Diff. relative(%) A2



Morellato et al.

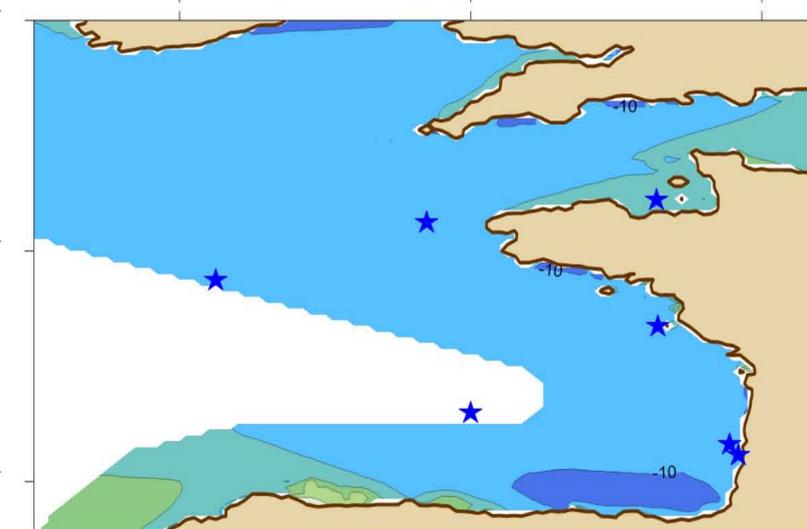
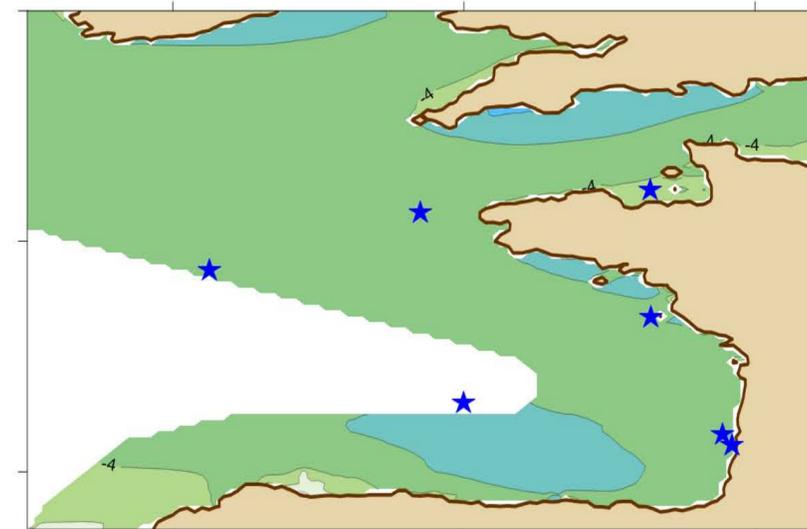
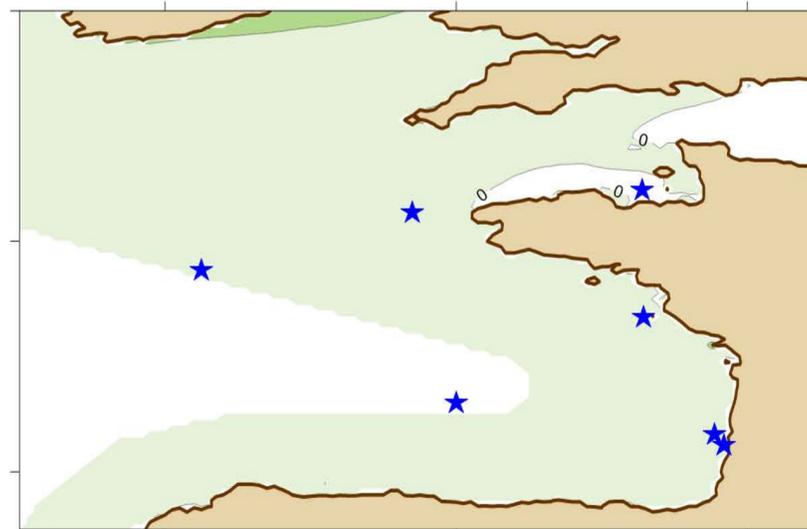
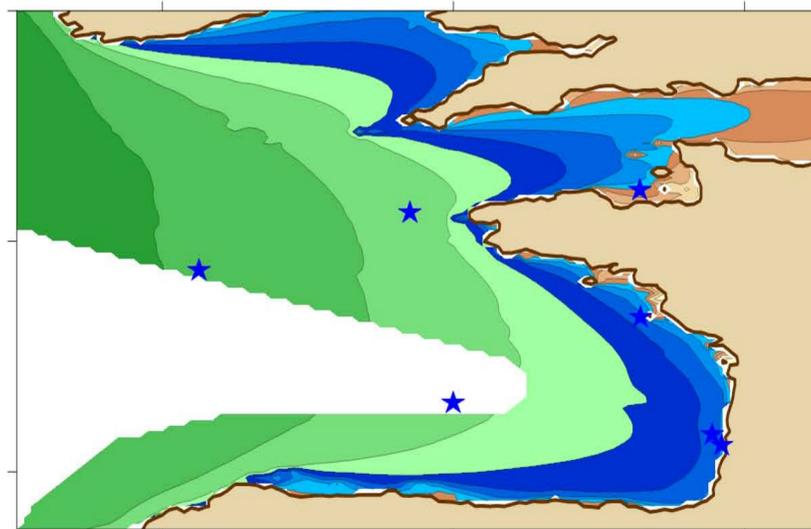


52°N

48°N

44°N

BoBWA Forecast



52°N

48°N

44°N

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

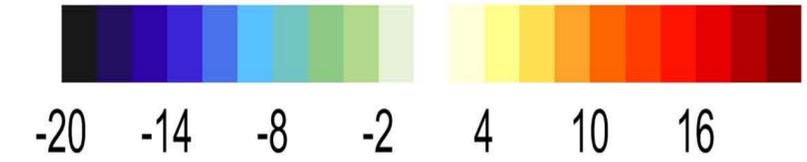
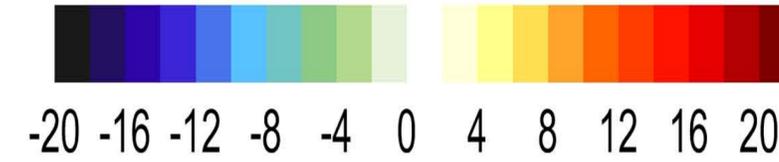
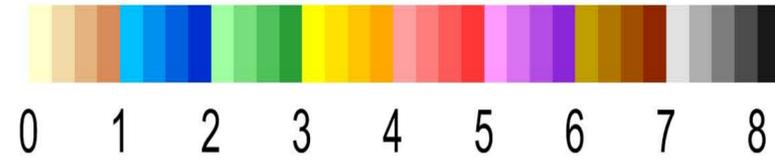
Evolution SWHPrc95 - summer [1961-2000] => [2061-2100]

REF SWH 95th (m)

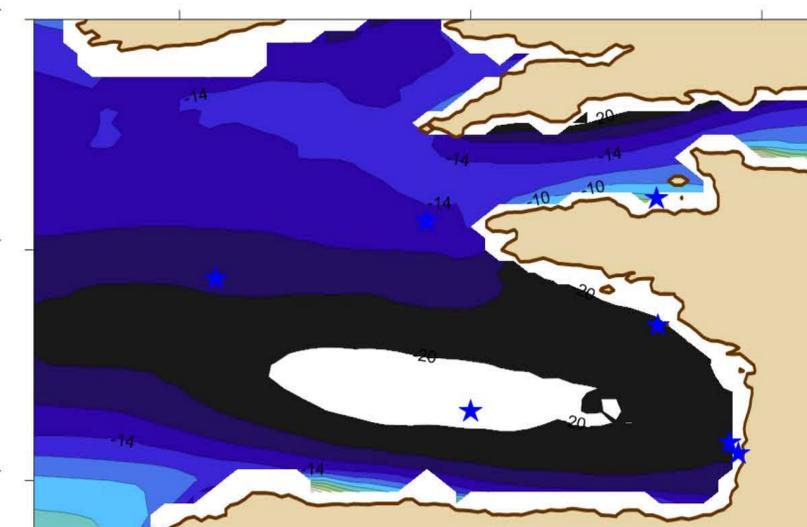
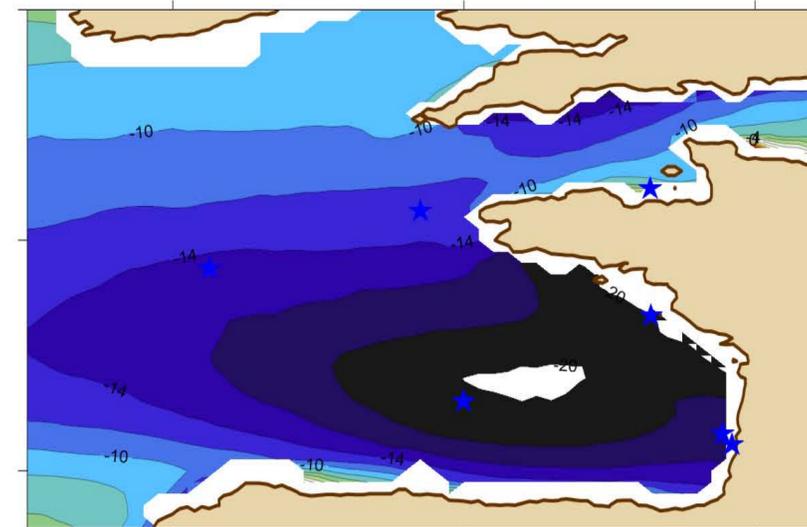
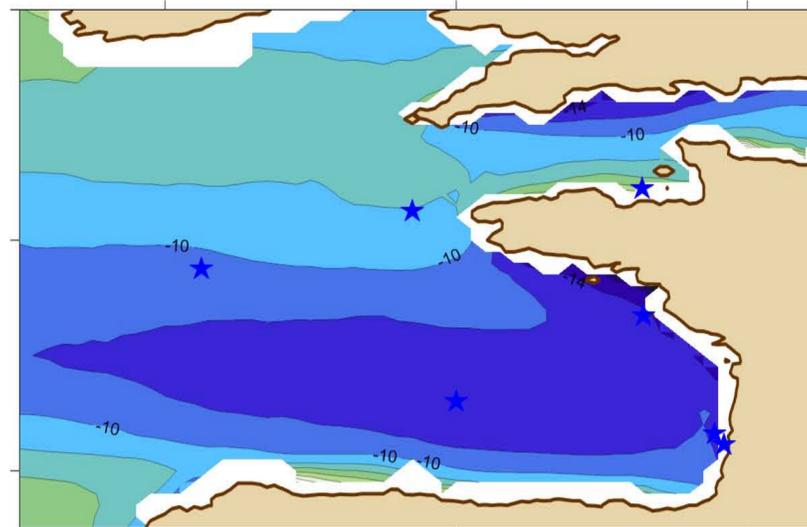
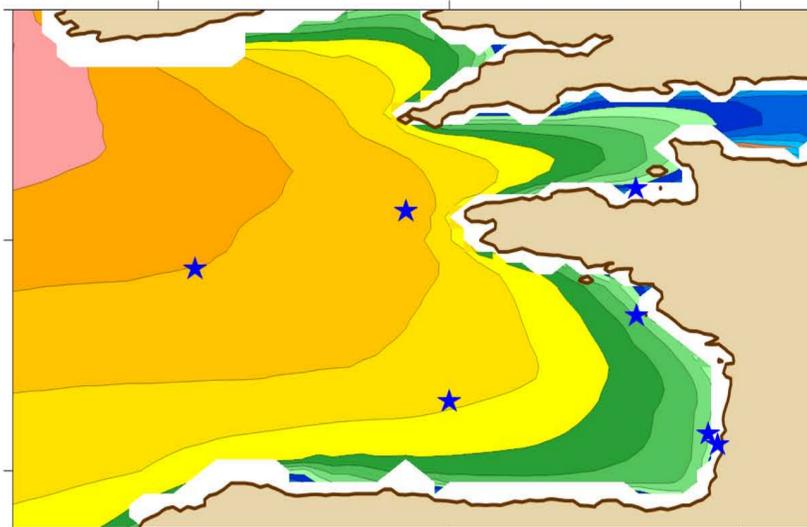
Diff. relative(%) B1

Diff. relative(%) A1B

Diff. relative(%) A2



Morellato et al.

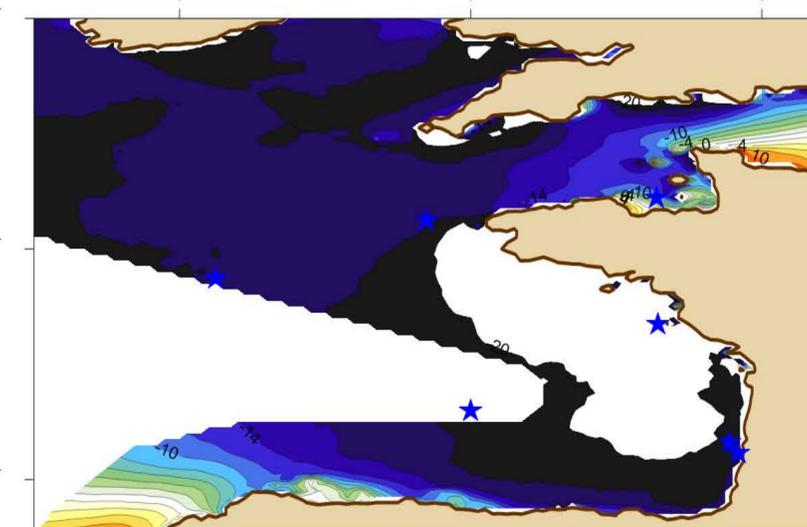
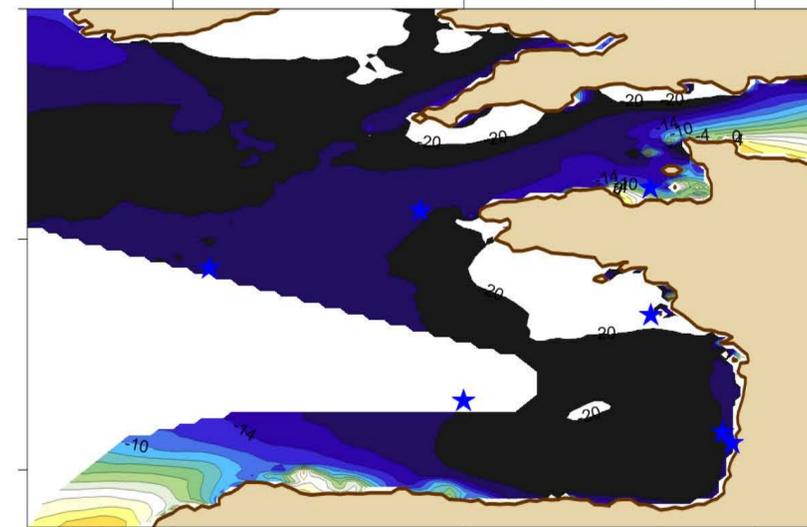
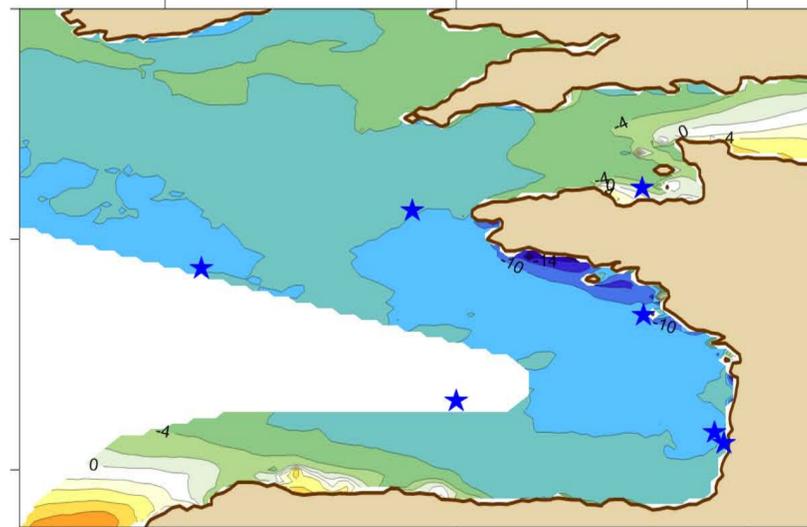
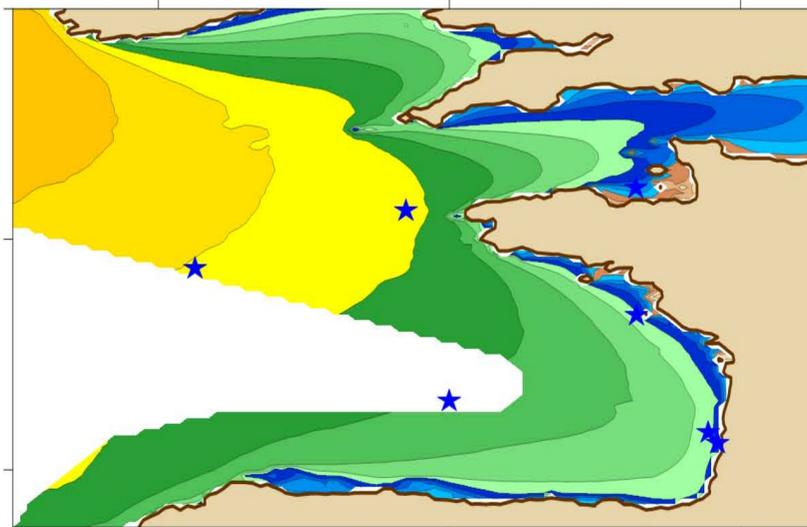


52°N

48°N

44°N

BoBWA Forecast



52°N

48°N

44°N

-9°E

-5°E

-1°E

-9°E

-5°E

-1°E

-9°E

-5°E

-1°E

-9°E

-5°E

-1°E

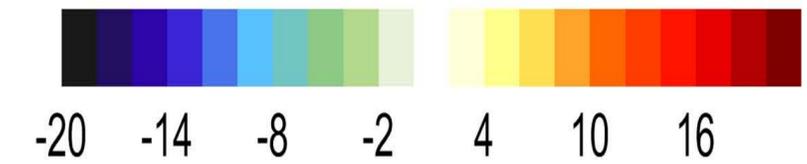
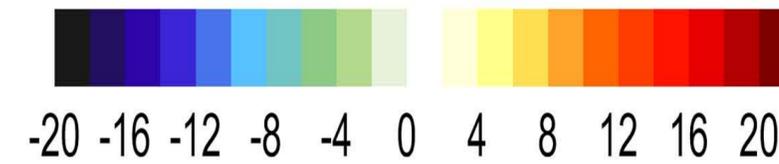
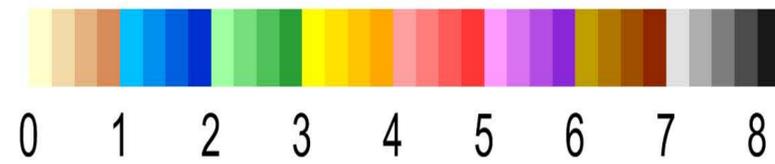
Evolution SWHPrct95 -autumn [1961-2000] => [2061-2100]

REF SWH 95th (m)

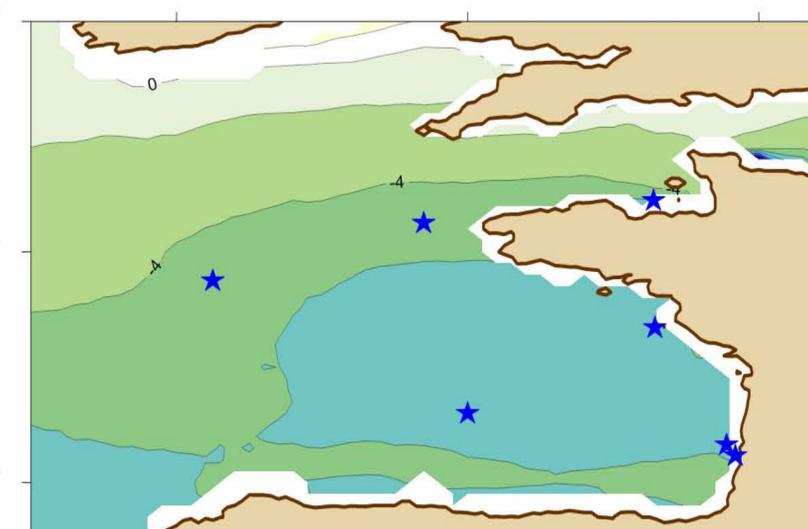
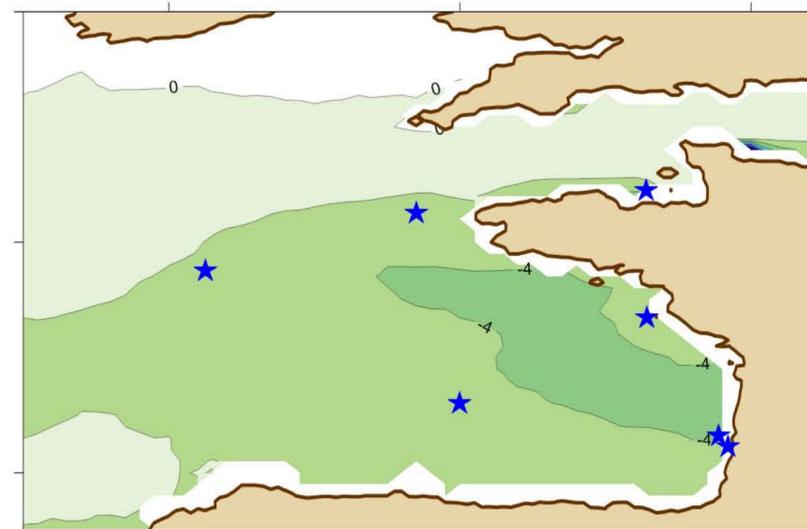
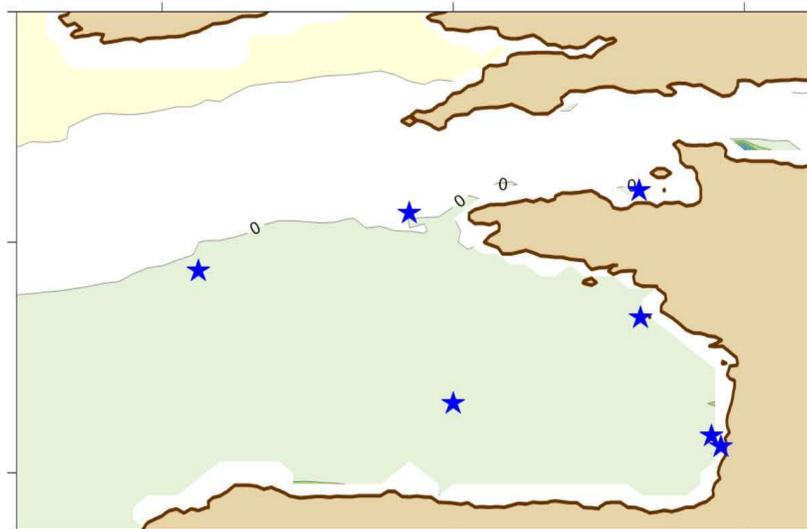
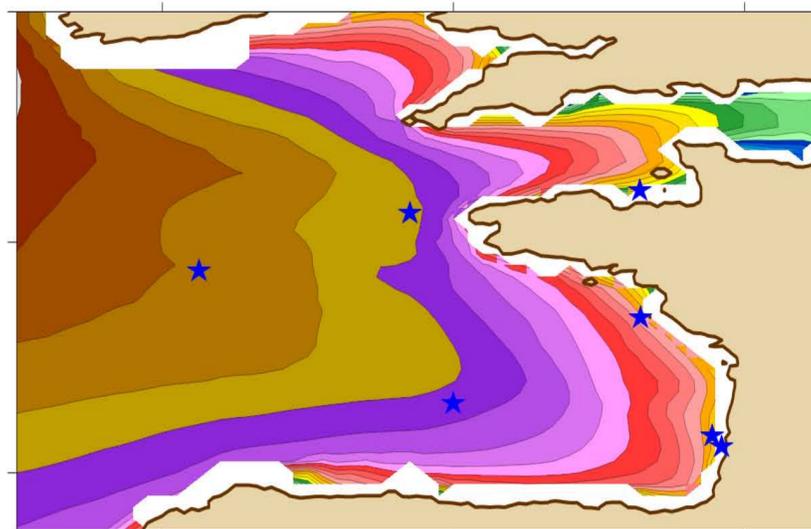
Diff. relative(%) B1

Diff. relative(%) A1B

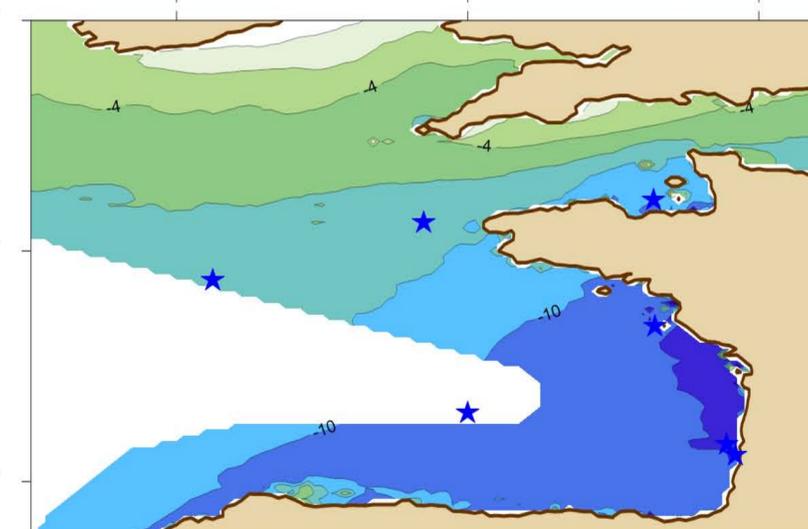
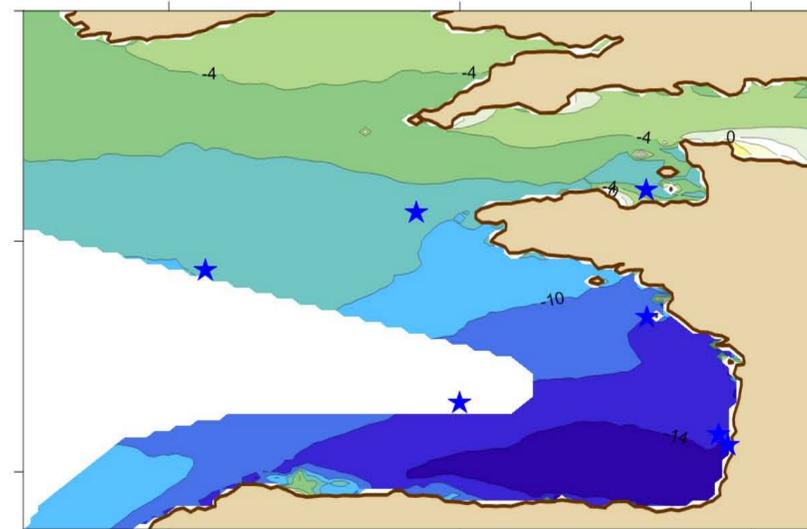
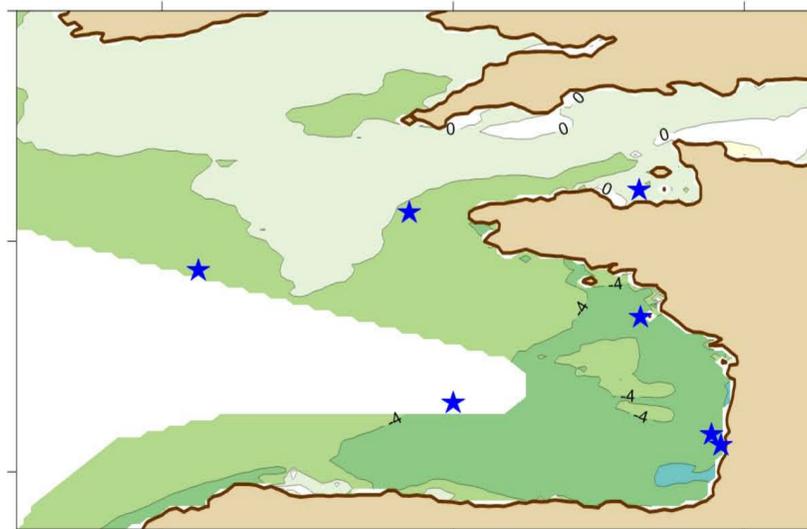
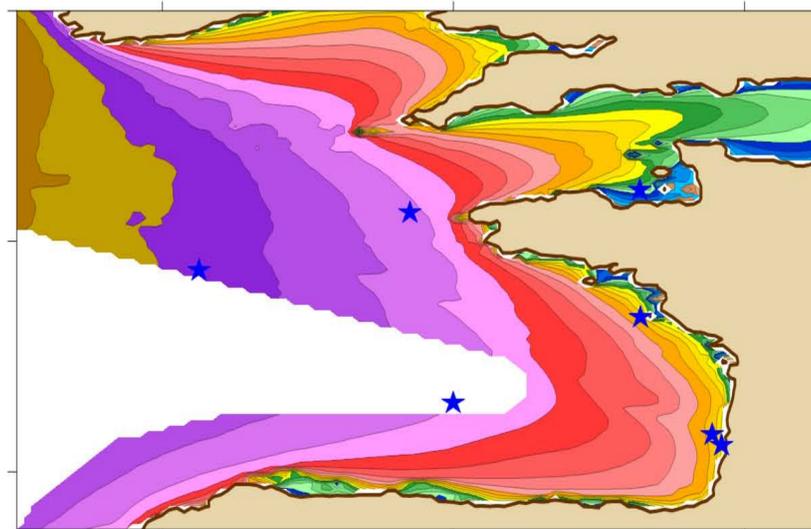
Diff. relative(%) A2



Morellato et al.



BoBWA Forecast



-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

52°N

48°N

44°N

52°N

48°N

44°N

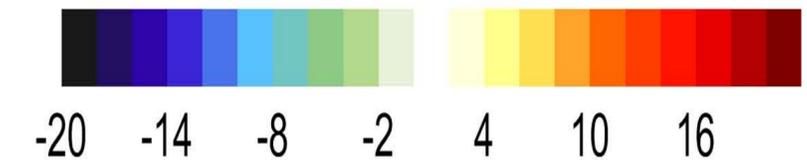
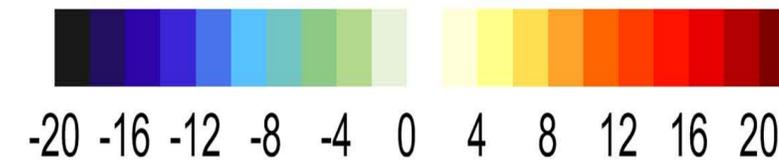
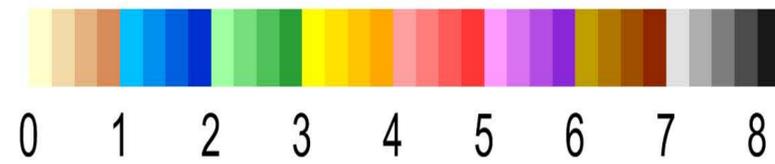
Evolution SWHPrct95 -winter [1961-2000] => [2061-2100]

REF SWH 95th (m)

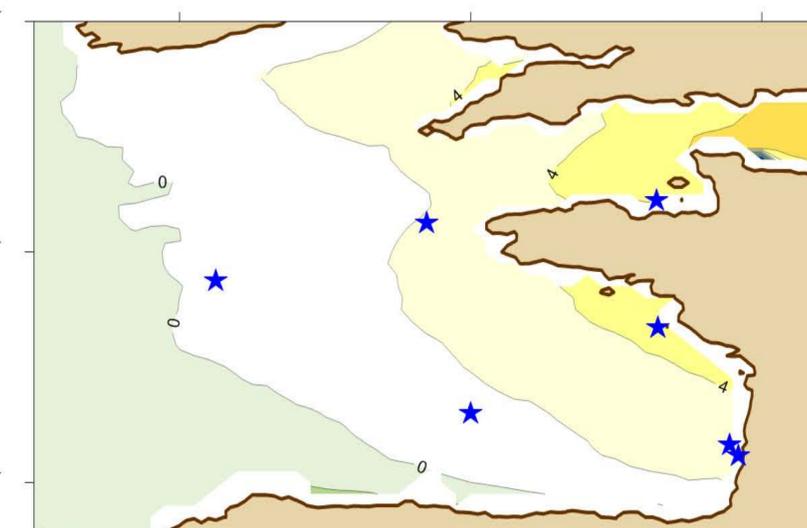
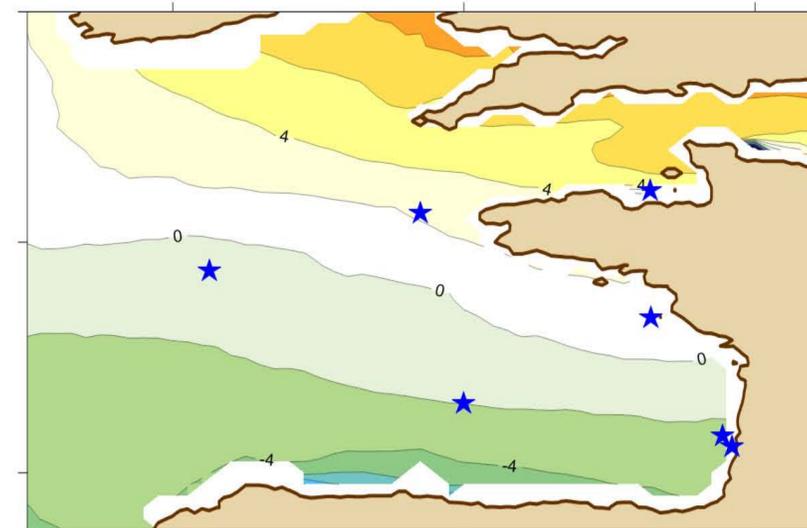
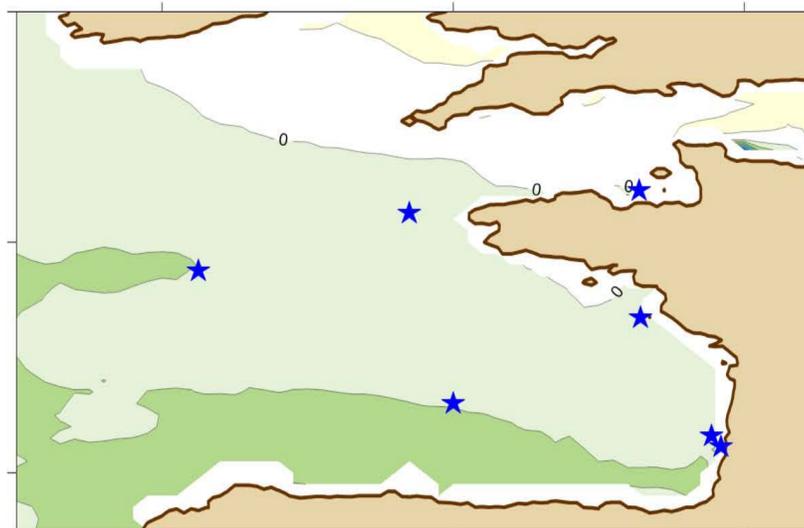
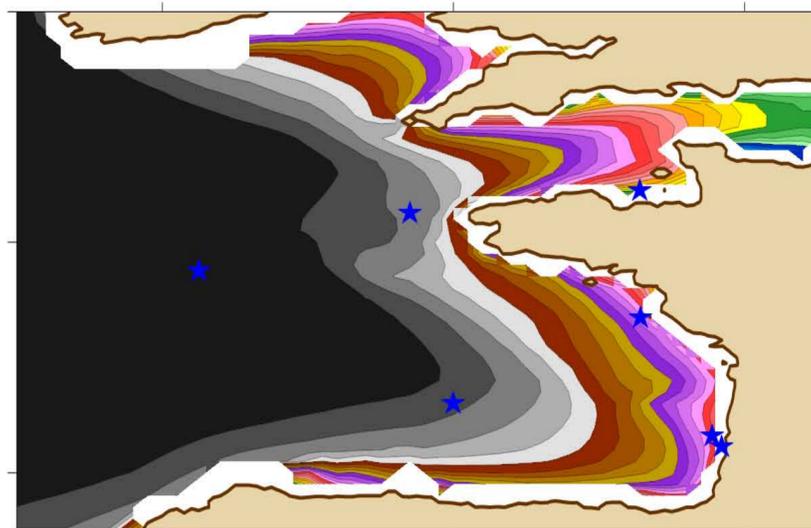
Diff. relative(%) B1

Diff. relative(%) A1B

Diff. relative(%) A2



Morellato et al.

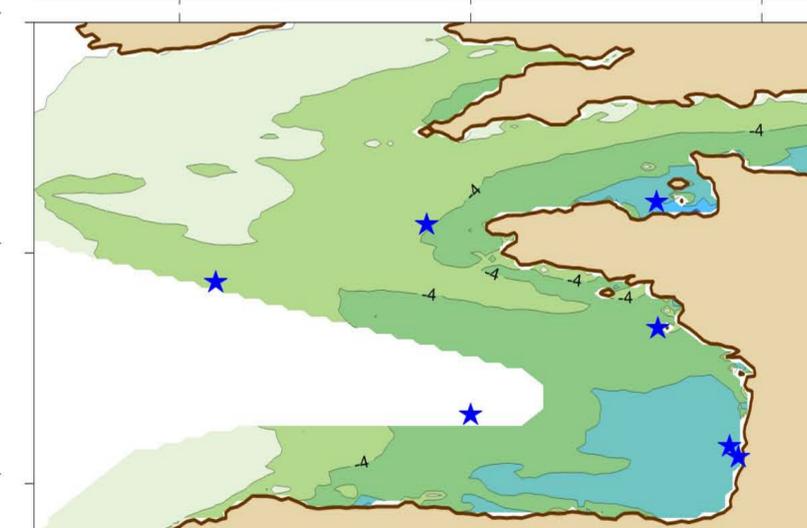
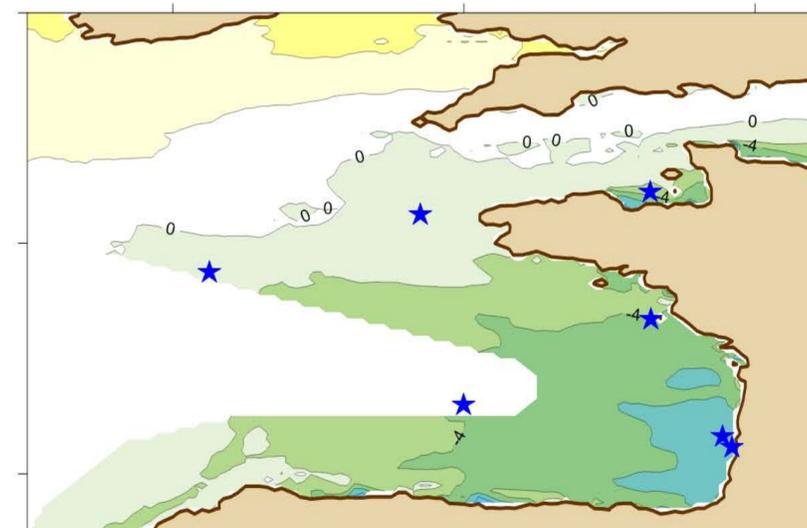
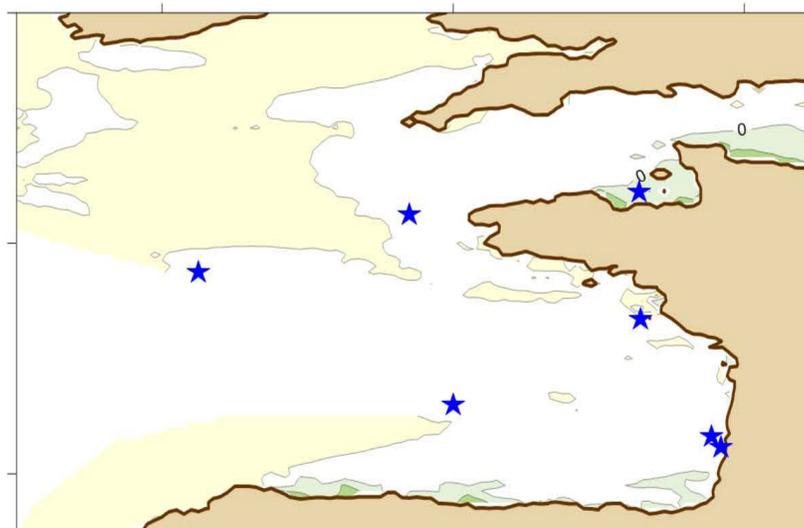
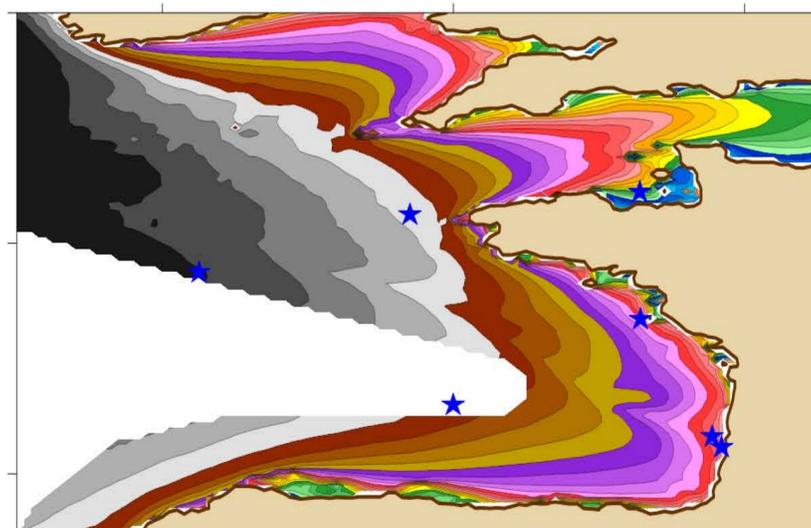


52°N

48°N

44°N

BoBWA Forecast



52°N

48°N

44°N

-9°E

-5°E

-1°E

-9°E

-5°E

-1°E

-9°E

-5°E

-1°E

-9°E

-5°E

-1°E

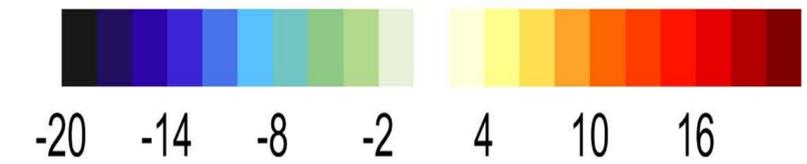
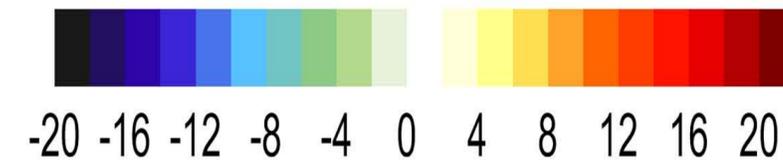
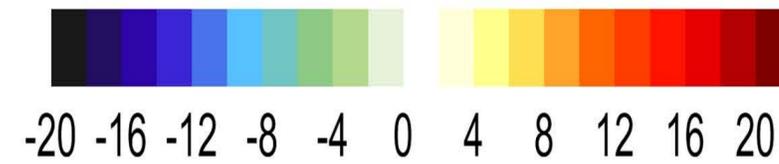
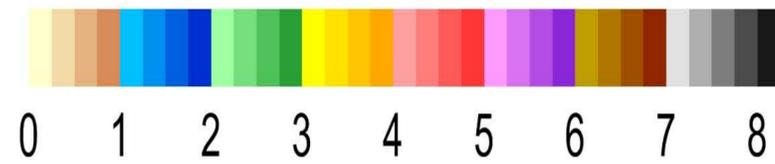
Evolution SWHPrct95 - spring [1961-2000] => [2061-2100]

REF SWH 95th (m)

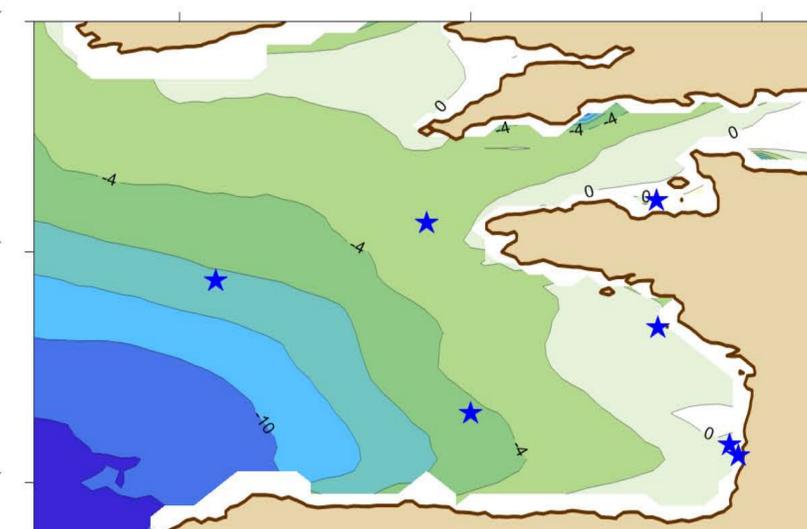
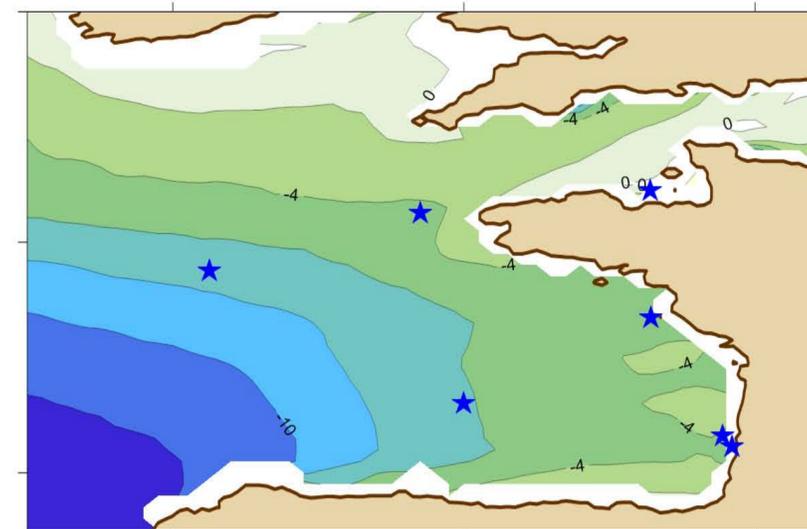
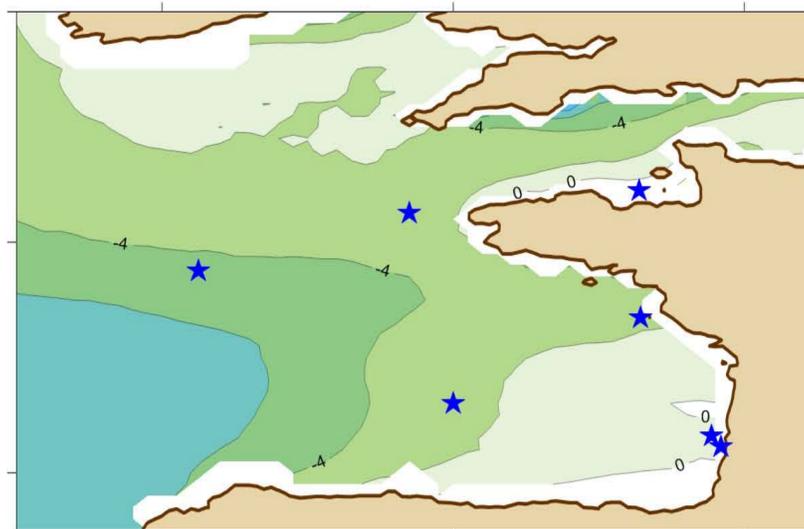
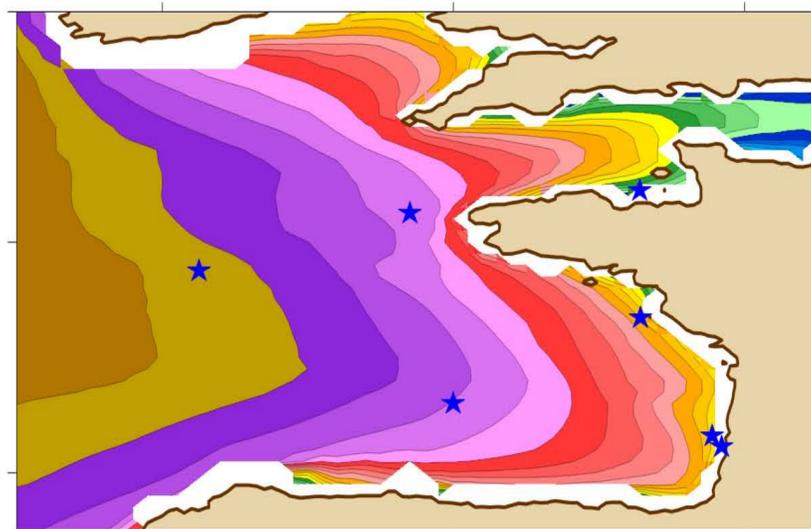
Diff. relative(%) B1

Diff. relative(%) A1B

Diff. relative(%) A2



Morellato et al.

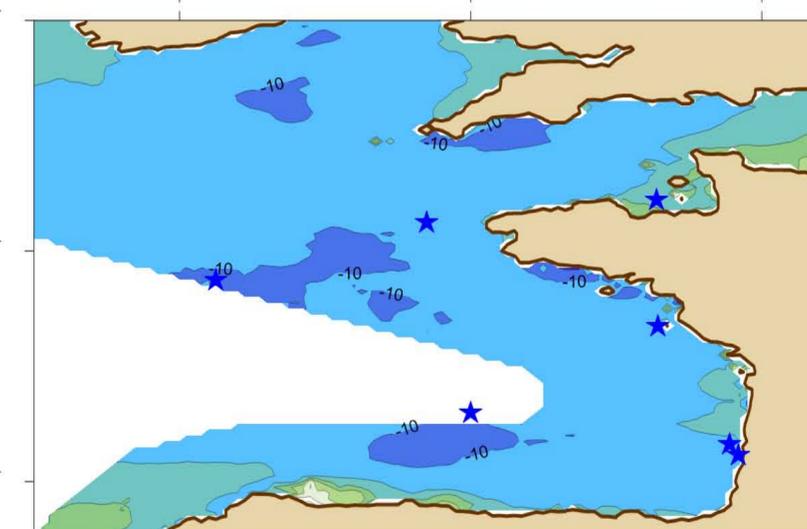
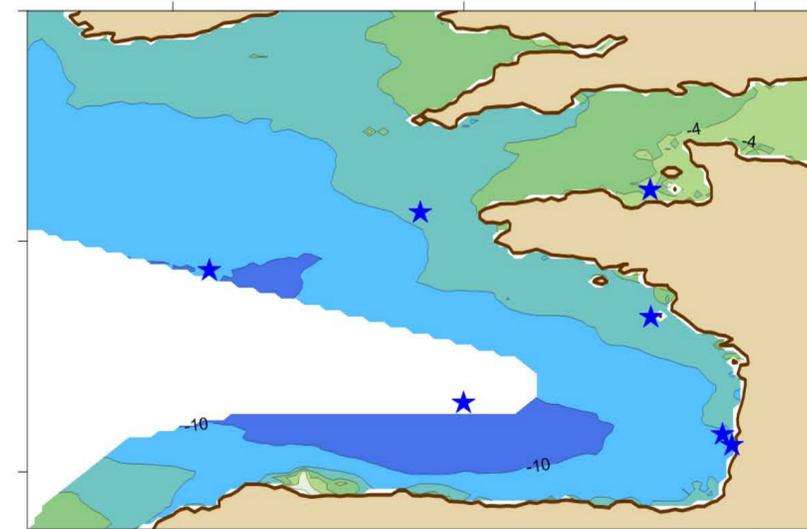
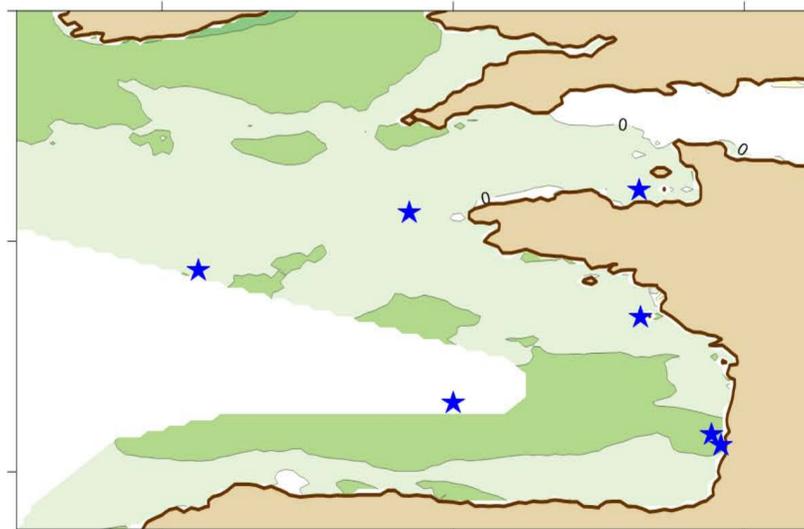
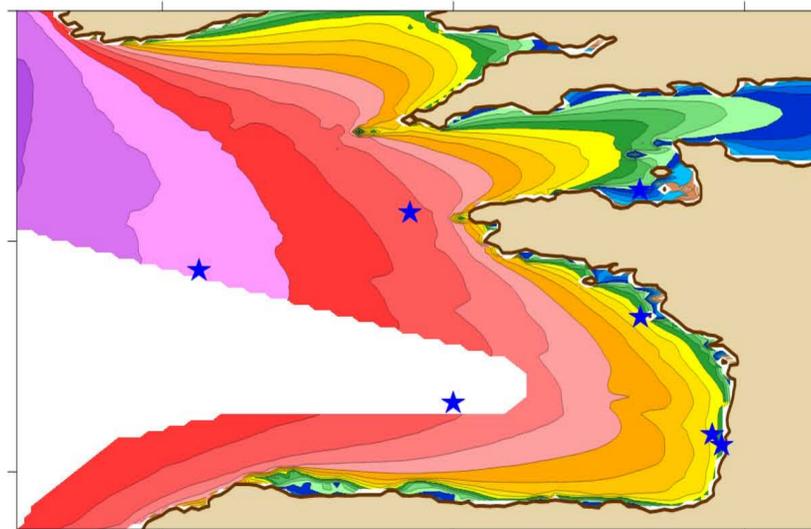


52°N

48°N

44°N

BoBWA Forecast



52°N

48°N

44°N

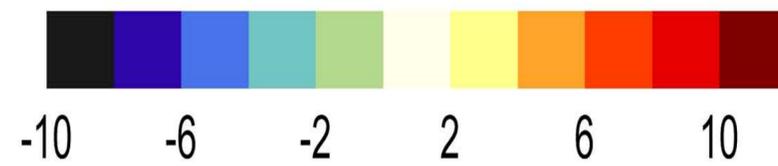
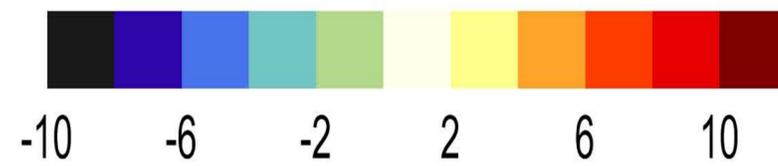
-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

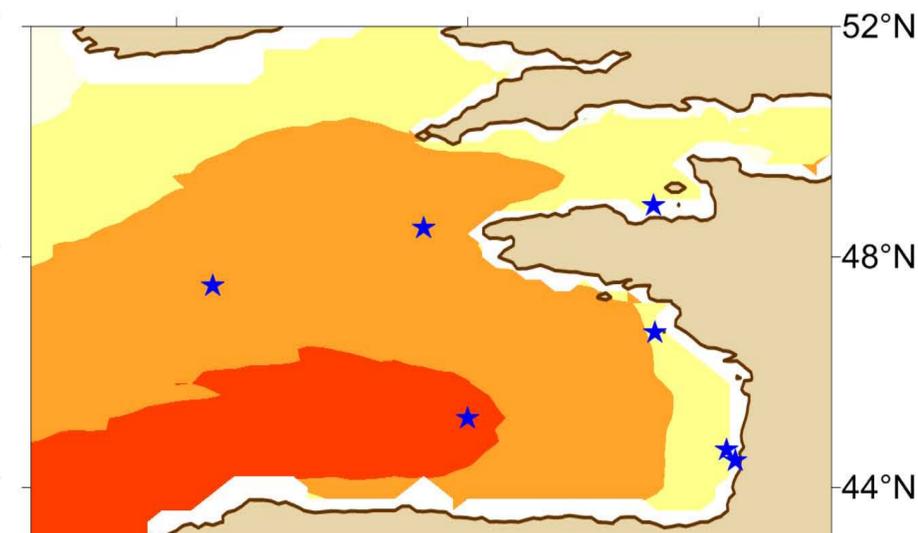
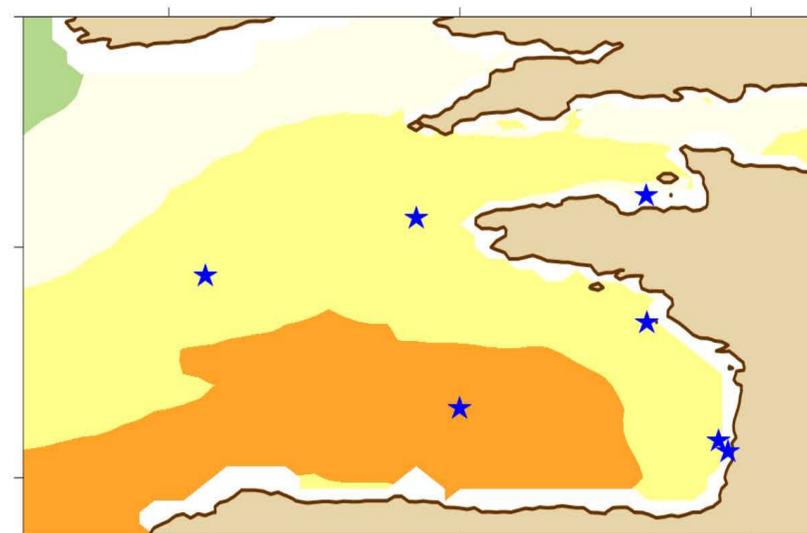
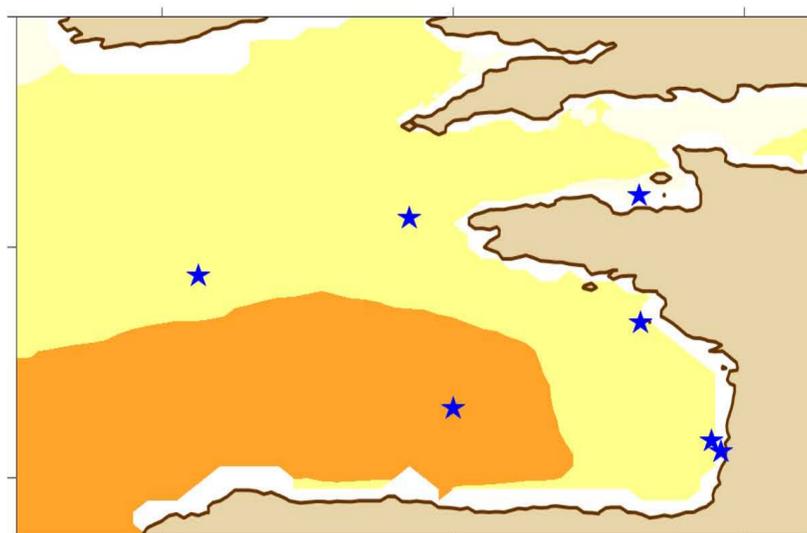
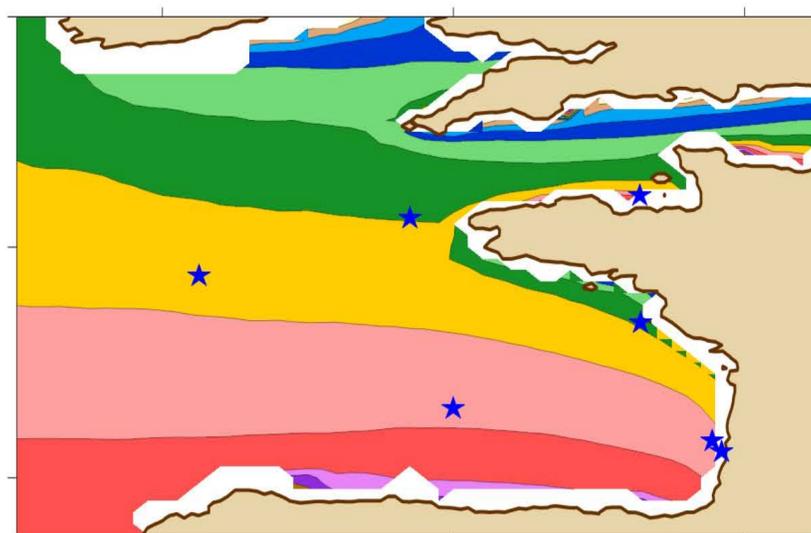
-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

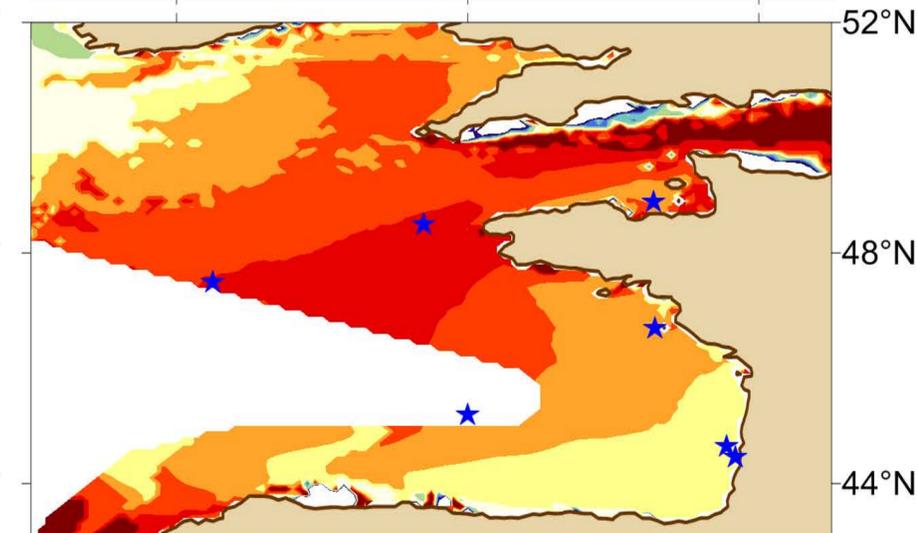
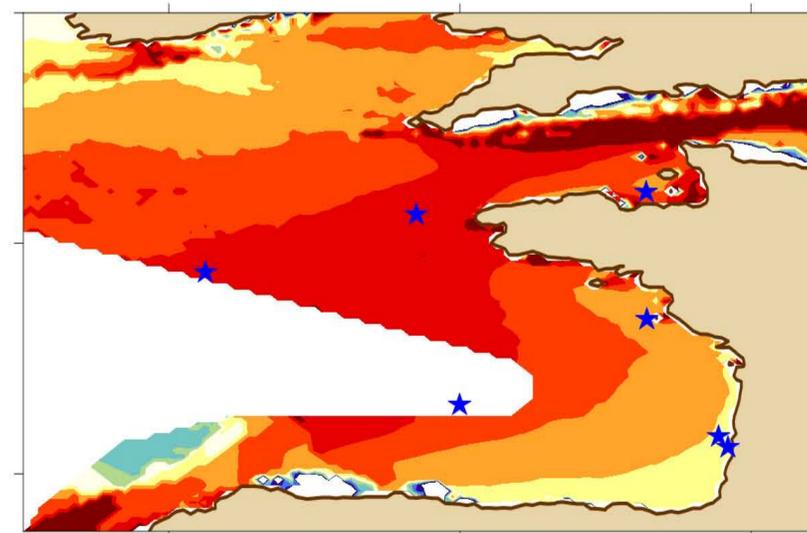
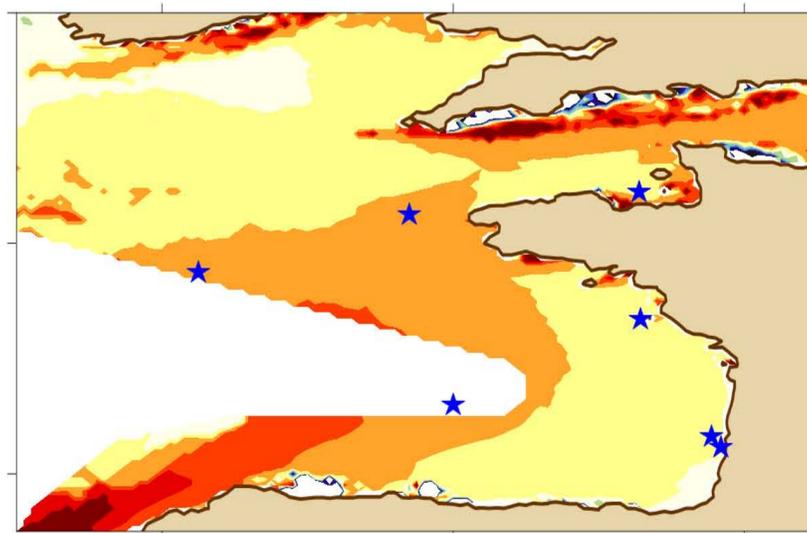
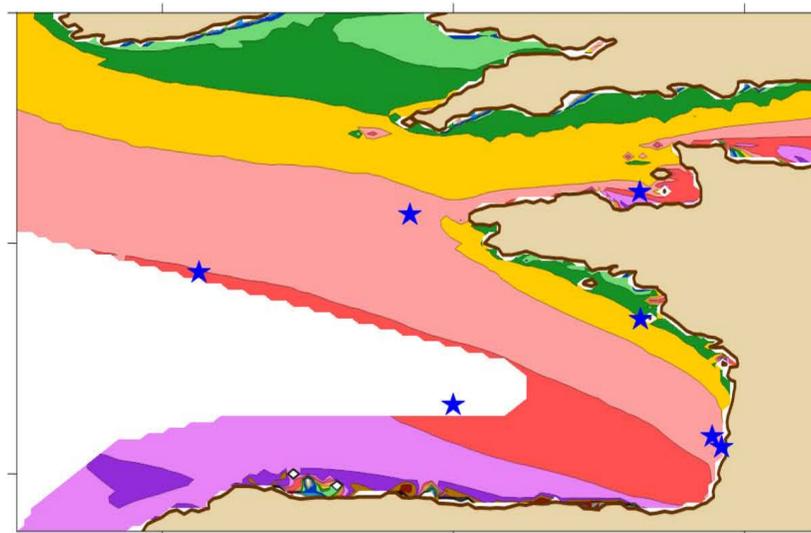
Evolution MWD - summer [1961-2000] => [2061-2100]

REF MWD ($^{\circ}$ N)Difference ($^{\circ}$ N) B1Difference ($^{\circ}$ N) A1BDifference ($^{\circ}$ N) A2

Morellato et al.



BoBWA Forecast



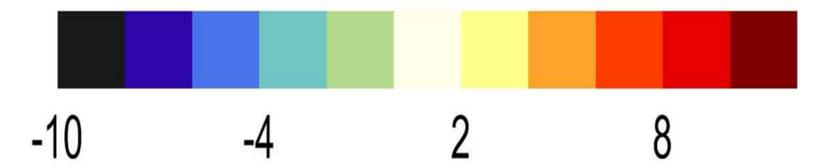
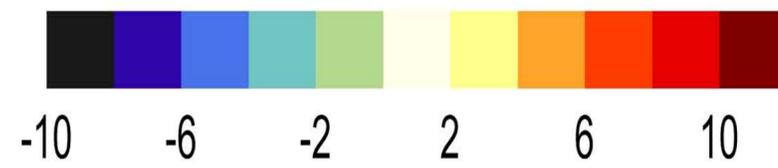
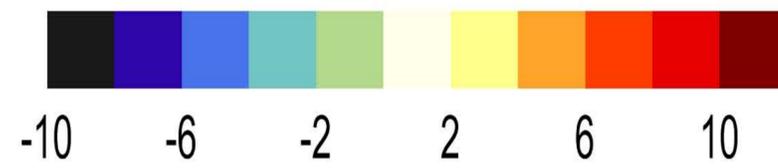
Evolution MWD - autumn [1961-2000] => [2061-2100]

REF MWD (°N)

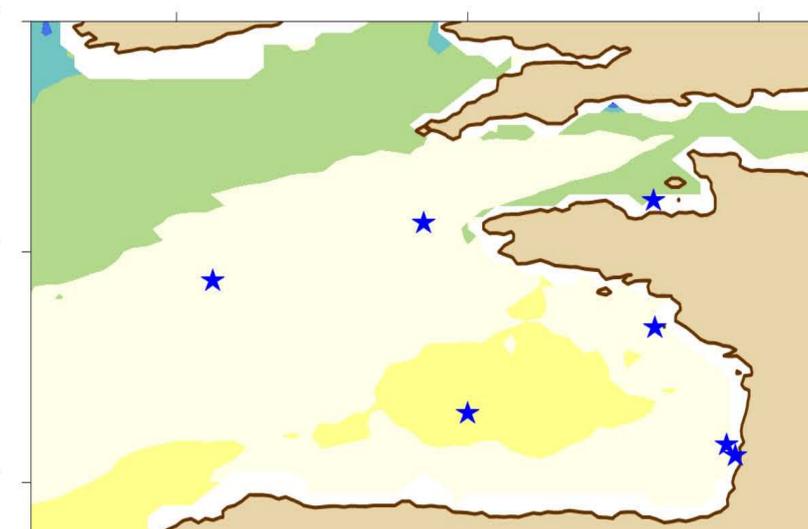
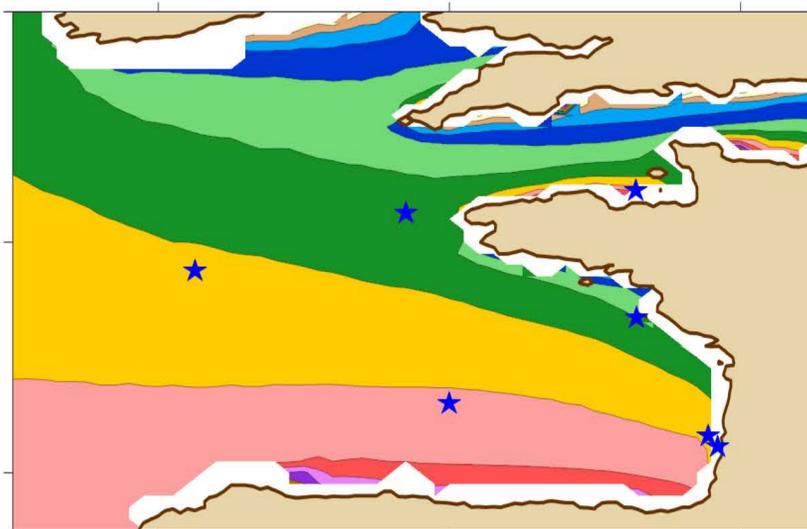
Difference (°N) B1

Difference (°N) A1B

Difference (°N) A2



Morellato et al.

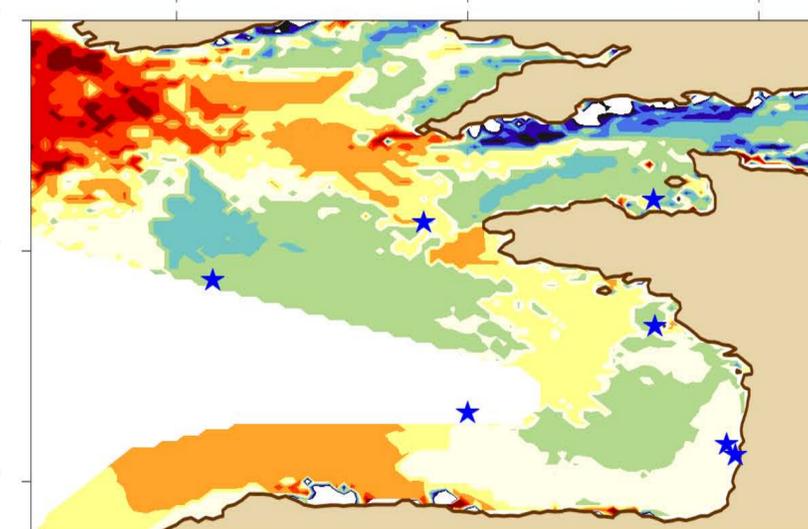
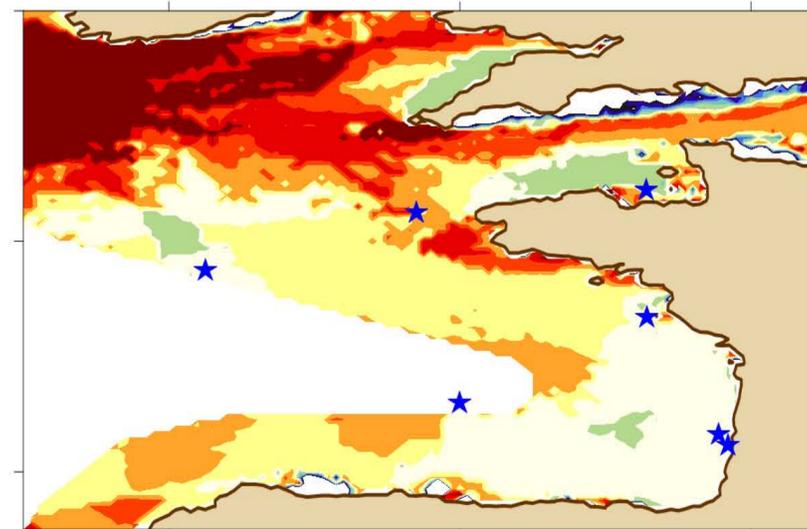
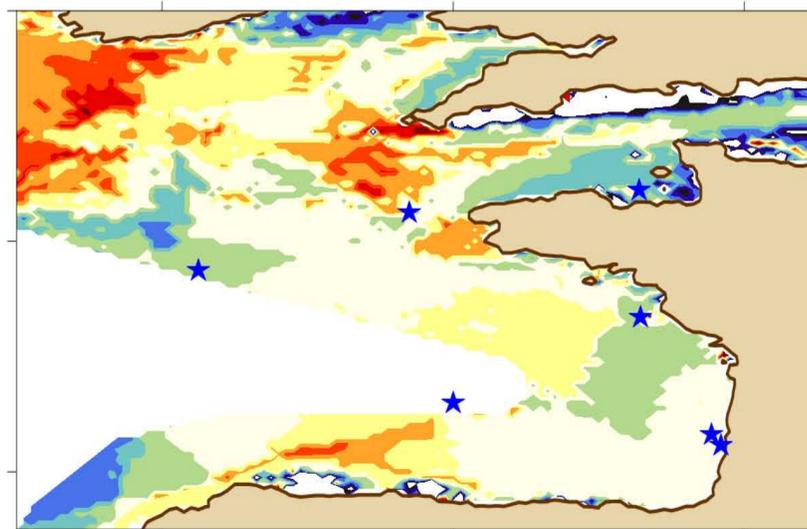
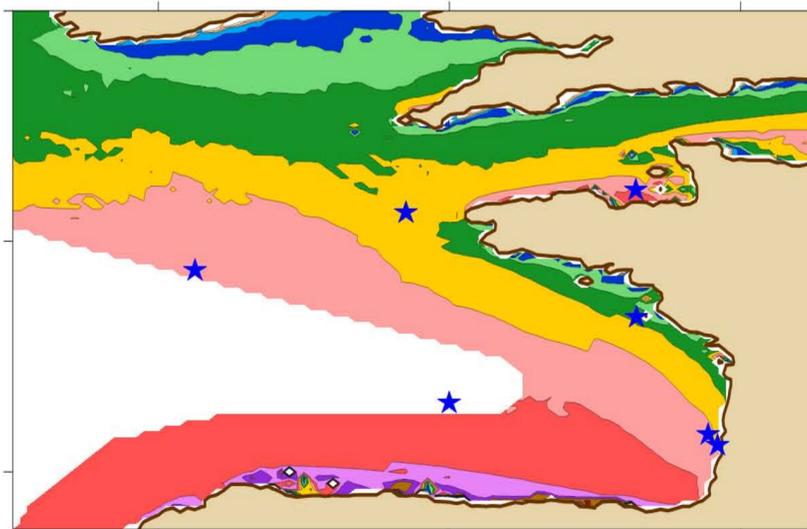


52°N

48°N

44°N

BoBWA Forecast



52°N

48°N

44°N

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

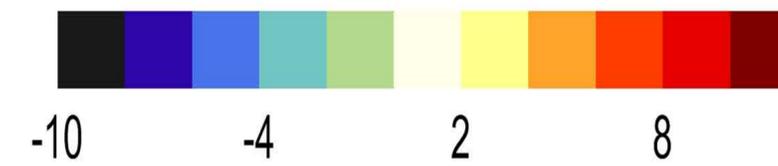
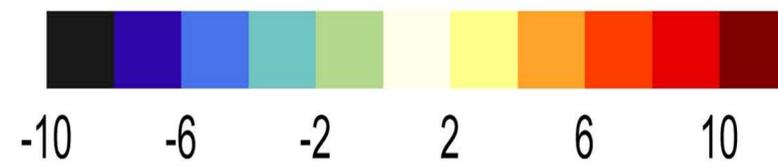
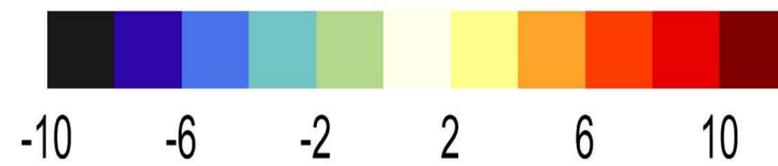
Evolution MWD - winter [1961-2000] => [2061-2100]

REF MWD (°N)

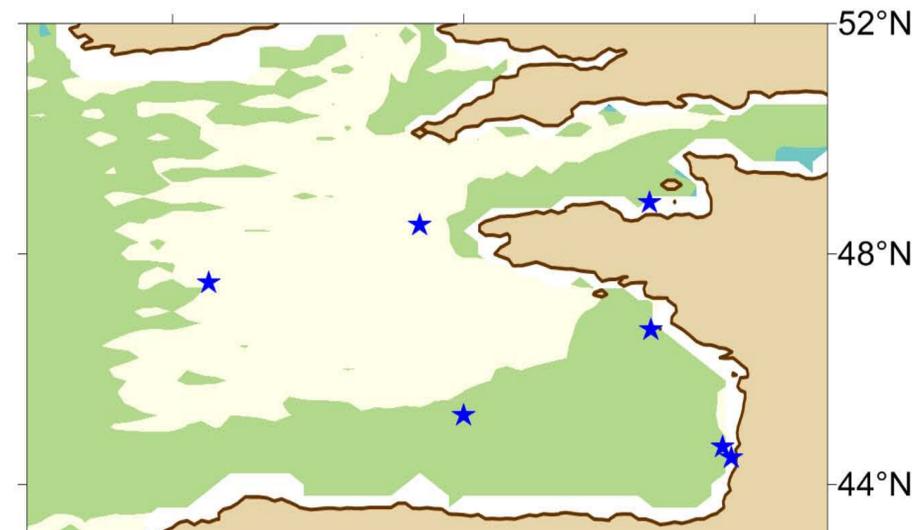
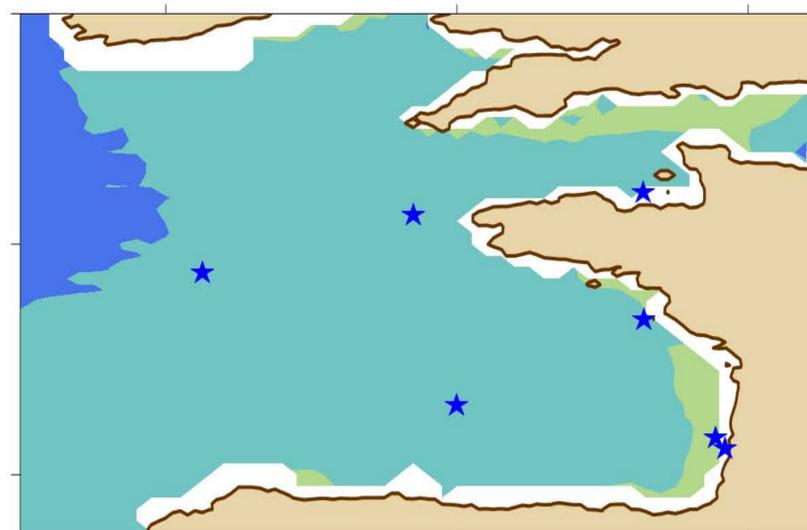
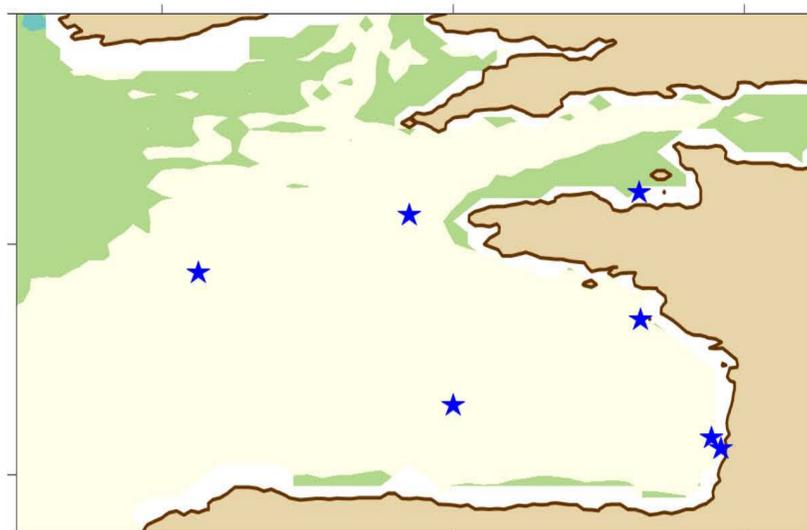
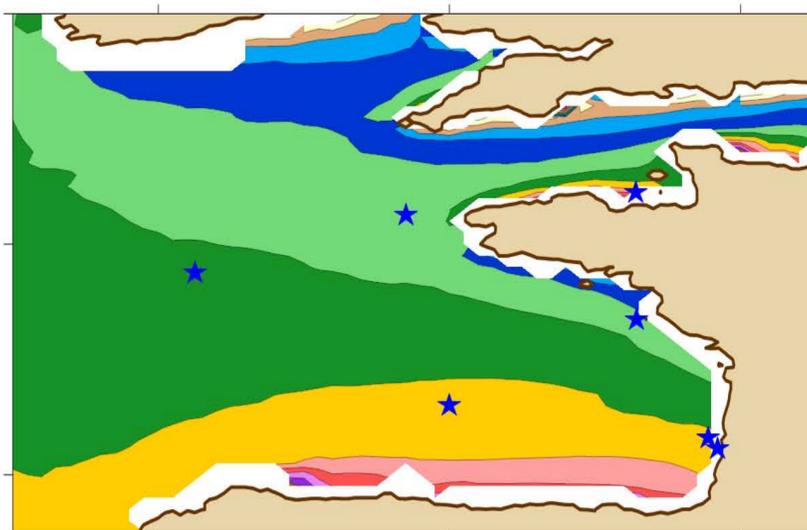
Difference (°N) B1

Difference (°N) A1B

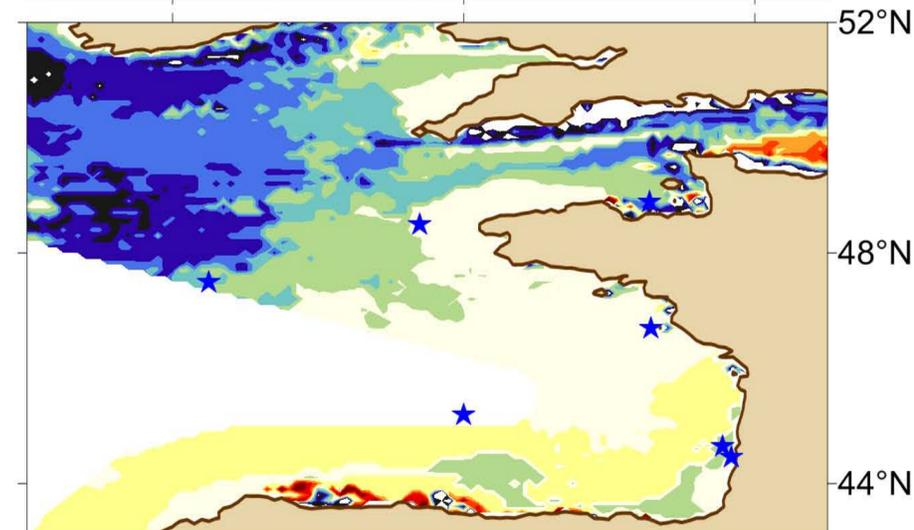
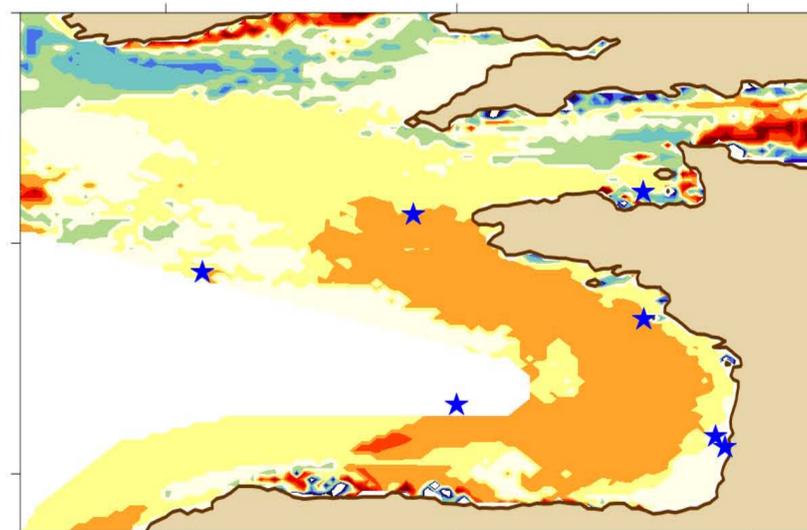
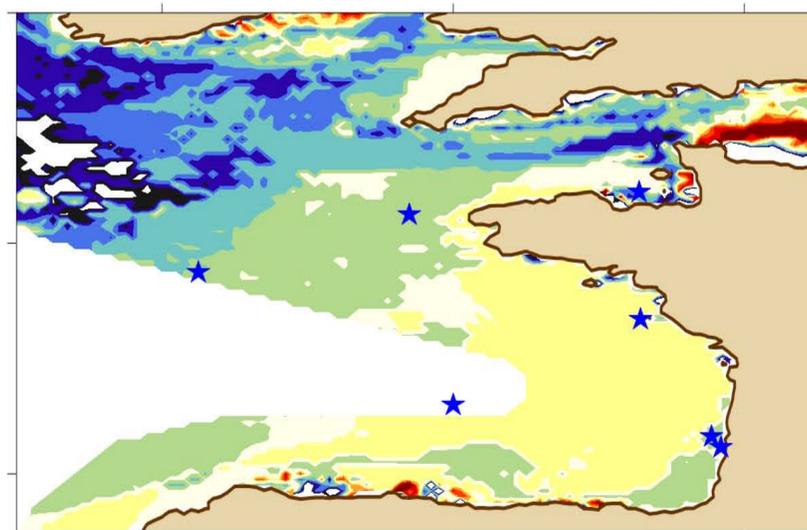
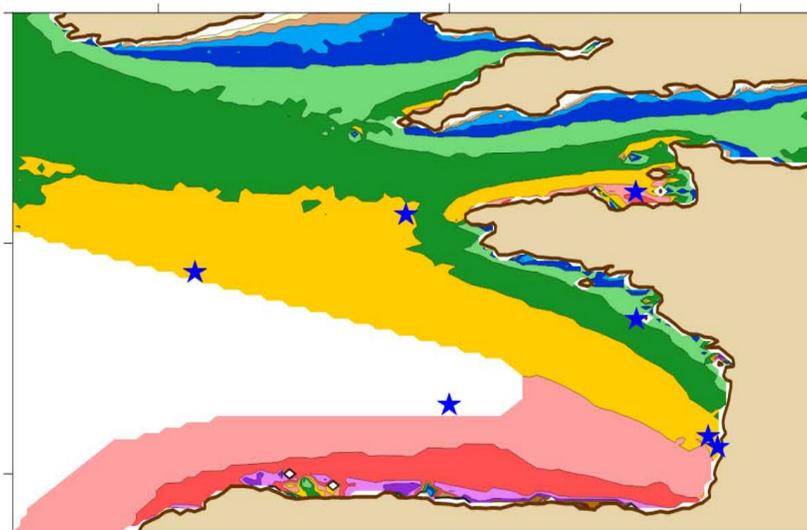
Difference (°N) A2



Morellato et al.



BoBWA Forecast



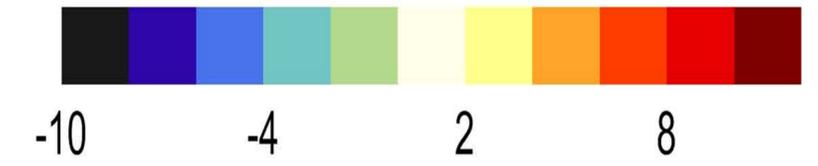
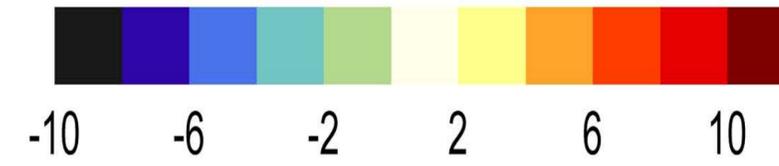
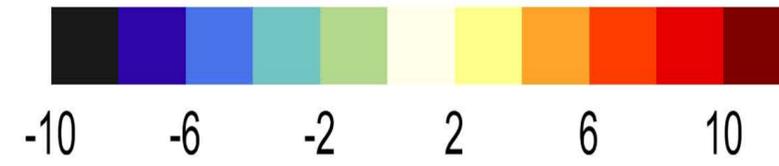
Evolution MWD - spring [1961-2000] => [2061-2100]

REF MWD (°N)

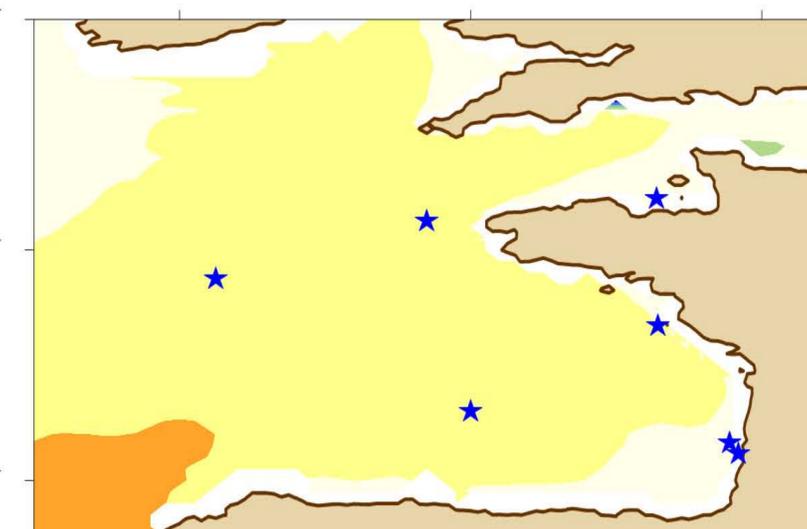
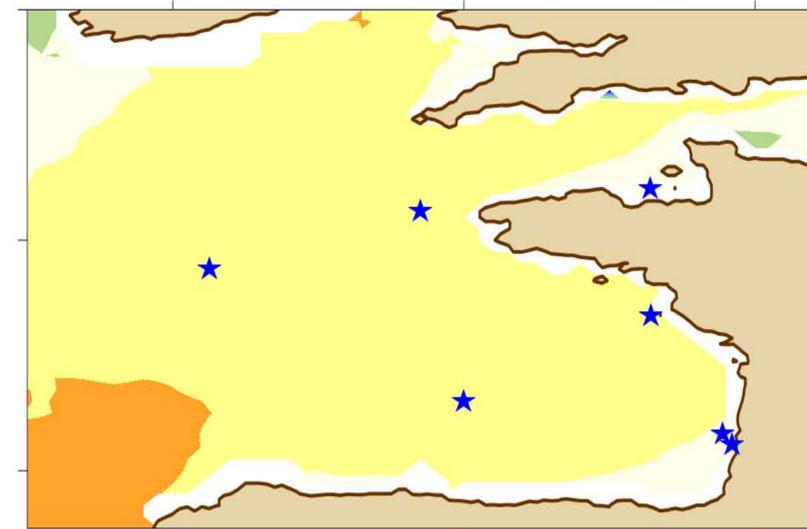
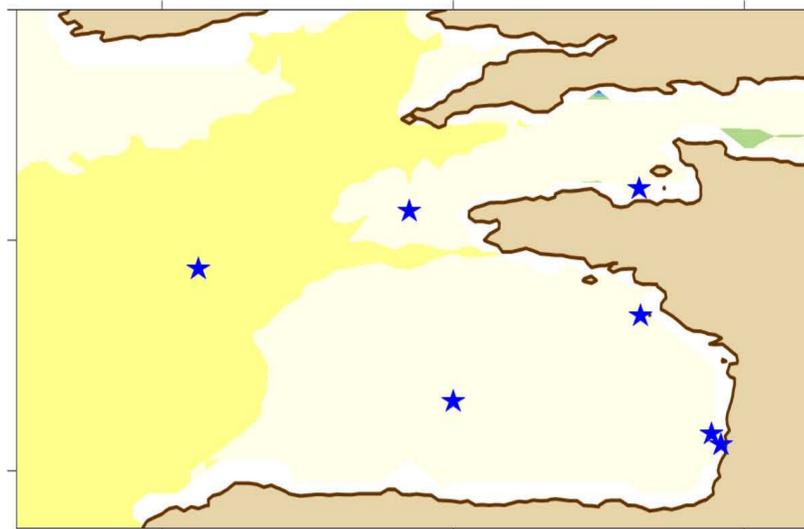
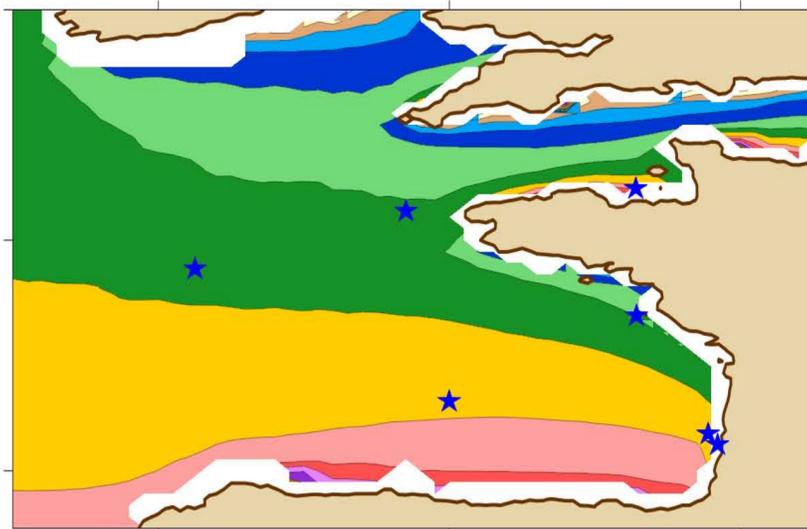
Difference (°N) B1

Difference (°N) A1B

Difference (°N) A2



Morellato et al.

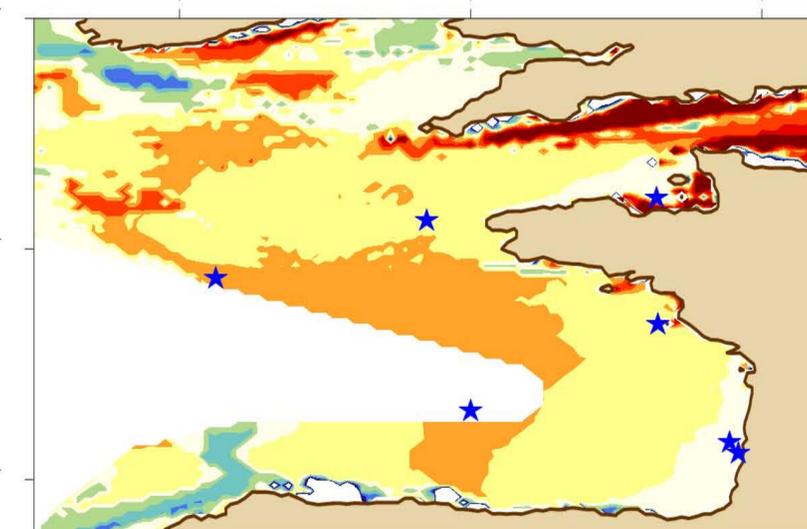
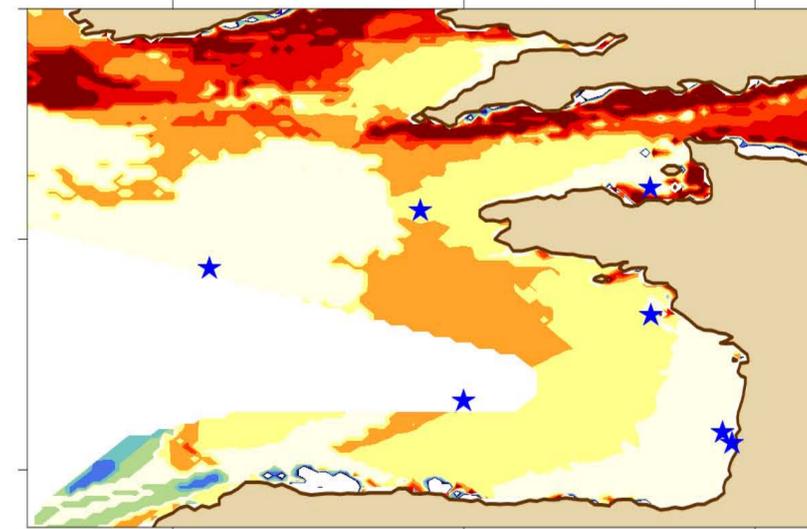
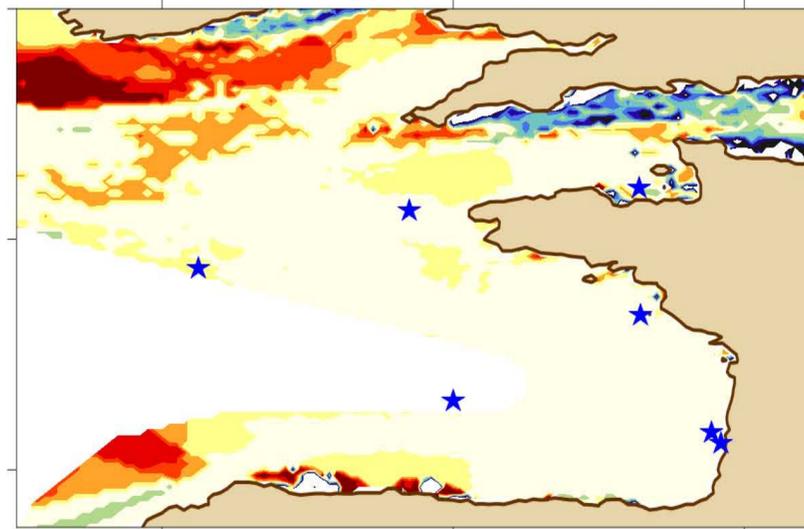
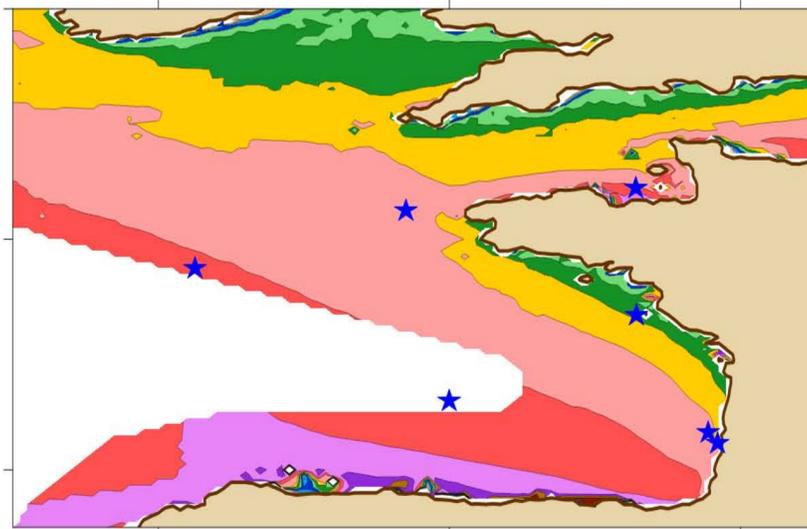


52°N

48°N

44°N

BoBWA Forecast



52°N

48°N

44°N

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E

-9°E -5°E -1°E



**Centre scientifique et technique
Service DRP/R3C**

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34