

[illegible]


 Liberté • Égalité • Fraternité
 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE


 Ministère
 de l'écologie, de l'énergie,
 du développement durable
 et de l'aménagement
 du territoire

Direction Départementale de
 l'Équipement de la Réunion

HOULREU - Quantification de la houle centennale de référence sur les façades littorales de La Réunion

BRGM/RP-57829-FR

Décembre 2009

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2009 09RISY01

Pedreros R., Lecacheux S., Le Cozannet G., Blangy A. et De la Torre Y.

avec la collaboration de Quetelard H. (Météo-France)



Vérificateur :

Nom : C. OLIVEROS

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : J.L. NEDELLEC

Date :

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 9001:2000.



Mots clés : Houle cyclonique, houle australe, alizés, Réunion, modélisation numérique, houle centennale

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

Pedrerros R., Lecacheux S., Le Cozannet G., Blangy A. et De la Torre Y., (2009).
« HOULREU » Quantification de la houle centennale de référence sur les façades littorales de La Réunion. BRGM/RP -57829-FR, 119 p., 93 fig., 14 tab.

Synthèse

Le cyclone GAMEDE et les houles de tempête de mai 2007 ont rappelé la forte vulnérabilité des littoraux de La Réunion aux aléas côtiers (érosion, submersion). Or, il n'existe pas de document de prévention (PPR) intégrant les risques côtiers. Dans ce contexte, la DDE souhaite mettre en place une démarche permettant la caractérisation et la cartographie des aléas côtiers sur le territoire réunionnais.

Les houles, en particulier cycloniques, sont responsables de la plupart des dommages liés à la mer. Elles n'ont cependant fait l'objet que de peu d'études à La Réunion, notamment en terme de modélisation. Leur connaissance actuelle n'est donc pas suffisamment « englobante » (couverture géographique limitée) pour pouvoir caractériser les aléas induits sur l'ensemble de l'île.

Cette étude, cofinancée par l'Etat et la dotation de Service Public du BRGM, a pour objectif la modélisation de la houle sur l'ensemble de l'île et la définition des houles centennales de référence sur chaque façade littorale de l'île, donnée indispensable à l'estimation et à la cartographie de l'aléa submersion marine.

Deux approches différentes sont appliquées pour l'analyse des houles cycloniques et des houles non cycloniques (australes et d'alizés). Afin de prendre en compte les différences d'exposition aux houles des franges littorales de l'île, celle-ci est découpée en 4 façades principales respectant les limites communales.

Les résultats font apparaître les houles de référence suivantes :

- les façades Nord et Est ainsi qu'une partie des façades Ouest (au nord de la Pointe des Aigrettes) et Sud (au nord de la Pointe de la Table) sont sous l'influence des houles cycloniques, **Dina** étant l'évènement de référence avec une période de retour centennale et une hauteur significative au large de l'ordre de 22 m au nord et 20 m à l'est ;
- le reste des façades Ouest et Sud est en revanche plus impacté à la côte par les **houles australes** dont la hauteur significative centennale a été évaluée à 7m au large.

Bien qu'estimées moins impactantes à la côte, des houles de référence secondaires (Pseudo-Géralda et Hollanda) sont également indiquées.

Compte tenu de la présence de récif corallien et/ou de l'orientation de la houle cyclonique très oblique sur certaines façades, l'utilisation des formulations paramétriques de « wave run-up » pour l'évaluation des submersions marines devra être considérée avec précaution. Dans ces cas précis, la modélisation « vagues à vagues » en faible profondeur peut être envisagée.

Sommaire

1. Introduction	13
2. Houle et aléas côtiers à La Réunion	15
2.1. LES TYPES DE HOULE A LA REUNION.....	15
2.2. ALEAS COTIERS A LA REUNION	16
3. Methodologie et données	19
3.1. DEMARCHE GENERALE.....	19
3.2. DONNEES ET OUTILS.....	20
3.2.1. Description du modèle de houle SWAN	20
3.2.2. Données bathymétriques et construction des MNT	22
3.2.3. Données sur les cyclones.....	24
3.2.4. Données des houlographes.....	24
3.2.5. Données pour le calcul des houles centennales (australes et d'alizés) ...	25
4. Méthodologie et validation de la modélisation des houles cycloniques.....	27
4.1. APPROCHE GENERALE	27
4.2. CONSTRUCTION DES CHAMPS DE VENT CYCLONIQUES	28
4.3. IMPLANTATION DU MODELE DE HOULE CYCLONIQUE	31
4.4. VALIDATION DES HOULES SIMULEES POUR GAMEDE ET DINA GRACE AUX DONNEES DES HOULOGRAPHES	32
4.4.1. Gamède	32
4.4.2. Dina	38
5. Reconstitution des houles cycloniques retenues	43
5.1. DINA (JANVIER 2002).....	43
5.2. HOLLANDA (FEVRIER 1994).....	45
5.3. COLINA (JANVIER 1993)	48
5.4. FIRINGA (JANVIER 1989).....	51

5.5. COMPARAISON AVEC L'ETUDE DE DHI (2007)	54
5.6. RECONSTITUTION DE CYCLONES FICTIFS (OU PSEUDO-CYCLONES) ...	56
5.6.1. Pseudo-Geralda	57
5.6.2. Pseudo-Hary	59
5.7. ANALYSE PAR FAÇADE DES SITUATIONS DE HOULE CYCLONIQUE LES PLUS IMPACTANTES	61
5.7.1. Façade nord	61
5.7.2. Façade sud	64
5.7.3. Façade ouest	65
5.7.4. Façade est	68
5.8. CONCLUSIONS SUR LES HOULES CYCLONIQUES.....	72
6. Houles non cycloniques	75
6.1. JUSTIFICATION.....	75
6.1.1. Exemple de houles australes extrêmes	75
6.1.2. Exemple de houles d'alizés extrêmes	75
6.2. METHODOLOGIE ET VALIDATIONS.....	79
6.2.1. Méthode	79
6.2.2. Validation des simulations.....	80
6.3. HOULE AUSTRALE	81
6.3.1. Classification des états de mer au point « Sud » (22°S 55°E)	81
6.3.2. Calcul des valeurs extrêmes	83
6.3.3. Choix de scénarios centennaux possibles	86
6.3.4. Propagation des houles à la côte	87
6.4. HOULES D'ALIZES	100
6.4.1. Classification des états de mer au point « Est » (21°S 56°15'E)	100
6.4.2. Calcul des valeurs extrêmes	102
6.4.3. Choix de scénarios centennaux possibles	105
6.4.4. Propagation de la houle d'alizés du 12/07/2006 à la côte.....	106
6.4.5. Conclusion partielle.....	106
6.5. CONCLUSIONS SUR LES HOULES NON CYCLONIQUES.....	109
7. Synthèse par façade	111
7.1. DETERMINATION DES HOULES DE REFERENCE	111

7.2. CARACTERISTIQUES DES HOULES DE REFERENCE AU LARGE	113
8. Conclusion	115
9. Bibliographie.....	117

Liste des Figures

Figure 1. Les différents régimes de houle à La Réunion (Météo France, 2009).	15
Figure 2. Représentation schématique du niveau marin extrême sur la côte.	17
Figure 3. Couverture des sondes bathymétriques réalisées par le SHOM.	23
Figure 4. MNT utilisés pour la modélisation de la houle dans cette étude.	23
Figure 5. Positionnement des Houlographes opérationnels à La Réunion	25
Figure 6. Schéma représentatif d'un cyclone dans l'hémisphère sud (Météo-France).	27
Figure 7. Variations du profil de la vitesse radiale en fonction de B (figure issue de Holland, 1980).	29
Figure 8. Trajectoire du cyclone Gamède (Météo-France).	33
Figure 9. Vent cyclonique de Gamède le 25/02/2007 (haut) et le 27/02/2007(bas).	34
Figure 10. Houle cyclonique de Gamède simulée avec SWAN au rang 1 avec M2 le 25/02/2007 à 0h00 (haut) et le 27/02/2007 à 12h (bas)	35
Figure 11. Comparaison de la hauteur significative des vagues enregistrée par les houlographes de Port Est (bas) et Pointe du Gouffre (haut) et générées par SWAN (resp aux rangs R2O et R2N) pendant le cyclone Gamède.	36
Figure 12. Comparaison de la période des vagues enregistrée par les houlographes de Port Est (bas) et Pointe du Gouffre (haut) et générées par SWAN (resp aux rangs R2O et R2N) pendant le cyclone Gamède.....	37
Figure 13. Trajectoire de Dina du 18 au 25 janvier 2002.....	38
Figure 14. Champ de vent de Dina (modèle BRGM : M1 en haut et M2 en bas).	39
Figure 15. Comparaison de la hauteur significative des vagues enregistrées par les houlographes de Port Est (bas) et Pointe du Gouffre (haut) et générées avec les vents paramétriques (M1 et M2) et SWAN pendant le cyclone Dina.	40
Figure 16. Comparaison de la houle cyclonique de Dina le 22/01/2002 à 22h après le pic de houle (approximativement vers 18h00) simulée avec SWAN (M1 en bas et M2 en haut).	41
Figure 17. Hauteur significative et direction de propagation (haut) et période de pic (bas) des vagues calculées avec SWAN au Rang 1 pour le cyclone Dina le 22/01/2002 à 14h	44
Figure 18. Hauteur significative maximum générée en chaque point par le cyclone Dina autour de La Réunion du 17/01/02 à 18h au 25/01/02 à 12h	45
Figure 19. Trajectoire de Hollanda du 10 au 13 février 1994	45

Figure 20. Champ de vent cyclonique de Hollanda le 11/02/1994 à 3h00 (modèle BRGM, M2).....	46
Figure 21. Hauteur significative et direction de propagation (haut) et période de pic (bas) des vagues calculées avec SWAN au Rang 1 pour le cyclone Hollanda le 11/02/1994 à 05h.....	47
Figure 22. Hauteur significative maximum générée en chaque point par le cyclone Hollanda autour de La Réunion du 09/02/94 à 06h au 13/02/94 à 18h.	48
Figure 23. Trajectoire de Colina du 15 au 20 janvier 1993	48
Figure 24. Champ de vent cyclonique de Colina le 19/01/1993 à 12h (modèle BRGM, M1).....	49
Figure 25. Hauteur significative et direction de propagation (haut) et période de pic (bas) des vagues calculées avec SWAN au Rang 1 pour le cyclone Colina le 19/01/1993 à 14h TU.....	50
Figure 26. Hauteur significative maximum générée en chaque point par le cyclone Colina autour de La Réunion du 13/01/1993 à 06h au 21/01/93 à 00h.	51
Figure 27. Trajectoire de Firinga du 25 janvier au 1 ^{er} février 1989	52
Figure 28. Champ de vent cyclonique de Firinga le 29/01/1989 à 6h TU (modèle BRGM M1).....	52
Figure 29. Hauteur significative et direction de propagation (haut) et période de pic (bas) des vagues calculées avec SWAN au Rang 1 pour le cyclone Firinga le 29/01/1989 à 07h TU.....	53
Figure 30. Hauteur significative maximum générée en chaque point par le cyclone Firinga autour de La Réunion du 25/01/89 à 00h au 02/02/89 à 06h.....	54
Figure 31. Positionnement du point de référence C de l'étude de DHI de 2007.....	55
Figure 32. Translation de la trajectoire de Geralda (en février 1994).	57
Figure 33. Champ de vent cyclonique du cyclone fictif pseudo-Geralda le 01/02/1994 à 00h.....	57
Figure 34. Haut : Hauteur significative et direction des vagues calculées avec SWAN au Rang 1 pour le cyclone pseudo-Géralda le 01/02/1994 à 00h. Bas : Hauteur significative maximale générée en chaque point du domaine lors du passage de pseudo-Geralda.	58
Figure 35. Translation de la trajectoire de Hary (en mars 2002).....	59
Figure 36. Champ de vent cyclonique du cyclone pseudo-Hary le 10/03/2002 à 00h.....	59
Figure 37. Haut : Hauteur significative et direction des vagues calculées avec SWAN au Rang 1 pour le cyclone fictif pseudo-Hary le 09/03/2002 à 22h . Bas : Hauteur significative maximum générée en chaque point du domaine par le cyclone fictif pseudo-Hary autour de La Réunion.	60
Figure 38. Haut : Hauteur significative de vague maximale générée en chaque point de la façade nord tous cyclones confondus (les isobathes indiquent 20m et 100m de fond). Bas : code couleur indiquant le cyclone ayant généré les vagues les plus hautes (bleu : Dina, jaune : Colina, vert : Firinga, rouge : Hollanda).	62

Figure 39. Hauteur significative maximale des vagues calculée avec tous les cyclones de référence par 20m de fond le long de la façade nord. Les positions des points sont indiqués Figure 38.....	62
Figure 40. Hauteur et direction des vagues engendrées par Dina au moment le plus critique pour la façade nord, le 22/01/02 à 14h. L'isobathe rouge indique 50 mètres de profondeur.....	63
Figure 41. Hauteur significative des vagues par 20m de fond le long de la façade nord (bleu : hauteur maximum générée avec les cyclones de référence, vert : hauteur maximum générée par pseudo-Hary, rose : hauteur maximum générée par pseudo-Géralda). Les positions des points sont indiquées Figure 38.....	63
Figure 42. Haut : Hauteur significative de vague maximale générée en chaque point de la façade sud tous cyclones confondus (les isobathes indiquent 20m et 100m de fond). Bas : code couleur indiquant le cyclone ayant généré les vagues les plus hautes (bleu : Dina, jaune : Colina, vert : Firinga, rouge : Hollanda).....	64
Figure 43. Hauteur significative maximale des vagues calculée avec tous les cyclones de référence par 20m de fond le long de la façade sud. Les positions des points sont indiqués Figure 42.....	65
Figure 44. Hauteur et direction des vagues engendrées par Hollanda au moment le plus critique pour la façade sud, le 11/02/94 à 5h. L'isobathe rouge indique 50 mètres de profondeur.....	65
Figure 45. Gauche : Hauteur significative de vague maximale générée en chaque point de la façade ouest tous cyclones confondus (les isobathes indiquent 20m et 100m de fond). Droite : couleur indiquant le cyclone ayant généré les vagues les plus hautes (bleu : Dina, jaune : Colina, vert : Firinga, rouge : Hollanda).....	66
Figure 46. Rapport en % des hauteurs des vagues calculées avec les méthodes M1 et M2 pour Dina (rapport = $(Hs(M1)-Hs(M2)) / Hs(M2)$)	66
Figure 47. Gauche : Hauteur significative de vague maximale générée en chaque point de la façade ouest avec Dina et Hollanda (les isobathes indiquent 20m et 100m de fond). Droite : code couleur indiquant le cyclone ayant généré les vagues les plus hautes (bleu : Dina, rouge : Hollanda).	67
Figure 48. Bleu foncé : Hauteur significative maximale des vagues calculée avec tous les cyclones de référence par 20m de fond le long de la façade ouest. Bleu clair : Hauteur significative maximale des vagues calculée avec les cyclones Dina et Hollanda par 20m de fond sur la façade ouest. Les zones grisées correspondent aux deux zones hachurées sur la Figure 45. Les positions des points sont indiqués Figure 45.....	68
Figure 49. Hauteur et direction des vagues engendrées par Hollanda le 11/02/94 à 18h (bas) et Dina le 22/01/02 à 16h (haut) aux moments les plus critiques pour la façade ouest. L'isobathe rouge indique 50 mètres de profondeur.	69
Figure 50. Hauteur significative de vague maximale générée en chaque point de la façade est tous cyclones confondus (les isobathes indiquent 20m et 100m de fond). Droite : code couleur indiquant le cyclone ayant généré les vagues les plus hautes (bleu : Dina, jaune : Colina, vert : Firinga, rouge : Hollanda).....	70
Figure 51. Hauteur significative des vagues par 20m de fond le long de la façade est. Les positions des points sont indiqués Figure 50	70

Figure 52. Hauteur et direction des vagues engendrées par Dina au moment le plus critique pour la façade est, le 22/01/02 à 14h. L'isobathe rouge indique 50 mètres de profondeur.	71
Figure 53. Hauteur significative des vagues par 20m de fond le long de la façade est (bleu : hauteur maximum générée avec les cyclones de référence, vert : hauteur maximum générée par pseudo-Hary, rose : hauteur maximum générée par pseudo-Géralda). Les positions des points sont indiquées Figure 50	71
Figure 54 – Synthèse des cyclones(haut) et pseudo-cyclones (bas) impactants par façade (Hs par 20 m de fond et zones de forte incidence de la houle).....	73
Figure 55. Position des cyclones modélisés dans cette étude sur l'analyse en valeurs extrêmes réalisées par DHI au point C (cf. Figure 31)	74
Figure 56. Exemple de situation de houles australes extrêmes : hauteur significatives des vagues, force (proportionnelle à la longueur des flèches) et direction du vent du 10 au 13 mai 2007 dans l'océan Indien ; Données : Wavewatch3 de la NOAA.	76
Figure 57. Exemple de situation de houles australes extrêmes : hauteur significatives des vagues, force (proportionnelle à la longueur des flèches) et direction du vent du 13 au 16 mai 2007 dans l'océan Indien ; Données : Wavewatch3 de la NOAA.	77
Figure 58. Exemple de situation conduisant à de fortes houles d'alizés : hauteur significatives des vagues, force (proportionnelle à la longueur des flèches) et direction du vent du 9 et 13 juillet 2006 dans l'océan Indien ; Données : Wavewatch3.	78
Figure 59. Position des points NWW3 considérés dans cette étude.	79
Figure 60. Saisonalité de la houle au point « sud » (cf. Figure 56).	82
Figure 61. Répartition des valeurs des paramètres de la classe de houle australe ayant le Hs le plus fort au sein du jeu de données complet. (distributions Hs, T et Directions : en bleu: jeu de données complet ; en rouge: classe représentée)	83
Figure 62. Ajustement d'une distribution de Weibull et de Gumbel sur les extrêmes de blocs de 2 mois pour les houles australes du point « sud ».....	84
Figure 63. Ajustement d'une distribution GEV par la méthode des moments pondérés (PWM) sur les extrêmes de blocs de 2 mois pour les houles australes du point « sud ».....	84
Figure 64. Ajustement d'une distribution GEV par maximisation de la fonction de vraisemblance sur les extrêmes de blocs de 1 mois pour les houles australes du point « sud ».	85
Figure 65. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 01/08/2001 (rang 1).	88
Figure 66. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 01/08/2001 (rang 2 – côte sud).....	88
Figure 67. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 01/08/2001 (rang 2 – côte ouest).....	89
Figure 68. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 01/08/2001 (rang 2 – côte est).....	90
Figure 69. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 01/08/2003 (rang 1).	91
Figure 70. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 01/08/2003 (rang 2 –côte sud).....	91

Figure 71. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 01/08/2003 (rang 2 –côte ouest).	92
Figure 72. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 01/08/2003 (rang 2 –côte est).	93
Figure 73. Fin d'un scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 02/08/2003 (rang 1).	94
Figure 74. Fin d'un scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 02/08/2003 (rang 2 – côte sud).	94
Figure 75. Fin d'un scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 02/08/2003 (rang 2 – côte ouest).	95
Figure 76. Fin d'un scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 02/08/2003 (rang 2 – côte est).	96
Figure 77. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 13/05/2007 (rang 1).	97
Figure 78. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 13/05/2007 (rang 2 – côte sud).	97
Figure 79. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 13/05/2007 (rang 2 – côte ouest).	98
Figure 80. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 13/05/2007 (rang 2 – côte est).	99
Figure 81. Illustration de la classification automatique du cyclone Dina (Janvier 2002) au point «Est» ; la classe n°3 correspond aux événements de tempêtes et de cyclones tropicaux.	101
Figure 82. Saisonalité de la houle au point «Est».	102
Figure 83. Répartition des valeurs prises par les paramètres de la houle correspondant à la classe de houle d'alizés (En bleu : jeu de données complet ; en rouge : classe correspondant aux houles d'alizés)	102
Figure 84. Ajustement d'une distribution de Weibull et de Gumbel sur les extrêmes de blocs de 2 mois pour les houles d'alizés du point « Est ».	103
Figure 85. Ajustement d'une distribution GEV par la méthode des moments pondérés (PWM) sur les extrêmes de blocs de 1 mois pour les houles d'alizés du point « Est ».	104
Figure 86. Ajustement d'une distribution GEV par maximisation de la fonction de vraisemblance sur les extrêmes de blocs de 2 mois pour les houles d'alizés du point « Est ».	104
Figure 87. Scénario de houle d'alizés centennale basé sur la situation du 12/07/2006 (rang 1).	107
Figure 88. Scénario de houle d'alizés centennale basé sur la situation du 12/07/2006 (rang 2 – côte est).	107
Figure 89. Scénario de houle d'alizés centennale basé sur la situation du 12/07/2006 (rang 2 – côte nord).	108
Figure 90. Scénario de houle d'alizés centennale basé sur la situation du 12/07/2006 (rang 2 – côte sud).	108

Figure 91. Synthèse des houles australes (haut) et d'alizés (bas) impactants par façade (Hs par 20 m de fond et zones de forte incidence de la houle).....	110
Figure 92 –Code couleur indiquant le type de houle ayant généré les vagues les plus hautes toute houle confondue (bleu : cyclonique, rouge : alizé, vert : australe).	112
Figure 93 – Synthèse des houles de référence et caractéristiques au large.....	113

Listes des Tableaux

Tableau 1. Processus pouvant être modélisés par SWAN.	22
Tableau 2. Houlographes de la DDE à La Réunion	25
Tableau 3. Paramètres de calcul au R0.	31
Tableau 4. Paramètres du calcul au R1.	31
Tableau 5. Paramètres de calcul pour les 4 façades R2N, R2S, R2E, R2O.	32
Tableau 6. Comparaison de houles significatives simulées par DHI et par le BRGM au point C.	55
Tableau 7. Périodes de retour associées aux houles cycloniques simulées par le BRGM (Gamède, Dina, Firinga, Hollanda, Colina).	74
Tableau 8. Climatologie de la houle au point NWW3 « Sud » (22°S 55°E).	82
Tableau 9. Houles australes décennales et centennales estimées par la méthode des blocs maxima pour le point NWW3 « Sud » (22°S 55°E).	85
Tableau 10. événements de houle australe pour lesquels NWW3 donne des hauteurs significatives de houle supérieures à 5m.....	86
Tableau 11. Climatologie de la houle au point NWW3 « Est» (21°S 56°15'E).	101
Tableau 12. Houles d'alizés décennales et centennales estimées par la méthode des blocs maxima pour le point NWW3 « Est » (21°S 56°15'E).	105
Tableau 13. Événements de houle alizés pour lesquels NWW3 donne des hauteurs significatives de houle supérieures à 4.5m.....	106
Tableau 14 – Caractéristiques au large des houles de référence par façade.....	114

1. Introduction

Le cyclone GAMEDE et les houles de tempête de mai 2007 ont rappelé la forte vulnérabilité des littoraux de La Réunion aux aléas côtiers (érosion, submersion). Or, il n'existe pas de document de prévention (PPR) intégrant les risques côtiers. Dans ce contexte, la DDE souhaite mettre en place une démarche permettant la caractérisation et la cartographie des aléas côtiers sur le territoire réunionnais.

Les houles, en particulier cycloniques, sont responsables de la plupart des dommages liés à la mer. Elles n'ont cependant fait l'objet que de peu d'études à La Réunion, notamment en terme de modélisation¹. Leur connaissance actuelle n'est donc pas suffisamment « englobante » (couverture géographique limitée) pour pouvoir caractériser les aléas induits sur l'ensemble de l'île.

Cette étude, cofinancée par l'Etat et la dotation de Service Public du BRGM, apparaît comme une étape intermédiaire nécessaire à la caractérisation et la cartographie des aléas côtiers. **Elle a pour objectif la modélisation de la houle (hauteur de vague, période et direction) sur l'ensemble de l'île et la définition des houles centennales de référence sur chaque façade littorale de l'île, donnée indispensable à l'estimation et à la cartographie de l'aléa submersion.**

Afin de prendre en compte les différences d'expositions aux houles des franges littorales de l'île, celle-ci sera découpée en 4 façades principales pour l'étude, à savoir nord, sud, est et ouest, respectant les limites communales².

L'île de La Réunion, située dans le sud-ouest de l'Océan Indien, est exposée à trois types de houle : les houles d'alizés, les houles australes et les houles cycloniques. Deux approches différentes sont appliquées pour l'analyse des houles cycloniques et des houles non cycloniques (australes et d'alizés). Un partenariat avec Météo-France (assistance) a, en particulier, été mis en œuvre sur la méthode de génération des champs de vents cycloniques.

Le contexte de l'étude, ainsi que la méthodologie générale et les données utilisées pour le projet seront abordés dans un premier temps. On s'attachera ensuite à l'étude des houles cycloniques puis à l'étude des houles non cycloniques (alizés et australes). Finalement, une synthèse des deux approches sera réalisée afin de déterminer les événements extrêmes à prendre en compte dans les PPR submersions marines sur chaque façade de l'île de La Réunion.

¹ Etudes locales sur la route du littoral réalisées par SOGREAH en 1997 et également par DHI pour EGIS EAU en 2007 ; étude sur le littoral sud-sud-ouest dans le cadre de l'identification des sites potentiels d'exploitation de la houle réalisée par BCEOM en 2007.

² Les PPR sont réalisés à l'échelle communale.

Le BRGM remercie Pierre Ailliot (Université Bretagne Occidentale) et Valérie Monbet (Université Bretagne Sud) pour la mise à disposition de la boîte à outils METIS et pour leurs conseils concernant la classification des états de mer.

2. Houle et aléas côtiers à La Réunion

2.1. LES TYPES DE HOULE A LA REUNION

La Réunion est exposée à trois types de houle (cf. Figure 1) dont les plus fréquentes demeurent les houles d'alizés, de secteur dominant sud-est.

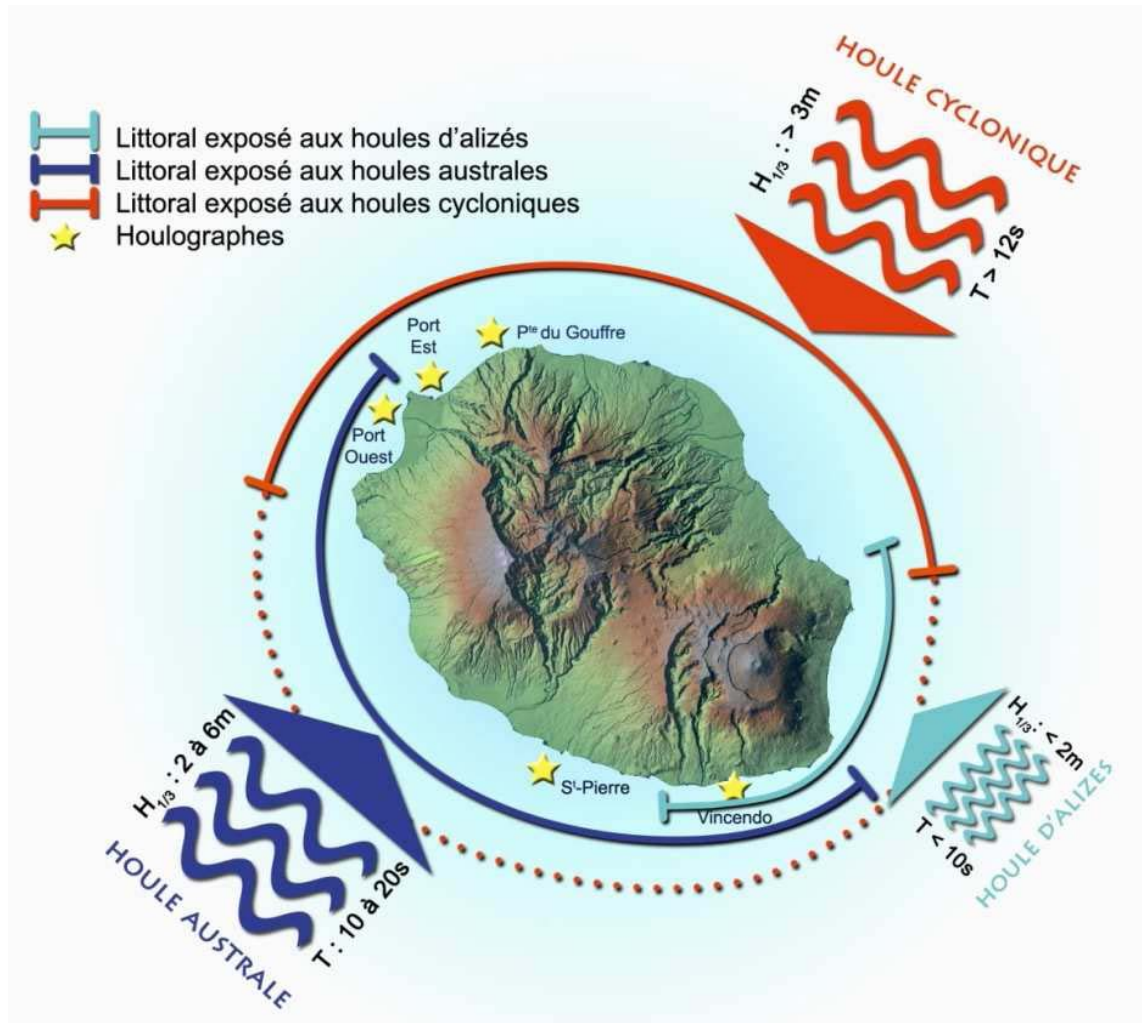


Figure 1. Les différents régimes de houle à La Réunion (Météo France, 2009).

Les houles d'alizés présentent une hauteur significative qui dépasse rarement 2 m et une période comprise entre 5 et 10 secondes sur la côte au vent. Elles sont générées par les alizés, vents caractéristiques de la zone intertropicale. C'est pendant l'hiver austral, période d'activité intense des alizés, que l'on observe les houles d'alizés

maximales. Leurs directions principales sont alors de secteur est à sud-est. Connus pour leur régularité, les alizés peuvent parfois être assez forts et engendrer des houles exceptionnelles de l'ordre de 5 mètres.

Les houles australes, de périodes relativement longues (périodes comprises entre 10 et 20 secondes), présentent des hauteurs moyennes de l'ordre de 3 à 4 m. Elles proviennent de tempêtes formées à 3000 km au large, dans la zone tempérée de l'hémisphère Sud et atteignent les rivages réunionnais 15 à 25 jours par an. Par leur énergie, ces houles sont particulièrement érosives et peuvent également être à l'origine d'importantes submersions sur les côtes sud et ouest (Cazes-Duvat et Paskoff, 2004). Les réunionnais gardent en mémoire les houles australes du 12 mai 2007, atteignant une valeur maximale de 11,3 mètres (6,4 m pour la hauteur significative³) à 19h selon les données de la DDE du houlographe de Saint Pierre.

Les houles cycloniques correspondent, quant à elles, à des épisodes très énergétiques, concentrés sur quelques jours par an (de 48 à 72 h), entre novembre et mars (Cazes-Duvat et Paskoff, 2004). Dépendantes de la trajectoire des cyclones, ces houles s'observent le plus souvent dans les secteurs nord-est à nord-ouest de l'île. Elles peuvent atteindre une hauteur maximale d'une dizaine de mètres (moyenne de l'ordre de 5 à 7 m).

2.2. ALEAS COTIERS A LA REUNION

La méthodologie pour l'évaluation et la cartographie des aléas côtiers à La Réunion a été mise en place en 2008 par le BRGM pour la DDE (De La Torre et Louze, 2008).

Pour rappel, le niveau atteint par la mer sur le rivage correspond à la superposition de la marée astronomique avec 1/ la surcote météorologique (effets de la pression atmosphérique et du vent), 2/ la surcote moyenne liée aux vagues (« wave set-up ») et 3/ le « swash » ou jet de rive (correspondant à l'oscillation de la nappe d'eau sur le rivage due au déferlement des vagues).

Trois principaux facteurs déterminent donc l'élévation extrême atteinte par la mer sur le rivage (Figure 2) :

- **La marée astronomique** : c'est la variation du niveau de la mer due à l'action gravitationnelle de la lune et du soleil. Elle est caractérisée par un niveau moyen, un niveau de basse-mer (minimum du cycle de marée) et pleine mer (maximum du cycle de marée).
- **Les conditions météorologiques** : la pression atmosphérique et le vent génèrent une **surcote atmosphérique (« storm surge »)** lors du passage d'un système dépressionnaire (cyclone ou tempête tropicale). La chute de pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d'eau, c'est le

³ La hauteur significative (Hs ou H1/3) correspond à la moyenne du tiers des vagues les plus hautes. Cette valeur est la plus couramment utilisée pour caractériser la hauteur la plus représentative de la houle.

phénomène de baromètre inverse (« barometric set-up »). Il s'agit d'une relation linéaire : la perte d'1 hPa équivaut à une élévation d'1 cm du plan d'eau. Il s'ajoute à l'effet du vent (tension de radiation) lorsqu'il pousse les masses d'eaux à la côte.

- **La houle** : elle génère deux phénomènes, une **surcote moyenne** appelée « **wave set-up** » et une **variation du niveau d'eau sur la côte**, appelée couramment « **swash** » ou **jet de rive**. La **surcote globale liée à la houle** (« **wave set-up** » + « **swash** ») est couramment appelée « **wave run-up** ».

Le « **wave set-up** » est la déformation moyenne du plan d'eau près de la côte suite au déferlement des vagues.

Le « **swash** » ou **jet de rive** correspond à l'oscillation de la nappe d'eau sur le rivage (au dessus et en dessous du niveau moyen de la mer : marée astronomique + surcote moyenne totale) sous l'impulsion des vagues lors du déferlement.

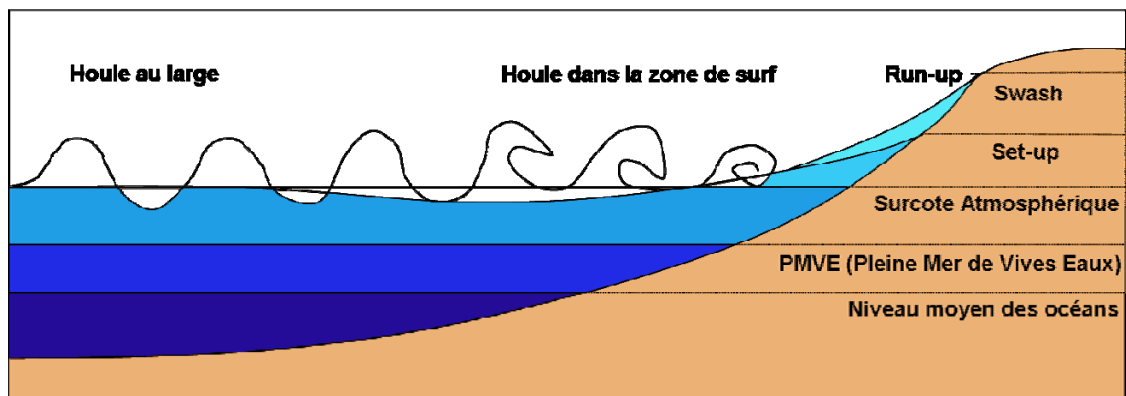


Figure 2. Représentation schématique du niveau marin extrême sur la côte.

Les surcotes dues à la houle sont directement liées aux conditions de houle (hauteur, longueur d'onde et direction) ainsi qu'à la morphologie (pente) et à la granulométrie (taille et rugosité) de la plage ou de la structure.

Les formules paramétriques de « wave run-up »⁴ concernent les cordons sédimentaires (plages, cordon de galet) et ne s'appliquent pas sur les « points durs » et les pentes sub-verticales représentées par les formations rocheuses, les récifs coralliens ou les aménagements. Elles nécessitent la connaissance de la hauteur significative de la houle au large, de la longueur d'onde de la houle au large et de la pente moyenne de la plage. Le phénomène de réfraction bathymétrique n'est pas pris en compte, tel quel, dans ces formulations. La direction de la houle au large doit donc être perpendiculaire au rivage.

⁴ Une analyse bibliographique des différentes formulations est donnée dans De La Torre et Louze (2008).

La modélisation « vague à vague » en faible profondeur nécessite quant à elle un MNT et un MNE topo-bathymétrique de résolution suffisamment bonne (1 à 5 m). Le modèle est forcé par des conditions de houle (H_s , T_p , $Dirp$)⁵ aux limites du domaine considéré.

Suite à la présente étude et grâce au projet Litto3D, la connaissance des conditions de houle centennale sur chaque façade de l'île permettra d'évaluer, soit par des formules paramétriques, soit par les techniques de modélisation « vague à vague » en faible profondeur, les cotes de submersions marines pour les PPR concernés.

⁵ Hauteur significative, période de pic, direction de pic.

3. Methodologie et données

3.1. DEMARCHE GENERALE

Cette étude a pour objectif de déterminer les caractéristiques des vagues extrêmes sur le pourtour de l'île de La Réunion. Celles-ci serviront à des études ultérieures visant à évaluer les cotes de submersions marines.

La zone d'étude concerne l'ensemble de l'île de La Réunion. Cependant, afin de prendre en compte les différences d'expositions aux houles des franges littorales de l'île, la zone d'étude est découpée en 4 façades principales, à savoir Nord, Sud, Est et Ouest. En effet, s'il ne fait pas de doute que les houles cycloniques extrêmes sont les régimes de vagues les plus préjudiciables sur la façade nord de l'île, il semble nécessaire d'estimer l'influence des houles australes et cycloniques pour les façades sud et ouest de l'île et l'influence des houles d'alizés et cycloniques pour la façade est.

Les événements de référence au large de chaque façade littorale sont dans un premier temps déterminés à partir de l'analyse de cyclones de référence d'une part, et en se référant aux caractéristiques des vagues centennales (hauteur, direction et période) pour les houles australes et d'alizés d'autre part. Ensuite, ces différents événements sont propagés jusqu'à la côte (profondeur approximative de 20m) afin d'obtenir les houles de référence tout le long du littoral réunionnais.

La résolution spatiale des modèles globaux ne permettant pas de reproduire correctement les vagues générées par les cyclones et les tempêtes tropicales (sous-estimation des hauteurs), deux approches différentes sont appliquées à l'étude des houles cycloniques et des houles non cycloniques.

Pour les houles cycloniques, deux démarches sont utilisées :

1. la première consiste à reconstruire des champs de vents de cyclones historiques de référence, puis à générer et propager ces houles à l'aide de l'outil SWAN et de données bathymétriques;
2. la seconde consiste à proposer des pseudo-cyclones (translation de la trajectoire de cyclones historiques de façon à impacter le plus possible les côtes réunionnaises), à en construire les champs de vents, puis à générer et propager ces houles à l'aide de l'outil SWAN et de données bathymétriques

Pour les houles australes et d'alizés, la démarche peut être divisée en 3 étapes :

1. détermination d'une hauteur de houle centennale à partir de l'analyse de données de modèles océaniques globaux ;

2. reconstruction d'événements centennaux possibles à partir d'un ou de plusieurs événements de référence ;
3. propagation de la houle de ces événements centennaux possibles à l'aide de l'outil SWAN et de données bathymétriques

Les outils et données communs à ces deux méthodologies sont décrits dans ce chapitre. Il s'agit de l'outil de modélisation des vagues SWAN et des données bathymétriques des zones d'étude. En revanche, d'autres outils sont spécifiques à l'une ou l'autre de ces méthodologies, notamment la reconstruction de cyclones paramétriques pour les houles cycloniques, la classification des états de mer et l'analyse statistique des événements extrêmes pour l'étude des houles australes et d'alizés. Ces méthodes spécifiques, ainsi que les données ayant servi à leur validation, sont décrites dans les chapitres 4 et 5.

3.2. DONNEES ET OUTILS

3.2.1. Description du modèle de houle SWAN

Le modèle SWAN (Simulating WAVes Nearshore), développé à l'Université de Technologie de Delft (Pays-Bas), permet de calculer les paramètres décrivant la houle au niveau des zones côtières, des lacs et des estuaires, à partir de données de vent, de bathymétrie et de courants. Une description détaillée du modèle est faite dans Booij et al. (2004). SWAN est basé sur l'équation spectrale de conservation de l'action de la houle qui est résolue suivant un schéma implicite en différences finies :

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}(c_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta N) = S/\sigma$$

(Équation 1)

avec $S = S_{in} + S_{nl} + S_{wc} + S_{bf} + S_{dib}$

$N(\sigma\theta)$	: Spectre de densité de l'action de la houle
σ	: Fréquence relative
θ	: Direction de la houle
S_{in}	: Action du vent
S_{nl}	: Interaction houle-houle non linéaire
S_{wc}	: Dissipation liée au moutonnement
S_{bf}	: Dissipation liée au frottement au fond
S_{dib}	: Dissipation liée au déferlement bathymétrique

c_x et c_y : vitesses de propagation de la houle dans l'espace (x et y).

c_σ et c_θ : vitesses de propagation de la houle dans l'espace spectral (σ , θ).

SWAN peut fonctionner en mode stationnaire (données de forçage constantes dans le temps) ou transitoire (données de forçage dépendantes du temps). Il est formulé en coordonnées cartésiennes (domaine de faible emprise) ou sphériques (domaine de grande emprise), le maillage pouvant être rectangulaire ou curviligne.

a) Processus pris en compte

SWAN modélise les processus de **propagation** suivants :

- Propagation à travers un espace géographique ;
- Gonflement de la houle ;
- Réfraction due à des variations spatiales du fond ou des courants ;
- Diffraction ;
- Blocage ou réflexion par des courants de retour ;
- Transmission à travers des obstacles, blocage ou réflexion à cause de ces obstacles.

SWAN modélise également les processus de **génération et de dissipation** dus à la houle :

- Génération par le vent ;
- Interactions houle – houle (quadruplets et triplets) ;
- Dissipation par moutonnement ;
- Dissipation par déferlement dû aux variations de profondeur ou aux courants ;
- Dissipation par frottement au fond.

SWAN ne doit pas être utilisé sur des domaines où les variations de profondeur sont importantes sur une échelle horizontale de quelques longueurs d'onde comme à proximité immédiate d'obstacles (jetées, brises lames) ou au niveau des ports.

b) Récapitulatif des propriétés du modèle

Les propriétés de SWAN et les phénomènes qu'il peut modéliser sont résumés dans le tableau suivant (Tableau 1).

Propriétés des modèles	SWAN
Base des formulations	Conservation de l'action de la houle
Domaine de propagation	360°
Théorie de la houle	Linéaire
Stationnaire ou transitoire	Stationnaire/Transitoire
Caractéristiques maillage	Différences finies, cartésien, sphérique, rectangulaire, curviligne
Densité maillage/longueur d'onde des vagues	Indépendant
Dépendance de la qualité des résultats/densité maillage	Faible

Réfraction	Oui
Diffraction	Oui (depuis déc. 2004)
Réflexion	Oui (ouvrages)
Gonflement	Oui
Déferlement	Battjes et Janssen (1978)
Interaction houle-courant	Oui
Interactions vague-vague	Triplet, quadruplet
Génération de la houle (Vent)	Modèles de Phillips, Miles/champs de vent homogènes ou hétérogènes
Dissipation énergie par frottements au fond	Modèle de Hasselman et al. (1973), Collins (1972), Madsen et al. (1988)
Dissipation énergie par moutonnement	Oui
Calcul de la surcote (set-up)	Oui (profil et zone)
Prise en compte d'obstacles	Modèle de Seelig

Tableau 1. Processus pouvant être modélisés par SWAN.

3.2.2. Données bathymétriques et construction des MNT

Les données bathymétriques utilisées dans cette étude proviennent du SHOM et de la base de données internationale SRTM30_PLUS DEM (Becker et al. 2009) :

- Données du SHOM : il s'agit des sondes bathymétriques réalisées et qualifiées par cet organisme. La résolution spatiale maximale de ces sondes est de l'ordre de 25-50m près de la côte. Ces données couvrent des profondeurs allant principalement de 10 à 200m de profondeur (Figure 3).
- SRTM30_PLUS : il s'agit d'un produit maillé à une résolution de $0.0083^\circ \times 0.0083^\circ$ (environ 1 km x 1 km) et couvrant l'ensemble du globe. Ce produit résulte de la compilation de données d'origine satellitale et de mesures hydrographiques.

Ces données ont été utilisées pour générer 3 types de MNT de résolutions et d'emprises différentes (Figure 4) :

- R0 : emprise du bassin océanique indien dédié au calcul des houles d'origine cyclonique (tient compte des sites de genèse et des trajectoires des cyclones). Ce rang est maillé à 10 km x 10 km à partir des données SRTM.
- R1 : emprise à l'échelle de l'île de La Réunion maillé à 1 km x 1 km en utilisant les données de SRTM.
- R2 : emprise pour chacune des façades (Nord, Est, Sud, Ouest). Ces grilles d'une maille de 100m x 100m ont été fabriquées à partir des sondes du SHOM en utilisant la méthode de krigeage pour l'interpolation (logiciel Surfer de Golden Software). Afin de ne pas rencontrer des difficultés dans l'application aux PPR, la délimitation des façades respecte les limites communales.

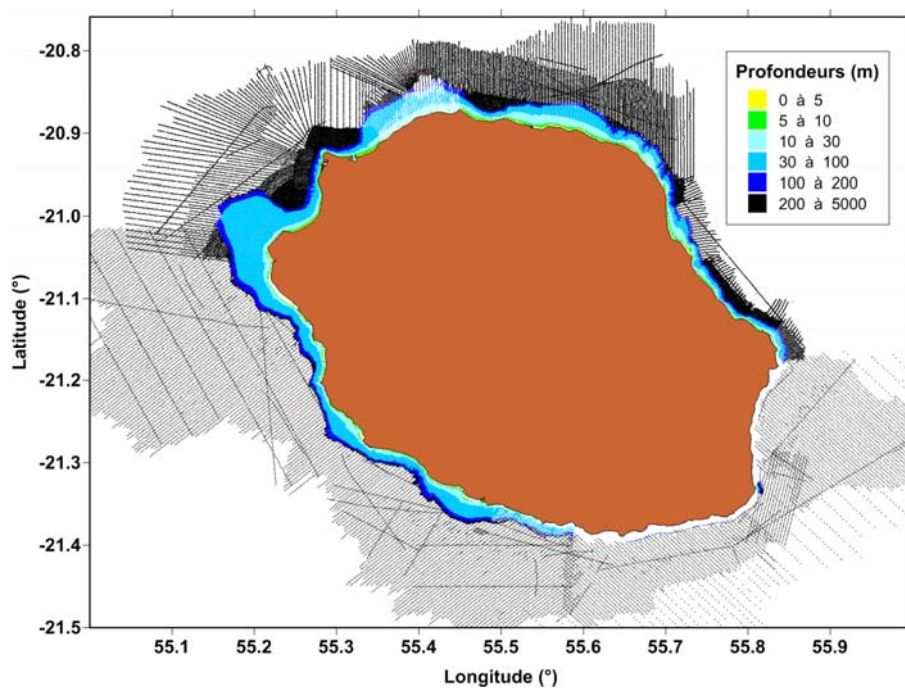


Figure 3. Couverture des sondes bathymétriques réalisées par le SHOM.

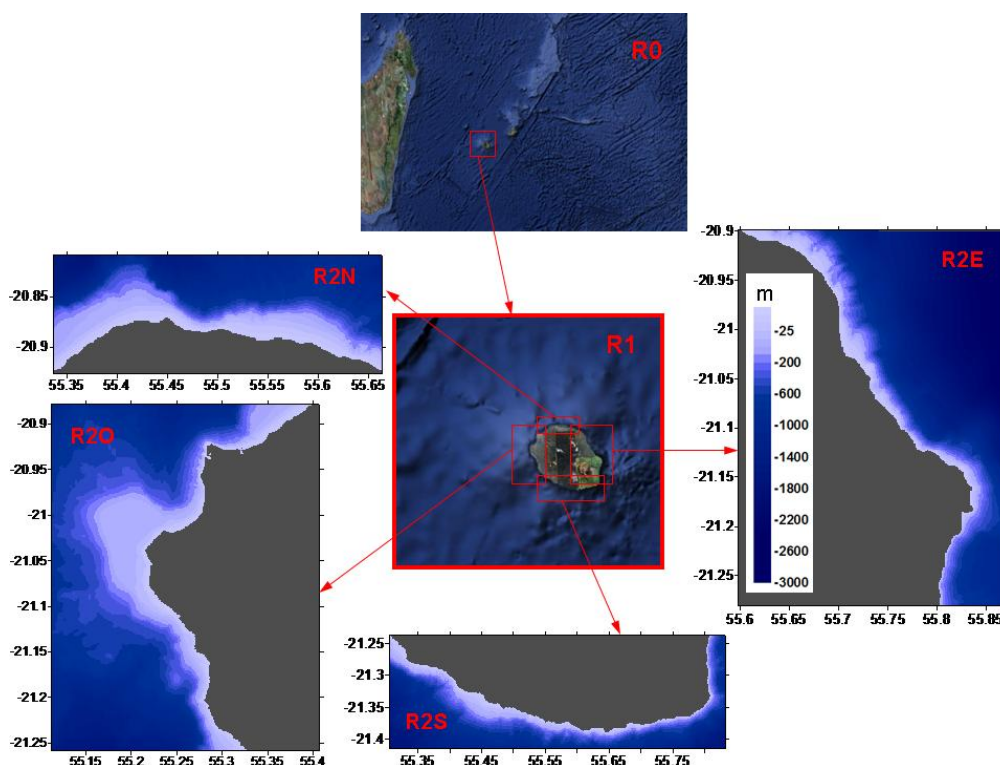


Figure 4. MNT utilisés pour la modélisation de la houle dans cette étude.

3.2.3. Données sur les cyclones

Une convention a été établie avec Météo-France Réunion dans le cadre de cette étude ayant pour objet la fourniture de données cycloniques et l'assistance technique à travers l'expertise de Météo-France en matière de modélisation paramétrique des champs de vent et de pression cyclonique

Cette base de données a été utilisée pour générer l'ensemble des champs de vent et de pression cycloniques de l'étude. Elle se présente sous la forme d'un tableau contenant, depuis 1932 et selon une fréquence de 6 heures : la date, heure, vitesse, cap et position du centre du cyclone. Lorsque l'information est disponible, ces données comprennent en outre :

- la vitesse du vent (moyen et rafales) au niveau du rayon de vent maximal ;
- la pression atmosphérique au centre du cyclone ;
- la pression et diamètre de la première isobare fermée ;
- le rayon du vent maximal ;
- les rayons d'extension des vents à 30 et 50 nœuds.

3.2.4. Données des houlographes

Sur l'île de La Réunion, la DDE possède aujourd'hui 4 houlographes en cours de fonctionnement. Ces houlographes sont de type « DATAWELL », non directionnels à des profondeurs d'environ 20 à 30 mètres. Leur positionnement est représenté sur la Figure 5. Deux houlographes supplémentaires, à Ste Rose au sud-est et à Vicendo au sud, ont également été mis en place par la DDE mais ils ne sont plus opérationnels aujourd'hui. La liste des houlographes de La Réunion est présentée dans le Tableau 2.

Nom	Date de mise en service	Date de fin de service	Profondeur (m)	Paramètres mesurés
Saint Pierre	26/09/2000	-	33	H, T
Port Ouest	25/02/1997	-	25	H, T
Port Est	19/11/1996	-	27	H, T
Pointe du Gouffre	15/05/2000	-	31	H, T
Sainte Rose	22/11/2000	05/02/2002	30	H, T
Vicendo	30/07/2000	20/03/2009	35	H, T

Tableau 2. Houlographes de la DDE à La Réunion

Dans le cadre de cette étude, les données des houlographes du port Ouest, du port Est, de la Pointe du Gouffre et de Saint-Pierre ont permis de valider les modélisations des houles cyclonique (Gamède, 2007 et Dina 2002). Les données du houlographe de Saint Pierre et du port Ouest ont permis de valider la modélisation des houles australes (houles de mai 2007). Ces validations sont présentées dans les parties concernant l'étude des houles non cycloniques et des houles cycloniques.

La côte Est n'étant pas couverte par les houlographes (le houlographe de Ste Rose n'a fonctionné uniquement entre le 22/11/2000 et le 05/02/2002, soit pendant 1 an et 2 mois), la validation des simulations des houles d'alizés n'a pu être effectuée.

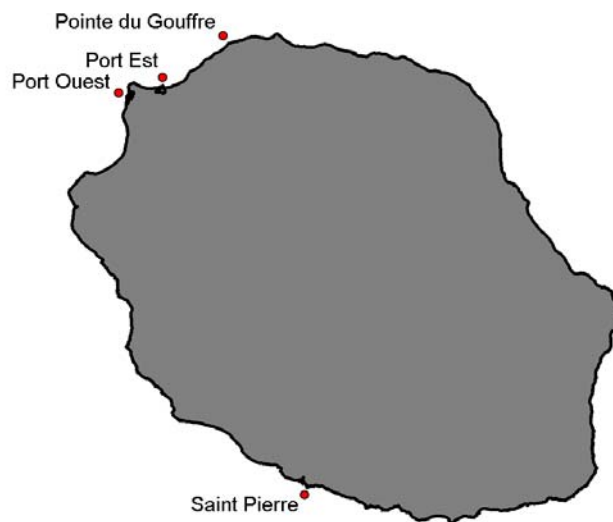


Figure 5. Positionnement des Houlographes opérationnels à La Réunion

3.2.5. Données pour le calcul des houles centennales (australes et d'alizés)

Les données utilisées sont issues du modèle de génération de vagues WaveWatch3 (NWW3) du National Center for Climate Prediction (NCEP) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). NWW3 (Tolman, 2002) est un modèle de 3^{ème} génération qui calcule des paramètres des vagues (dont la hauteur significative, la période et la direction) à partir de vents générés par un modèle atmosphérique assimilant des données in-situ. Le modèle, couvrant le domaine océanique entre 78°N et 78°S, a une résolution spatiale de 1.25° en longitude et 1° en latitude, une résolution directionnelle de 15° et une résolution temporelle de 3h. Les données sont disponibles du 30/01/1997 au 01/04/2009, soit un peu plus de 12 ans de données.

On peut noter que compte tenu de la longueur de la série temporelle, il conviendra d'être prudent quant à l'estimation de la hauteur de houle centennale⁶. Une alternative serait d'utiliser un jeu de données plus long tel que celui d'ERA-40 (40 ans) d'ECMWF. Cependant, même si les valeurs moyennes de vagues des données ERA-40 sont bonnes, les pics de houle sont généralement sous-estimés. D'autre part, la maille du modèle ERA-40 présente une résolution moins fine que celle de NWW3. Enfin, les observations de vagues issues des satellites ERS sont assimilées par ERA-40 à partir de 1991, mais des problèmes de calibration du satellite engendrent des sauts dans la qualité de la donnée de vagues ERA-40. Pour ces différentes raisons, les données de vagues Wavewatch3 ont été préférées.

⁶ L'incertitude autour de la valeur centennale dépend de la méthode utilisée pour le calcul des extrêmes, du nombre d'événements observés et de la longueur de la série. Un critère permettant de qualifier l'estimation reste les intervalles de confiance autour de la valeur estimée (voir plus bas).

4. Méthodologie et validation de la modélisation des houles cycloniques

4.1. APPROCHE GENERALE

Les cyclones sont des dépressions atmosphériques qui se forment à la surface de la mer et autour desquelles circulent des vents violents entraînés par la force de Coriolis (dans le sens horaire pour l'hémisphère sud). Le centre du cyclone (l'*œil*) se déplace et dessine la trajectoire. Nulle au niveau de l'œil, l'intensité du vent atteint son maximum à une distance appelée *rayon de vent maximum* (ou *Rm*), puis décroît et redevient nulle. Ces vents génèrent une houle importante, désordonnée, mais dont la direction principale tend à suivre la trajectoire du cyclone.

La structure des cyclones est complexe, elle dépend beaucoup des conditions atmosphériques mais aussi de la direction et de la vitesse de la trajectoire empruntée. Ainsi, les vents ne sont pas distribués de manière homogène de part et d'autre de l'œil. Le rayon de vent maximum et l'intensité maximum atteinte ne sont pas symétriques autour de l'œil. Les caractéristiques de la houle en un point donné dépendent de l'intensité, de la trajectoire et de l'asymétrie du cyclone qui l'a générée.

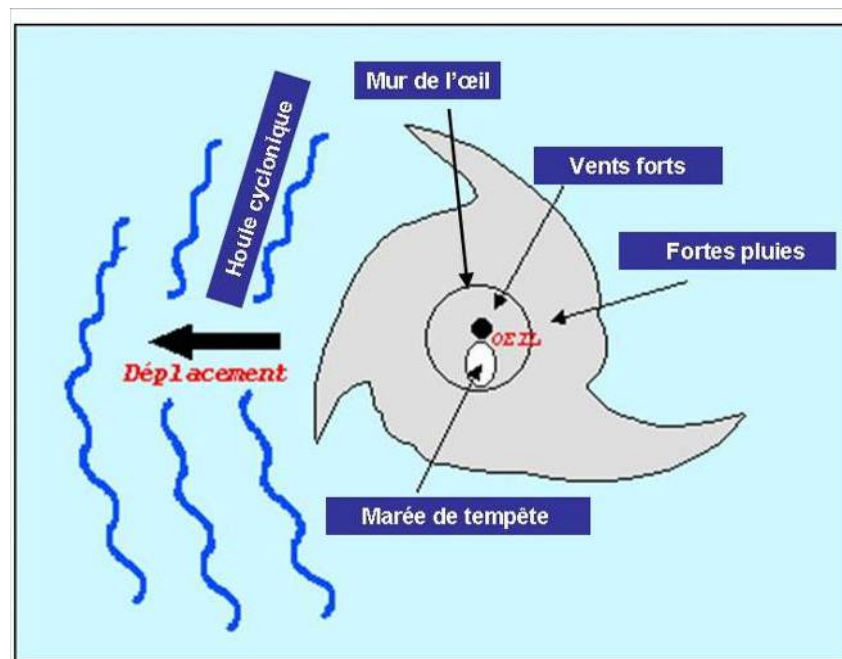


Figure 6. Schéma représentatif d'un cyclone dans l'hémisphère sud (Météo-France).

Pour une île comme La Réunion, les trajectoires les plus pénalisantes en termes de houle cyclonique diffèrent selon la façade que l'on considère. Généralement, les cyclones arrivent du nord-est de l'île avec une trajectoire zonale est-ouest puis s'orientent vers le sud-ouest en passant soit à l'ouest soit à l'est de La Réunion. Afin de déterminer les types de cyclones les plus impactants pour chaque façade de l'île, 4 cyclones de référence ont été proposés : **Dina** (janvier 2002), **Colina** (janvier 1993), **Hollanda** (février 1994) et **Firinga** (janvier 1989). Ces cyclones ont été sélectionnés car leur trajectoire passe très proche de La Réunion tout en ayant des angles d'approche différents. De plus, ces 4 cyclones ont des intensités importantes (>5 sur l'échelle Dvorak⁷). Afin de créer des configurations très impactantes en terme de houle cyclonique pour La Réunion, deux cyclones fictifs (ou pseudo cyclones) ont également été créés en translatant les trajectoires de **Géralda** et **Hary** dont l'intensité n'a pas encore été observée près de La Réunion mais est considérée comme probable (Météo France, 2007).

La modélisation de la houle cyclonique comprend deux étapes :

- La création de champs de vent cycloniques à partir des paramètres du cyclone (base de données Météo-France) avec le modèle du BRGM.
- La modélisation de la houle cyclonique avec le modèle de vagues SWAN (Booij et al. 2004) en utilisant les champs de vent paramétriques construits préalablement.

La qualité de la reconstitution des champs de vent cycloniques dépend des paramètres disponibles sur le cyclone. Avec des paramètres de base (trajectoire, pression au centre, vent maximum, rayon de vent maximum), on peut construire un champ de vent symétrique autour de l'œil (**méthode 1**). Si des enregistrements de vent supplémentaires sont disponibles (rayon d'extension du vent à 30 kt), il est alors possible de reconstituer l'asymétrie du cyclone et d'avoir des champs de vent plus proches de la réalité (**méthode 2**).

Pour Dina, Hollanda, pseudo-Hary et pseudo-Géralda, la méthode 2 (validée pour les houles cycloniques de Dina et Gamède) a été adoptée alors que pour les cyclones Colina et Firinga, la méthode 1 a été utilisée faute de données supplémentaires.

4.2. CONSTRUCTION DES CHAMPS DE VENT CYCLONIQUES

Les données sur les cyclones étudiés ont été fournies par Météo France. Les paramètres de base utilisés dans la modélisation du champ de vent par le BRGM sont : la position de l'œil ou trajectoire, la pression atmosphérique au niveau de l'œil (**P_c**), le rayon de vent maximum (**R_m**), la vitesse maximum du vent (**V_m**) et la pression de la première isobare fermée appelée aussi pression de l'environnement (**P_n**).

⁷ L'échelle de Dvorak relie un chiffre de 0 à 8 à une valeur de vent maximal soutenu et correspond à une pression centrale du centre de la dépression ainsi que la vitesse moyenne du vent soutenu durant dix minutes.

La vitesse radiale du vent (**V_r**) est calculée avec la formulation de Holland (1980). Elle croît progressivement de l'œil au rayon de vent maximum puis diminue et devient nulle (cf. Figure 7).

$$V_r = \sqrt{B \frac{(P_n - P_c)}{\rho_a} \times \left(\frac{R_m}{r}\right)^B \times \exp\left(-\left(\frac{R_m}{r}\right)^B\right) + \frac{r^2 f^2}{4} - \frac{rf}{2}}$$

(Équation 2)

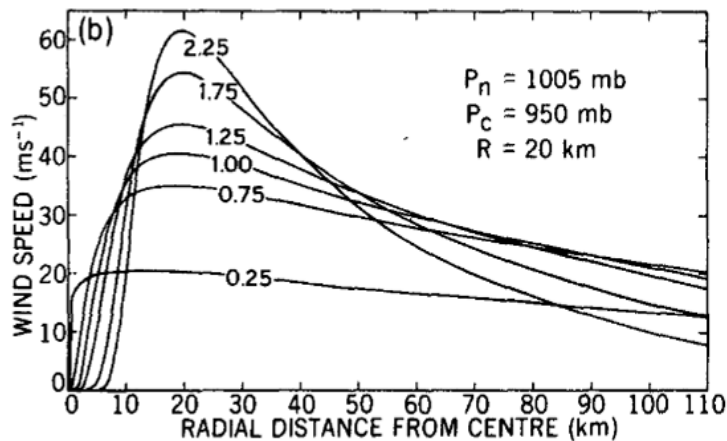


Figure 7. Variations du profil de la vitesse radiale en fonction de B (figure issue de Holland, 1980).

Les vitesses sont en **m/s**, les pressions en **Pascal**, les distances en **m**.

- **r** est la distance du point par rapport à l'œil
- **P_n** est la pression de l'environnement. Elle est souvent considérée comme la moyenne climatologique de la région étudiée mais précisément, il s'agit de la valeur de la première isobare fermée.
- **p_a** est la masse volumique de l'air (en **kg/m³**) à la surface de l'océan dans la région étudiée.
- **f** est la valeur absolue du paramètre de Coriolis : $2\omega \sin(\psi)$, ω étant la vitesse angulaire de rotation de la terre (**0,0000727 rad/s**) et ψ la latitude du cyclone.
- **B** est le paramètre de forme du cyclone. Il est calculé avec la formule de Holland à l'aide la vitesse maximum **V_m** quand $r=R_m$.

$$B = \frac{V_m^2 \rho_a e}{(P_n - P_c)} \quad (\text{Équation 3})$$

La direction du vent est estimée grâce aux formules de Bretschneider (1972) :

$$\beta = 10^\circ \times \left(1 + \frac{r}{R_m}\right) \quad \text{si} \quad r < R_m$$

$$\beta = 20^\circ + 25^\circ \times \left(\frac{r}{R_m} - 1\right) \quad \text{si} \quad R_m \leq r < 1,2 \times R_m \quad (\text{Équation 4})$$

$$\beta = 25^\circ \quad \text{si} \quad 1,2 \times R_m \leq r$$

Deux variantes ont été utilisées pour générer les champs de vent cycloniques en fonction des données disponibles.

- La première méthode (**M1**) considère que le rayon de vent maximum R_m et la vitesse maximum de vent V_m sont uniformes autour de l'œil du cyclone. **Le champ de vent obtenu est donc symétrique.**
- La deuxième méthode (**M2**) peut être utilisée si le rayon d'extension du vent à 30 kt est disponible dans chaque cadran. Le rayon de vent maximum uniforme R_m donné dans les paramètres n'est alors pas utilisé : il est calculé dans chaque cadran (NE, SE, SO, NO) avec l'équation 2 puis comme une fonction de θ (position autour de l'œil du cyclone) par recherche d'une fonction polynomiale. A cette asymétrie de forme s'ajoute une asymétrie du vent maximum V_m en fonction de θ . L'intensité de la vitesse est multipliée par le facteur A (Xie et al. 2006) :

$$A(\theta) = \left(\frac{R_m(\theta)}{R_{m_{\max}}}\right)^{(B/2)} \quad (\text{Équation 5})$$

Ainsi, la vitesse maximale du profil de vent est égale à V_m là où $R_m(\theta)$ est maximum, et devient d'autant plus faible que $R_m(\theta)$ est petit. Le profil de vent varie en fonction de θ . **Le champ de vent obtenu est donc asymétrique en forme et en intensité.**

Tous les champs de vent construits dans l'étude ont une résolution de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ et un pas de temps semi-horaire. Cette résolution est adaptée aux diamètres des cyclones étudiées ce qui assure une bonne représentation spatiale des champs de vent calculés.

4.3. IMPLANTATION DU MODELE DE HOULE CYCLONIQUE

La houle cyclonique a été calculée avec le modèle SWAN (Booij et al. 2004) en mode transitoire, avec des coordonnées sphériques et un maillage rectangulaire. Comme le vent est le seul paramètre de forçage pour générer et propager la houle, le domaine géographique de la modélisation doit être suffisamment grand et couvrir une grande partie du bassin sud de l'Océan Indien. Une modélisation avec trois emboîtements permet d'obtenir des résultats de plus en plus précis près de la côte de La Réunion (cf. Figure 4).

Le **Rang 0 (R0)** couvre une grande partie de l'océan Indien. Il permet de générer la houle cyclonique uniquement avec le vent paramétrique, sans forçage aux frontières du domaine. La configuration de SWAN utilisée est celle par défaut (GEN3) avec 72 directions et un intervalle de fréquence de 0,05s à 0,5s, avec la prise en compte du déferlement car il existe de nombreux hauts fonds au nord de l'île de Rodrigues notamment. Les paramètres du calcul sont résumés dans le Tableau 3. La profondeur minimale de calcul est de 10m de fond.

Paramètres de Calcul R0					
Pas de temps	Grille de calcul (coordonnées sphériques WGS84)				
	Lon min	Lon max	Lat min	Lat max	résolution
horaire	45°E	75°E	-30°N	-10°N	0.0833°x0.0833° ~ 10km

Tableau 3. Paramètres de calcul au R0.

A partir du **Rang 1 (R1)**, centré sur La Réunion, le frottement est pris en compte en plus des paramètres par défaut et du déferlement. Le pas de temps et la grille de calcul sont plus précis (cf. Tableau 4). La profondeur minimale de calcul est de 1m de fond.

Paramètres de Calcul R1					
Pas de temps	Grille de calcul (coordonnées sphériques WGS84)				
	Lon min	Lon max	Lat min	Lat max	résolution
semi-horaire	53.75°E	56.25°E	-22°N	-20°N	0.00833°x0.00833° ~ 1km

Tableau 4. Paramètres du calcul au R1.

A chaque façade correspond une grille de calcul particulière pour le **rang 2 (R2N pour la façade nord, R2S pour la façade sud, etc.)**. Ce découpage permet d'avoir des grilles de calcul beaucoup plus précises tout en conservant un pas de temps restreint (cf. Tableau 5) et d'obtenir des résultats à des profondeurs faibles et très proches de la côte. Les options de SWAN utilisées sont les mêmes que pour R1.

Paramètres de Calcul R2N					
Pas de temps	Grille de calcul (coordonnées sphériques WGS84)				
	Lon min	Lon max	Lat min	Lat max	résolution
semi-horaire	55.336°E	55.663°E	-20.926°N	-20.808°N	0.00083°x0.00083° ~ 100m
Paramètres de Calcul R2S					
Pas de temps	Grille de calcul (coordonnées sphériques WGS84)				
	Lon min	Lon max	Lat min	Lat max	résolution
semi-horaire	55.3°E	55.83°E	-21.41°N	-21.23°N	0.00083°x0.00083° ~ 100m
Paramètres de Calcul R2E					
Pas de temps	Grille de calcul (coordonnées sphériques WGS84)				
	Lon min	Lon max	Lat min	Lat max	résolution
semi-horaire	55.59°E	55.87°E	-21.28°N	-21.89°N	0.00083°x0.00083° ~ 100m
Paramètres de Calcul R2O					
Pas de temps	Grille de calcul (coordonnées sphériques WGS84)				
	Lon min	Lon max	Lat min	Lat max	résolution
semi-horaire	55.11°E	55.40°E	-21.25°N	-21.87°N	0.00083°x0.00083° ~ 100m

Tableau 5. Paramètres de calcul pour les 4 façades R2N, R2S, R2E, R2O.

4.4. VALIDATION DES HOULES SIMULEES POUR GAMEDE ET DINA GRACE AUX DONNEES DES HOULOGRAPHERS

Les cyclones Gamède et Dina, dont les houles cycloniques ont été totalement ou partiellement enregistrées par les houlographes de la DDE (cf. paragraphe 3.2.4), sont utilisés dans l'étude pour :

- comparer les deux méthodes de création des champs de vent paramétriques (M1 et M2) et apprécier l'erreur induite par la méthode la moins précise (M1) sur le calcul des vagues ;
- valider la méthodologie de modélisation de la houle cyclonique avec les vents paramétriques et le modèle SWAN.

4.4.1. Gamède

Gamède est arrivé à environ 200 km de la façade nord de La Réunion le 25 février 2007 (cf. Figure 8). Il entame alors une modification de trajectoire qui l'éloigne de l'île et l'amène vers le nord-ouest. Le 26, en fin de journée, sa trajectoire change brutalement et repart vers le sud en passant à l'ouest de l'île. Même si Gamède ne s'est jamais approché à moins de 200 km de La Réunion, la houle cyclonique qu'il a générée a été fortement ressentie au nord de l'île pendant la journée du 27 février 2007.

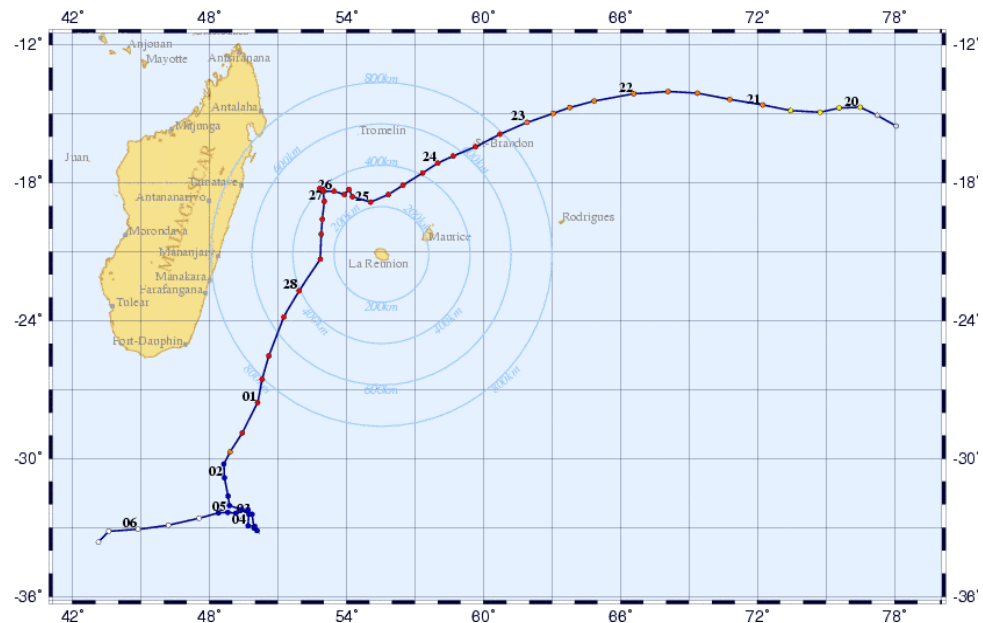


Figure 8. Trajectoire du cyclone Gamède (Météo-France).

Champs de vent cycloniques paramétriques

Les modifications brusques de trajectoire ont entraîné la création d'une asymétrie importante dans la structure de Gamède qui ne peut être représentée par la méthode symétrique traditionnelle M1.

La Figure 9 présente, pour deux dates différentes, le champ de vent cyclonique de Gamède créée avec le modèle du BRGM pour les méthodes M1 (symétrique) et M2 (asymétrique). On note que :

- tant que la trajectoire du cyclone est rectiligne (jusqu'au 25/02/2007) et sa vitesse de déplacement limitée, le cyclone reste assez symétrique donc M1 et M2 donnent des résultats comparables (cf. Figure 9, haut). M1 a quand même tendance à un peu surestimer l'intensité globale du vent car le rayon de vent maximum R_m donné dans les paramètres est plus grand que celui calculé avec M2 ;
- quand la trajectoire du cyclone change brusquement, la forme de celui-ci est modifiée (les 26 et 27 février). M1 ne peut pas représenter l'asymétrie et l'intensité du vent est sous-estimée à proximité de La Réunion (cf. Figure 9, bas).

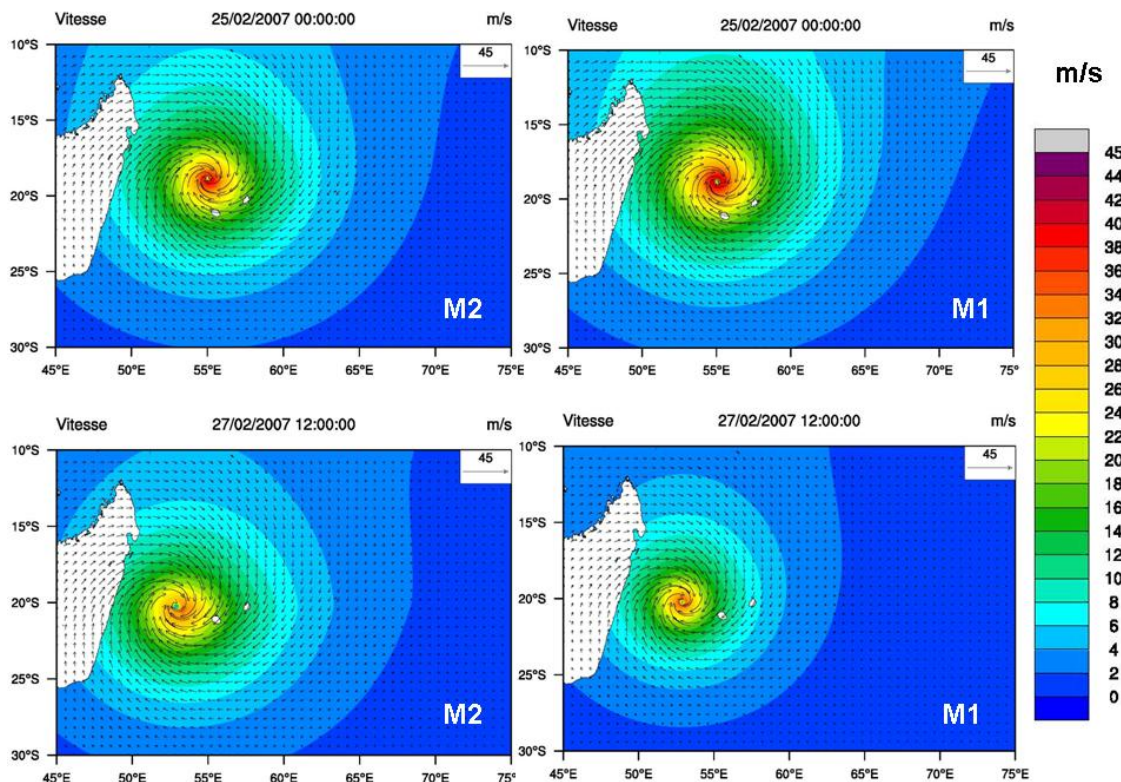


Figure 9. Vent cyclonique de Gamède le 25/02/2007 (haut) et le 27/02/2007(bas).

Simulation de la houle cyclonique

La Figure 10 montre la houle cyclonique simulée avec SWAN au rang 1 avec M2 pendant les deux phases de Gamède : le 25/02/07 à 00h quand le cyclone passe au nord de l'île et présente une structure symétrique (cf. Figure 9, haut) ; et le 27/02/07 à 12h, proche du pic de hauteur significative sur la côte nord-ouest, quand le cyclone prend une structure asymétrique défavorable pour La Réunion (cf. Figure 9, bas).

La Figure 11 présente le résultat de la modélisation des vagues (Hs) correspondantes au niveau des houlographes de la Pointe du Gouffre (PDG) et du Port Est (PE) pour chaque champ de vent (M1 et M2).

Jusqu'au 26 en milieu de journée, la hauteur des vagues simulées avec les vents M1 et M2 sont proches (cf. Figure 11). Les vagues générées avec le vent M1 sont quand même plus hautes (de l'ordre de 50 cm à Pointe du Gouffre) que celles générées avec le vent M2 car celui-ci est un peu moins étendu. Les résultats obtenus avec le vent M2 sont plus proches des mesures des houlographes de la Pointe du Gouffre et du Port Est que ceux obtenus avec le vent M1.

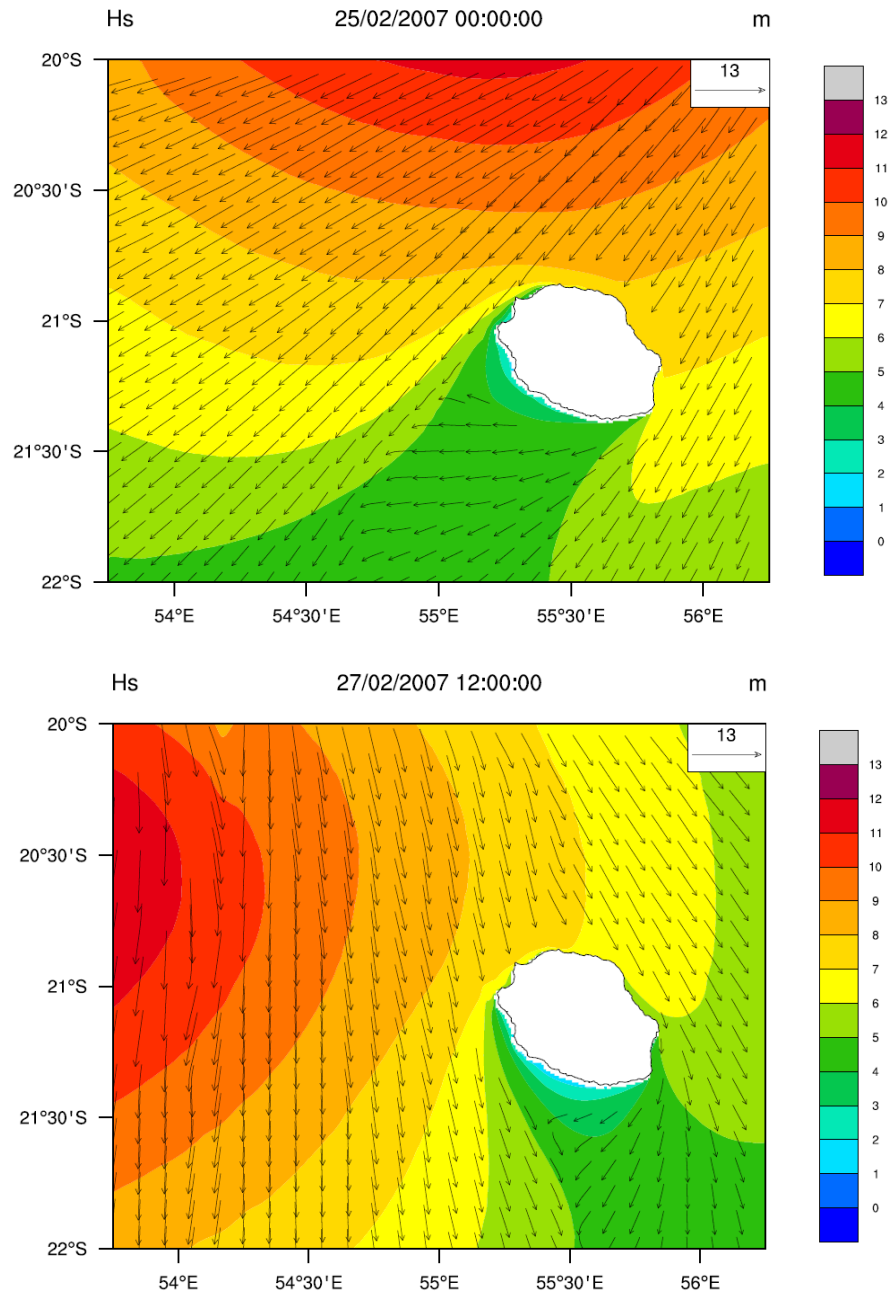


Figure 10. Houle cyclonique de Gamède simulée avec SWAN au rang 1 avec M2 le 25/02/2007 à 0h00 (haut) et le 27/02/2007 à 12h (bas)

A partir du 27 février 2007, quand le cyclone modifie radicalement sa trajectoire, les enregistrements montrent un pic de hauteur de vague atteignant 7m pour les 2 houlographes. Alors que le vent M1 ne permet pas d'atteindre ce pic (maximum 5m atteint), le vent M2 donne des résultats très proches des enregistrements (6,2m à Pointe du Gouffre et de 6,5m à Port Est) et réussit à reproduire le pic de vagues engendré par la forme asymétrique du cyclone.

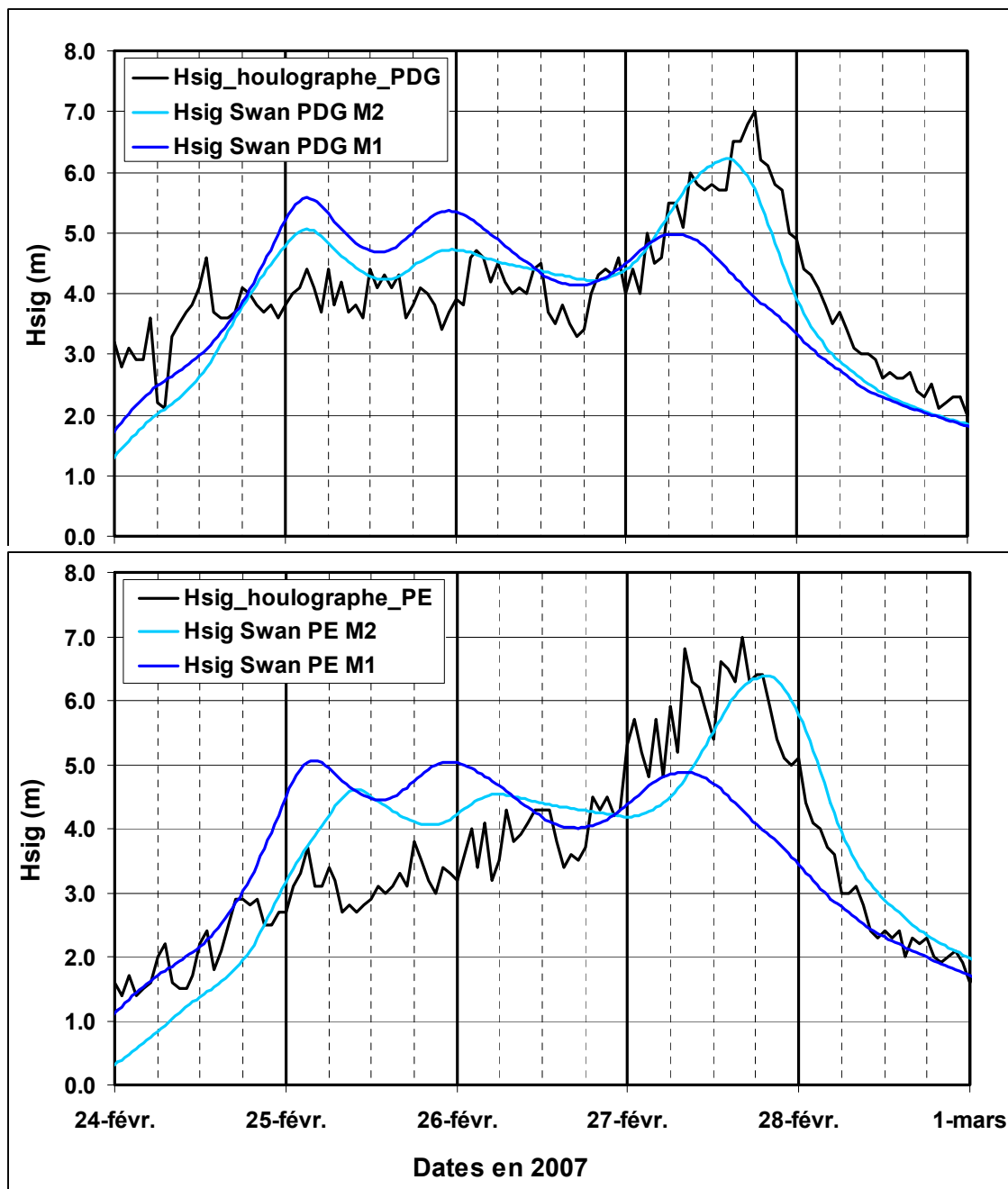


Figure 11. Comparaison de la hauteur significative des vagues enregistrée par les houlographes de Port Est (bas) et Pointe du Gouffre (haut) et générées par SWAN (resp aux rangs R2O et R2N) pendant le cyclone Gamède.

La Figure 12 présente le résultat de la modélisation des vagues correspondantes aux périodes de houle (T_p) mesurées par les houlographes de la Pointe du Gouffre (PDG) et du Port Est (PE) pour chaque champ de vent (M1 et M2).

La période des vagues simulées avec les vents M1 et M2 sont proches (cf. Figure 12) sur toute la période du pic de houle de Gamède. Jusqu'au 26 février, les périodes des vagues simulées (entre 15s et 16s) sont supérieures à celles enregistrées par les 2 houlographes (13s). A partir du 27 février 2007, quand le cyclone modifie radicalement sa trajectoire, les périodes simulées et enregistrées sont semblables. Au moment du pic de houle le 27 février, la période de pic à la Pointe du Gouffre est de 13 secondes. Finalement, le vent M1 et le vent M2 donnent des résultats très proches des enregistrements et reproduisent bien la période de pic de la houle engendrée par le cyclone Gamède.

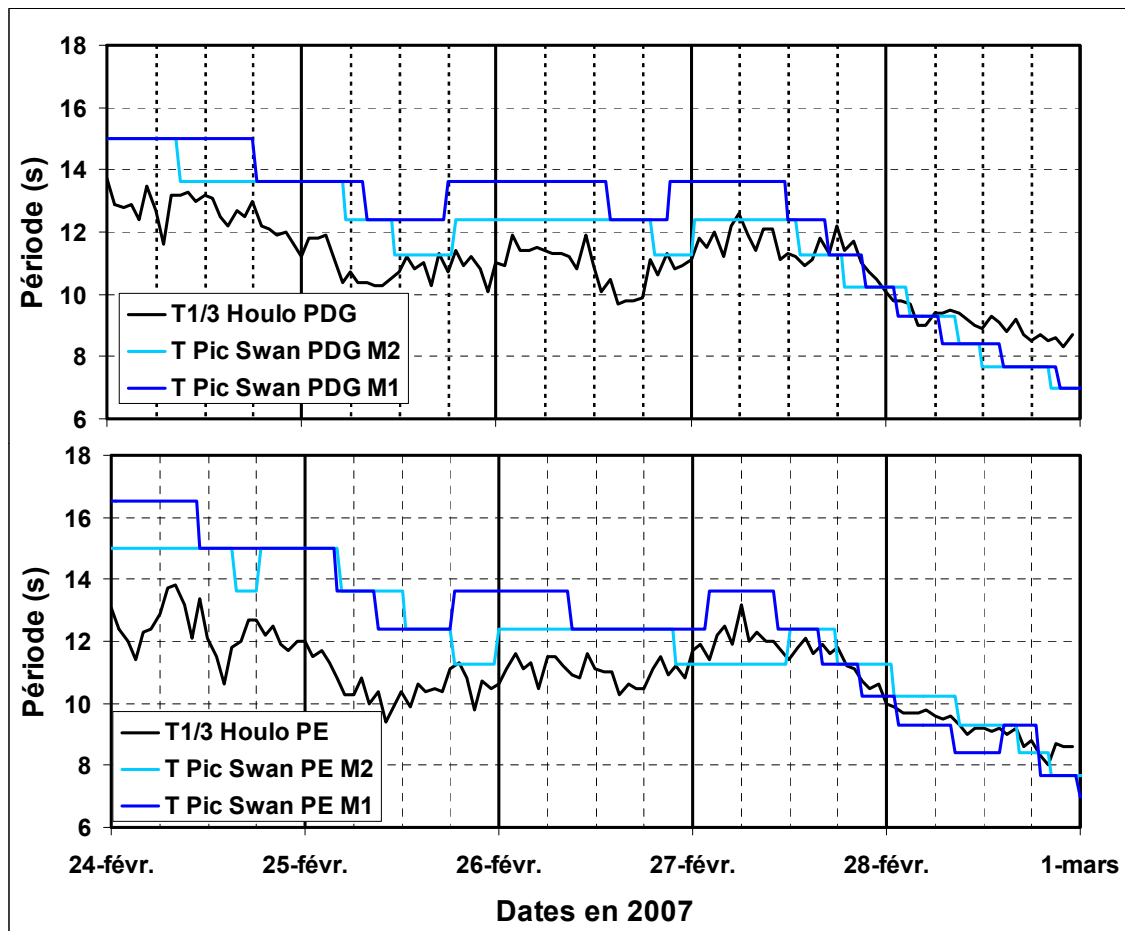


Figure 12. Comparaison de la période des vagues enregistrée par les houlographes de Port Est (bas) et Pointe du Gouffre (haut) et générées par SWAN (resp aux rangs R2O et R2N) pendant le cyclone Gamède.

Conclusions :

L'exemple du cyclone Gamède montre que :

- l'association du champ de vent M2 et de SWAN permet de reproduire correctement la houle cyclonique près de la côte réunionnaise que sa structure soit symétrique ou non ;

- la méthode de génération des champs de vent M2 est particulièrement recommandée dans le cas de changements brusques de trajectoire, quand l'asymétrie du cyclone est forte ;
- la méthode M1 reste pertinente pour des cyclones peu rapides dont la trajectoire est rectiligne.

4.4.2. Dina

Le cyclone Dina a frappé La Réunion le 22 janvier 2002 (cf. Figure 13). L'œil du cyclone est passé au nord puis à l'ouest de l'île en longeant La Réunion avec une vitesse de déplacement d'environ 19 km/h. Au plus proche de l'île, son intensité est de 6 sur l'échelle de Dvorak, soit des vents maximums d'environ 100 nœuds, ce qui fait de Dina l'un des cyclones les plus violents ayant touché La Réunion.

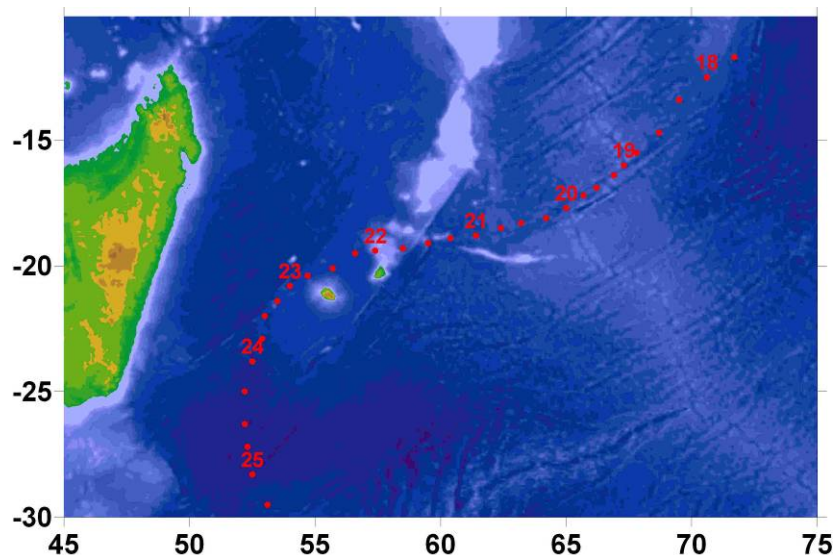


Figure 13. Trajectoire de Dina du 18 au 25 janvier 2002

Champs de vent paramétriques

Malgré une trajectoire relativement régulière, on note une forte asymétrie dans la forme et l'intensité du vent du cyclone Dina (cf. Figure 14) due à sa vitesse de translation élevée (environ 20 km/h le 22/01/02 à 12h00 TU) qui intensifie la vitesse du vent et le rayon de vent maximum à gauche du sens de la trajectoire (là où le vent et la trajectoire se dirigent dans le même sens). Avec M1, la forme et l'intensité étant homogènes autour de l'œil, l'intensité et la portée du vent sont surestimées à droite de la trajectoire (c.a.d au nord de l'œil) et sous-estimées à sa gauche.

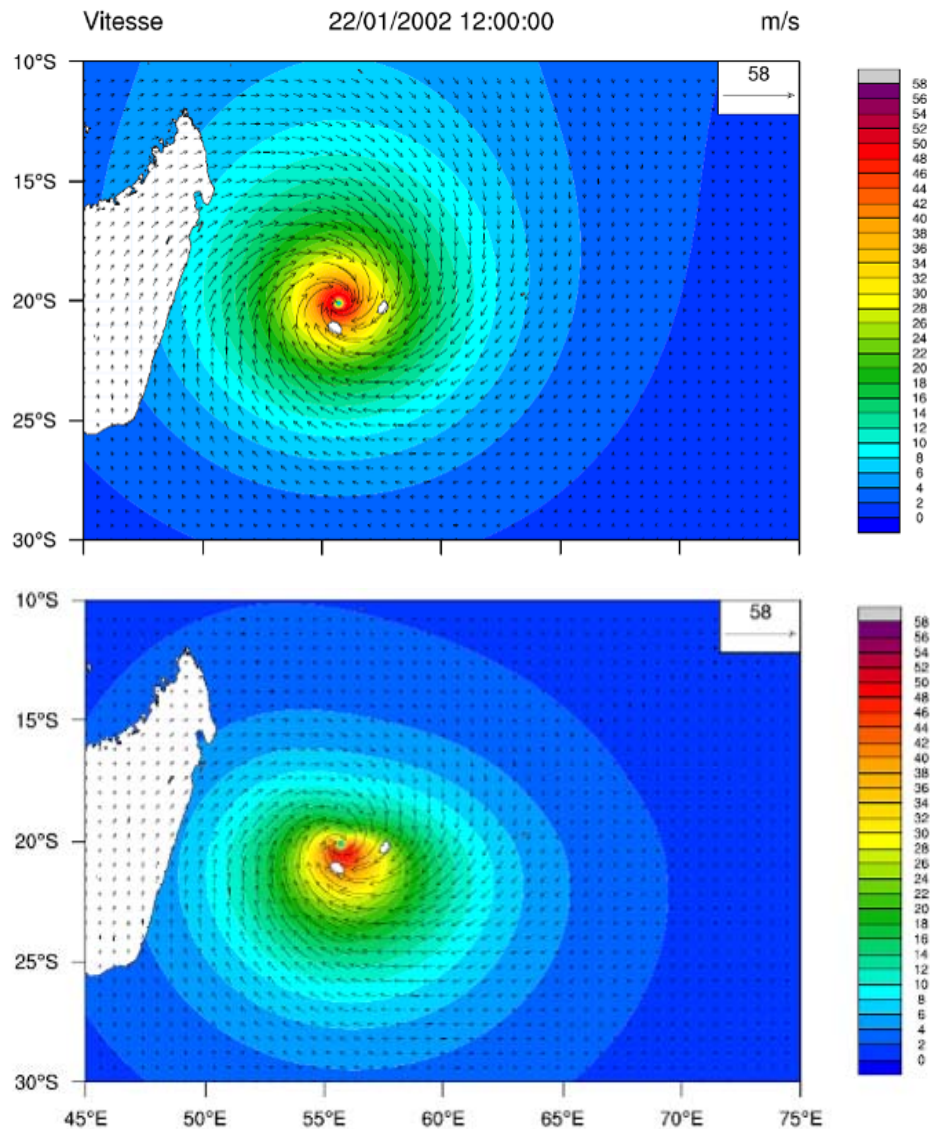


Figure 14. Champ de vent de Dina (modèle BRGM : M1 en haut et M2 en bas).

Simulation de la houle cyclonique

Les houlographes du nord de l'île, chahutés par la forte houle, n'ont pas enregistré le pic de la tempête mais fournissent quand même des informations sur le montant et le tombant de celle-ci (cf. Figure 15). La montée de la houle simulée avec SWAN est un peu précoce mais on note une bonne concordance (surtout au niveau du tombant) entre les mesures et les résultats de la simulation avec le vent M2 qui représente bien l'asymétrie du cyclone.

Les vagues générées avec le vent M1 sont plus fortes que celles simulées avec M2 sur la façade nord de l'île (12,5m avec M1 et 10,8m avec M2 au niveau du houlographe de Pointe du Gouffre). Cette différence est due à l'erreur de symétrie sur le vent de la

méthode 1, qui est surestimé au nord de l'œil du cyclone, et génère une houle d'ouest au dessus du cyclone qui est inexistante avec le vent plus réaliste de la méthode 2 (cf. Figure 16).

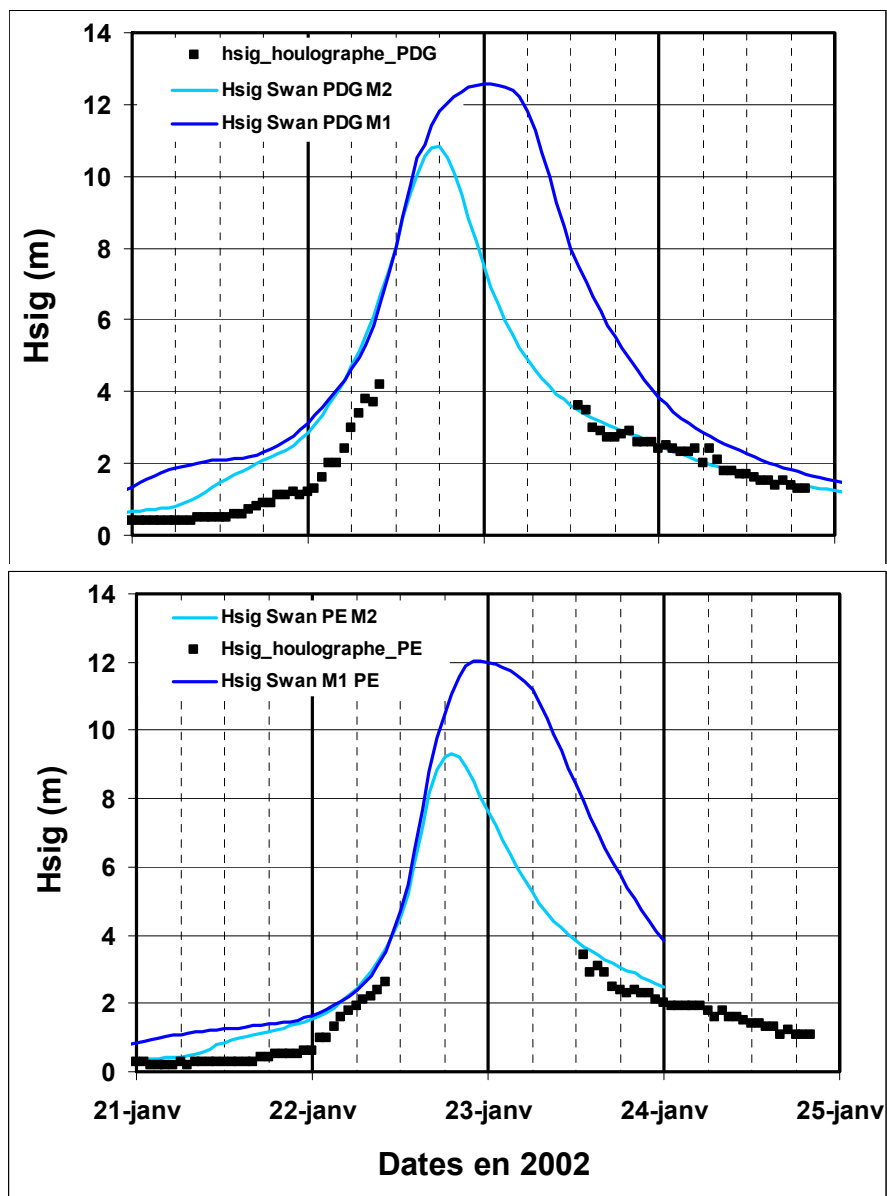


Figure 15. Comparaison de la hauteur significative des vagues enregistrées par les houlographes de Port Est (bas) et Pointe du Gouffre (haut) et générées avec les vents paramétriques (M1 et M2) et SWAN pendant le cyclone Dina.

Le houlographe de Saint Pierre a enregistré un pic de 8.2m de hauteur significative et les résultats des simulations donnent respectivement 8m et 9m de hauteur significative avec les méthodes M1 et M2.

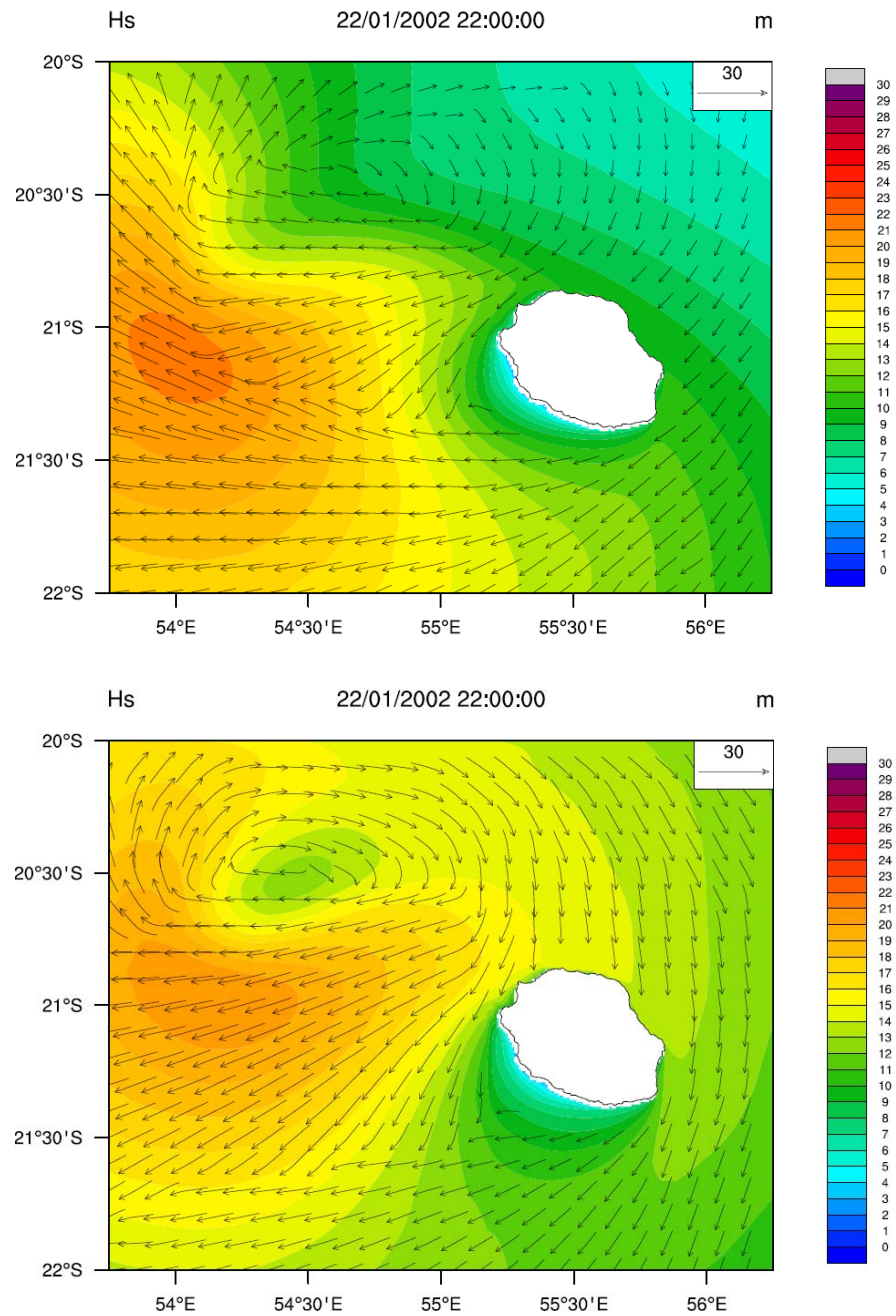


Figure 16. Comparaison de la houle cyclonique de Dina le 22/01/2002 à 22h après le pic de houle (approximativement vers 18h00) simulée avec SWAN (M1 en bas et M2 en haut).

Conclusions

L'exemple du cyclone Dina montre que :

- l'association du champ de vent paramétrique M2 et de SWAN permet de reproduire correctement la houle cyclonique près de la côte réunionnaise ;

- pour des vitesses de translation importantes la méthode de génération des vents M1 n'est pas satisfaisante même si la trajectoire du cyclone est assez régulière. Globalement, M1 surestime l'intensité totale du champ de vent mais selon la position considérée par rapport à la trajectoire du cyclone, les vagues simulées avec M1 seront surestimées ou sous-estimées. On peut s'attendre à une surestimation des vagues sur les façades nord et ouest avec la méthode 1 pour des cyclones dont la trajectoire passe à l'ouest de l'île. Cette surestimation sera quantifiée au paragraphe 5.7.3.
- Pour les trajectoires classiques passant à l'ouest de l'île comme celle de Dina, l'asymétrie du cyclone créée par une vitesse de translation élevée est défavorable à l'île car l'intensité maximum du vent se situe à gauche de la trajectoire, c'est-à-dire du côté de La Réunion.

5. Reconstitution des houles cycloniques retenues

Les cyclones réels proposés pour l'étude sont Dina (2002), Hollanda (1994), Colina (1993) et Firinga (1989). Ils présentent des trajectoires variées passant de part et d'autre de l'île avec des directions de déplacement différentes. De plus, ils sont passés très proche de La Réunion avec des intensités importantes.

Selon les données disponibles, les champs de vent sont créés avec la méthode 1 (symétrique) ou la méthode 2 (asymétrique). Pour Dina et Hollanda, les vents sont construits avec la méthode M2. Pour Colina et Firinga, seule la méthode symétrique est applicable (paramètres disponibles).

La hauteur des vagues incidentes près de la côte dépend des caractéristiques de la houle au large (hauteur significative H_s , période de pic T_p , et direction) ainsi que de la morphologie côtière.

Dans un premier temps, l'interprétation des résultats pour chaque cyclone s'arrête au rang 1 de la simulation des vagues avec SWAN. Une analyse plus précise près de la côte est ensuite donnée par façades (R2N, R2S, R2E, R2O).

5.1. DINA (JANVIER 2002)

Le cyclone Dina ayant servi à la validation, sa description et sa trajectoire ont été détaillées dans le paragraphe 4.4.2.

Champs de vent paramétriques

Le champ de vent paramétrique de Dina est créé avec la méthode M2 (cf. Figure 14, haut). Il comporte une forte asymétrie due à sa vitesse de translation et le vent maximum passe très proche de la côte nord de l'île avec une direction est-nord-est et une intensité d'environ 100 nœuds (intensité 6 sur l'échelle de Dvorak).

Simulation de la houle cyclonique

La houle, dont la direction principale suit celle de la trajectoire du cyclone (provenance est nord-est), atteint l'île de La Réunion le 22 janvier en balayant principalement les parties est et nord de l'île (exemple à 14h TU, Figure 17)

Les hauteurs significatives atteignent alors 22m au large de la côte nord et 18m à 20m au large de la façade est. C'est pourtant sur cette dernière façade que les vagues sont les plus impactantes car elles arrivent frontalement au rivage.

En revanche, les parties ouest et sud-ouest sont relativement protégées des vagues. Celles-ci, déjà atténuées par le contournement de l'île, ne dépassent pas 16m de hauteur significative et se dirigent vers le large.

Les périodes de pics de la houle s'échelonnent de 12s (au sud-ouest) à 18s (au nord de l'île).

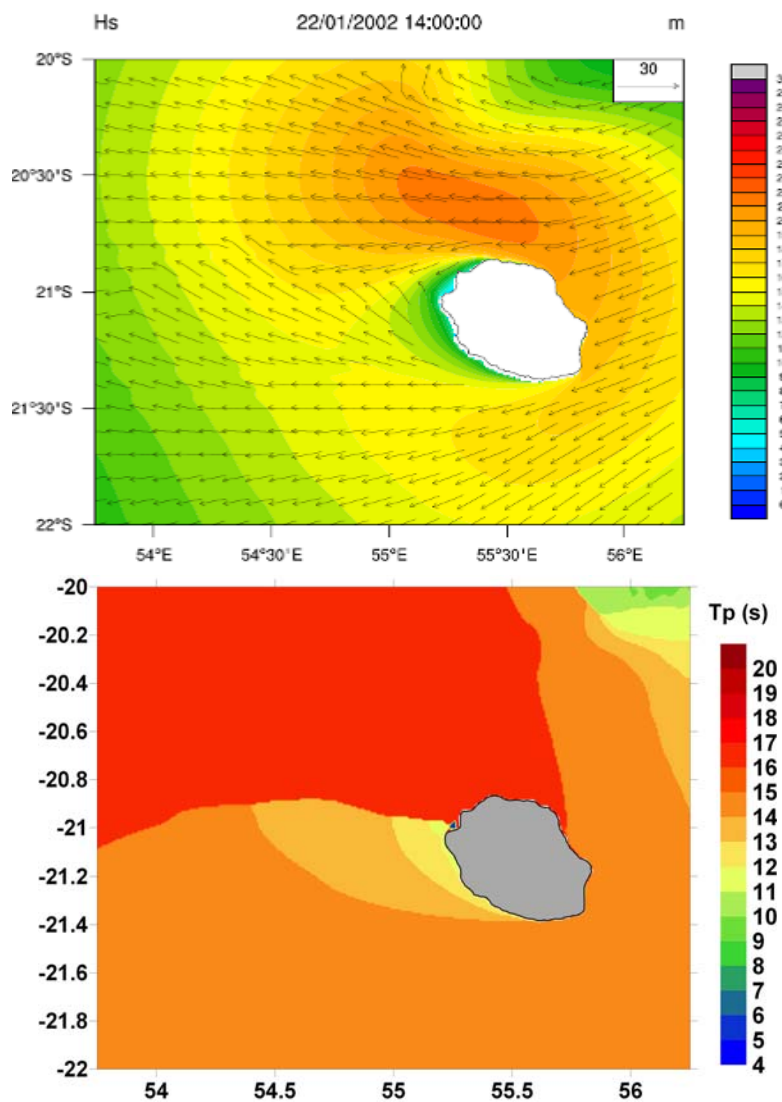


Figure 17. Hauteur significative et direction de propagation (haut) et période de pic (bas) des vagues calculées avec SWAN au Rang 1 pour le cyclone Dina le 22/01/2002 à 14h

Conclusion

La Figure 18 indique la hauteur significative maximum calculée pendant le passage du cyclone Dina sur le domaine R1 de la simulation. Le type de trajectoire de Dina induit une houle de provenance est nord-est particulièrement forte pour les côtes nord et est de La Réunion avec des hauteurs au large d'une vingtaine de mètres.

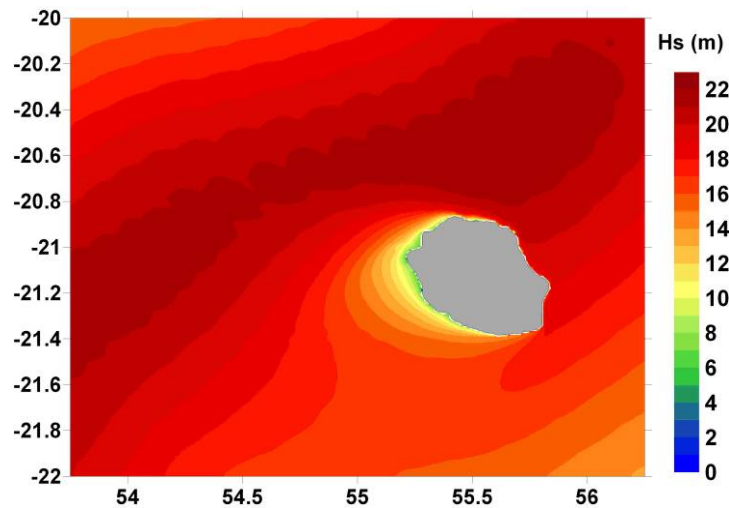


Figure 18. Hauteur significative maximum générée en chaque point par le cyclone Dina autour de La Réunion du 17/01/02 à 18h au 25/01/02 à 12h

5.2. HOLLANDA (FEVRIER 1994)

Hollanda est l'un des rares cyclones dont l'œil passe à l'est de l'île. Celui-ci effleure la façade sud-est le 11 février 1994 avec une vitesse de translation d'environ 20 km/h et des vents proches de 90 nœuds.

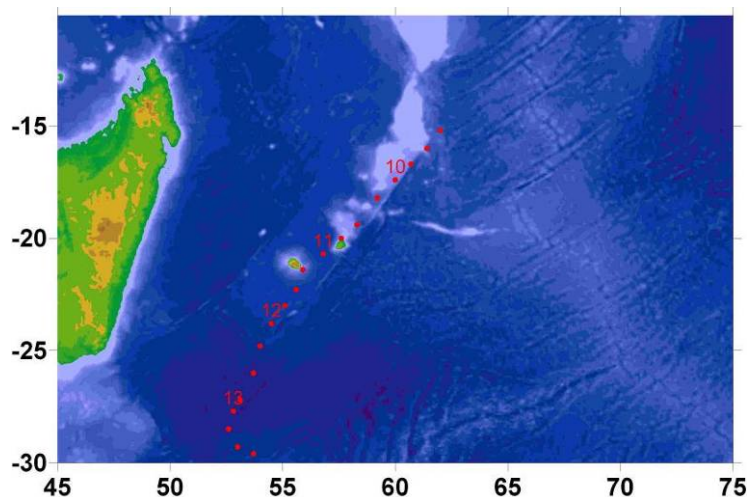


Figure 19. Trajectoire de Hollanda du 10 au 13 février 1994

Champs de vent paramétriques

Le vent paramétrique de Hollanda est créé avec M2. Son asymétrie est assez particulière à l'approche de La Réunion. En effet, le maximum d'intensité du vent ne se situe pas à gauche de la trajectoire mais est un peu décalé au sud de celle-ci.

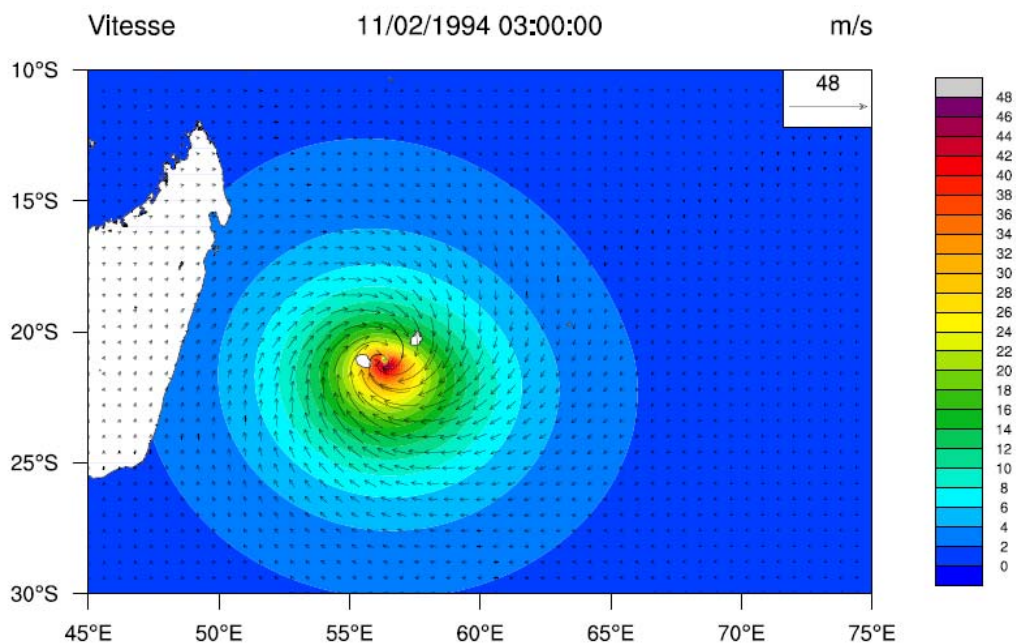


Figure 20. Champ de vent cyclonique de Hollanda le 11/02/1994 à 3h00 (modèle BRGM, M2)

Simulation de la houle cyclonique

De par sa trajectoire et son asymétrie originales, Hollanda affecte principalement les côtés sud-est et sud de l'île. Les vagues maximales simulées surviennent le 11 février vers 5h TU au sud-est de La Réunion avec une incidence d'est et une hauteur significative de 18m au large (cf. Figure 21).

A l'est et au sud-ouest, les vagues perdent de l'amplitude par réfraction à l'approche de la côte. Les façades nord et nord-ouest restent protégées avec des vagues n'excédant pas 8m et se dirigeant vers le large.

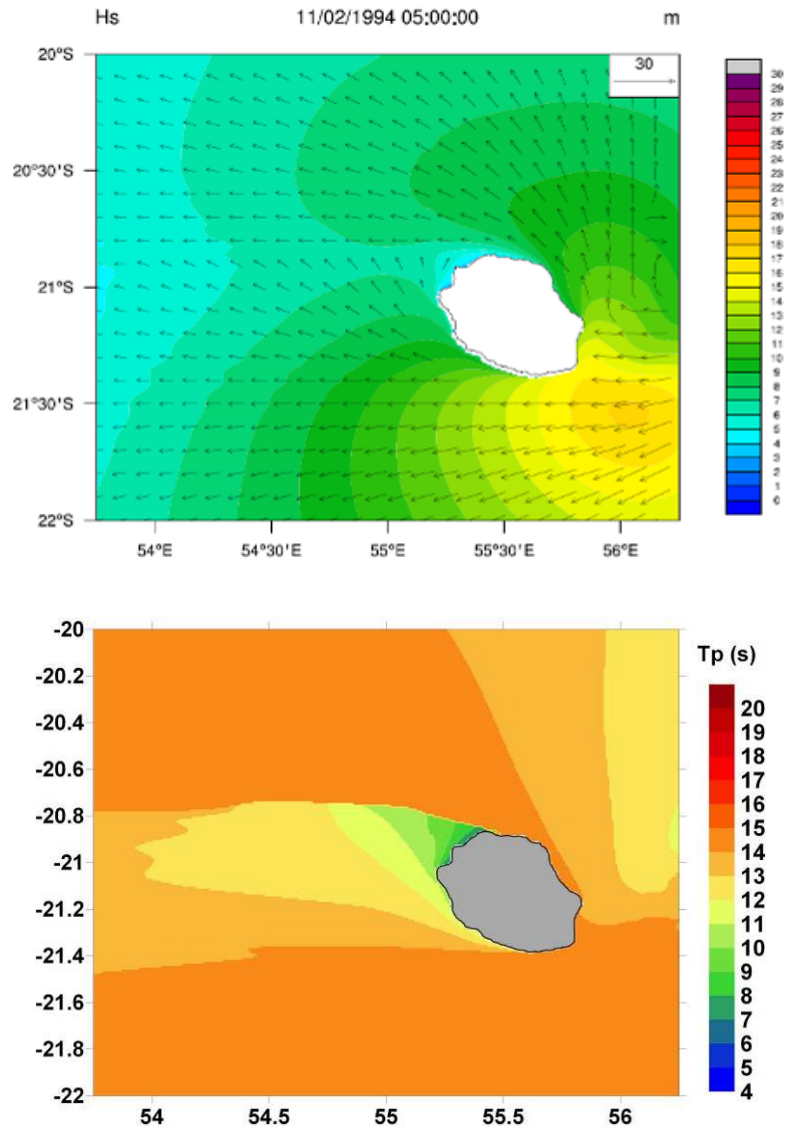


Figure 21. Hauteur significative et direction de propagation (haut) et période de pic (bas) des vagues calculées avec SWAN au Rang 1 pour le cyclone Hollanda le 11/02/1994 à 05h.

Conclusion

La Figure 22 représente la hauteur significative maximale de vague calculée pendant le passage du cyclone Hollanda sur le domaine du Rang 1 de la simulation. Le type de trajectoire de Hollanda induit une houle d'est qui frappe principalement les façades sud et sud-est de La Réunion. Au sud-est, les hauteurs de vagues engendrées au large sont de l'ordre de 18 m.

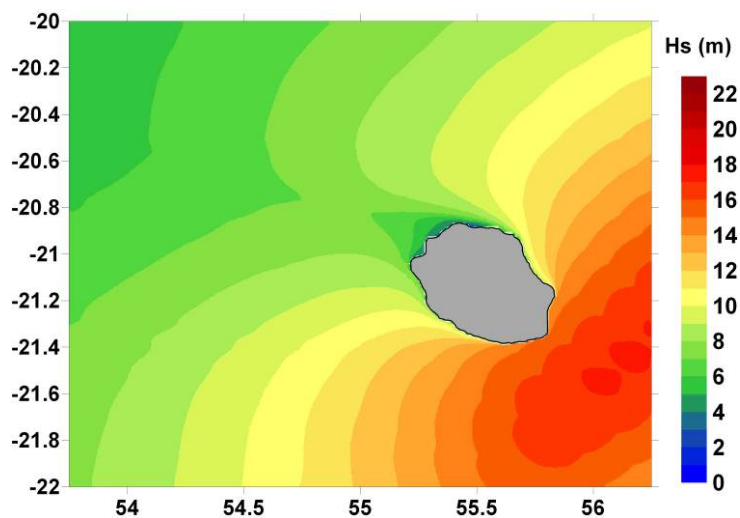


Figure 22. Hauteur significative maximum générée en chaque point par le cyclone Hollanda autour de La Réunion du 09/02/94 à 06h au 13/02/94 à 18h.

5.3. COLINA (JANVIER 1993)

Colina présente une trajectoire méridienne. L'œil, en provenance du nord-nord-est, est arrivé à proximité de La Réunion le 19 janvier 1993 à une vitesse de 17 km/h et avec des vents de près de 80 nœuds.

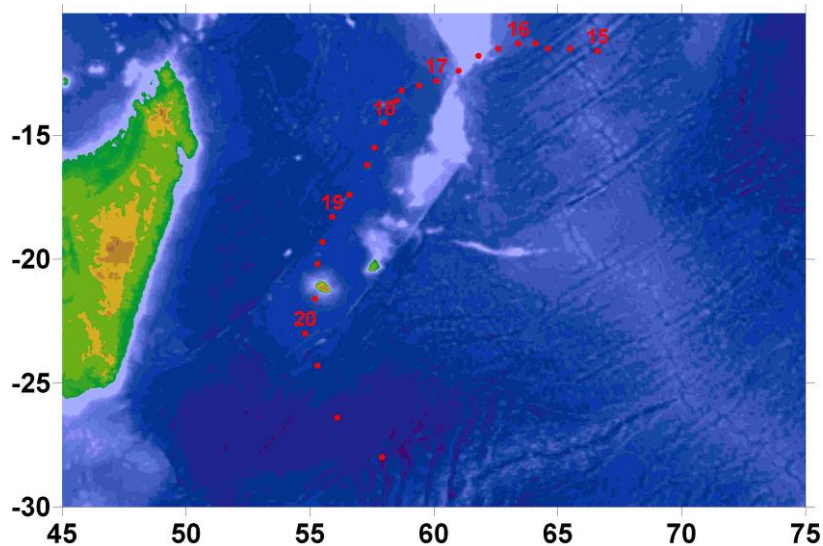


Figure 23. Trajectoire de Colina du 15 au 20 janvier 1993

Champs de vent paramétriques

Le vent paramétrique de Colina est créé avec M1. Étant donnée la trajectoire, son intensité est certainement surestimée à droite de la trajectoire dans le sens de propagation.

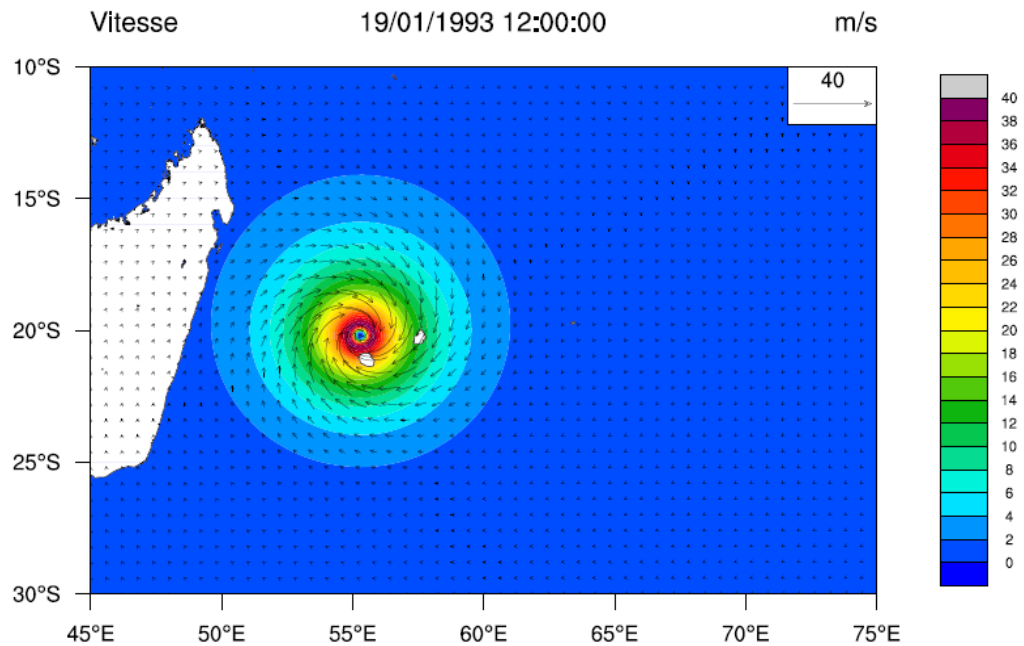


Figure 24. Champ de vent cyclonique de Colina le 19/01/1993 à 12h (modèle BRGM, M1)

Simulation de la houle cyclonique

Le pic de houle cyclonique a touché l'île le 19 janvier vers 14h TU (Figure 25). L'orientation et la position de la trajectoire ont été particulièrement défavorables pour la partie nord-est de La Réunion car la houle la plus importante est arrivée au nord-est de l'île, de provenance nord-nord-est, c'est-à-dire orthogonalement à la côte.

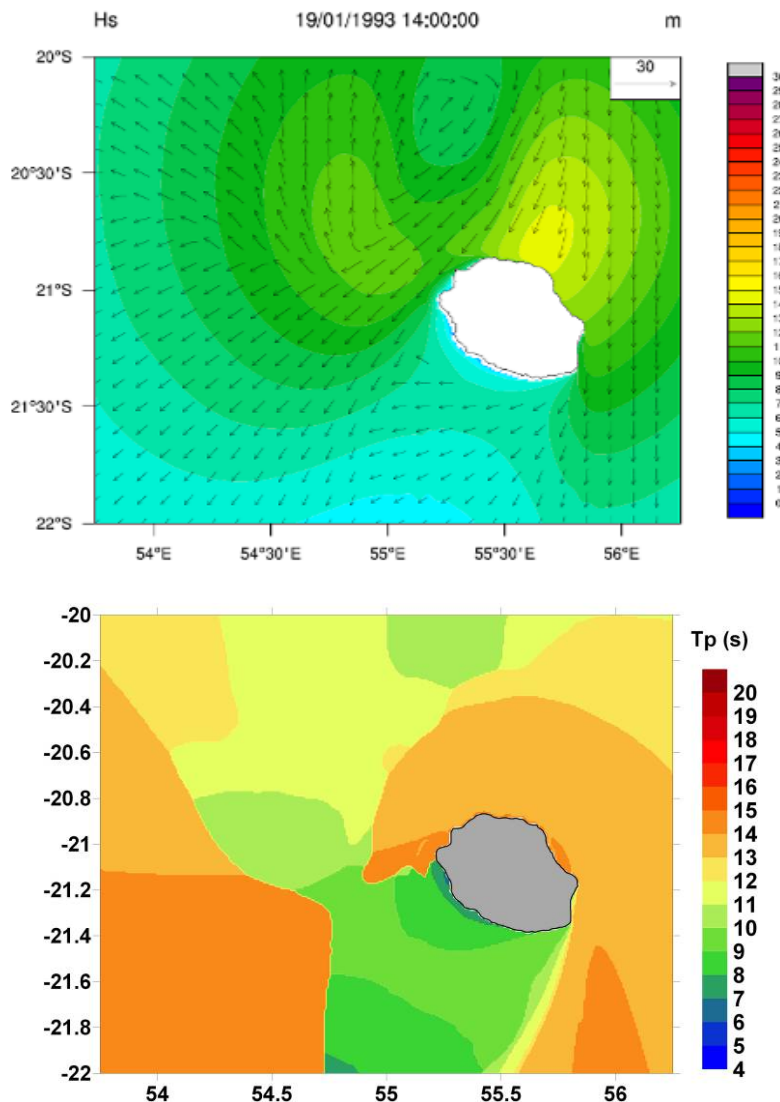


Figure 25. Hauteur significative et direction de propagation (haut) et période de pic (bas) des vagues calculées avec SWAN au Rang 1 pour le cyclone Colina le 19/01/1993 à 14h TU.

Ainsi, la façade nord-est a été touchée par des vagues de hauteur significative d'environ 16 m. Le sud-ouest de l'île a été relativement épargné.

Les périodes de pic (T_p) s'échelonnent de 15 s pour les secteurs exposés (NE) à 8 s pour les zones protégées (SO).

Conclusion

La Figure 26 représente la hauteur significative maximale de vague calculée pendant le passage du cyclone Colina sur le domaine du Rang 1 de la simulation. Le type de trajectoire de Colina est particulièrement impactant pour la façade nord de l'île.

D'après les tests effectués lors de la validation de la méthodologie (cf. 4.4), il est vraisemblable que la hauteur des vagues générées avec SWAN pour Colina avec la méthode M1 soit surestimée sur la façade ouest.

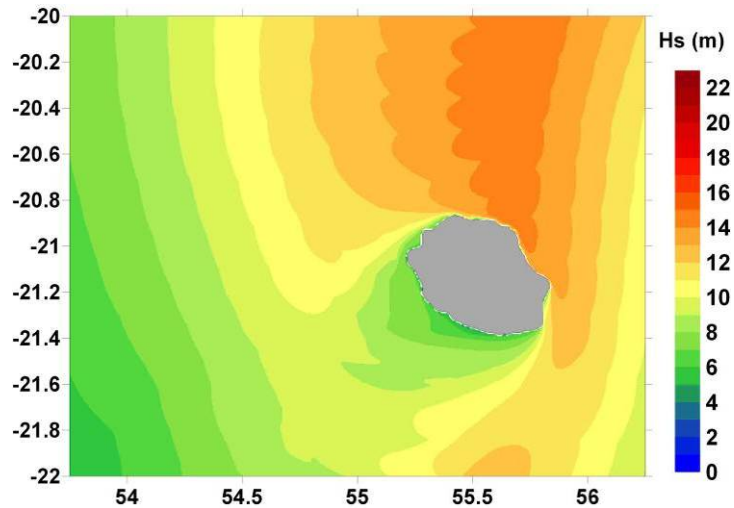


Figure 26. Hauteur significative maximum générée en chaque point par le cyclone Colina autour de La Réunion du 13/01/1993 à 06h au 21/01/93 à 00h.

5.4. FIRINGA (JANVIER 1989)

Le cyclone Firinga est passé à proximité de La Réunion le 29/01/1989 (cf. Figure 27). Sa trajectoire est orientée plus vers le sud que celle de Dina et sa vitesse de déplacement est similaire (environ 20 km/h). L'œil est passé plus proche de l'île que celui de Dina mais l'intensité du vent était plus faible et n'excédait pas 80 noeuds (maximum 5 sur l'échelle de Dvorak). Firinga est donc globalement moins critique que Dina pour La Réunion.

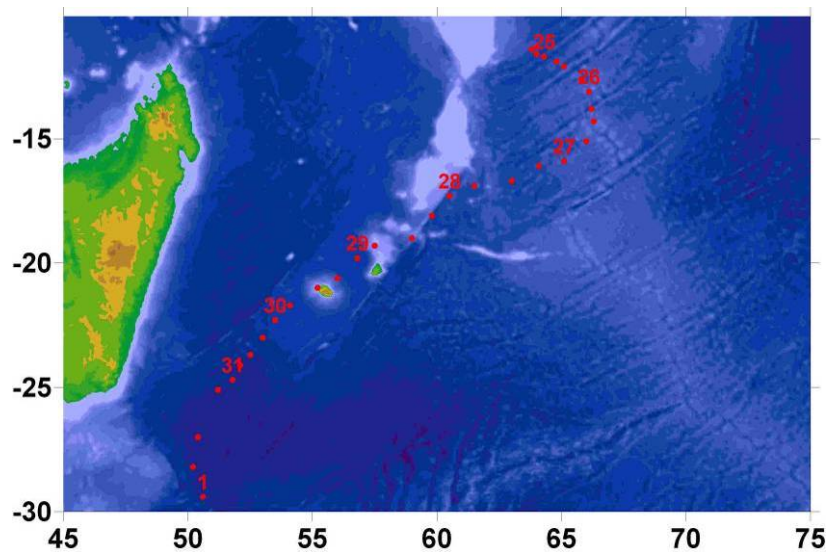


Figure 27. Trajectoire de Firinga du 25 janvier au 1^{er} février 1989

Champs de vent paramétriques

Les champs de vent sont construits avec M1 (cf. Figure 28). L'asymétrie de Firinga n'est donc pas représentée. Les trajectoires et les vitesses de translation de Firinga et Dina étant semblables, les deux cyclones doivent avoir des asymétries proches avec un vent maximum à gauche de la trajectoire. Il est donc probable que l'intensité du vent et la hauteur des vagues soient globalement surestimées avec M1.

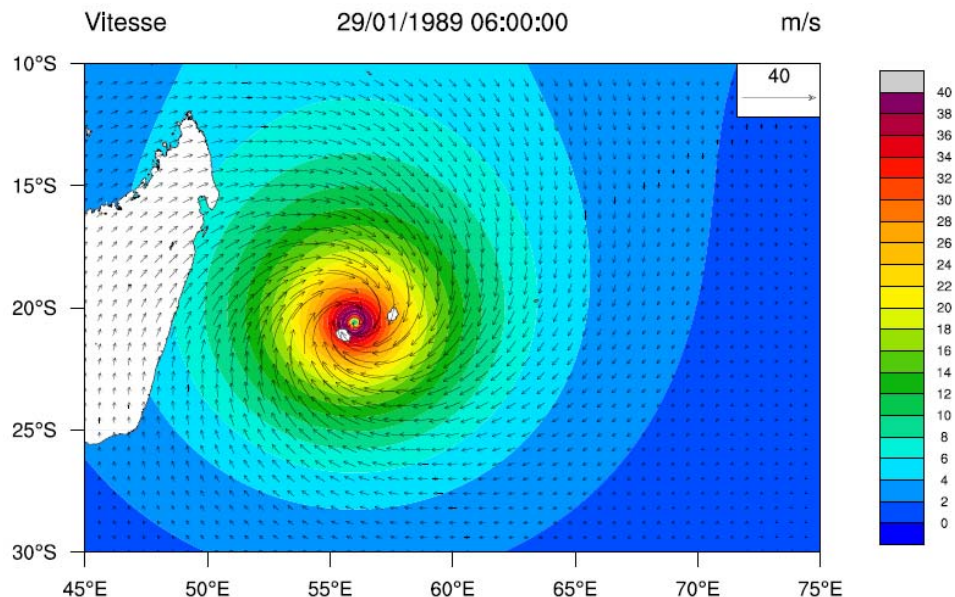


Figure 28. Champ de vent cyclonique de Firinga le 29/01/1989 à 6h TU (modèle BRGM M1).

Simulation de la houle cyclonique

La houle cyclonique de Firinga a frappé principalement l'est de La Réunion et cela à partir du 28 janvier (vers 16h TU). Avec une direction d'incidence est nord-est, elle arrive presque frontalement à la côte est.

C'est le 29 janvier à 7h que Hs est maximale au large avec 17m face à la côte est (cf. Figure 29). La période se situe entre 14s et 15s.

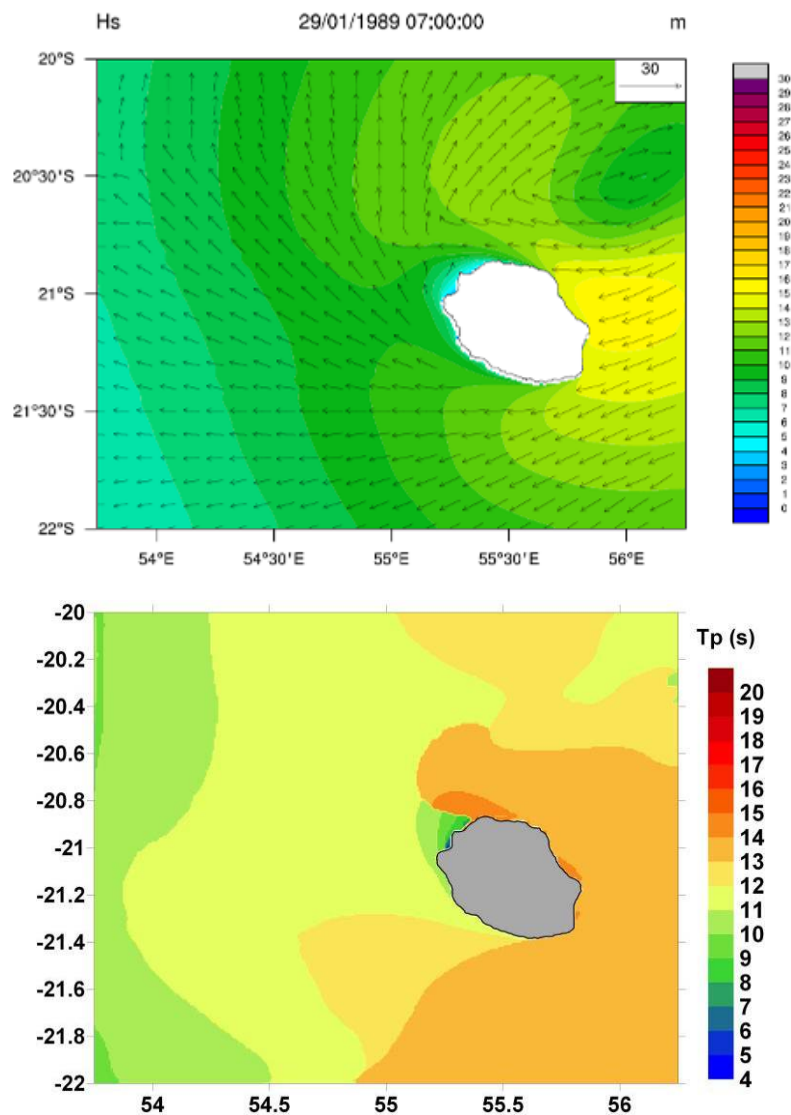


Figure 29. Hauteur significative et direction de propagation (haut) et période de pic (bas) des vagues calculées avec SWAN au Rang 1 pour le cyclone Firinga le 29/01/1989 à 07h TU.

Au nord et au sud, les hauteurs significatives des vagues font entre 10m et 13m avec une direction parallèle à la côte. Sur la partie nord-ouest de l'île les hauteurs significatives des vagues H_s atteignent au maximum 7 à 8m (Figure 30).

Conclusion

La Figure 30 représente la hauteur significative maximale de vague calculée pendant le passage du cyclone Firinga sur le domaine du Rang 1 de la simulation. Le type de trajectoire de Firinga induit une houle de provenance est-nord-est. La trajectoire de Firinga passe proche de l'île et la houle la plus importante s'abat sur la façade est de l'île qui est la plus exposée à ce type de direction incidente.

La houle résultante à la côte est peu importante quelque soit la façade (au maximum 13 à 15 m au large de la façade est).

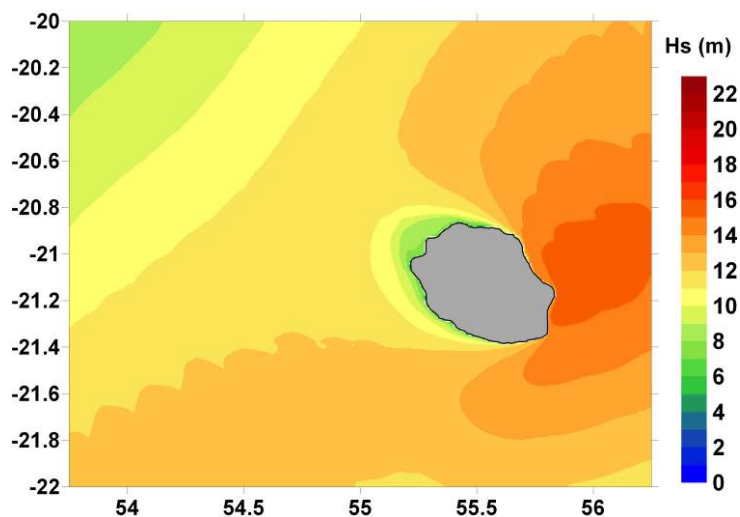


Figure 30. Hauteur significative maximum générée en chaque point par le cyclone Firinga autour de La Réunion du 25/01/89 à 00h au 02/02/89 à 06h.

5.5. COMPARAISON AVEC L'ETUDE DE DHI (2007)

En 2007 DHI a réalisé pour Egis EAU SA une étude de modélisation numérique des houles cycloniques aux abords de la côte nord-ouest de La Réunion afin d'établir différentes conditions de houles pour la nouvelle liaison Saint Denis Ouest. Cette étude tient compte de 21 cyclones, dont 5 font partis des cyclones traités dans ce rapport, pour lesquels elle fournit les hauteurs significatives calculées au niveau d'un point situé au large de la côte nord-ouest de l'île (Figure 31 : Point C : 55,36E - 20,845S, profondeur de 1200m).

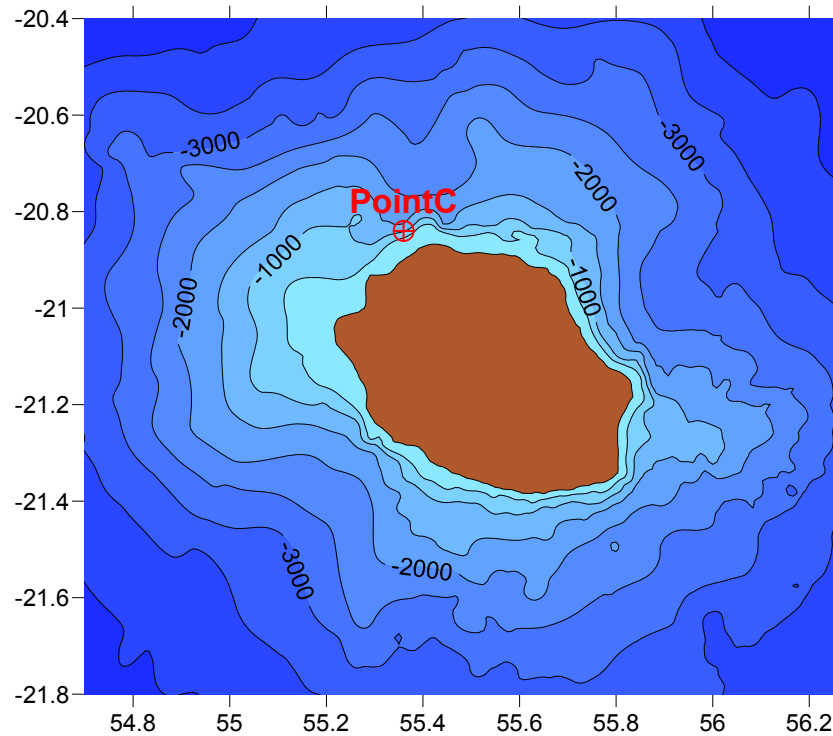


Figure 31. Positionnement du point de référence C de l'étude de DHI de 2007.

Le Tableau 6 présente la comparaison des hauteurs significatives de houle simulées par DHI et par le BRGM (présente étude).

	BRGM (présente étude)	DHI (2007)
Gamède	9m	8.4m
Dina	18m	12.5m
Firinga	9m	6.0m
Hollanda	8m	4.4m
Colina	12m	7.9m

Tableau 6. Comparaison de houles significatives simulées par DHI et par le BRGM au point C.

Pour le cyclone Gamède, les études du BRGM et de DHI donnent des résultats proches : respectivement 9m et 8,4m au point C et respectivement 6,5m et 7m près de la côte au niveau du houlographe du Port-Est (cf. Figure 11). Dans l'étude de DHI, différents types de vents paramétriques ont été utilisés (le modèle DHI Cywind, le modèle paramétrique de Météo-France Réunion et le modèle opérationnel Météo-France). Il est précisé dans le rapport DHI (2007) que pour obtenir la bonne valeur du pic de houle enregistré par les houlographes, les vents ont dû être ajustés (application d'une majoration de 10 % de l'intensité du vent). Le vent paramétrique M2 du BRGM, utilisé pour simuler la houle de Gamède a été validé sans aucun ajustement (cf. paragraphes 4.4.1 et 4.4.2).

Pour les autres cyclones dits non validés (car il n'existe pas de mesures de houles sur la façade nord de l'île pour la validation), les résultats des deux études présentent des différences notables. DHI a utilisé le vent paramétrique de Météo-France Réunion et l'a majoré de 10% (facteur utilisé par DHI pour ajuster le champ de vent du cyclone de Gamède) pour pallier notamment la faible résolution spatiale de ces vents ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$). A noter que cette méthode n'est pas très robuste car, comme indiqué par DHI, l'ajustement à appliquer n'est pas le même pour tous les cyclones. Il dépend de nombreux paramètres dont l'intensité du vent, sa trajectoire, etc.

De plus, le paragraphe 4.2.2 du rapport de DHI fait état d'une possible sous-estimation des Hs pour les cyclones non validés (dont Dina, Firinga, Hollanda et Colina). Ils constatent que les hauteurs de houle centennale obtenues sur un échantillon réduit de 10 cyclones validés sont bien plus importantes que celles obtenues sur l'ensemble des 21 cyclones (validés et non validés). Cette différence est de l'ordre de +2 à +3m.

Dans la présente étude, les méthodes M1 et M2, ont été appliquées pour générer tous les champs de vent sans ajustement supplémentaire. C'est pourquoi, pour Dina et Hollanda, reproduits avec la méthode M2, une bonne confiance peut être accordée aux résultats de la présente étude. D'autre part, des tests sur les méthodes M1 (symétrique) et M2 (asymétrique) effectués pour Dina, indiquent que l'on peut s'attendre à une surestimation de Hs de 5% au niveau du point C pour Firinga et Colina.

Finalement les deux constats suivant peuvent être réalisés :

- la méthode du BRGM pour la construction des vents (sans ajustement des vents pour obtenir les bons pics de houle pour Gamède et Dina) semble plus robuste ;
- la possible sous-estimation des Hs calculés par DHI tendent à indiquer que les valeurs issues de la présente étude sont plus proches de la réalité.

5.6. RECONSTITUTION DE CYCLONES FICTIFS (OU PSEUDO-CYCLONES)

Afin d'envisager des cas de cyclones plausibles, bien que jamais observés, deux cyclones fictifs ont été créés en translatant la trajectoire des cyclones réels Hary (exercice déjà effectué par Météo-France et DHI) et Géralda ayant engendré de fortes houles bien plus au nord de La Réunion. Ces cyclones ont été choisis pour leur vraisemblance aux latitudes proches de La Réunion. En effet, le potentiel énergétique au niveau de l'île, lié à la température de l'eau de mer, permet à des cyclones d'intensité 6,5 sur l'échelle de Dvorak (c'est-à-dire 60 nœud maximum) de passer près de l'île (*Météo-France, 2007*).

Les cyclones ont été translatés en déplaçant la trajectoire de manière à faire coïncider le pic de houle à un passage sur la côte réunionnaise. Comme les houles maximales sont observées à gauche de la trajectoire (dans le sens de déplacement du cyclone), les nouvelles trajectoires passent au nord de La Réunion.

5.6.1. Pseudo-Geralda

Champs de vent paramétriques

Le cyclone fictif créé à partir de Géralda a été obtenu en translatant la trajectoire pour faire passer le maximum d'intensité du vent, soit 120 m/s le 01/02/1994 à 00h, au plus proche de l'île (cf. Figure 32) puis en appliquant la méthode M2. Le cyclone pseudo-Geralda créé est semblable à Dina avec des vents plus intenses.

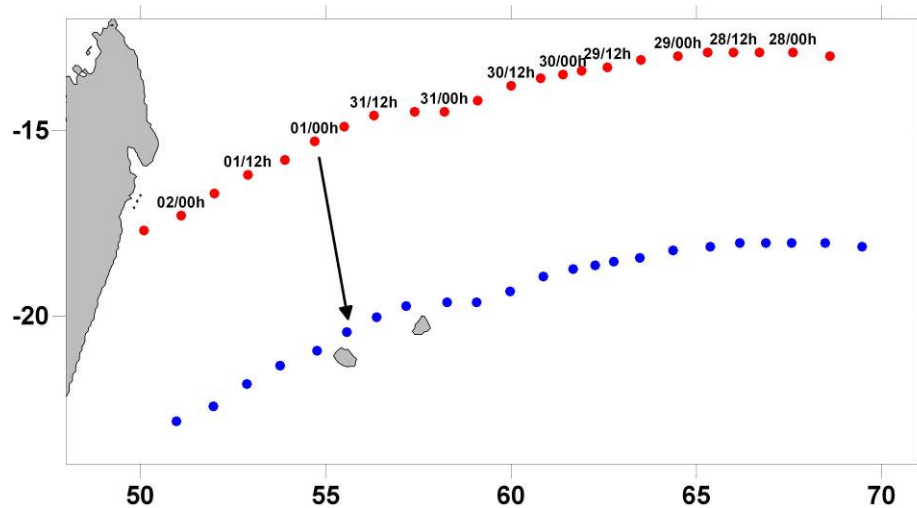


Figure 32. Translation de la trajectoire de Geralda (en février 1994).

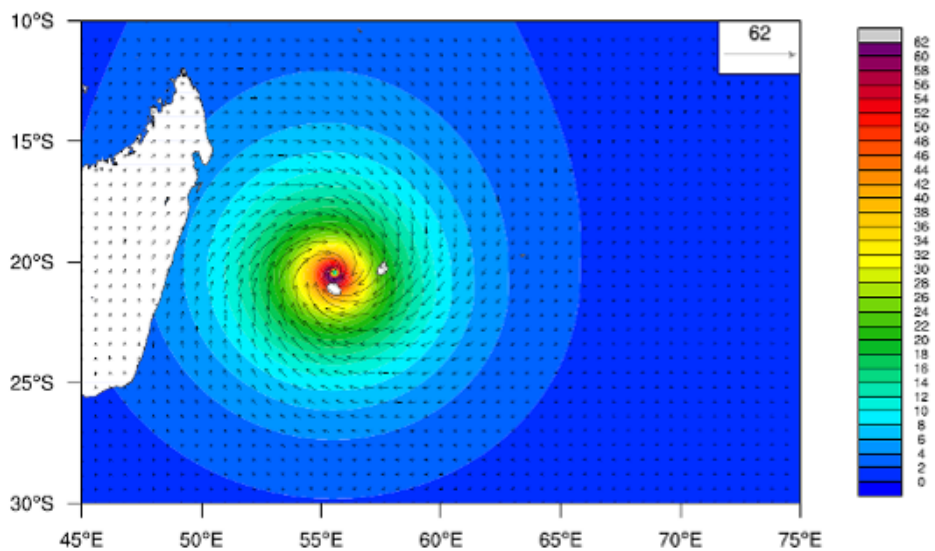


Figure 33. Champ de vent cyclonique du cyclone fictif pseudo-Geralda le 01/02/1994 à 00h.

Simulation de la houle cyclonique

Le cyclone pseudo-Géralda génère des vagues de 25m maximum au nord de La Réunion (cf. Figure 34). La trajectoire choisie est particulièrement impactante pour les façades nord et nord-est. Les vagues les plus importantes sont de provenance est-nord-est.

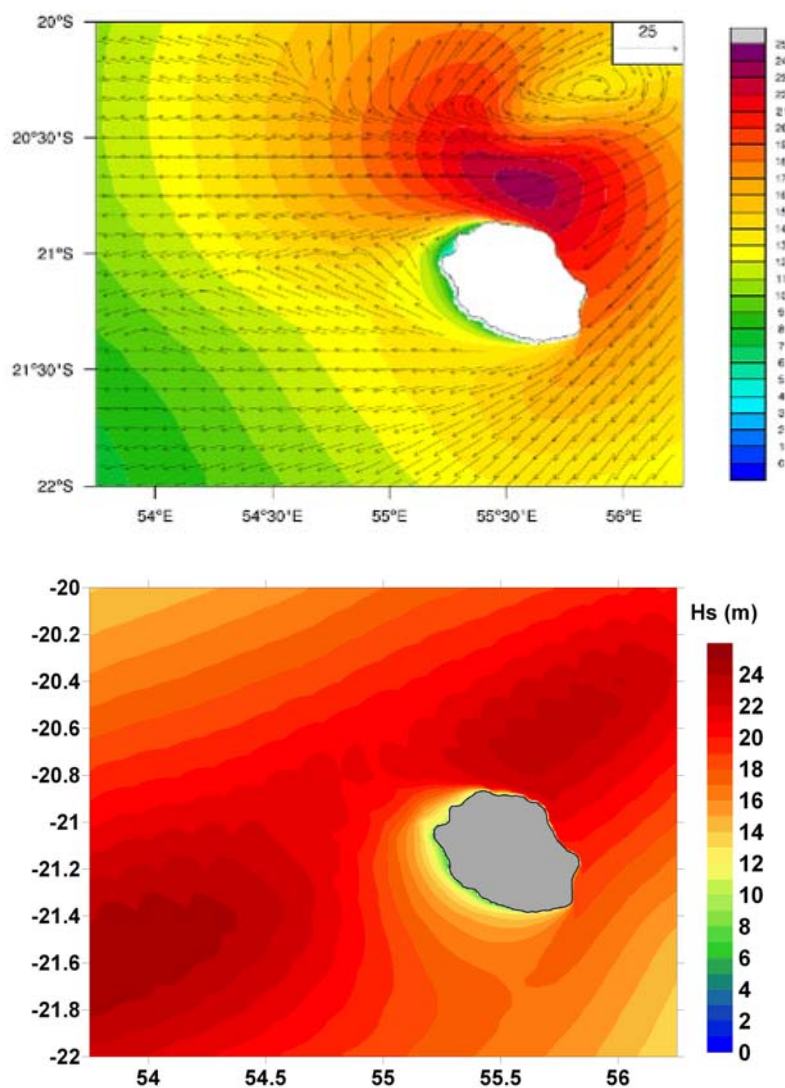


Figure 34. Haut : Hauteur significative et direction des vagues calculées avec SWAN au Rang 1 pour le cyclone pseudo-Géralda le 01/02/1994 à 00h. Bas : Hauteur significative maximale générée en chaque point du domaine lors du passage de pseudo-Géralda.

5.6.2. Pseudo-Hary

Champs de vent paramétriques

Le cyclone fictif crée à partir de Hary a été obtenu en translatant la trajectoire pour faire passer le maximum d'intensité du vent (le 10/03/2002 à 00h) au plus proche de l'île (cf. Figure 35).

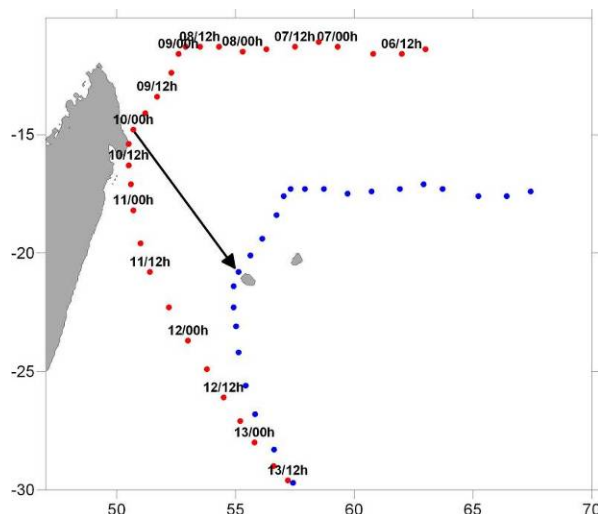


Figure 35. Translation de la trajectoire de Hary (en mars 2002).

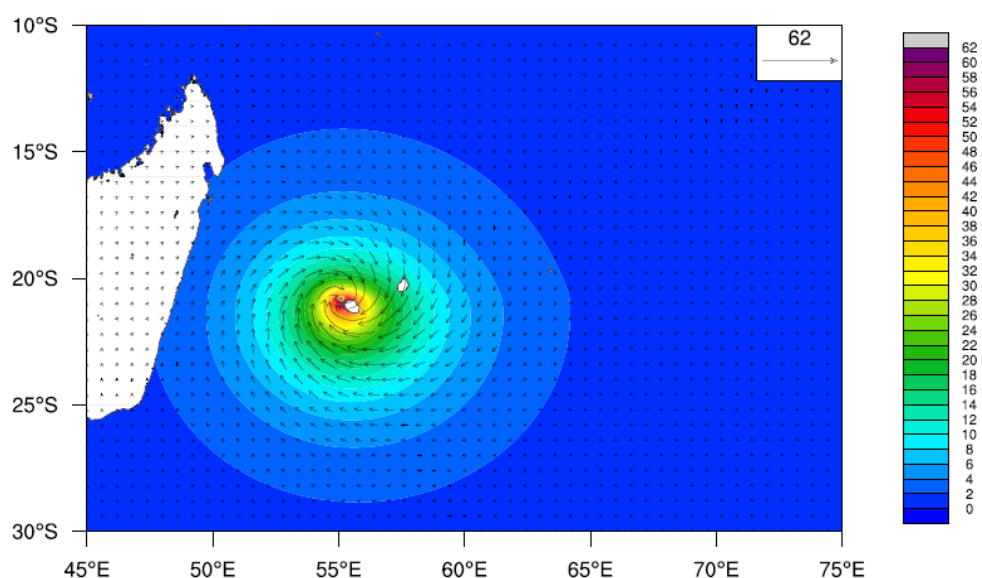


Figure 36. Champ de vent cyclonique du cyclone pseudo-Hary le 10/03/2002 à 00h

Simulation de la houle cyclonique

Le cyclone pseudo-Hary a généré des vagues de 20m maximum au nord de La Réunion (cf. Figure 37). La trajectoire choisie est particulièrement impactante pour la façade nord ainsi que pour les parties nord-est et nord-ouest de l'île. Les vagues les plus importantes sont de provenance nord-nord-est.

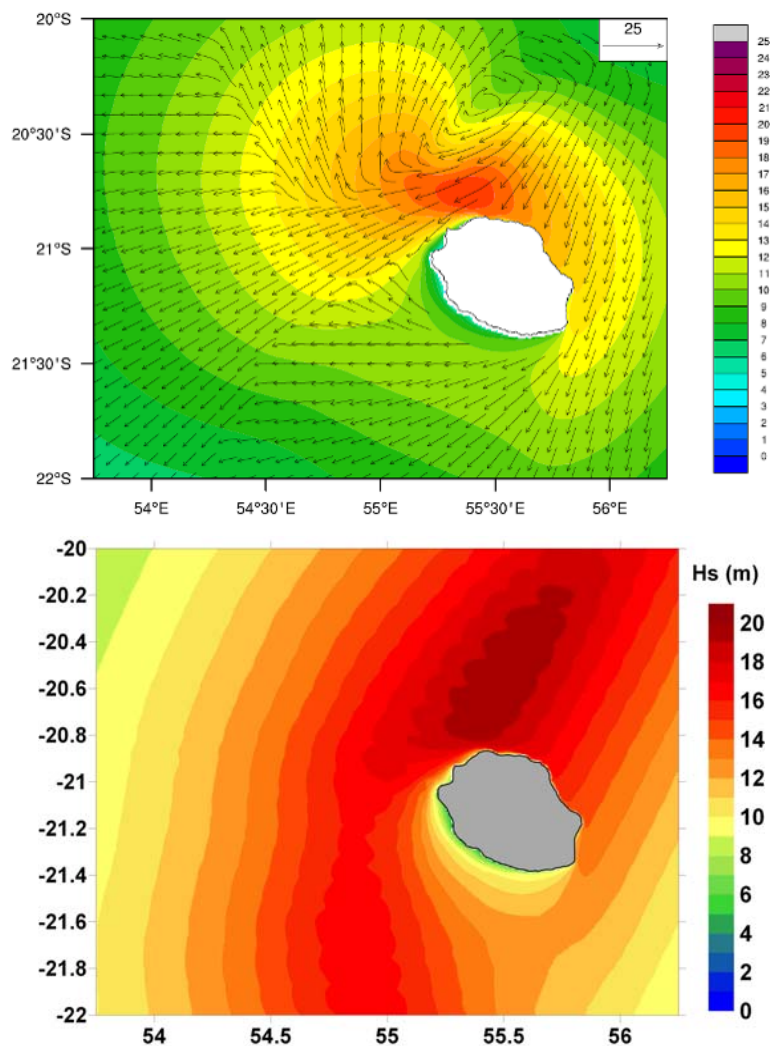


Figure 37. Haut : Hauteur significative et direction des vagues calculées avec SWAN au Rang 1 pour le cyclone fictif pseudo-Hary le 09/03/2002 à 22h . Bas : Hauteur significative maximum générée en chaque point du domaine par le cyclone fictif pseudo-Hary autour de La Réunion.

5.7. ANALYSE PAR FAÇADE DES SITUATIONS DE HOULE CYCLONIQUE LES PLUS IMPACTANTES

Pour toutes les façades de l'île, Dina est le cyclone qui engendre la plus grande houle cyclonique au large. Cependant, certains cyclones étudiés peuvent créer des vagues plus importantes près de la côte sur certaines façades littorales en fonction de la direction de la houle cyclonique au large (cf. paragraphes 5.1 à 5.4).

Afin de comparer plus précisément l'impact des cyclones et de mieux cerner les trajectoires les plus pénalisantes par façade, des cartes de hauteur significative maximum en chaque point tous cyclones confondus sont présentées.

5.7.1. Façade nord

Cyclones réels

Pour la façade nord, deux cyclones sont particulièrement impactants (cf. Figure 38) : **Dina**, dont la houle cyclonique est de provenance est-nord-est avec des hauteurs significatives au large de 22m et une période pic de 18 s face à la côte nord, et **Colina**, dont la houle arrive du nord-nord-est, presque orthogonalement à la côte avec une hauteur significative au large de 16m et une période pic de 14s face à la côte nord.

Ainsi, même si Dina induit des vagues plus importantes au large, celles-ci sont réfractées pendant leur propagation jusqu'à la côte et peuvent engendrer des vagues plus petites en certains endroits de la côte. La houle du cyclone Gamède a également été considérée pour cette façade. Cependant, compte tenu de la distance de l'œil de Gamède à l'île de La Réunion (plus éloigné que celui de Dina), la hauteur significative maximale des vagues générées par Gamède sont plus faibles que celles de Dina.

Sur l'isobathe à 20m (cf. Figure 38), les vagues les plus hautes sur toute la façade sont en majorité créées par Dina. La hauteur des vagues n'est pas uniforme, elle dépend de l'orientation de la côte. La partie la plus à l'est est plus exposée avec des vagues d'une douzaine de mètres (point 34, cf. Figure 39). A l'ouest, les vagues tendent à diminuer et sont inférieures à 10m à l'extrémité de la façade.

Les vagues engendrées par Dina sont de provenance **est-nord-est**, donc très obliques par rapport à la côte (cf. Figure 40). La période de pic moyenne est d'environ **18s** (cf. Figure 17).

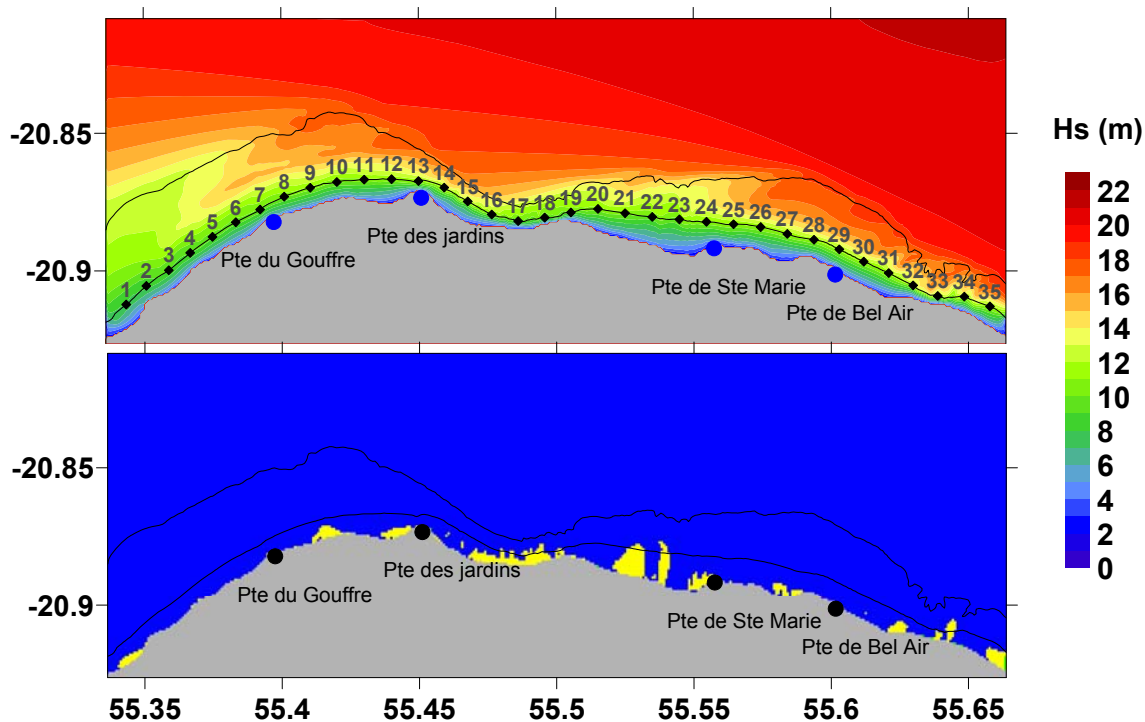


Figure 38. Haut : Hauteur significative de vague maximale générée en chaque point de la façade nord tous cyclones confondus (les isobathes indiquent 20m et 100m de fond). Bas : code couleur indiquant le cyclone ayant généré les vagues les plus hautes (bleu : Dina, jaune : Colina, vert : Firinga, rouge : Hollanda).

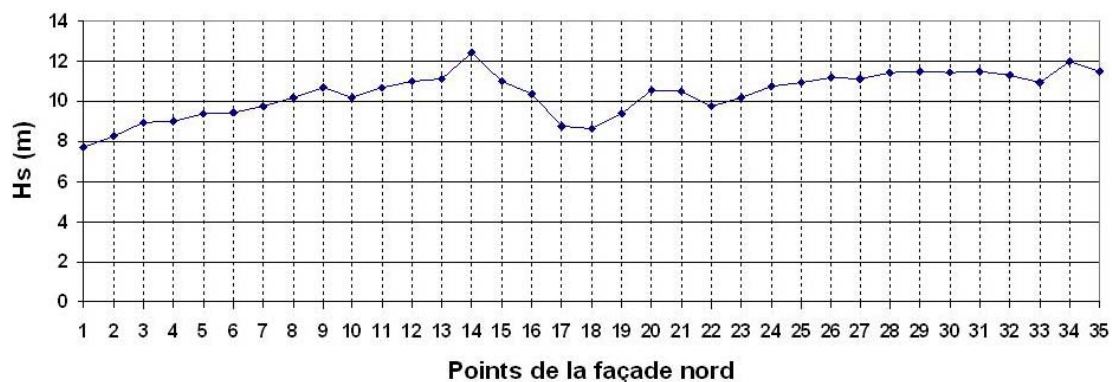


Figure 39. Hauteur significative maximale des vagues calculée avec tous les cyclones de référence par 20m de fond le long de la façade nord. Les positions des points sont indiqués Figure 38.

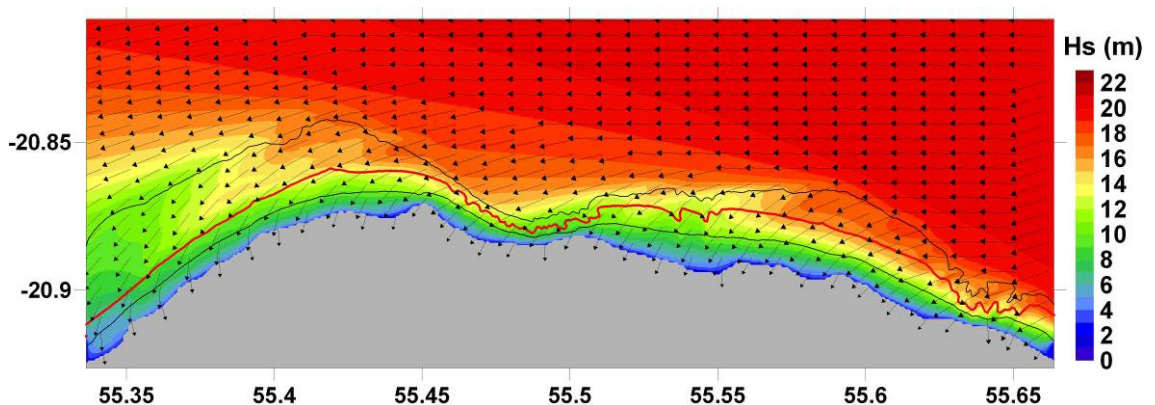


Figure 40. Hauteur et direction des vagues engendrées par Dina au moment le plus critique pour la façade nord, le 22/01/02 à 14h. L'isobathe rouge indique 50 mètres de profondeur.

Cyclones fictifs

Les deux pseudo-cyclones ont engendré des vagues plus importantes par 20m de fond que les cyclones étudiés jusqu'à présent (cf. Figure 41) car :

- Pseudo-Géralda, bien que similaire à Dina par sa trajectoire et la direction de sa houle cyclonique, est plus intense.
- Pseudo-Hary, dont la trajectoire est orientée vers le sud au passage de La Réunion, génère une houle de nord-nord-est, plus impactante pour la façade nord bien que moins importante au large.

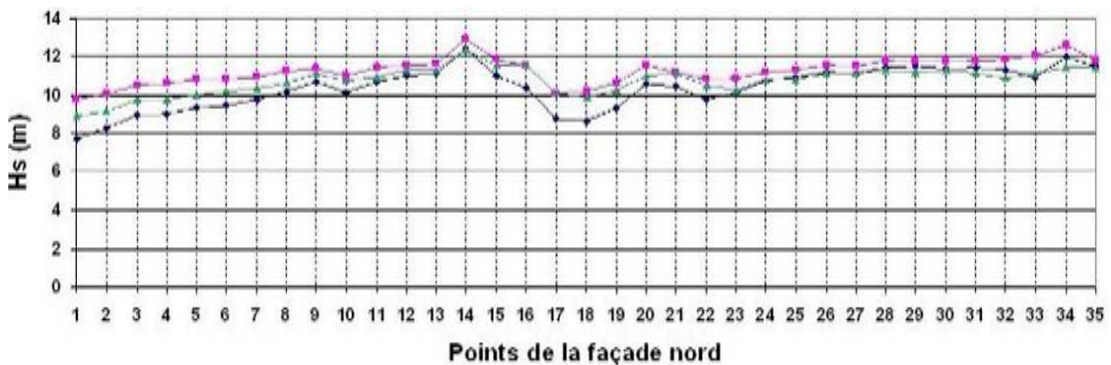


Figure 41. Hauteur significative des vagues par 20m de fond le long de la façade nord (bleu : hauteur maximum générée avec les cyclones de référence, vert : hauteur maximum générée par pseudo-Hary, rose : hauteur maximum générée par pseudo-Géralda). Les positions des points sont indiquées Figure 38.

5.7.2. Façade sud

La façade sud est plus concernée par des cyclones du type de **Hollanda** dont la trajectoire passe à l'est de l'île. En effet, cette configuration crée une houle d'est au sud de l'île (cf. Figure 21) dont la direction est plus défavorable que celle des houles plus classiques de nord-est car la côte est orientée vers le sud ou le sud-ouest. Ainsi, même si Dina provoque des houles plus importantes très au large autour de l'île, celle-ci s'éloignent de la côte et à faible profondeur, les houles d'est de Hollanda sont plus impactantes (cf. Figure 42). La partie de la façade sud située à l'est de la pointe de la table (côte orientée Nord-Sud) reste plus exposée à la houle cyclonique de Dina car la différence entre les directions incidentes des houles de Dina et Hollanda est ici plus faible (cf. Figure 17 et Figure 21).

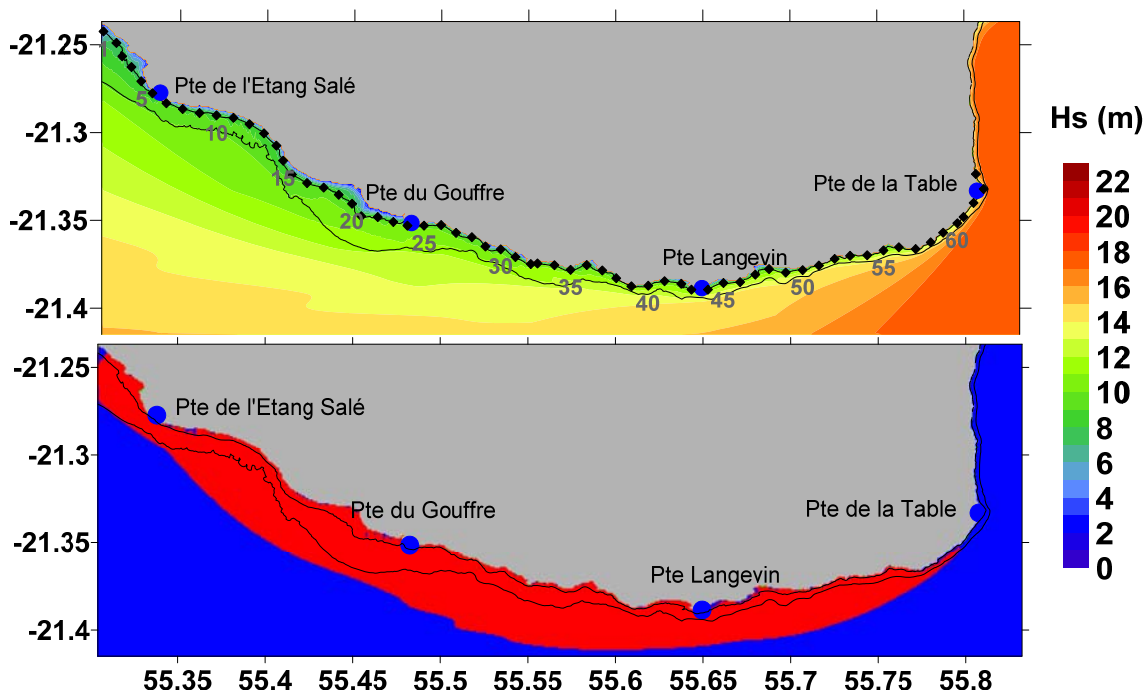


Figure 42. Haut : Hauteur significative de vague maximale générée en chaque point de la façade sud tous cyclones confondus (les isobathes indiquent 20m et 100m de fond). Bas : code couleur indiquant le cyclone ayant généré les vagues les plus hautes (bleu : Dina, jaune : Colina, vert : Firinga, rouge : Hollanda).

Sur l'isobathe à 20m (cf. Figure 43), la hauteur des vagues atteint presque 14m à l'est (points 63) et s'échelonne de 10m à 5m au fur et à mesure que l'on se dirige vers l'ouest (points 1 à 55).

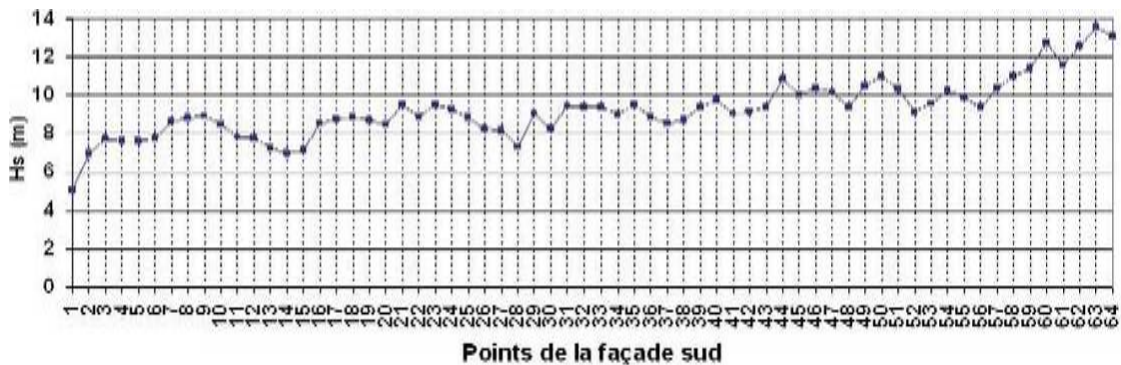


Figure 43. Hauteur significative maximale des vagues calculée avec tous les cyclones de référence par 20m de fond le long de la façade sud.
Les positions des points sont indiqués Figure 42.

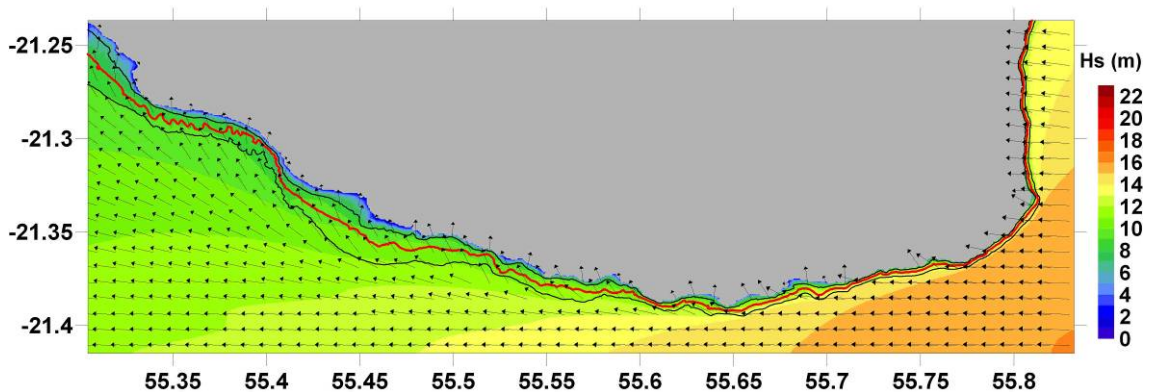


Figure 44. Hauteur et direction des vagues engendrées par Hollanda au moment le plus critique pour la façade sud, le 11/02/94 à 5h. L'isobathe rouge indique 50 mètres de profondeur.

Les vagues les plus importantes sur la façade sud (exceptée la partie à l'est de la Pointe de la Table) sont générées par Hollanda dont la houle cyclonique provient de l'est. Leur provenance est très oblique à la côte (cf. Figure 44). Sur la moitié ouest (jusqu'au point 40 environ), la période pic est de **12s** alors que sur la partie plus à l'est de la côte (point 60), la période atteint **14s** (cf. Figure 21).

5.7.3. Façade ouest

La Figure 45 présente la hauteur significative maximale simulée en chaque point de la façade ouest pour tous les cyclones. Or, comme le montre la Figure 46, les hauteurs des vagues calculées avec la méthode M1 sont surestimées (jusqu'à 50%) sur cette façade pour des cyclones de trajectoire type Dina comme Firinga et Colina (cf. paragraphes 5.3 et 5.4). Ces zones surestimées sont hachurées sur la Figure 45. Elles sont écartées par la suite.

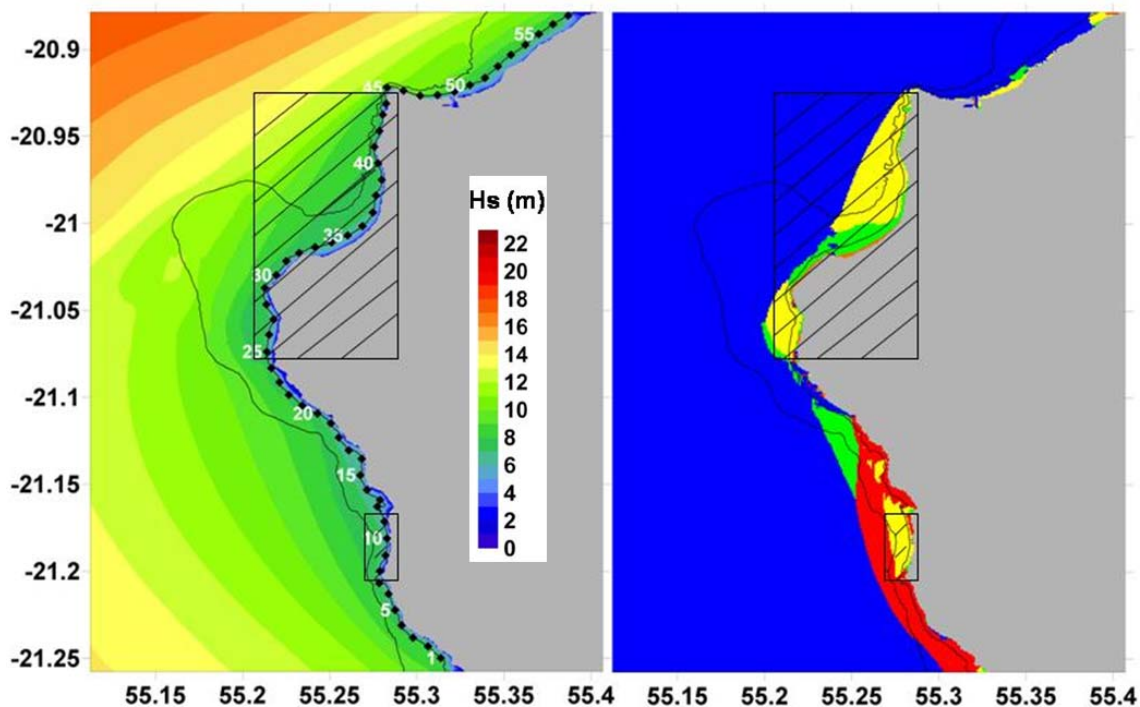


Figure 45. Gauche : Hauteur significative de vague maximale générée en chaque point de la façade ouest tous cyclones confondus (les isobathes indiquent 20m et 100m de fond). Droite : couleur indiquant le cyclone ayant généré les vagues les plus hautes (bleu : Dina, jaune : Colina, vert : Firinga, rouge : Hollanda).

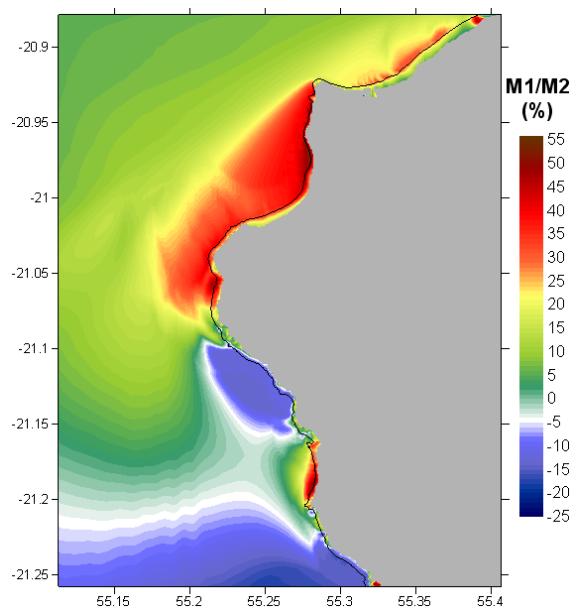


Figure 46. Rapport en % des hauteurs des vagues calculées avec les méthodes M1 et M2 pour Dina (rapport = $(Hs(M1) - Hs(M2)) / Hs(M2)$).

La Figure 47 reprend donc la même analyse avec les cyclones Hollanda et Dina seulement. Les cyclones Colina et Firinga, modélisés avec la méthode M1, ont été exclus. Finalement, on retrouve une influence dominante de **Dina au nord** de la pointe des Aigrettes et de **Hollanda au sud** de la pointe des Aigrettes.

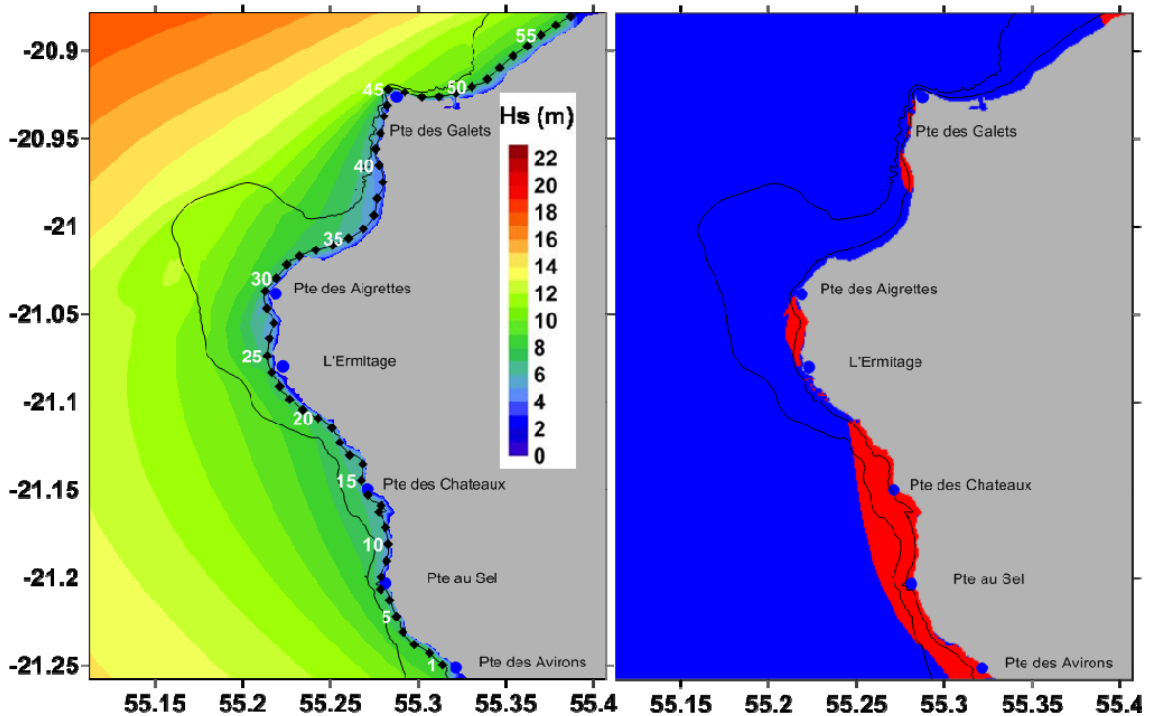


Figure 47. Gauche : Hauteur significative de vague maximale générée en chaque point de la façade ouest avec Dina et Hollanda (les isobathes indiquent 20m et 100m de fond). Droite : code couleur indiquant le cyclone ayant généré les vagues les plus hautes (bleu : Dina, rouge : Hollanda).

Au niveau de l'isobathe à 20m (cf. Figure 48), les vagues s'échelonnent de 4m à 9m en ne considérant que Dina et Hollanda (courbe bleu clair). La partie la plus au nord est la plus exposée car elle est sous l'influence de cyclones de type Dina. Les zones les plus protégées sont les baies enclavées (points 35 à 40 et points 8 à 13).

Etant donné que Gamède est le cyclone le plus récent ayant provoqué d'importants dégâts sur la façade Ouest (notamment dans la baie de Saint Paul), il a été jugé intéressant de le comparer aux autres houles cycloniques sur cette façade. Les résultats montrent que la hauteur significative maximale des vagues générées par Gamède sont plus faibles que celles de Dina en raison de la distance de l'œil de l'île de La Réunion (plus éloigné que celui de Dina).

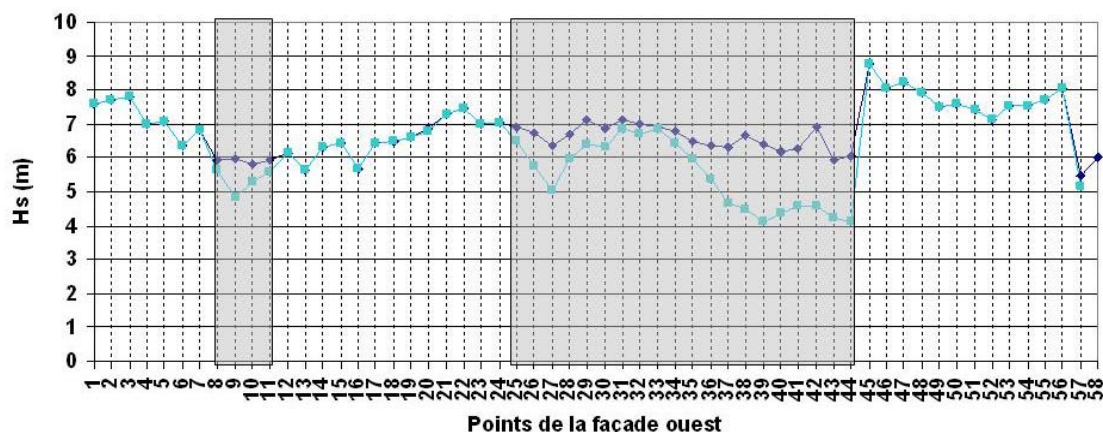


Figure 48. Bleu foncé : Hauteur significative maximale des vagues calculée avec tous les cyclones de référence par 20m de fond le long de la façade ouest. Bleu clair : Hauteur significative maximale des vagues calculée avec les cyclones Dina et Hollanda par 20m de fond sur la façade ouest. Les zones grisées correspondent aux deux zones hachurées sur la Figure 45. Les positions des points sont indiqués Figure 45.

Les vagues les plus importantes pour la façade ouest sont générées par Hollanda et Dina. Sur la partie la plus au sud (sud de la Pointe des Aigrettes), les vagues sont engendrées par Hollanda et proviennent du **sud**. Sur la partie la plus au nord (nord de la Pointe des Aigrettes), les vagues sont engendrées par Dina et proviennent du **nord-nord-est**. Tout comme pour la façade nord, leur provenance est très oblique à la côte (cf. Figure 49). La période pic s'échelonne de **10s au sud à 18s au nord** (cf. Figure 17 et Figure 21). La hauteur significative de la houle (à 20 mètres de profondeur) varie de 5 à 8 mètres au sud et de 4 à 9 mètres au nord.

5.7.4. Façade est

Cyclones réels

Cette façade est directement exposée aux trajectoires des cyclones les plus classiques qui viennent du nord-est (cf. Figure 50) dont le cyclone **Dina** est l'exemple type.

Sur l'isobathe à 20m (cf. Figure 51), la hauteur des vagues varie entre 10m et 14m selon l'orientation de la côte.

Cette façade est la seule exposée à une houle cyclonique intense qui se propage quasi frontalement à la côte. Ainsi, les vagues engendrées par Dina, venant d'**est-nord-est**, sont les plus impactantes (Figure 50 et Figure 52). La période correspondant aux vagues les plus importantes va de **15s à 18s** tout au nord de la façade. La hauteur significative de la houle par 20 mètres de profondeur varie de 10 à 14 mètres.

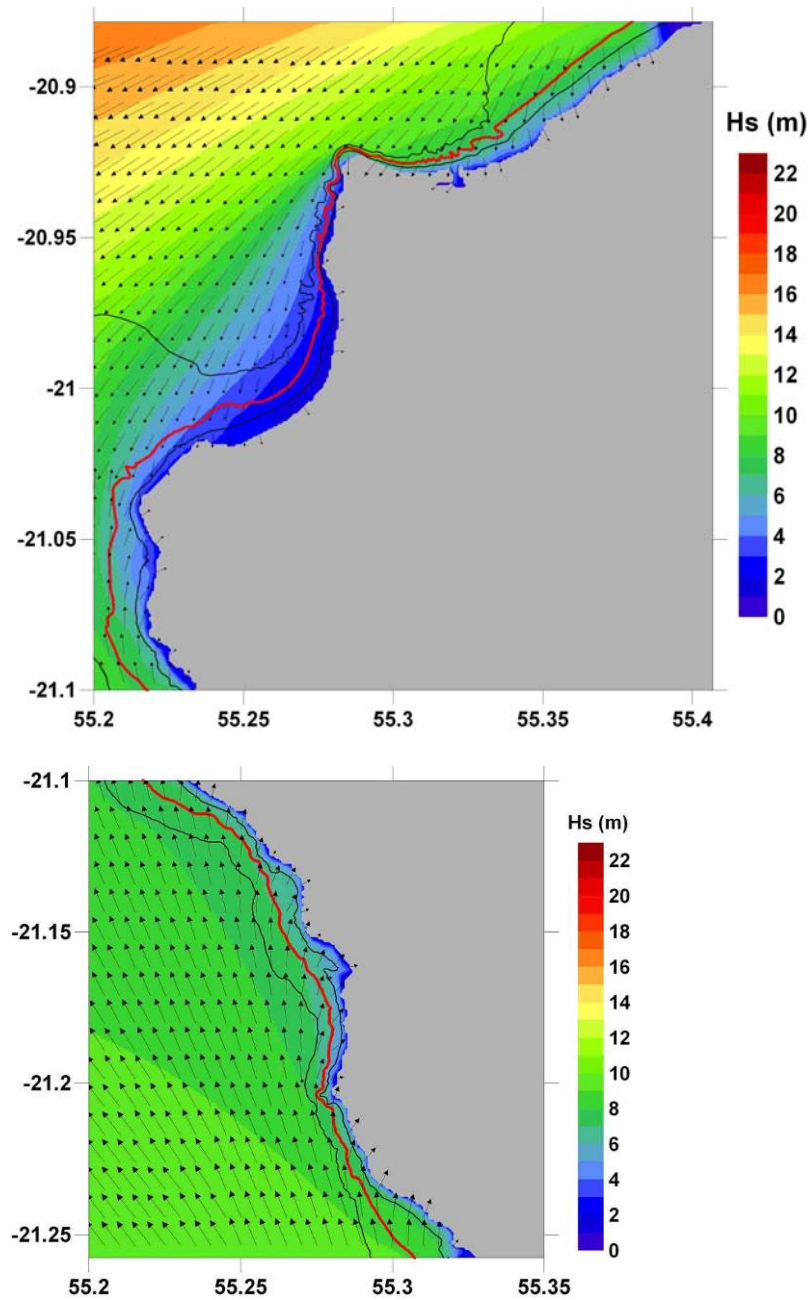


Figure 49. Hauteur et direction des vagues engendrées par Hollanda le 11/02/94 à 18h (bas) et Dina le 22/01/02 à 16h (haut) aux moments les plus critiques pour la façade ouest. L'isobathe rouge indique 50 mètres de profondeur.

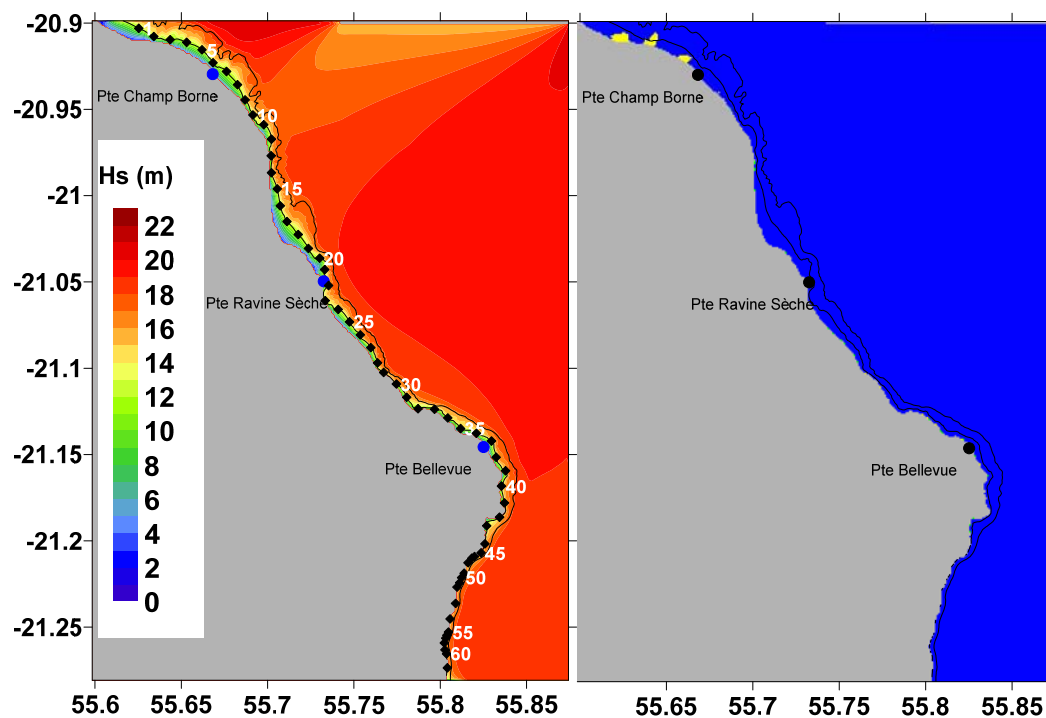


Figure 50. Hauteur significative de vague maximale générée en chaque point de la façade est tous cyclones confondus (les isobathes indiquent 20m et 100m de fond). Droite : code couleur indiquant le cyclone ayant généré les vagues les plus hautes (bleu : Dina, jaune : Colina, vert : Firinga, rouge : Hollanda).

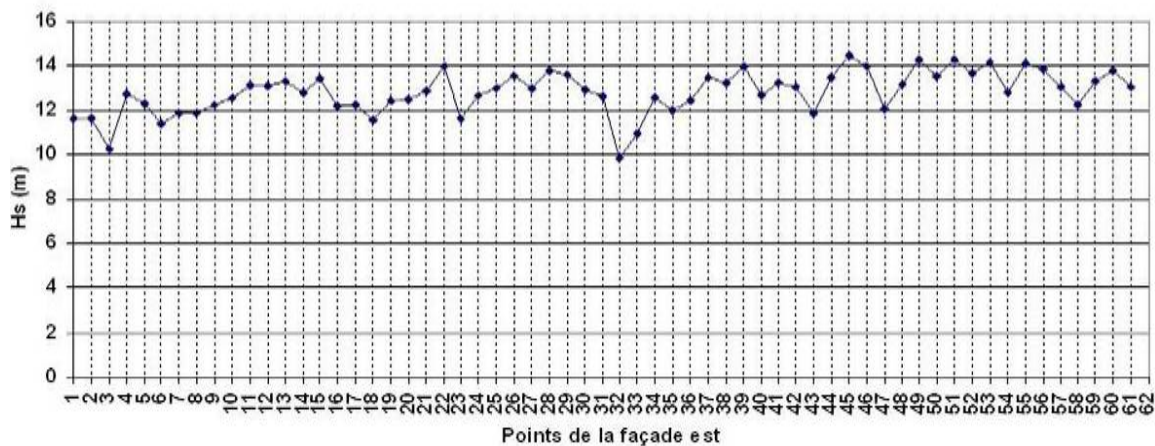


Figure 51. Hauteur significative des vagues par 20m de fond le long de la façade est. Les positions des points sont indiqués Figure 50

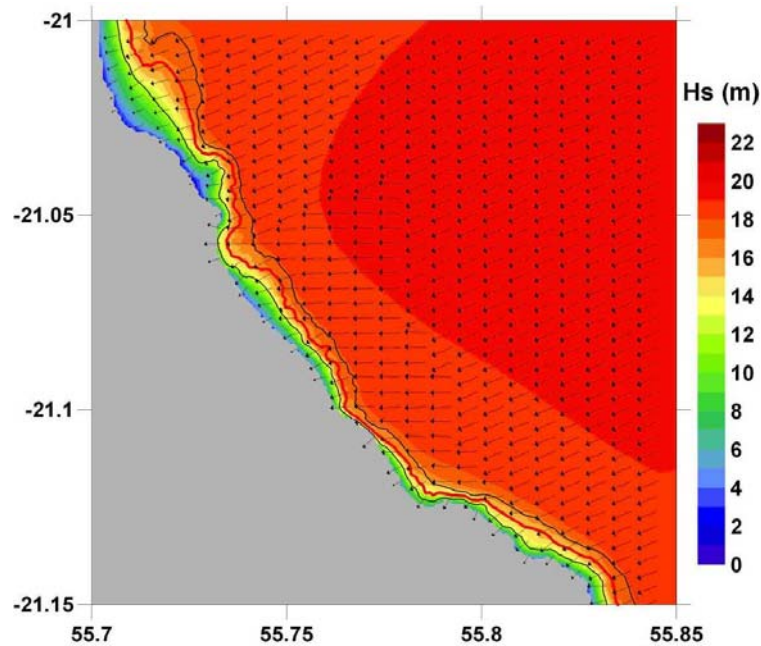


Figure 52. Hauteur et direction des vagues engendrées par Dina au moment le plus critique pour la façade est, le 22/01/02 à 14h. L'isobathe rouge indique 50 mètres de profondeur.

Cyclones fictifs

Pour la façade est, les pseudo-cyclones n'ont pas engendré de vagues plus importantes près de la côte que Dina.

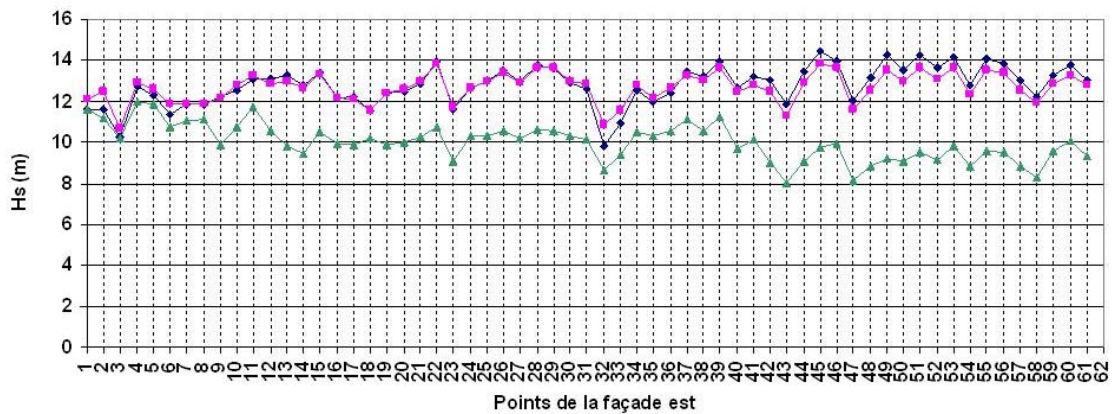


Figure 53. Hauteur significative des vagues par 20m de fond le long de la façade est (bleu : hauteur maximum générée avec les cyclones de référence, vert : hauteur maximum générée par pseudo-Hary, rose : hauteur maximum générée par pseudo-Géralda).
Les positions des points sont indiquées Figure 50

5.8. CONCLUSIONS SUR LES HOULES CYCLONIQUES

Afin de déterminer les conditions de houles les plus impactantes sur chaque façade de l'île, les hauteurs significatives maximales des événements modélisés sont comparées à 20 mètres de profondeur. En effet, il s'agit de la profondeur minimale de validité du modèle mis en place. On peut considérer qu'à 20m de fond, les houles prises en compte ont déjà été réfractée et que la houle la plus forte à 20m sera également la plus impactante à la côte.

Houles cycloniques de référence

En résumé (Figure 54 - haut), Dina apparaît comme le cyclone le plus impactant sur les façades Nord et Est avec des valeurs H_s comprises entre 9 et 14 m sur ces deux façades. Sur la façade Ouest, Dina et Hollanda donnent des valeurs similaires avec des hauteurs significatives de 5 à 9 m. Sur la façade Sud, Hollanda est le plus impactant avec H_s compris entre 7 et 13m.

L'analyse des cyclones fictifs (Figure 54– bas) présente des hauteurs significatives pouvant localement être légèrement plus importantes (10 à 14 m pour pseudo-Géralda) sur la façade Nord et Est. Sur la façade Ouest, seule la zone au Nord de la Pointe de galets est soumise à des houles de pseudo-Géralda plus impactantes avec des valeurs similaires.

Compte-tenu des trajectoires des cyclones retenus comme références, seule la façade Est présente une houle orthogonale à la côte permettant l'application des formules paramétriques de *run-up*.

Occurrence de la houle cyclonique

Le nombre de cyclones réels modélisés dans cette étude (5 cyclones avec Gamède) n'est pas suffisant pour faire une analyse statistique en valeurs extrêmes qui permettrait d'évaluer la hauteur de la houle cyclonique centennale. Il est cependant possible de comparer les résultats obtenus par le BRGM avec l'étude en valeurs extrêmes réalisée par DHI (2007).

DHI a réalisé deux études en valeurs extrêmes sur des échantillons respectifs de 21 cyclones (répartis sur 25 ans entre 1983 et 2007) et 10 cyclones (répartis sur 8 ans entre 2000 et 2007) dont 8 ont été validés grâce aux mesures des houlographes.

Si l'on positionne les valeurs H_s au point C (point de référence DHI – cf. Figure 31) des 5 cyclones modélisés dans le cadre de cette étude sur l'analyse en valeurs extrêmes de DHI, seul Dina présente une période de retour centennale, les autres cyclones ayant une occurrence d'ordre décennale (Figure 55 et Tableau 7).

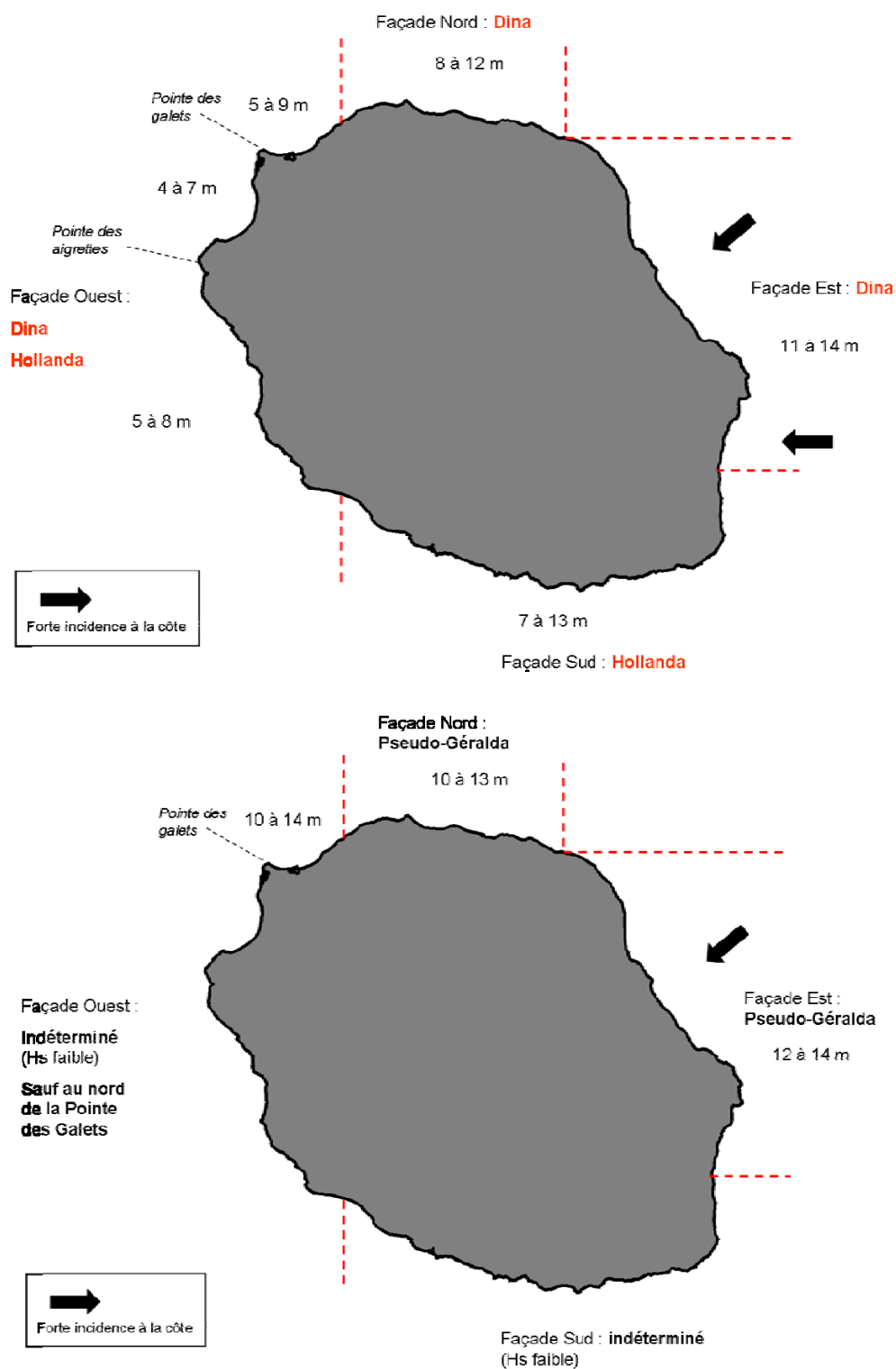


Figure 54 – Synthèse des cyclones(haut) et pseudo-cyclones (bas) impactants par façade (Hs par 20 m de fond et zones de forte incidence de la houle)

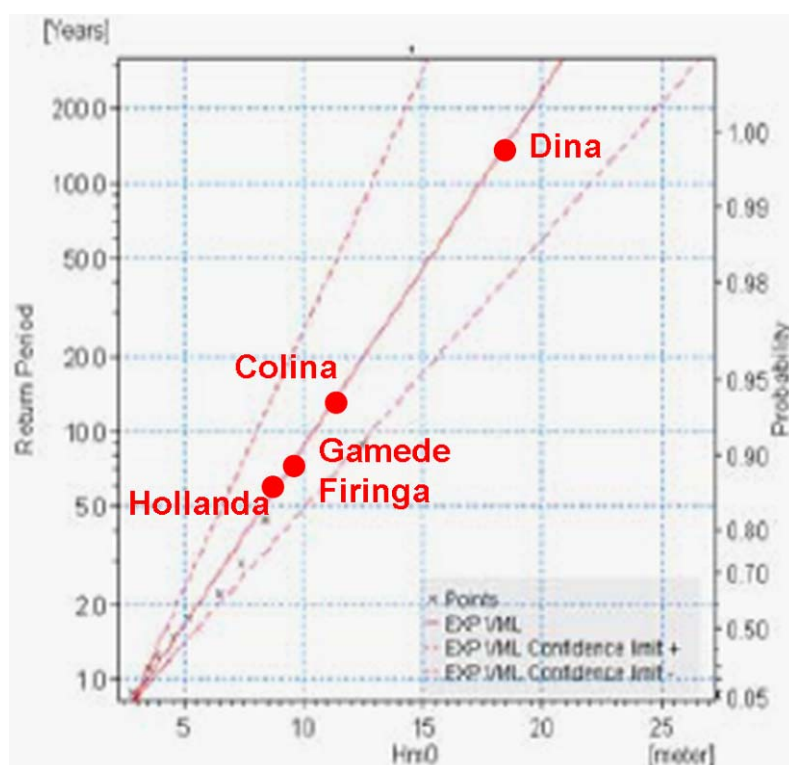


Figure 55. Position des cyclones modélisés dans cette étude sur l'analyse en valeurs extrêmes réalisées par DHI au point C (cf. Figure 31)

	Hs (m) au point C	Période de retour approximative (années)
Gamède	9m	<10
Dina	18m	100
Firinga	9m	<10
Hollanda	8m	<10
Colina	12m	10

Tableau 7. Périodes de retour associées aux houles cycloniques simulées par le BRGM (Gamède, Dina, Firinga, Hollanda, Colina).

En conclusion, si la transposition des valeurs modélisées dans cette étude sur l'analyse en valeurs extrêmes de DHI présente des limites (période de retour calée sur les valeurs DHI et non BRGM, échantillon très court), la distinction (au point C) entre les différents cyclones est telle que **Dina apparaît nettement comme le cyclone de référence et que son occurrence est centennale**, et ce quelque soit la méthode utilisée (DHI ou transposition BRGM/DHI).

6. Houles non cycloniques

6.1. JUSTIFICATION

Si les houles non cycloniques (australes et alizés) n'ont pas des hauteurs significatives au large aussi importantes que les houles cycloniques, elles peuvent néanmoins être les plus pénalisantes sur certaines parties du littoral de l'île en raison de leur orientation sud-ouest à est.

Plus fréquentes, les houles non cycloniques sont bien reproduites par la résolution spatiale des modèles globaux. Elles feront donc l'objet d'études statistiques et les houles australes et d'alizés centennales seront déterminées.

6.1.1. Exemple de houles australes extrêmes

La situation qui a provoqué les houles australes exceptionnelles de mai 2007 est illustrée à travers les Figure 56 et Figure 57.

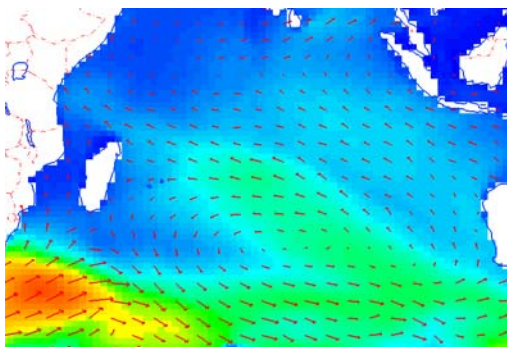
On observe deux pics de houle très marqués : dans la nuit du 12 au 13 Mai 2007, la hauteur significative des vagues atteint des valeurs de 6 mètres au large de La Réunion puis un autre pic est observé le 14 Mai 2007 dans la soirée avec des valeurs de 5 mètres. Ces événements extrêmes ont été d'autant plus destructeurs que les périodes associées aux pics de houle varient de 14 à 16 secondes.

6.1.2. Exemple de houles d'alizés extrêmes

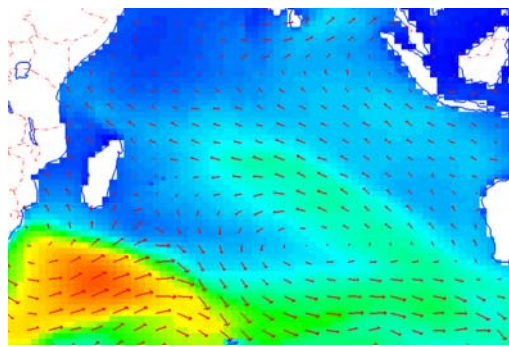
Un exemple de fortes houles d'alizés est fourni par l'évènement du 10 au 13 juillet 2006 (Figure 58). Il met en évidence un pic de houle atteignant des hauteurs significatives de l'ordre de 5 mètres dans le sud de l'île.

Cette situation exceptionnelle est caractérisée par une agitation de la mer précédant la formation des houles d'alizés. Cette agitation, liée aux dépressions de la zone tempérée australe, semble jouer un rôle dans la présence de fortes houles d'alizés à La Réunion. Plus généralement, on constate que tous les événements de houles d'alizés forts (modélisés par NWW3) sont associés à des houles australes fortes dans l'océan indien.

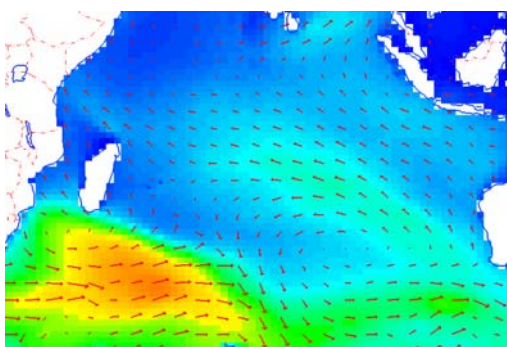
Il est à noter que l'appellation « houle d'alizés » ne couvre pas toutes les houles de secteur est et sud-est, la distinction étant faite avec des vagues liées à des cyclones ou des houles australes ayant la même orientation.



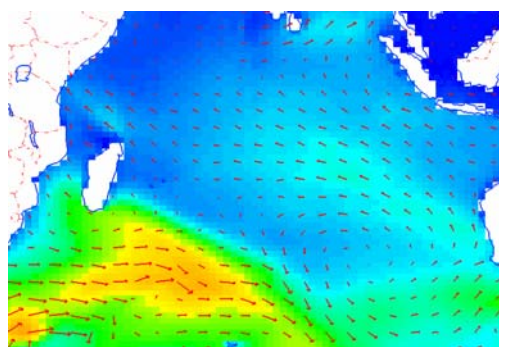
Situation le 10/05/2007 à 21h



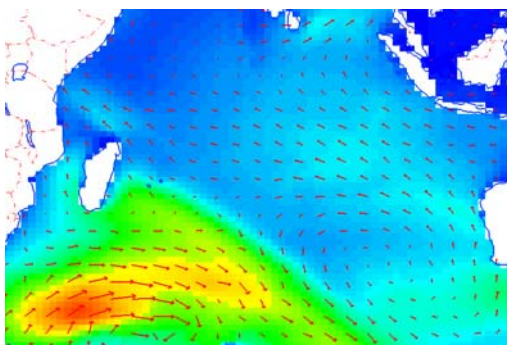
Situation le 11/05/2007 à 9h



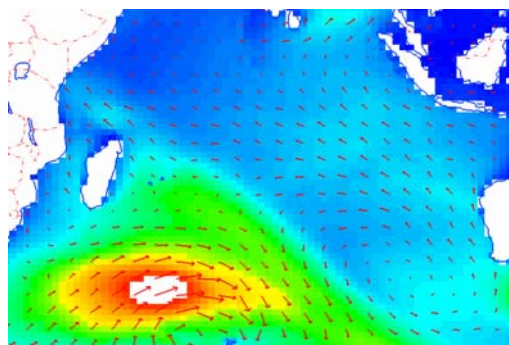
Situation le 11/05/2007 à 21h



Situation le 12/05/2007 à 9h



Situation le 12/05/2007 à 21h



Situation le 13/05/2007 à 9h

Hauteur significative des vagues :



→ Force et direction du vent

Figure 56. Exemple de situation de houles australes extrêmes : hauteur significatives des vagues, force (proportionnelle à la longueur des flèches) et direction du vent du 10 au 13 mai 2007 dans l'océan Indien ; Données : Wavewatch3 de la NOAA.

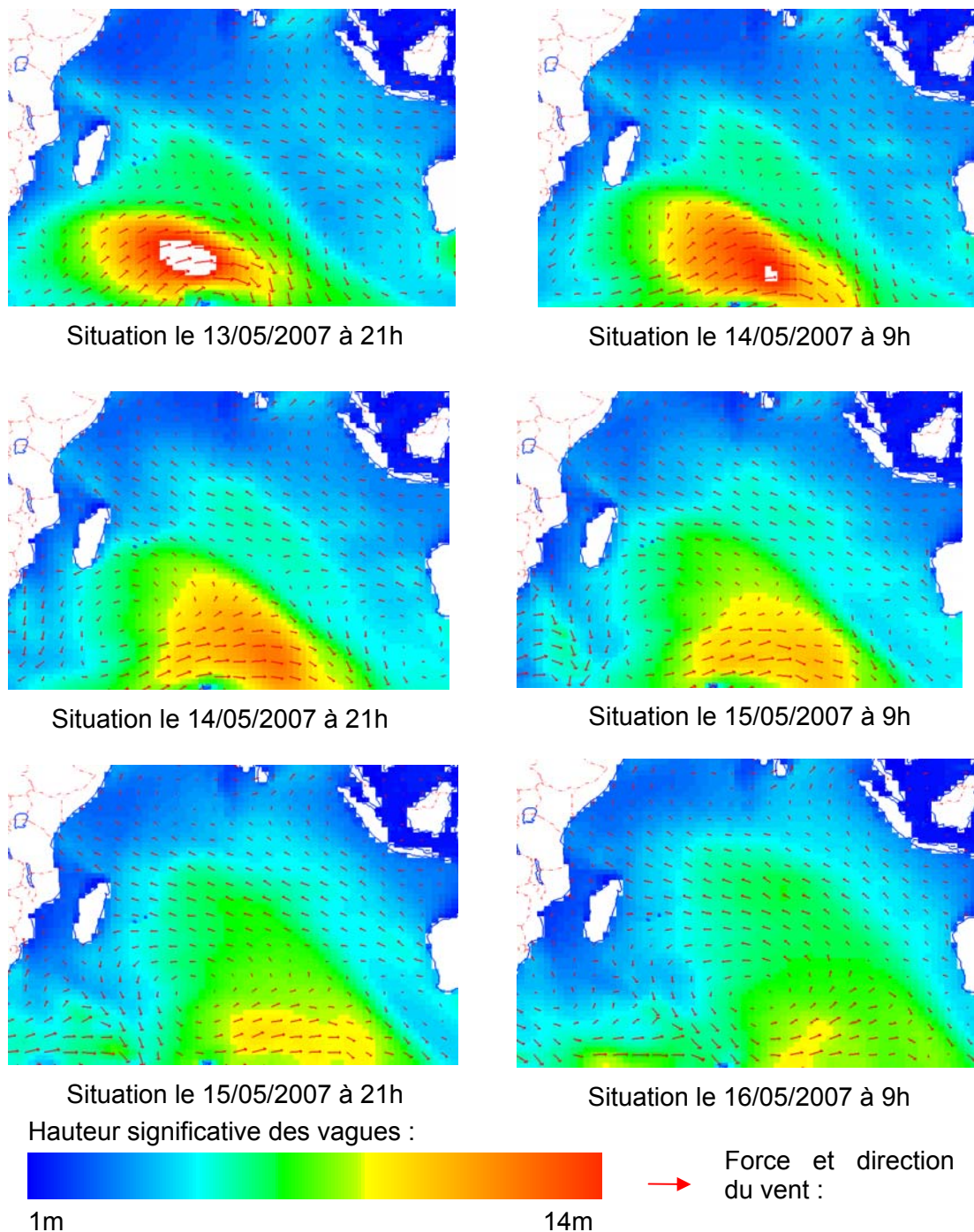
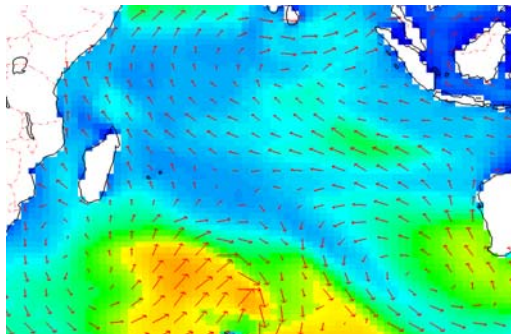
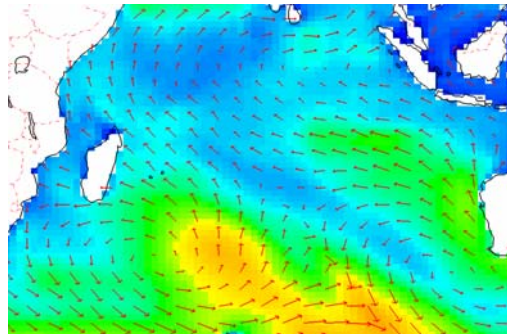


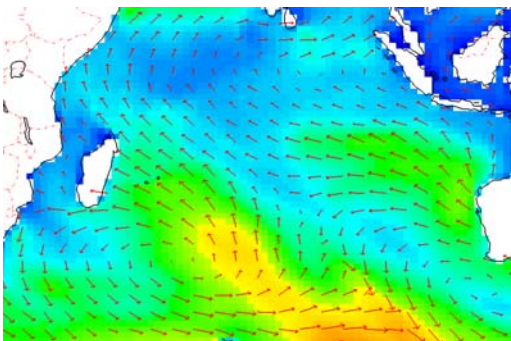
Figure 57. Exemple de situation de houles australes extrêmes : hauteur significatives des vagues, force (proportionnelle à la longueur des flèches) et direction du vent du 13 au 16 mai 2007 dans l'océan Indien ; Données : Wavewatch3 de la NOAA.



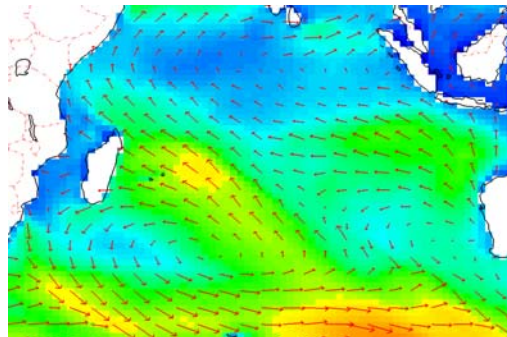
Situation le 10/07/2006 à 9h



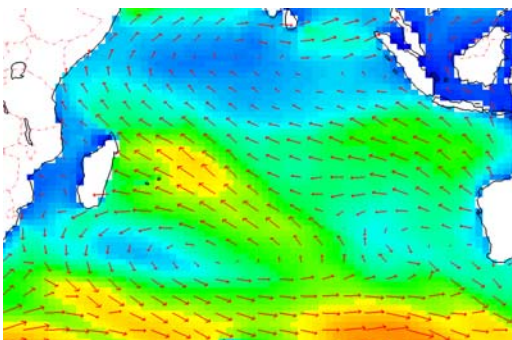
Situation le 11/07/2006 à 9h



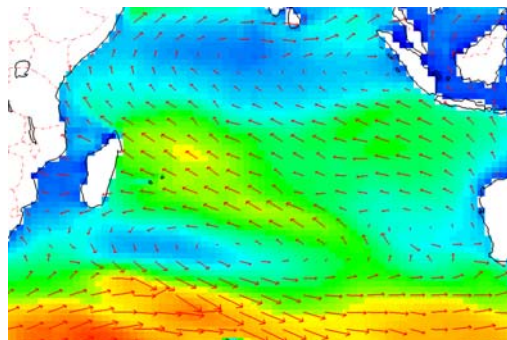
Situation le 11/07/2006 à 18h



Situation le 12/07/2006 à 9h



Situation le 12/07/2006 à 18h



Situation le 13/07/2006 à 9h

Hauteur significative des vagues :



1m

14m



Force et direction
du vent

Figure 58. Exemple de situation conduisant à de fortes houles d'alizés : hauteur significatives des vagues, force (proportionnelle à la longueur des flèches) et direction du vent du 9 et 13 juillet 2006 dans l'océan Indien ; Données : Wavewatch3.

6.2. METHODOLOGIE ET VALIDATIONS

6.2.1. Méthode

Le principe de la méthode utilisée pour la description des houles australes et d'alizés est expliqué brièvement dans cette partie.

Deux points du modèle NWW3⁸ ont été étudiés (Figure 59) :

- Le point « Sud » (22°S 55°E) pour les houles australes
- Le point « Est » (21°S 56°15'E) pour les houles d'alizés

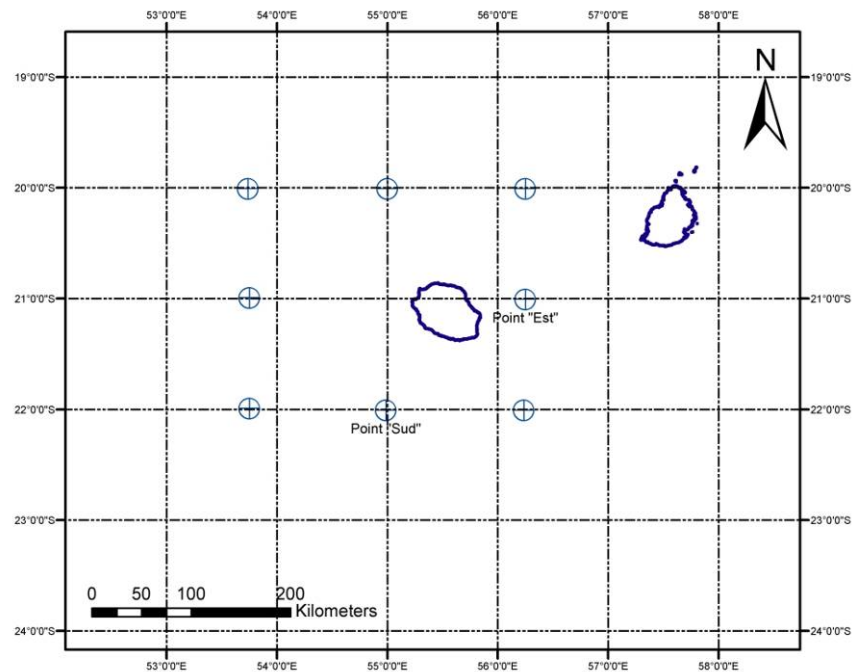


Figure 59. Position des points NWW3 considérés dans cette étude.

Dans un premier temps, la climatologie de la houle a été étudiée pour ces deux points par classification des états de mer. Cette étape préliminaire permet d'isoler dans le signal de houle, les houles d'alizés et australes. Ceci revêt une importance particulière dans la mesure où les extrêmes des états de mer sont calculés séparément pour chaque famille de houle. De plus, il convient d'exclure toute houle extrême étrangère à la famille considérée pour éviter de perturber le calcul de la houle centennale. Cette classification est effectuée de manière automatique ou semi-automatique en utilisant

⁸ Pour rappel la base NWW3 présente 12 ans de données de 1997 à 2009 (cf. 3.2.5).

des boîtes à outils développées au BRGM (Le Cozannet et al. 2009) et à l'Ifremer/université de Bretagne Sud (Monbet et Ailliot 2005).

Dans un deuxième temps, les extrêmes de chacune des familles de houle considérées sont analysés par la méthode classique des « blocks maxima ». De plus, les distributions de Gumbel, de Weibull ou Generalized Extreme Value (GEV) sont ajustées aux extrêmes de chacun des blocs définis par l'utilisateur. Ceci permet de définir une hauteur de houle centennale au point d'étude (Points définis ci-dessus, Figure 59). La toolbox WAFO est utilisée pour effectuer cette analyse (Brodtkorb et al., 2000).

Dans un troisième temps, des scénarios centennaux probables sont définis⁹. Pour cela, les configurations de houles extrêmes sont reprises dans la série temporelle de WW3 afin de définir les périodes et les directions de vagues (et, lorsque c'est nécessaire, des vents) représentatifs de la situation centennale considérée. Les hauteurs de houle aux frontières du domaine sont rapportées à une valeur centennale en multipliant chacune des hauteurs significatives des points du bord du domaine (c'est-à-dire chacun des 8 points du bord du Rang 1 illustré dans la Figure 59) par le coefficient $H_s(\text{cent}) / H_s(\text{ev})$, où $H_s(\text{cent})$ est la hauteur significative centennale pour le point sur lequel a porté l'étude des extrêmes et $H_s(\text{ev})$ la hauteur significative de la houle pour l'événement de référence en chacun des points de frontière du domaine.

Les houles aux frontières du domaine sont finalement propagées sur les domaines du Rang 1 et du Rang 2 en utilisant le modèle SWAN décrit précédemment. Les rangs 1 et 2 des simulations sont décrits paragraphe 3.2.2. Les paramètres des houles d'alizés et australes restent stables suffisamment longtemps (au moins 6h et souvent quelques jours) pour permettre d'utiliser le modèle SWAN en mode stationnaire. Dans certaines conditions, notamment pour les houles d'alizés, le vent entretenant la houle a été pris en compte. Les simulations présentées prennent en compte le frottement au fond et le déferlement.

6.2.2. Validation des simulations

Pour estimer la qualité des données et la validité des simulations, un événement extrême de houle australe est modélisé et comparé aux mesures effectuées par les houlographes de Saint-Pierre et du Port-Ouest.

L'événement retenu correspond aux houles australes extrêmes de mai 2007 qui ont particulièrement affectés la façade ouest de La Réunion. La simulation du 13/05/2007 à 0h donne une hauteur significative de 5,5 mètres au point de la maille le plus proche du houlographe de St Pierre, qui a enregistré une hauteur significative de houle égale à 5.9 mètres à 0h (6m en moyenne entre 23h et 1h). Au point de la maille proche du houlographe du Port Ouest, la simulation présente une hauteur significative de 3.8m.

⁹ En effet, une même hauteur de houle peut correspondre à des périodes, des directions et/ou une influence du vent sensiblement différent. Il convient d'envisager différents scénarios pour prendre en compte celui qui sera en définitive le plus pénalisant.

Le houlographe a mesuré une hauteur significative de 3.9 mètres à 23h et 3.6 mètres à 1h (pas d'enregistrement à 0h). Sur cet événement, on constate donc que les écarts sont de l'ordre de 10% entre les simulations et les données des houlographes, soit environs 0.5m. Cette précision est considérée comme suffisante pour cette étude.

6.3. HOULE AUSTRALE

6.3.1. Classification des états de mer au point « Sud » (22°S 55°E)

Le climat de houle au point « sud » est caractérisé de manière automatique en appliquant l'algorithme des K-moyennes aux paramètres des états de mer Hs, T et D (hauteur significative, période, direction). Cette classification permet de mettre en évidence les états de mer caractéristiques du point « sud » ainsi que leur occurrence annuelle (Tableau 8) et saisonnière (Figure 60).

Pour chacune des classes trouvées par l'algorithme, la moyenne de Hs, T et D est donnée. Il convient de noter que la houle classée dans une classe prend des valeurs qui ont une certaine dispersion autour des moyennes de Hs, T et D pour cette classe. Cette dispersion est d'autant plus forte que les valeurs prises par l'un des paramètres sont particulières (par exemple, la dispersion autour de Hs dans la classe de houle cyclonique et de tempête est relativement forte). Cependant, pour le nombre de classes choisies par l'utilisateur (ici : 15 classes), l'algorithme fait en sorte de minimiser cette dispersion. Le nombre de classes (15) a été retenu car il permet d'identifier une classe de houle cyclonique et de tempêtes nord dans ce jeu de données¹⁰.

Famille de houle	Hs (m)	T (s)	D (°)	Occurrence annuelles	Saisonnalité
Houle cyclonique et de tempêtes nord	2,6	7,7	0	0,9%	Eté austral
Houle d'alizés	3,6	8,9	120	3,5%	Toute l'année, + fréquent en hiver austral
Houle d'alizés	3,1	9,8	90	7,5%	Toute l'année, + fréquent en hiver austral
Houle d'alizés	2,5	9,1	110	10,3%	Toute l'année, + fréquent en été austral
Houle d'alizés	2,2	8,4	90	11,0%	Toute l'année, + fréquent

¹⁰ Avec l'algorithme des K moyennes, il est courant de paramétrer un nombre de classes assez élevées quitte ensuite à regrouper certaines classes, afin de permettre à l'algorithme d'isoler certaines classes énergétiques mais aussi assez rares.

					en été austral
Houle d'alizés	2,0	7,1	110	7,5%	Toute l'année, + fréquent en été austral
Houle australe	4,2	13,9	210	3,3%	Hiver austral
Houle australe	3,1	11,4	200	5,1%	Hiver austral
Houle australe	3,1	15,2	220	4,8%	Hiver austral
Houle australe	3,0	13,0	210	9,2%	Hiver austral
Houle australe	2,9	10,3	160	3,7%	Toute l'année
Houle australe	2,2	13,6	220	7,6%	Toute l'année
Houle australe s'orientant sud est	2,1	9,3	140	5,6%	Toute l'année
Houle australe	2,1	12,0	210	12,1%	Toute l'année
Houle australe	1,8	10,5	200	8,0%	Toute l'année

Tableau 8. Climatologie de la houle au point NWW3 « Sud » (22°S 55°E).

Classification des états de mer au point sud / 22°S 55°E

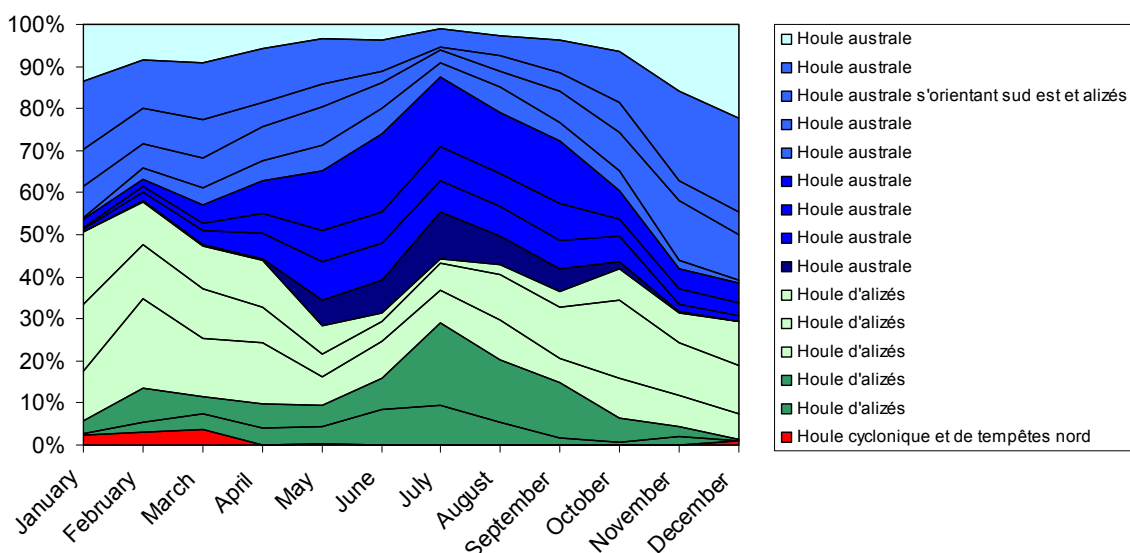


Figure 60. Saisonnalité de la houle au point « sud » (cf. Figure 56).

Cette analyse met en évidence la prédominance du mode « houle australe » en ce point (près de 60%). Elle confirme également que les houles australes les plus fortes ont lieu pendant l'hiver austral (activité plus intense des dépressions australes). En revanche, il convient d'être prudent concernant les houles cycloniques et de tempêtes qui peuvent être confondues avec les houles d'alizés. En effet une partie des houles classées en alizés en été austral sont en fait des houles cycloniques et de tempêtes tropicales. Cette difficulté porte uniquement sur la confusion de la classe de houle d'alizés ayant le Hs le plus fort. Elle ne pose pas de difficultés pour l'analyse qui suit car la démarche consiste à isoler les classes de houles australes pour en calculer les valeurs centennales.

La classe de houle australe ayant le plus grand intérêt pour la détermination des valeurs centennales est la classe qui a le Hs le plus fort (4.2 m). Cette houle a une dispersion directionnelle très faible et provient de la direction SSW. Elle correspond par ailleurs à des périodes pic élevées allant de 12 à 15s (Figure 61).

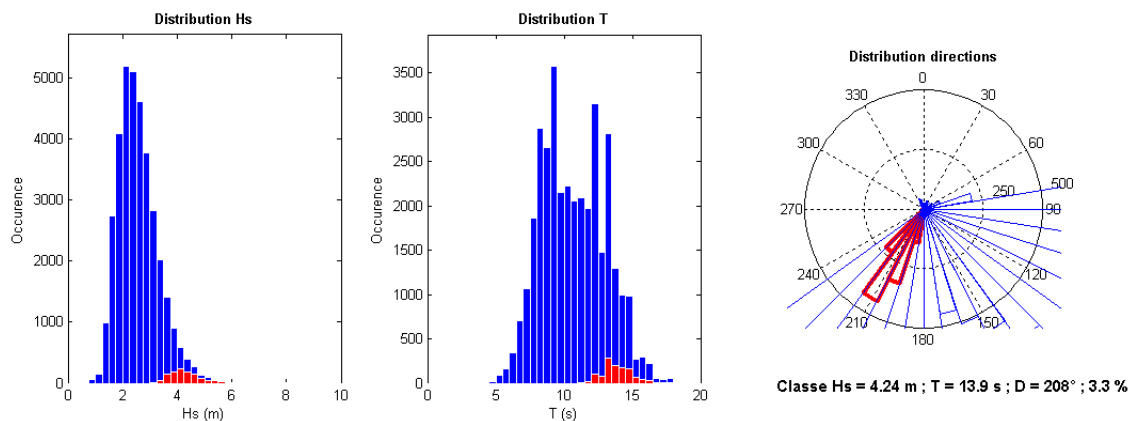


Figure 61. Répartition des valeurs des paramètres de la classe de houle australe ayant le Hs le plus fort au sein du jeu de données complet. (distributions Hs, T et Directions : en bleu: jeu de données complet ; en rouge: classe représentée)

6.3.2. Calcul des valeurs extrêmes

La méthode des blocs maxima est appliquée à l'échantillon des houles australes du point « sud ». Plusieurs distributions classiques sont ajustées aux maxima de blocs dont la longueur est définie par l'utilisateur. La robustesse du résultat est évaluée par les tests d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov et du Khi2 permettant de déterminer si l'échantillon suit bien la loi connue. La longueur de bloc la plus courte satisfaisant aux deux tests est en définitive retenue.

L'ajustement à une distribution de Gumbel est rejeté par le test du Khi2, même pour des blocs de 2 mois. L'ajustement à une fonction de Weibull est accepté par les deux tests (Figure 62), mais donne des valeurs de houle centennale plus faibles que l'ajustement sur des distributions GEV (Figure 63 et Figure 64). Finalement, l'ajustement par maximisation de la fonction de vraisemblance (ML) est retenu car il satisfait aux tests de Kolmogorov-Smirnov et du Khi2 pour des longueurs de blocs de 1

mois. Cette méthode d'ajustement est considérée par ailleurs comme plus rigoureuse par les statisticiens (Mazas et Hamm, 2007). Le Tableau 9 résume les résultats obtenus.

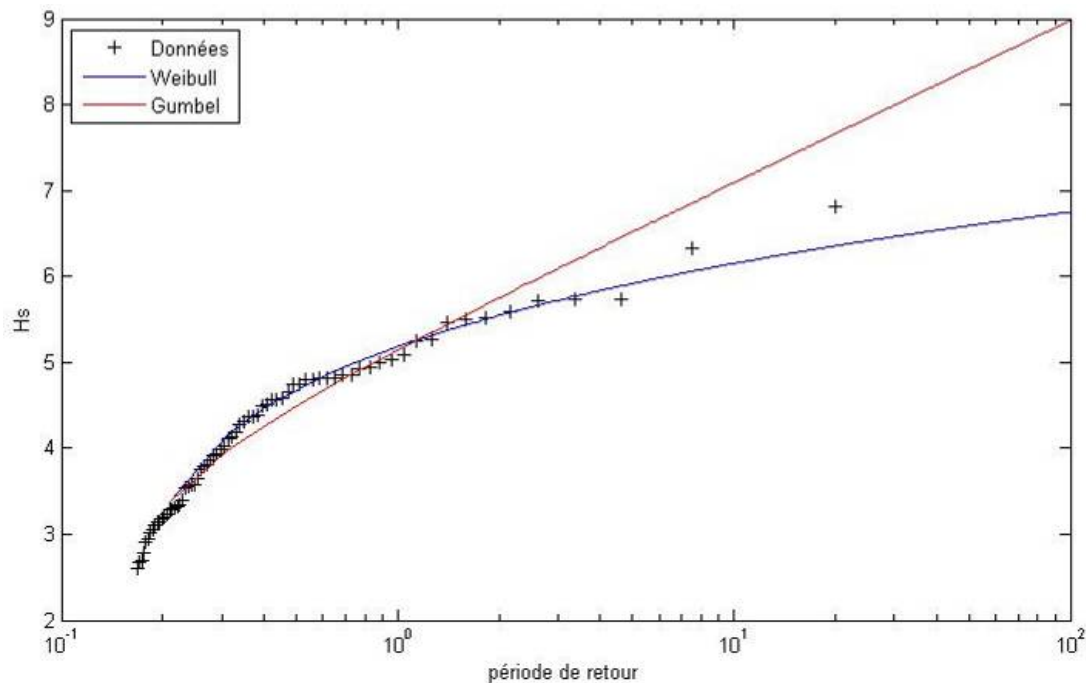


Figure 62. Ajustement d'une distribution de Weibull et de Gumbel sur les extrêmes de blocs de 2 mois pour les houles australes du point « sud ».

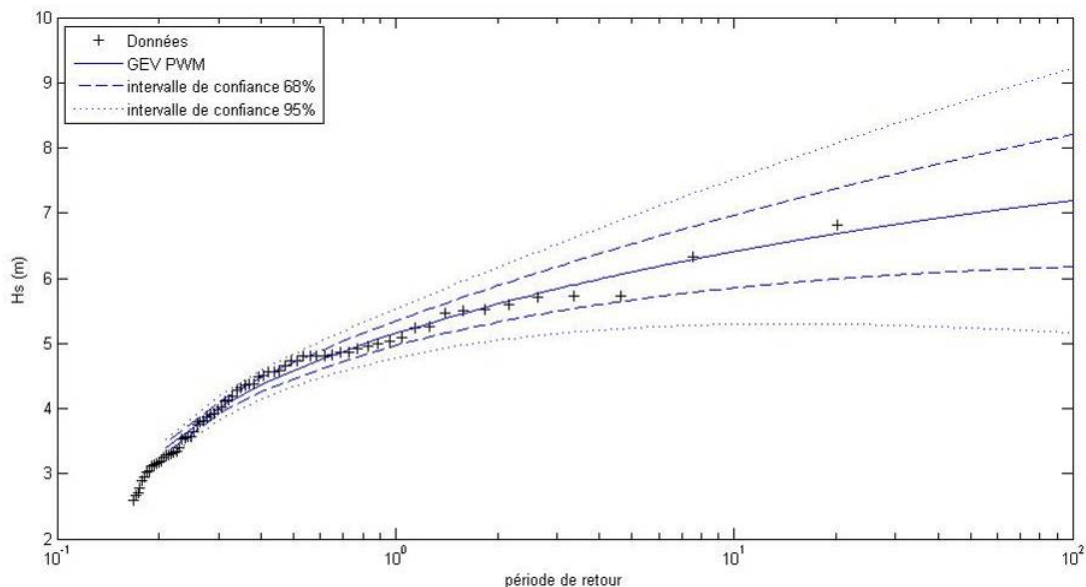


Figure 63. Ajustement d'une distribution GEV par la méthode des moments pondérés (PWM) sur les extrêmes de blocs de 2 mois pour les houles australes du point « sud ».

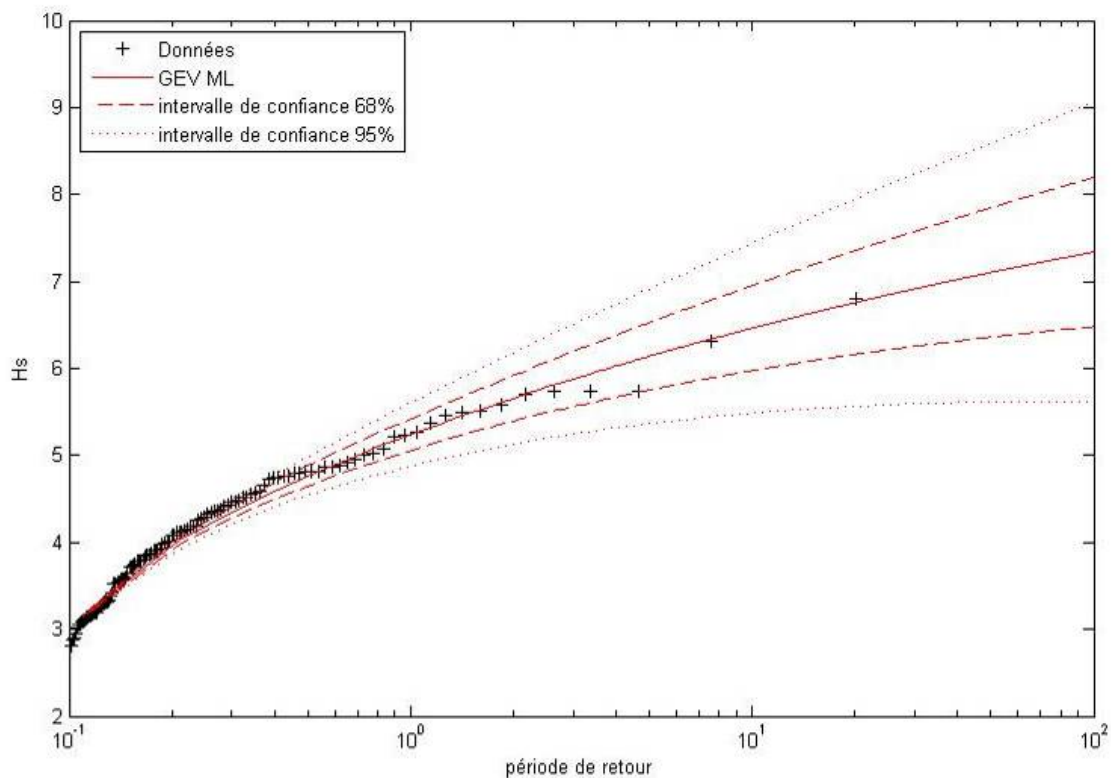


Figure 64. Ajustement d'une distribution GEV par maximisation de la fonction de vraisemblance sur les extrêmes de blocs de 1 mois pour les houles australes du point « sud ».

Echantillon	Point «sud»			
Type de distribution	GEV	GEV	Gumbel	Weibull
Méthode d'ajustement	ML	moments pondérés		
Longueur des blocs	1 mois	2 mois	/	2 mois
Hs10	6,5 m	6,4 m	/	6,2 m
Hs100	7,3 m	7,2 m	/	6,7 m
Tests	Komolgorov-S / Khi2	Komolgorov-S / Khi2	Komolgorov-S	Komolgorov-S / Khi2

Tableau 9. Houles australes décennales et centennales estimées par la méthode des blocs maxima pour le point NWW3 « Sud » (22°S 55°E).

Les valeurs de houles australes centennales obtenues ici (Hs100 de 7.3m et Hs10 de 6.5 m) sont sensiblement différentes de celles proposées dans d'autres études :

- Egis Eau (2008), en utilisant des données GlobOcéan, obtient une valeur centennale de 5.8m au point « sud » (4.5m pour la valeur décennale) ;
- SOGREAH (1998), en utilisant des données Global Wave Statistics (British Maritime Technology) à partir d'observations visuelles faites par des navires sur la période de 1954-1984, trouvait des hauteurs centennales de 10.3m au large (8m pour la valeur décennale).

Ces différences peuvent s'expliquer (1) par les différents jeux de données utilisés et, dans une moindre mesure, (2) par les différents critères utilisés pour la séparation des houles australes. On note en particulier qu'aucun événement antérieur à août 2001 n'a connu de hauteurs significatives supérieures à 5.5m selon les données NWW3.

On rappelle également ici l'incertitude associée au calcul d'une hauteur centennale compte tenu du jeu de données de 12 ans existant : l'intervalle de confiance à 95% pour la valeur de la hauteur significative de la houle centennale australe est de 5.5m à 9m.

6.3.3. Choix de scénarios centennaux possibles

Afin de permettre le choix d'un ou plusieurs scénarios possibles, les événements de houle australe pour lesquels les données NWW3 donnent des hauteurs significatives supérieures à 5m entre 1997 et 2009 sont identifiés dans la série temporelle (Tableau 10).

Date du maximum de l'événement	Heure du maximum de l'événement	Hs	Tp	Dp
01/08/2001	15:00	5.7 m	15.3 s (16s à 9s)	200° ; Remarque : pendant cet événement, les alizés entretiennent les houles australes
16/09/2002	18:00	5.6 m	15.4 s	200° ; Remarque : pendant cet événement, les alizés entretiennent les houles australes
12/06/2003	06:00	5.7 m	13.6 s	220°
06/07/2003	18:00	5.6 m	14.9 s	220°
01/08/2003	12:00	6.8 m	13.9 s	185° (houle s'orientant de 200° à 160°)
29/07/2005	18:00	5.5 m	14 s	210°
28/06/2006	15:00	5.7 m	13 s	205°
23/09/2006	03:00	5.7 m	16 s	220°
13/05/2007	00:00	6.3 m	16.5 s	210°

Tableau 10. événements de houle australe pour lesquels NWW3 donne des hauteurs significatives de houle supérieures à 5m.

Quatre événements représentatifs de configurations particulières complémentaires ont été choisis pour la modélisation d'événements centennaux possibles :

- l'événement du 01/08/2001 pendant lequel les vents d'alizés ont pu jouer un rôle dans la manière dont la houle a affecté la côte ;
- l'événement du 01/08/2003 qui correspond à l'évènement présentant la hauteur de houle significative maximum au point « sud » ;
- l'événement du 13/05/2007 pour lequel les périodes au point « sud » atteignent des valeurs de 16.5 s et pour lequel les houles proviennent du sud-sud-ouest ;
- enfin, une autre simulation de la fin de l'événement du 01/08/2003 a également été simulée. En effet, à la fin de l'événement, le 02/08/2003 à 6h, les houles atteignent 5.9 m de hauteur significative mais ont une provenance de sud-sud-est (160°) de sorte que les côtes sont alors affectées de manière sensiblement différente.

La hauteur significative de la houle est ramenée à la hauteur centennale calculée précédemment (7,3m), sauf dans le cas du 02/08/2003 : en effet, dans ce cas qui correspond à la fin d'un événement, à un stade auquel la houle se sera nécessairement atténuée. On suppose donc que le maximum a été atteint précédemment, lorsque la houle était orientée sud-sud-ouest. Ainsi, la hauteur significative de l'événement du 02/08/2003 est multipliée par 1.057 (facteur qui ramène le Hs du 01/08/2003 à la valeur centennale) afin de simuler la fin d'un événement centennal de houle australe.

Les 8 points du bord du domaine servent au forçage du rang 1. Ils sont calculés de la manière suivante : pour chacun des points, les valeurs prises par les paramètres de la houle (et dans le cas du 01/08/2001, par le vent) au moment du maximum de l'événement de houle australe au point « sud » sont extraites. Seules les hauteurs significatives sont modifiées en appliquant le coefficient multiplicateur permettant de ramener le Hs du point « sud » à la valeur centennale. Ainsi, chacun des 8 points du bord du domaine se voit appliqué un coefficient multiplicateur de 1.27 le 01/08/2001, de 1.057 les 01/08/2003 et 02/08/2003 et de 1.15 le 13/05/2007.

Ces quatre scénarios sont utilisés par la suite pour déterminer la hauteur centennale de la houle australe à 20m de profondeur.

6.3.4. Propagation des houles à la côte

Ces quatre scénarios de houle australe centennale possibles sont ensuite propagés à la côte à l'aide du modèle SWAN.

Les résultats de ces simulations sont présentés ci-après. Compte tenu de la résolution spatiale des grilles de calcul utilisées, il est nécessaire de noter que seules les valeurs de hauteur de houle par 20m de profondeur et plus doivent être retenues.

Houle australe – scénario basé sur la situation du 01/08/2001

Dans ce scénario, des alizés soufflent sur La Réunion et peuvent causer des interactions avec les houles australes provenant de secteur sud-sud-ouest (Figure 65).

Ce scénario affecte essentiellement la façade sud (Figure 66) avec des hauteurs significatives supérieures à 6m par 20 m de profondeur. Ces houles peuvent dépasser localement les 7m à proximité des récifs coralliens et des caps rocheux.

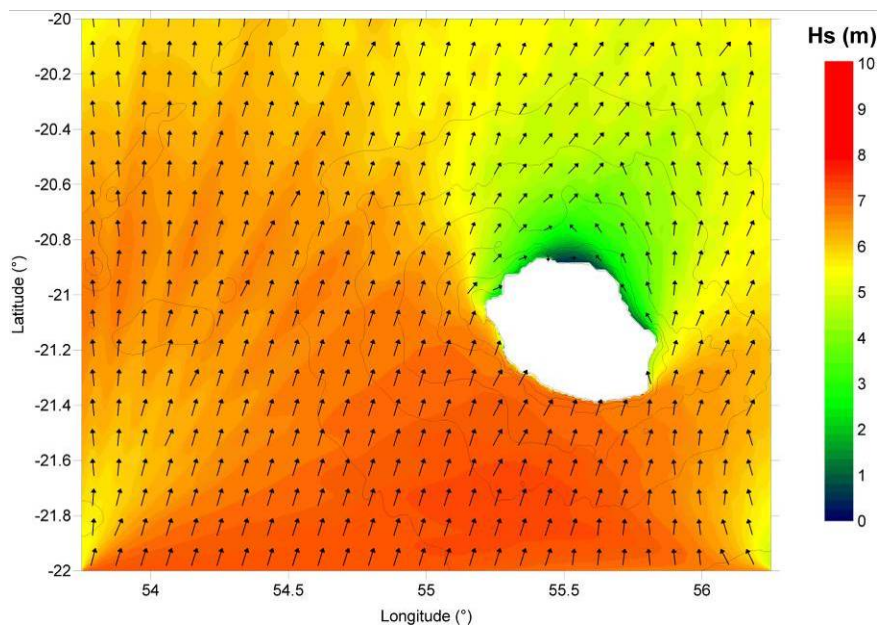


Figure 65. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 01/08/2001 (rang 1).

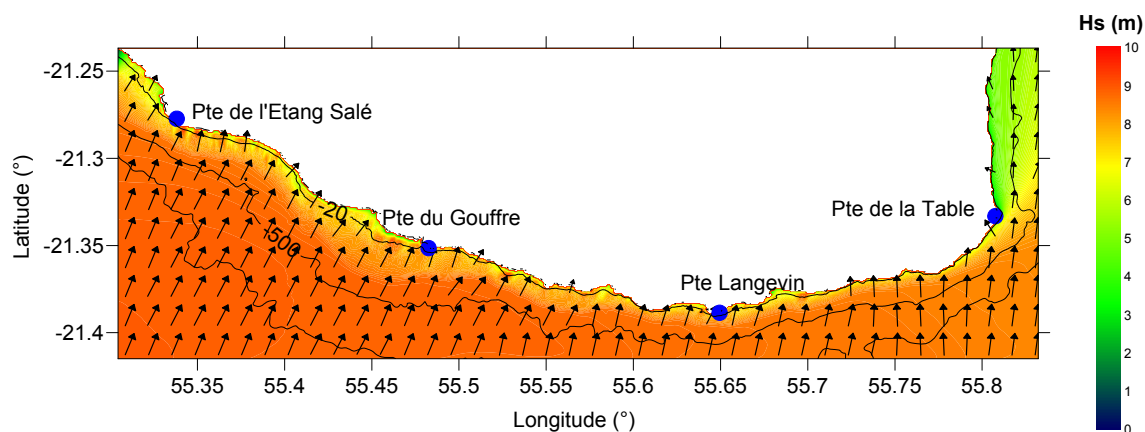


Figure 66. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 01/08/2001 (rang 2 – côte sud).

La façade ouest est également bien affectée (Figure 67), les valeurs Hs par 20 m de fond étant de l'ordre de 4 à 6m avec des effets de site en atténuation dans les

« baies » (St Paul et St Leu) et en accentuation au contact des récifs coralliens (Ermitage) et des formations rocheuses (au Nord de la Pointe des Avirons).

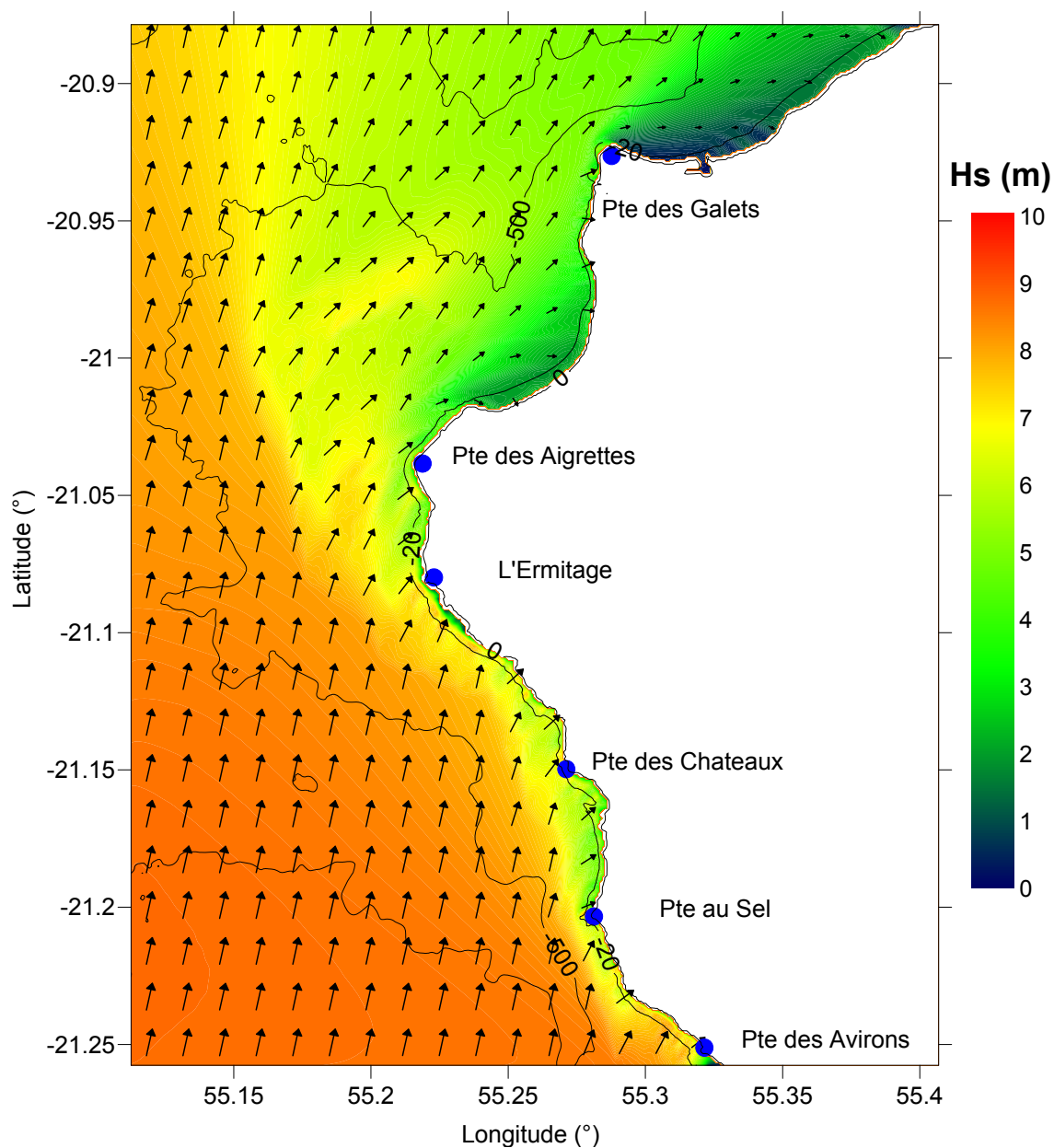


Figure 67. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 01/08/2001 (rang 2 – côte ouest).

La côte est (Figure 68) demeure bien protégée en dépit de l'action des alizés.

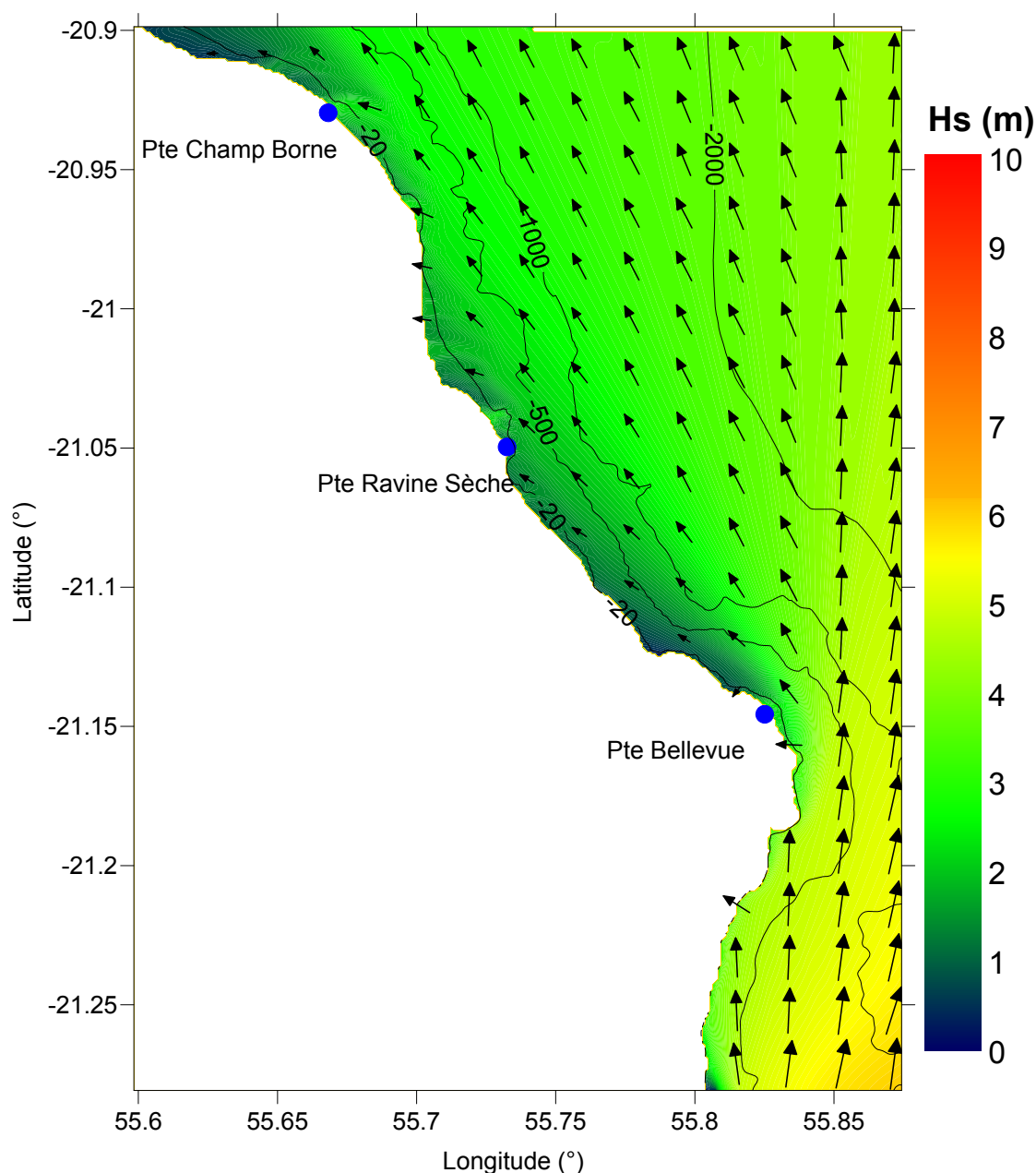


Figure 68. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 01/08/2001 (rang 2 – côte est).

Houle australe – scénario basé sur la situation du 01/08/2003

Dans ce scénario, la houle est à son maximum lorsqu'elle provient du sud. Cette situation est mise en évidence par la Figure 69. La houle simulée affecte en premier lieu la côte sud : dans cette configuration, les houles atteignent souvent des hauteurs significatives supérieures à 5m (par 20m de profondeur, Figure 70). Des effets de site, avec des houles de l'ordre de $H_s = 6\text{m}$ et localement supérieures à 7m (par 20m de

fond) peuvent être notés, en particulier sur la côte sud entre la pointe de l'Etang Salé et la pointe Langevin. Les côtes ouest (Figure 71) et est (Figure 72) sont moins impactées.

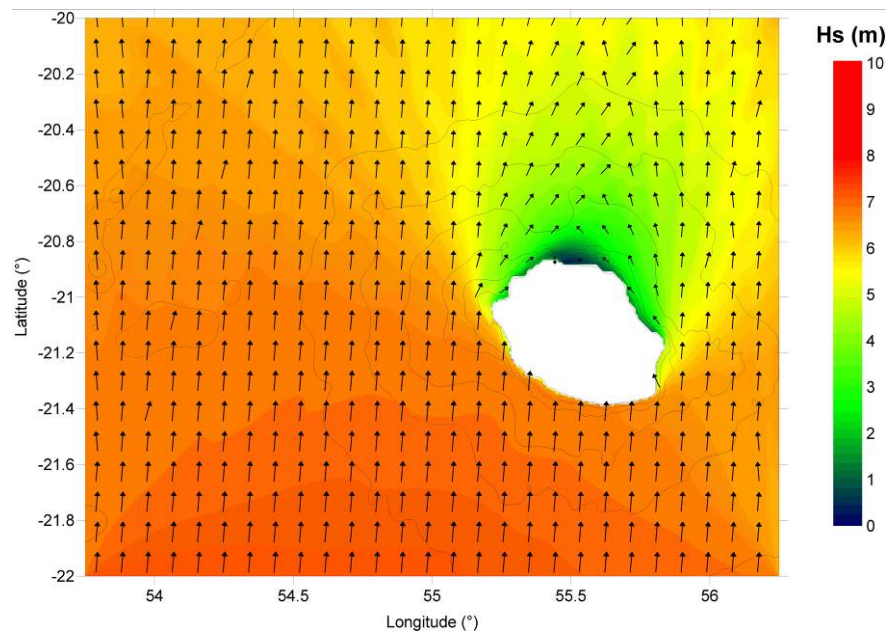


Figure 69. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 01/08/2003 (rang 1).

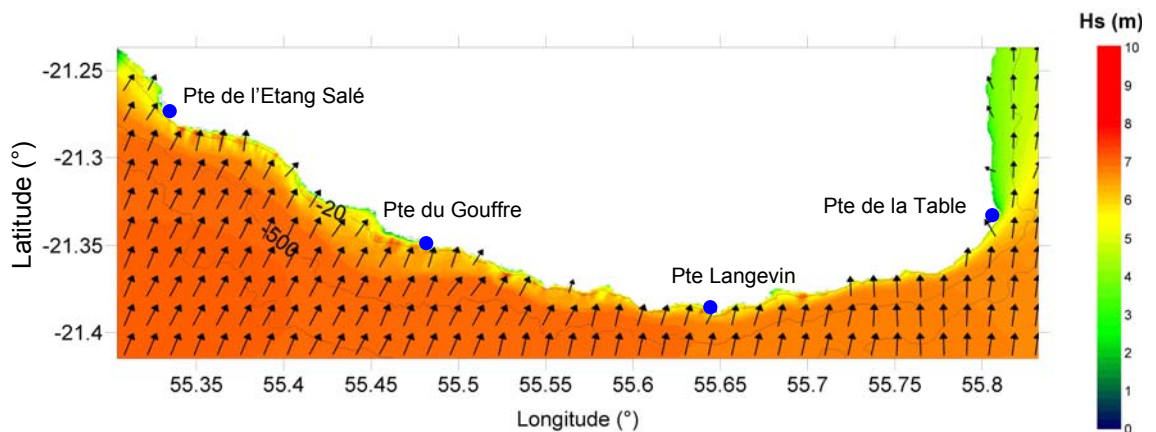


Figure 70. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 01/08/2003 (rang 2 – côte sud).

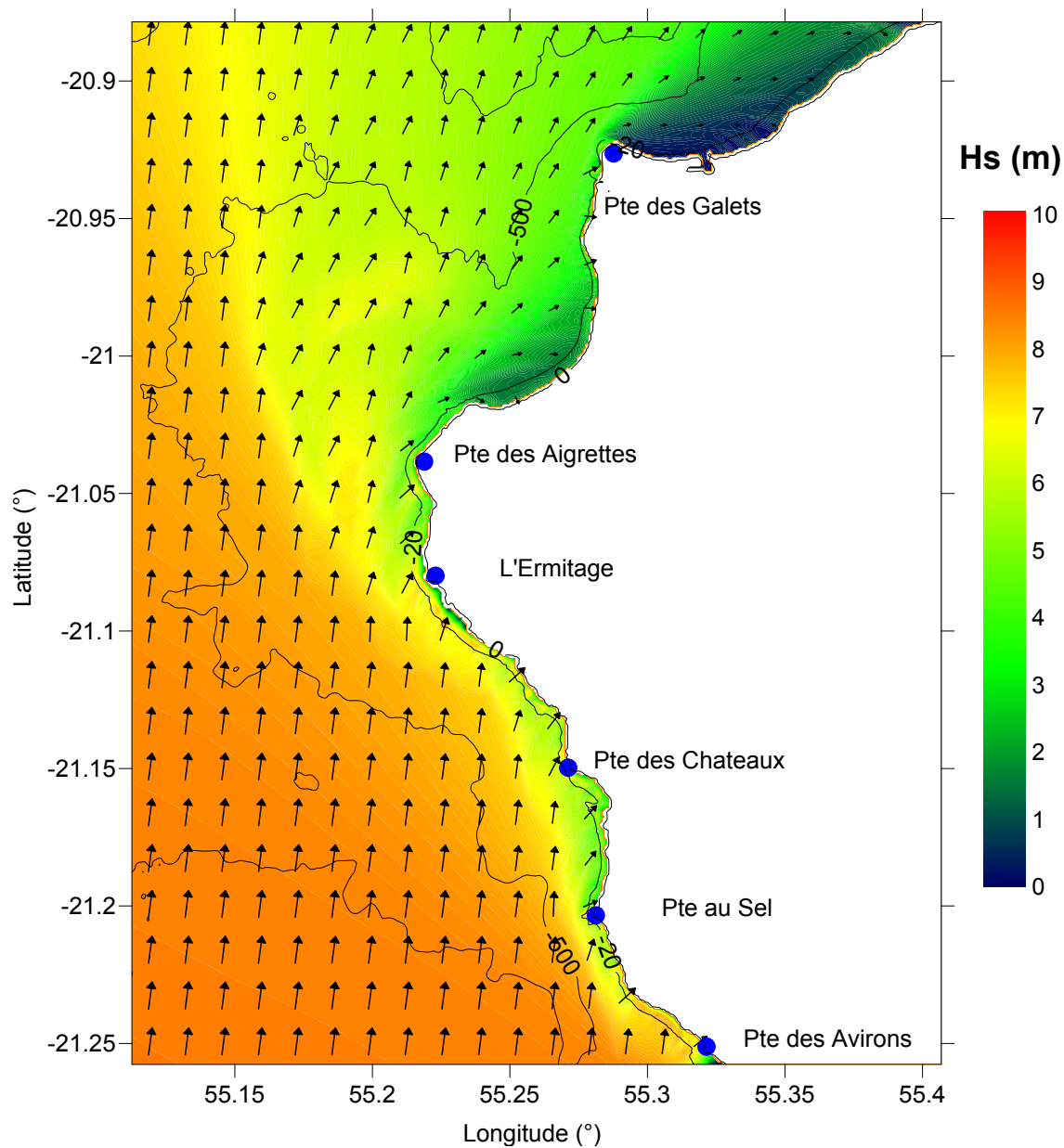


Figure 71. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 01/08/2003 (rang 2 – côte ouest).

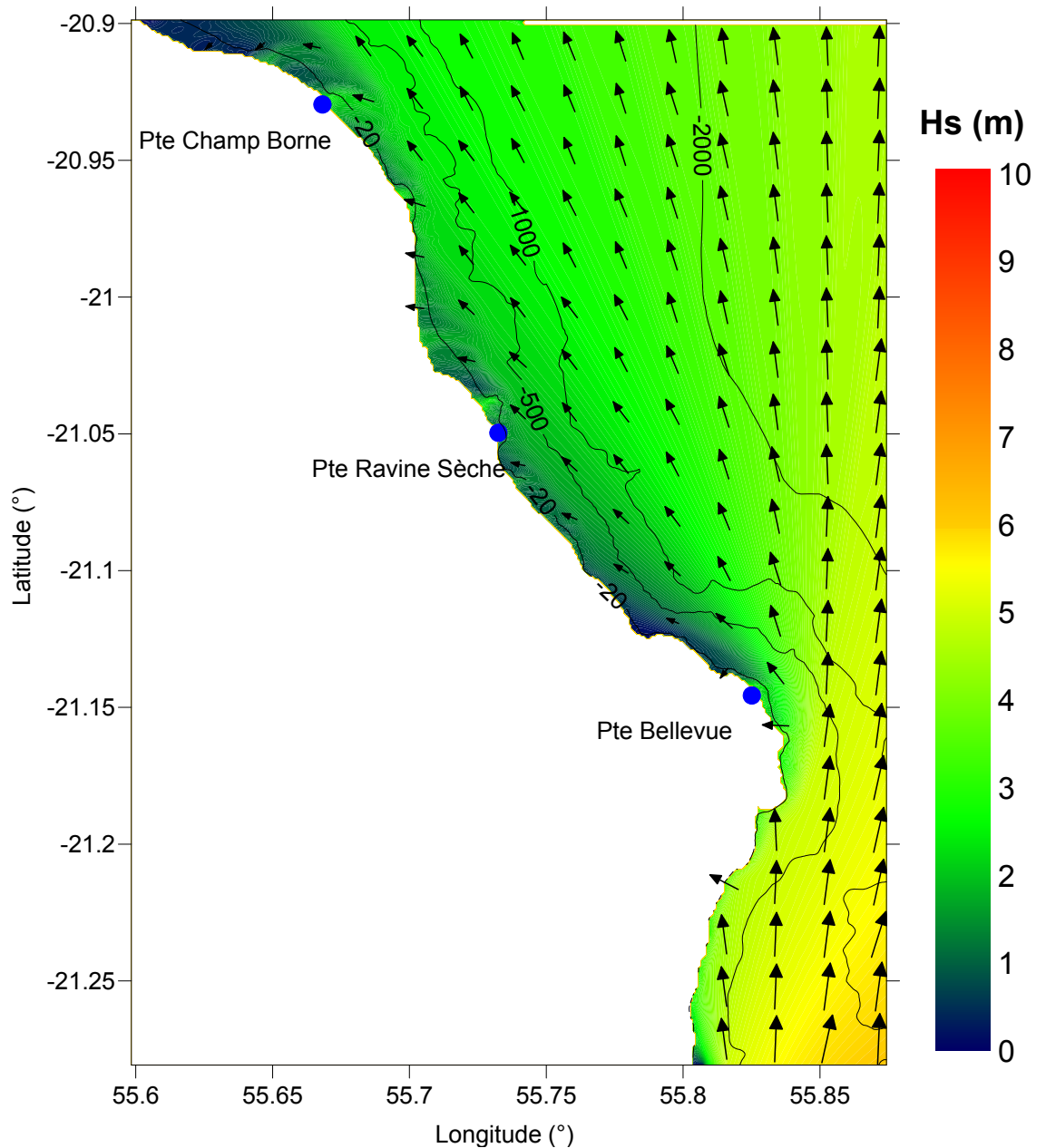


Figure 72. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 01/08/2003 (rang 2 – côte est).

Houle australe – scénario basé sur la situation du 02/08/2003

Ce scénario est caractérisé par une houle du sud-est atténuée par rapport à l'événement centennial. Il correspond à la situation d'une houle centennale s'orientant sud-sud-est et diminuant, de manière analogue à la situation du 01/08/2003 (Figure 73). Ce scénario peut conduire à une situation dans laquelle la côte est (Figure 76) est impactée. Les simulations montrent que seule la zone située entre la Pointe du Gouffre

et la Pointe de la Table (façade sud - Figure 74) est impactée par des houles significatives supérieures à 4m (20m de profondeur). Sur la façade est, Hs reste relativement modéré (environ 2m) sauf au Sud de la Pointe de Bellevue (entre 4 et 5 m).

Compte tenu de la direction de la houle, les côtes sud et ouest (Figure 75) sont moins impactées qu'au maximum du pic de houle du 01/08/2003.

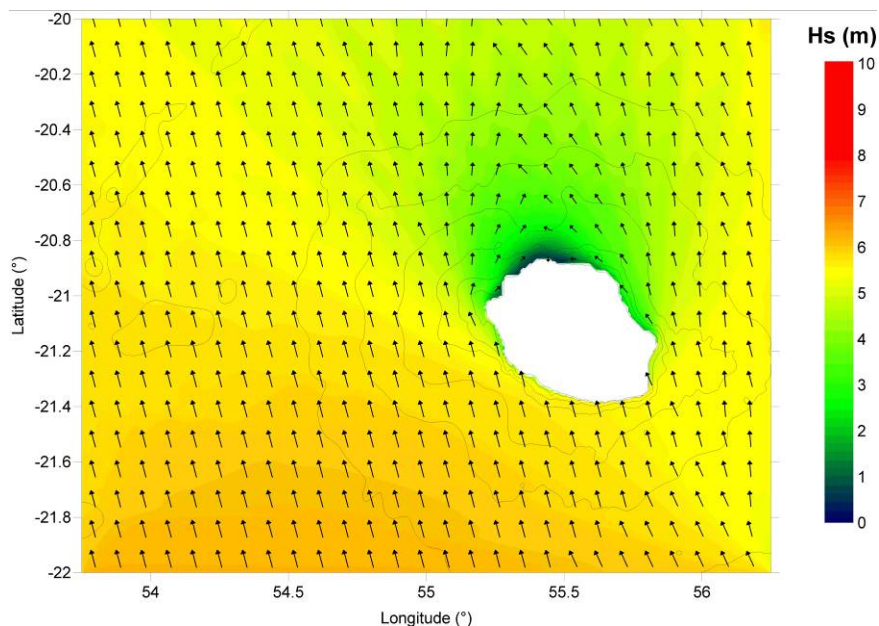


Figure 73. Fin d'un scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 02/08/2003 (rang 1).

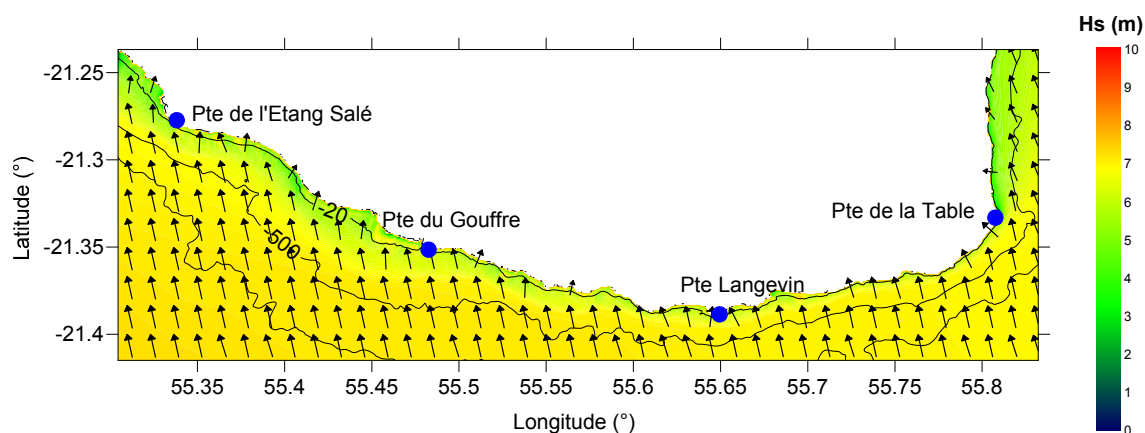


Figure 74. Fin d'un scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 02/08/2003 (rang 2 – côte sud).

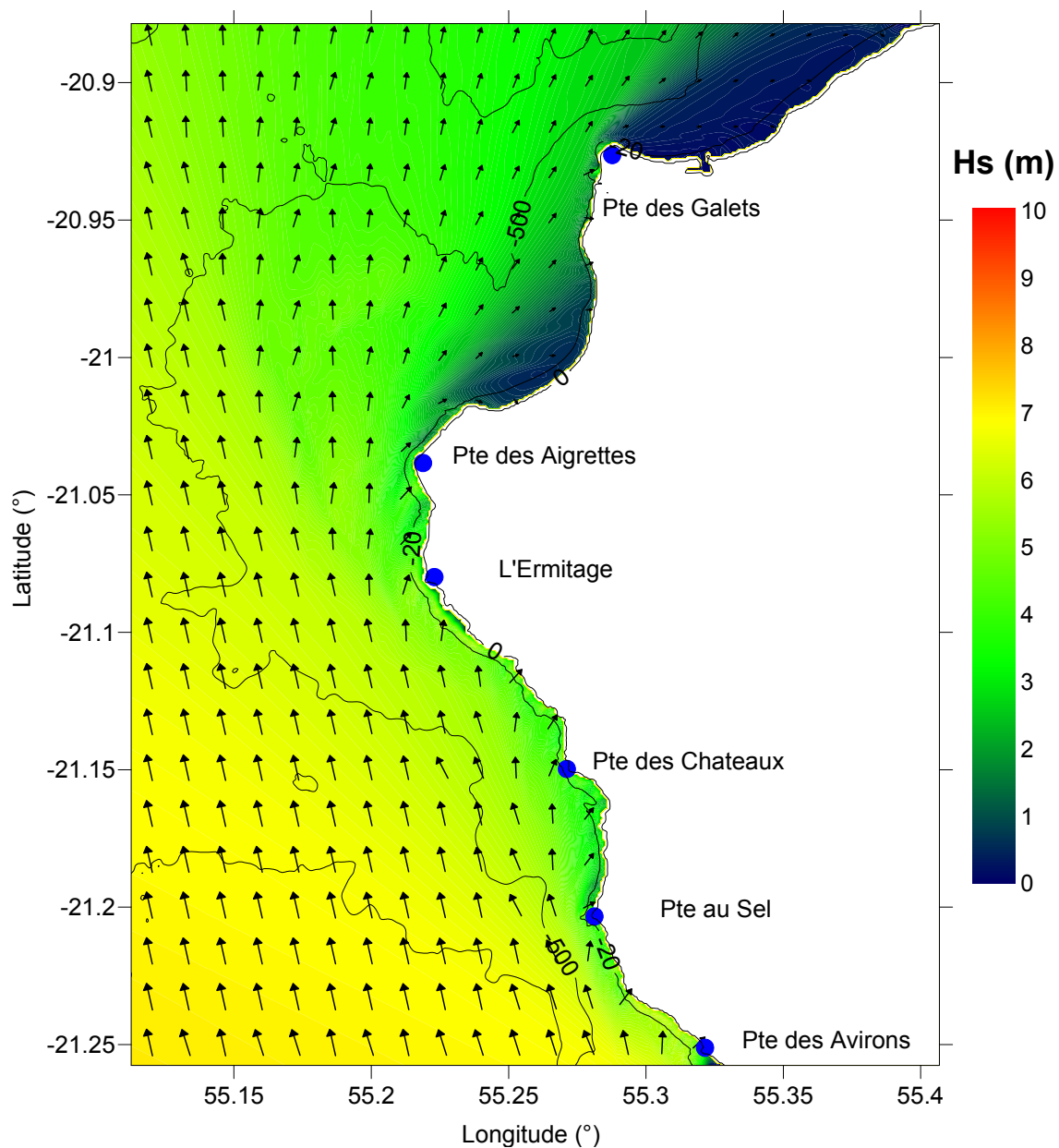


Figure 75. Fin d'un scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 02/08/2003 (rang 2 – côte ouest).

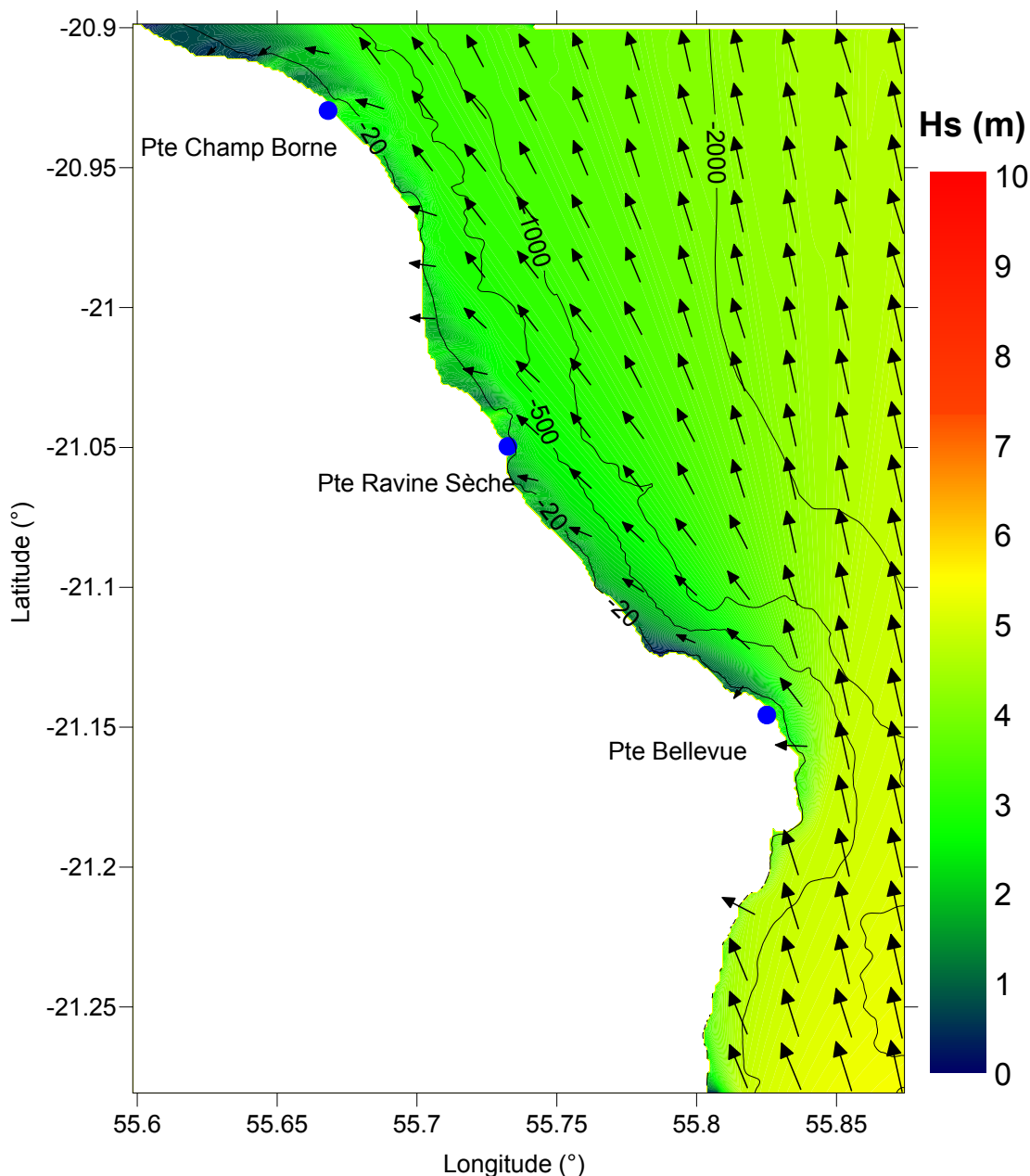


Figure 76. Fin d'un scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 02/08/2003 (rang 2 – côte est).

Houle australe – scénario basé sur la situation du 13/05/2007

Dans ce scénario, les hauteurs de vagues sont maximales pour une orientation sud-sud-ouest de la houle (Figure 77). Ce scénario est également caractérisé par des périodes longues, de l'ordre de 16 s au nœud sud WW3. Ce scénario affecte la côte sud (Figure 78) et la côte ouest (Figure 79), la côte est demeurant protégée (Figure 80).

Sur la côte ouest, des houles de Hs supérieures à 6m (par 20m de profondeur) atteignent le littoral entre St Gilles-les-bains et l'Etang Salé. Des effets de site, avec des houles de l'ordre de Hs > 6m et localement supérieures à 7m (par 20m de fond) peuvent être notés sur cette partie du littoral.

Sur la côte sud, des houles souvent supérieures à 6m en hauteur significative sont observées à 20m de profondeur. Ces houles peuvent dépasser des Hs de 7m localement, en particulier entre la pointe de l'Etang Salé et la Pointe du Gouffre. Ce scénario donne des hauteurs significatives à la côte similaires à celles du scénario basé sur l'événement du 01/08/2003, mais il affecte la façade ouest en raison de sa direction de propagation sud-ouest.

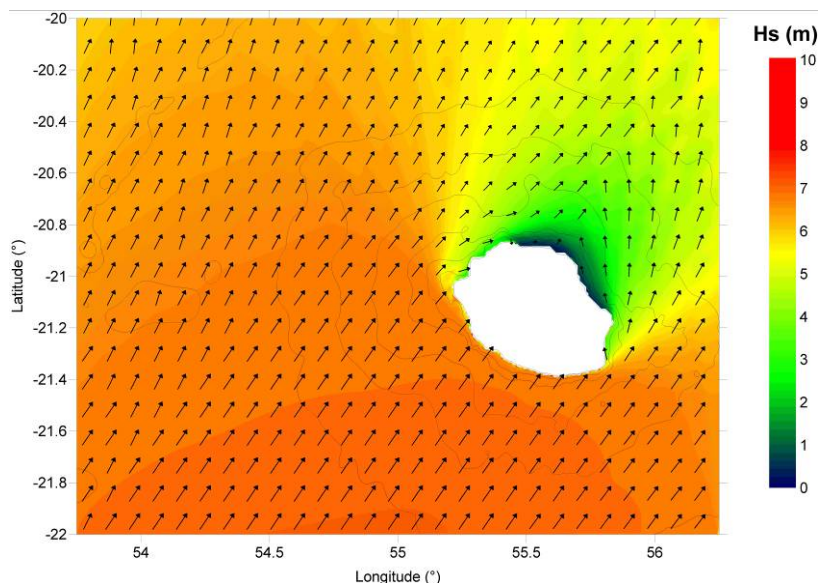


Figure 77. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 13/05/2007 (rang 1).

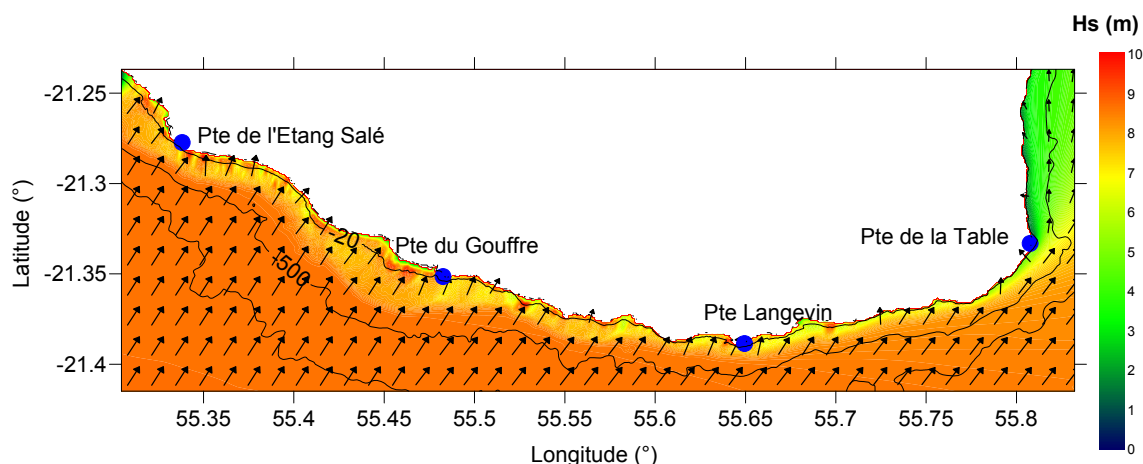


Figure 78. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 13/05/2007 (rang 2 – côte sud)

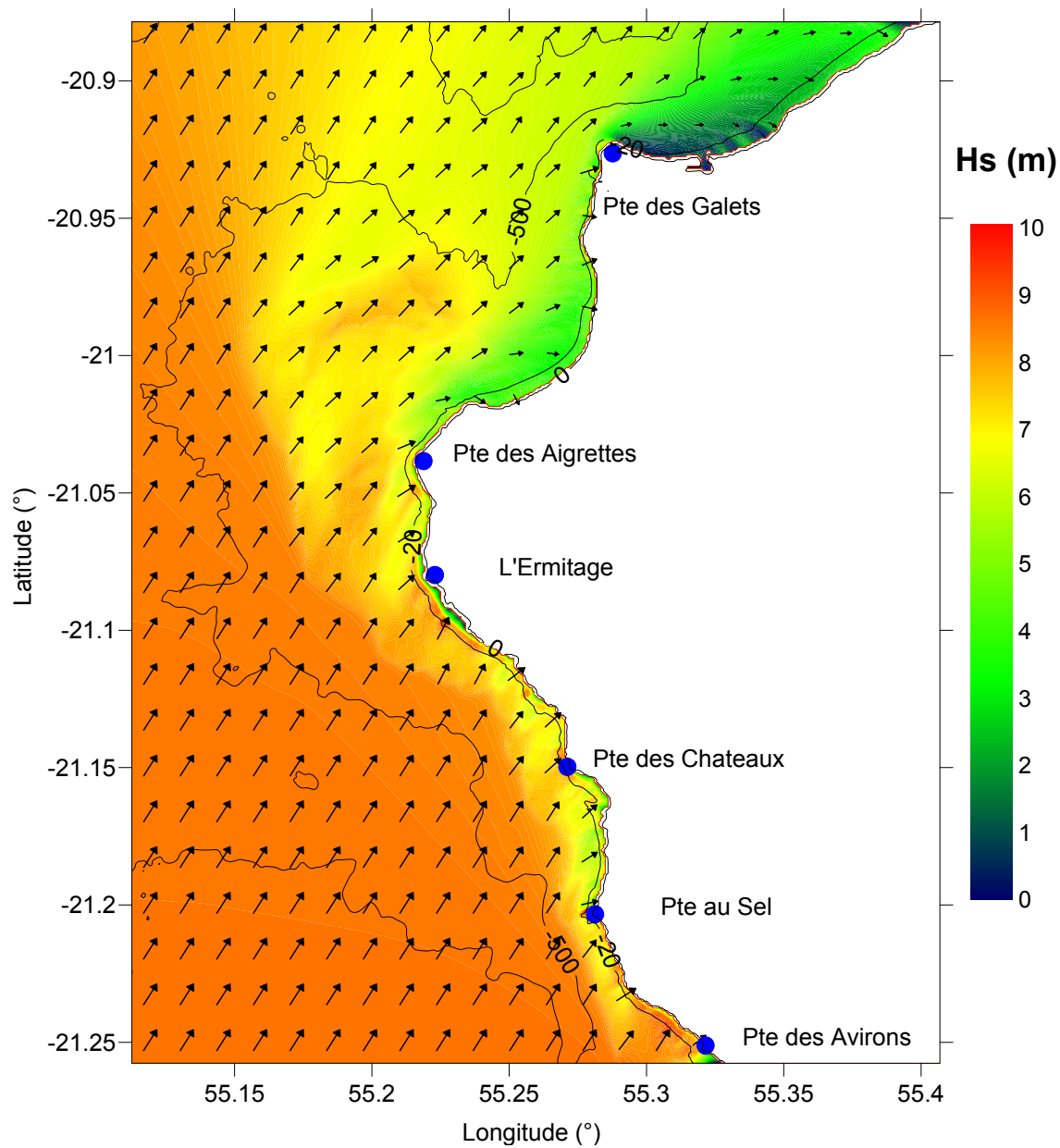


Figure 79. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 13/05/2007 (rang 2 – côte ouest).

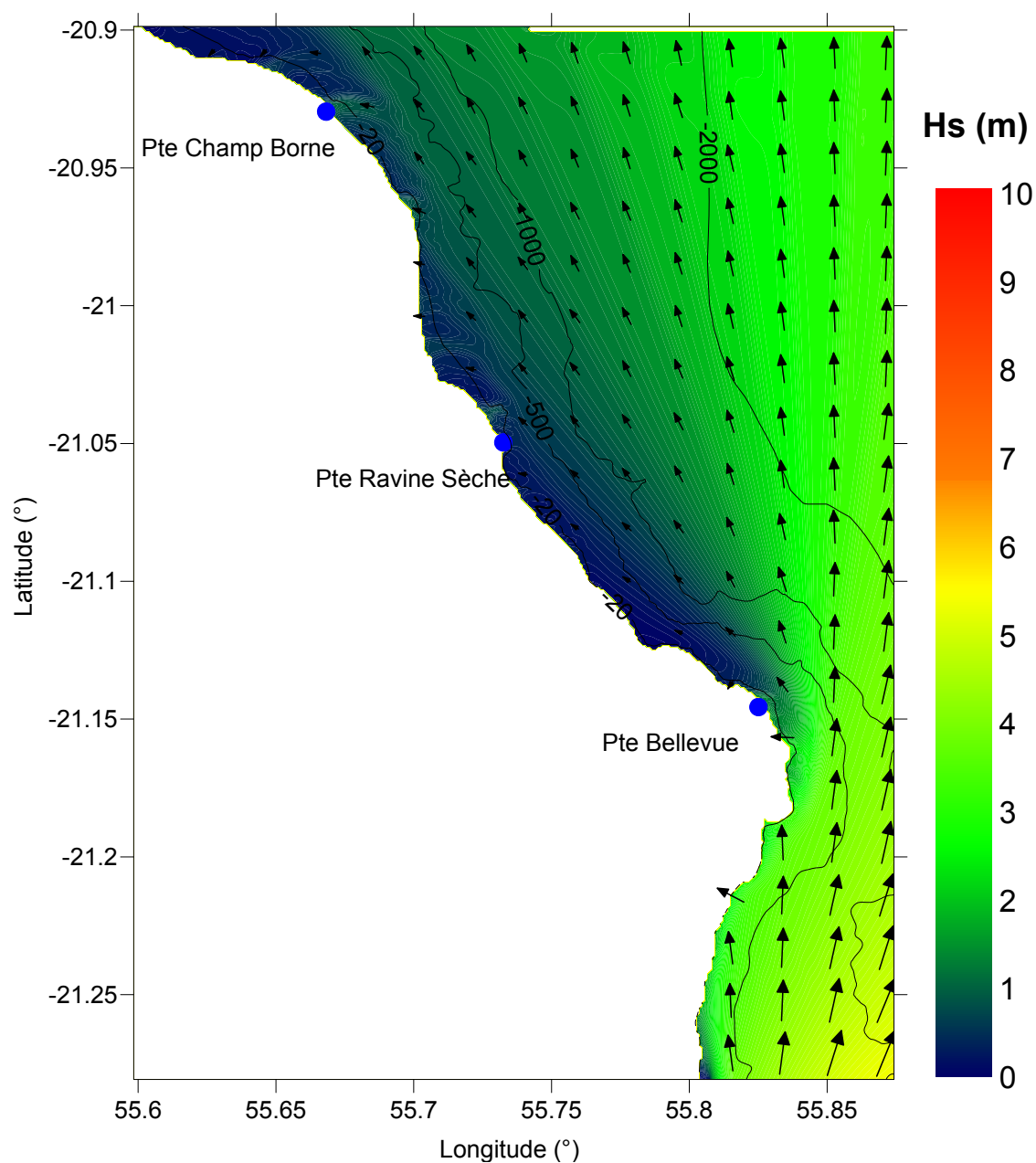


Figure 80. Scénario de houle australe centennale basé sur la situation du 13/05/2007 (rang 2 – côte est).

Conclusion partielle

En résumé, en fonction des scénarios proposés, les houles australes affectent essentiellement les façades sud et ouest avec des hauteurs significatives de l'ordre de 6 à 7m par 20 m de profondeur et restent peu impactantes au nord et à l'est de l'île.

6.4. HOULES D'ALIZES

6.4.1. Classification des états de mer au point « Est » (21°S 56°15'E)

La classification mise en œuvre comme pour les houles australes se heurte au point Est à une confusion entre les houles d'alizés des houles de tempêtes tropicales qui ont des caractéristiques très proches en termes de hauteur, période et direction des vagues dans la série temporelle NWW3. D'autre part, en raison du grand nombre de cyclones et de tempêtes tropicales observés à La Réunion pendant l'été austral, une séparation de ces événements un par un par l'utilisateur n'est pas envisageable.

Pour séparer les houles cycloniques, on utilise les propriétés suivantes :

- la direction et la hauteur des houles cycloniques varient beaucoup au cours d'un événement donné.
- les houles d'alizés sont créées par des vents caractérisés par leur régularité même s'ils peuvent parfois être relativement forts.

La séparation sur ces critères a permis de classer la plupart des événements, puis d'identifier un nombre réduit de cas pour lesquels l'ambiguïté peut être levée par un critère de saisonnalité ou une recherche dans une base de données d'événements. A l'issue de cette classification semi-automatique, on dispose d'une série temporelle de houles d'alizés complète (i.e. prenant en compte les houles d'alizés de l'été austral) **mais qui ne comporte pas d'événements autres que les houles d'alizés.**

Nous avons donc eu recours en complément à la boîte à outils METIS (Monbet et Ailliot 2005) afin de proposer une classification globale des états de mer au point « Est ». L'algorithme utilisé prend en compte la dynamique temporelle du signal de houle. En pratique, le signal de houle $\{H_s(t) \cdot \cos(D(t)), H_s(t) \cdot \sin(D(t)), T(t)\}$ est modélisé par une chaîne de Markov à états cachés à probabilité d'émission gaussienne. Ce modèle statistique est ajusté par un algorithme d'Estimation-Maximisation. Le choix de conditions initiales adaptées permet de séparer les houles australes, d'alizés et de tempêtes et de cyclones tropicaux.

A l'issue de cette étape, on peut constater que des événements cycloniques marquants ont été bien classés. Le cyclone Dina (janvier 2002) peut être cité en exemple de cette classification puisqu'il a été classée avec les cyclones et tempêtes tropicales (classe 3, Figure 81). Le cyclone Dina est l'un des plus difficiles à classer de la série car il est très mal reproduit par NWW3 qui modélise un passage du centre du cyclone au Sud de La Réunion (le cyclone était passé au nord). Au début de l'événement tel qu'il est modélisé par NWW3, rien ne permet de le distinguer des houles d'alizés si ce n'est la variabilité sur H_s et D qui suit (Figure 81).

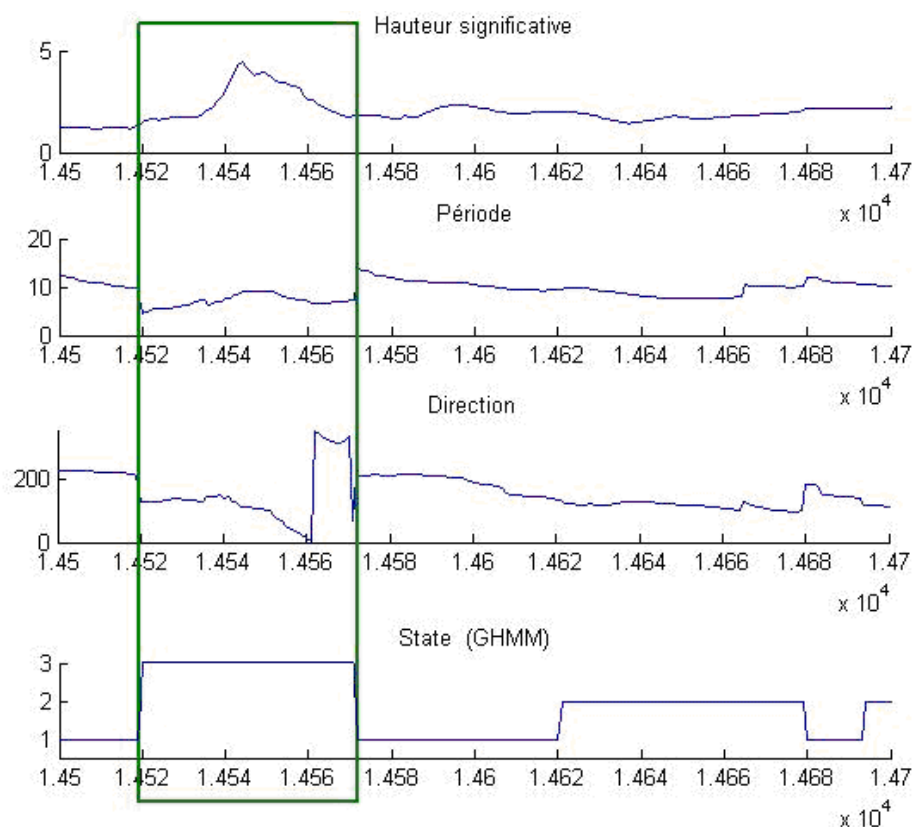


Figure 81. Illustration de la classification automatique du cyclone Dina (Janvier 2002) au point «Est» ; la classe n°3 correspond aux événements de tempêtes et de cyclones tropicaux

Comme évoqué précédemment, quelques erreurs de classification persistent en hiver austral et sont corrigées en post-traitement. La tempête tropicale Hennie du 25/03/2005, classée en houle d'alizés, est également remise dans la bonne classe.

Le Tableau 11 donne les résultats de cette classification. Il met en évidence le fait que les houles d'alizés et de tempêtes tropicales se distinguent par des variabilités différentes des paramètres T et D.

	Hs (m)	T (s)	D (°)	Ecart type sur Hs (m)	Ecart type sur T (s)	Ecart type sur σ D (°)	Occurrence (%)
Cyclones et tempêtes tropicales	2,2	7,4	112	1	1	68	11,1%
Houles d'alizés	2,4	9,3	115	0,6	1,6	32,3	43,5%
Houle australe	2,3	12,2	199	0,7	1,9	25,3	48,0%

Tableau 11. Climatologie de la houle au point NWW3 « Est » (21°S 56°15'E).

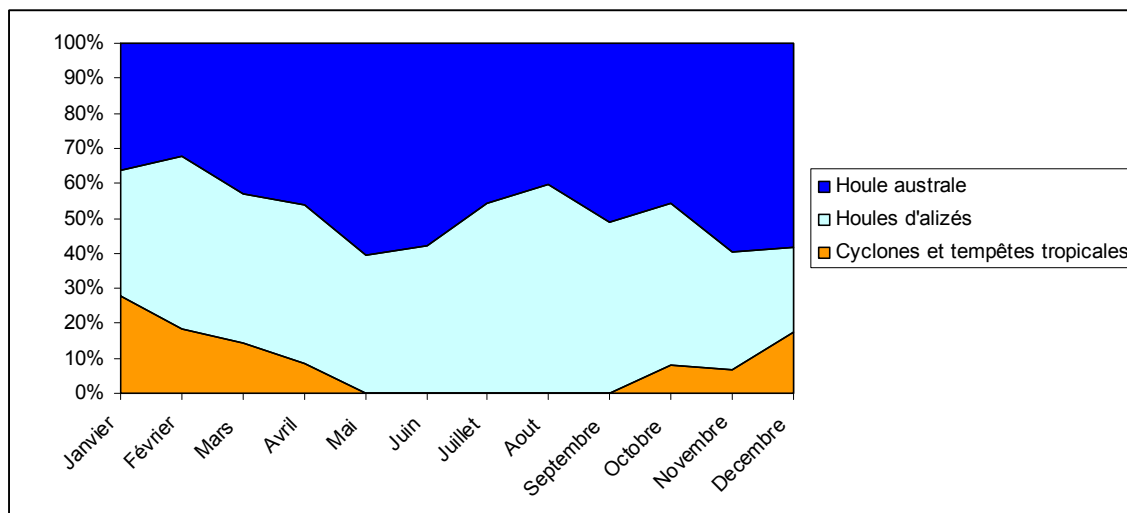


Figure 82. Saisonnalité de la houle au point «Est».

La répartition des valeurs prises par la classe de houle d'alizés au point « Est » ainsi isolée est représentée sur la Figure 83. Cette houle provient de la direction E à SE. Elle correspond à des périodes pic allant de 7 à 10s et des hauteurs significatives allant de 1 à 3m en moyenne.

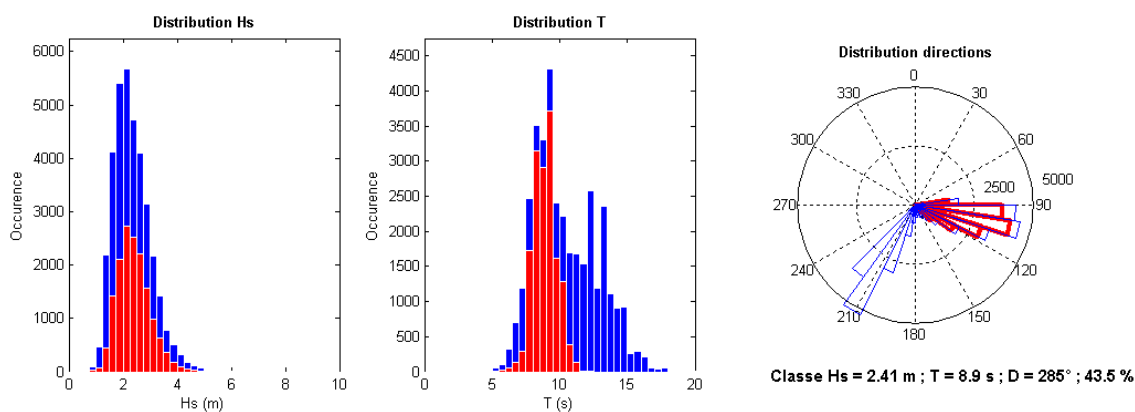


Figure 83. Répartition des valeurs prises par les paramètres de la houle correspondant à la classe de houle d'alizés (En bleu : jeu de données complet ; en rouge : classe correspondant aux houles d'alizés)

6.4.2. Calcul des valeurs extrêmes

Compte tenu de la longueur de la série temporelle (un peu plus de 12 ans de données), il convient d'être prudent quant à l'estimation de la hauteur de houle centennale.

Comme pour les houles australes, la méthode des blocs maxima est appliquée à l'échantillon des houles d'alizés du point « Est ». L'ajustement à une distribution de

Gumbel est accepté par les tests de Khi2 et de Kolmogorov Smirnov pour des blocs de 2 mois mais il apparaît très mal ajusté aux valeurs extrêmes et donne des H_s centennaux très différents des autres méthodes (Figure 84). L'ajustement à une fonction de Weibull (Figure 84) est accepté par les deux tests, mais donne des valeurs de houle centennale plus faibles que l'ajustement aux distributions GEV (Figure 85 et Figure 86). Finalement, l'ajustement par maximisation de la fonction de vraisemblance (ML) recommandé dans la littérature (Mazas et Hamm, 2007) est retenu. On peut noter que cette dernière valeur est très proche de celle trouvée par la méthode des moments pondérés qui est également dans l'intervalle de confiance à 68%. Le Tableau 12 résume les résultats obtenus.

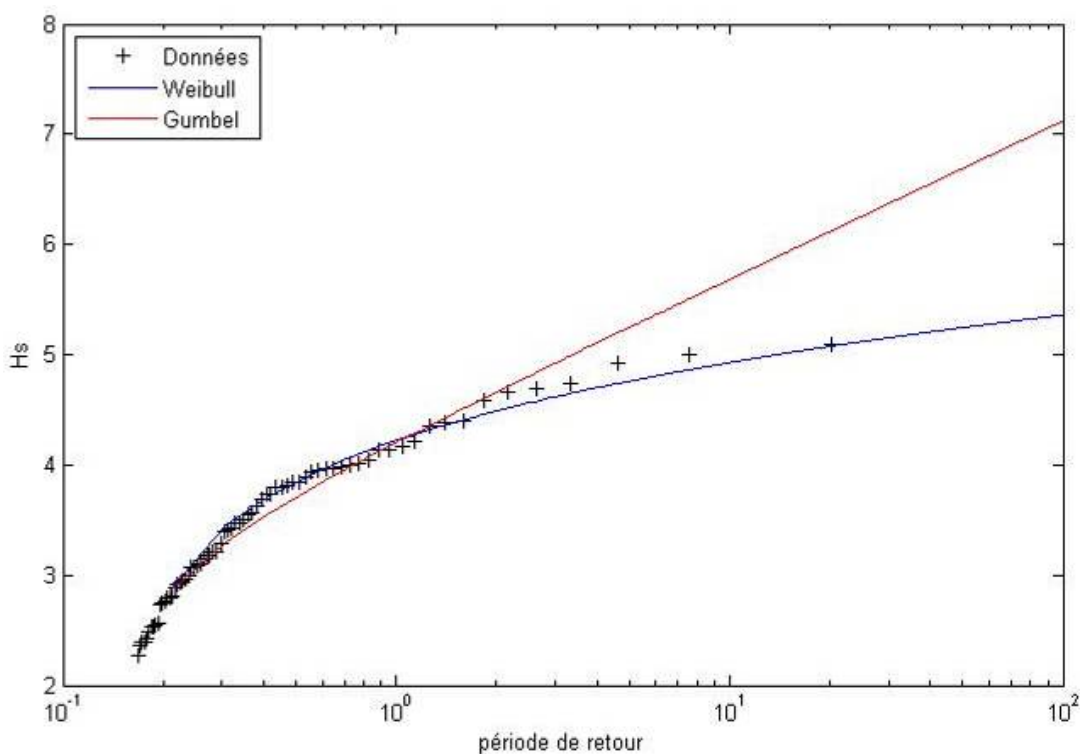


Figure 84. Ajustement d'une distribution de Weibull et de Gumbel sur les extrêmes de blocs de 2 mois pour les houles d'alizés du point « Est ».

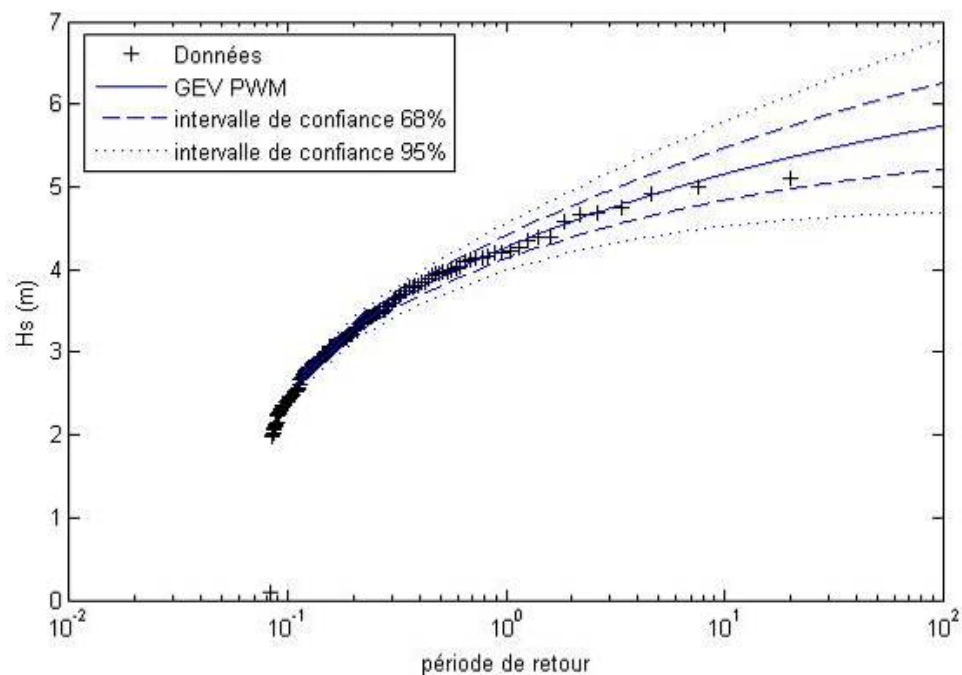


Figure 85. Ajustement d'une distribution GEV par la méthode des moments pondérés (PWM) sur les extrêmes de blocs de 1 mois pour les houles d'alizés du point « Est ».

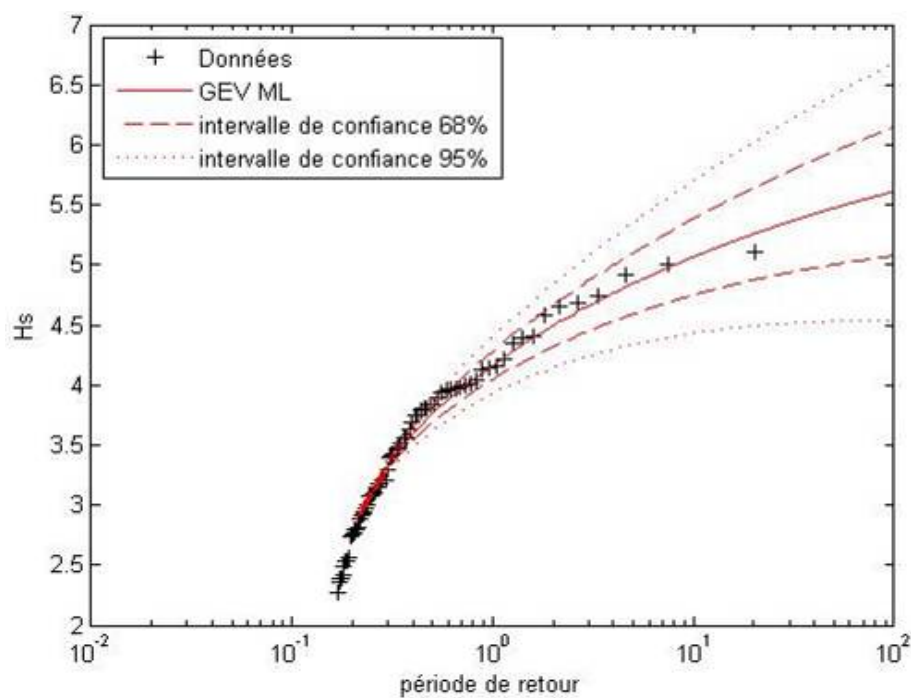


Figure 86. Ajustement d'une distribution GEV par maximisation de la fonction de vraisemblance sur les extrêmes de blocs de 2 mois pour les houles d'alizés du point « Est ».

Echantillon	Point « Est »			
Type de distribution	GEV	GEV	Gumbel	Weibull
Méthode d'ajustement	ML	moments pondérés		
Longueur des blocs	1 mois	2 mois	2 mois	2 mois
Hs10	5.06	5.15	5.68	4.90
Hs100	5.60	5.73	7.11	5.36
Tests	Komolgorov-S / Khi2	Komolgorov-S / Khi2	Komolgorov-S	Komolgorov-S / Khi2

Tableau 12. Houles d'alizés décennales et centennales estimées par la méthode des blocs maxima pour le point NWW3 « Est » (21°S 56°15E).

Les valeurs de houles centennales d'alizés présentées ici (Hs100 et Hs10 d'environ 5m) sont plus faibles que celles proposées dans d'autres études :

- Egis Eau (2008), en utilisant des données GlobOcéan, obtient une valeur centennale de 6.3m au point « est » (4.9m pour la valeur décennale) ;
- SOGREAH (1998), en utilisant des données Global Wave Statistics (British Maritime Technology) réalisées à partir d'observations visuelles faites par des navires sur la période de 1954-1984, trouvait des hauteurs décennales de 6.6m (pas de valeur de houle centennale).

Comme pour l'analyse des houles australes, les différences peuvent s'expliquer (1) par les différents jeux de données utilisés et (2) par les différents critères utilisés pour la séparation des houles d'alizés. On rappelle ici l'incertitude associée au calcul d'une hauteur centennale compte tenu du jeu de données de 12 ans existant : à titre d'exemple, l'intervalle de confiance à 95% pour la valeur de la hauteur significative de la houle centennale d'alizés est de 4.5m à 6.5m.

6.4.3. Choix de scénarios centennaux possibles

Afin de permettre le choix d'un ou plusieurs scénarios possibles, les événements de houle d'alizés pour lesquels les données NWW3 donnent des hauteurs significatives supérieures à 4.5m entre 1997 et 2009 sont identifiés dans la série temporelle (Tableau 13). Ces événements ont des caractéristiques similaires en termes de direction et de périodes de houles, mais aussi de saisonnalité.

Un seul événement représentatif d'une situation plausible de houle d'alizés centennale est choisi : il s'agit de la houle d'alizés la plus forte modélisée sur ce point sur la période considérée, soit celle du 12/07/2006 à 9 :00, avec un Hs de 5.1m, une période de 9.19s et une direction de 120°. Comme précédemment, pour contraindre les limites du domaine, les Hs issus de NWW3 sont multipliés par un coefficient multiplicatif

(ici : 1.098) pour les ramener à la hauteur centennale (ici : 5.6m). Les vents, les périodes et les directions sont laissés inchangés.

Date du maximum de l'événement	Heure du maximum de l'événement	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
08/07/1999	21 :00	4.66	10.26	120
02/08/2001	9 :00	4.69	8.6	130
05/05/2003	15:00	4.58	9.78	100
26/06/2004	06:00	4.74	9.9	110
30/08/2005	09:00	4.92	10.18	100
12/07/2006	09:00	5.1	9.19	120
26/07/2008	00:00	5.0	10.09	100

Tableau 13. Evénements de houle alizés pour lesquels NWW3 donne des hauteurs significatives de houle supérieures à 4.5m.

6.4.4. Propagation de la houle d'alizés du 12/07/2006 à la côte

Ce scénario de houle d'alizé centennale possible est propagé à la côte à l'aide du modèle SWAN.

Comme précédemment, seules les valeurs par 20m de profondeur et plus doivent être retenues.

Dans cette simulation, les houles ont une hauteur significative toujours inférieure à 4m au nord de Sainte Rose. Au sud, les hauteurs significatives des houles dépassent 4m sans atteindre 5m. Les résultats sont présentés dans les Figure 87, Figure 88, Figure 89 et Figure 90.

6.4.5. Conclusion partielle

Ainsi, en fonction du scénario proposé, les houles d'alizés sont relativement peu impactantes et affectent de manière relativement homogène les façades sud, est et nord avec des hauteurs significatives n'excèdent que ponctuellement les 4 m par 20 m de profondeur.

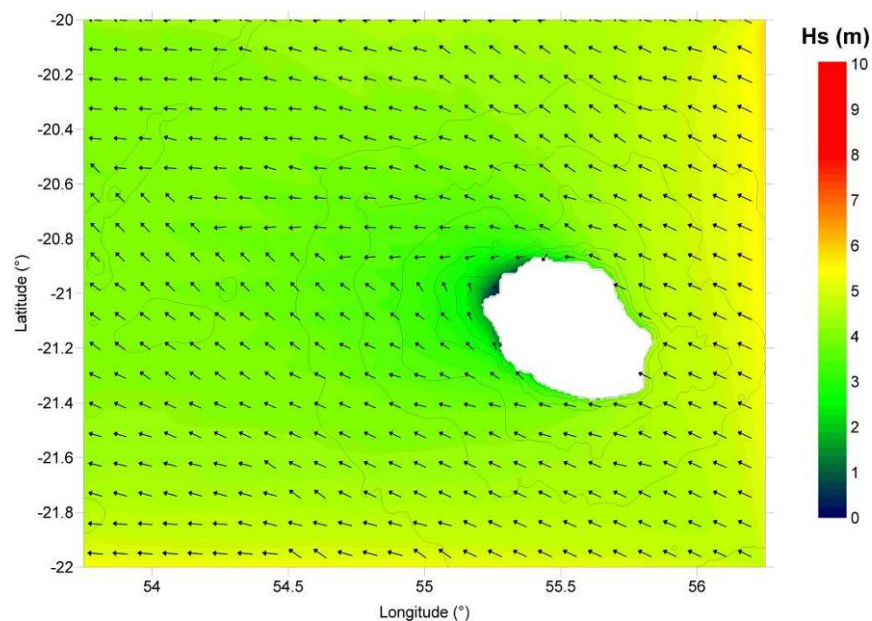


Figure 87. Scénario de houle d'alizés centennale basé sur la situation du 12/07/2006 (rang 1).

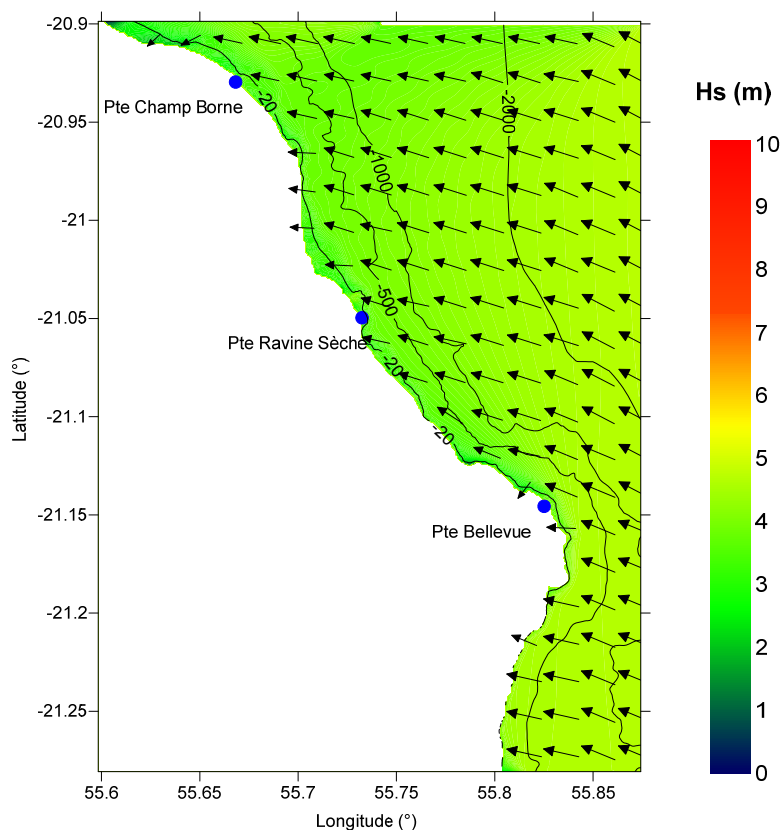


Figure 88. Scénario de houle d'alizés centennale basé sur la situation du 12/07/2006 (rang 2 – côte est).

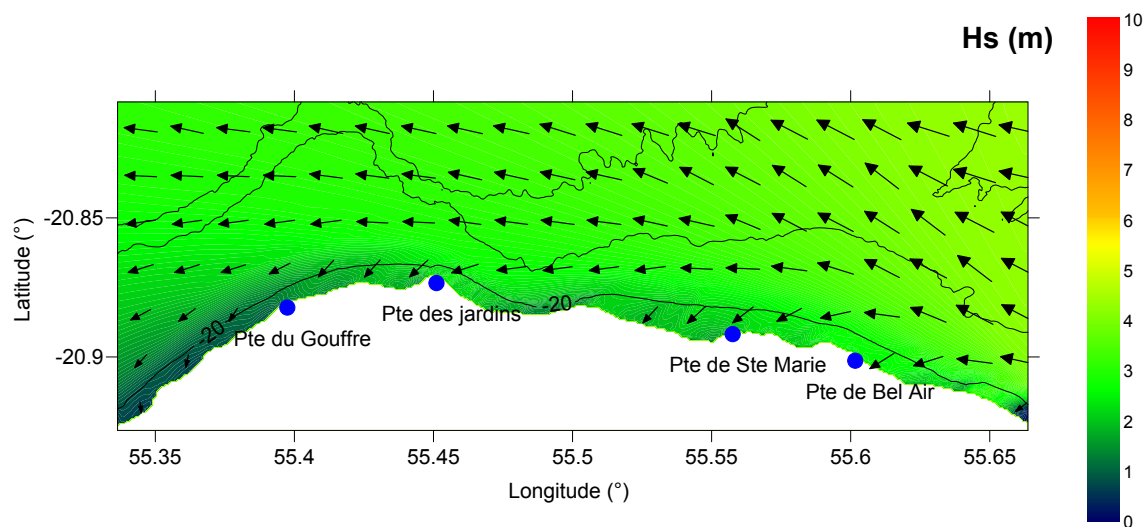


Figure 89. Scénario de houle d'alizés centennale basé sur la situation du 12/07/2006 (rang 2 – côte nord).

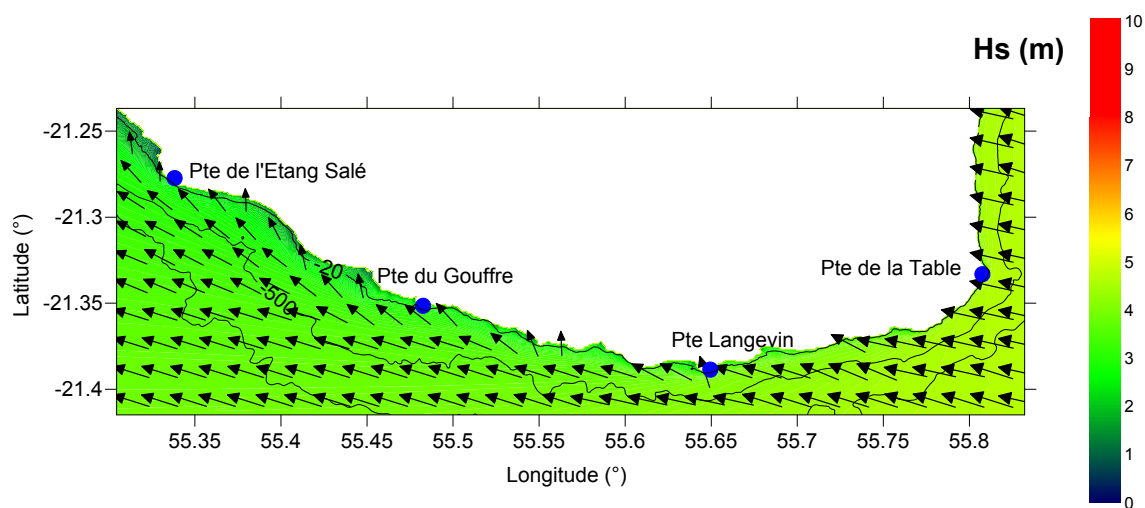


Figure 90. Scénario de houle d'alizés centennale basé sur la situation du 12/07/2006 (rang 2 – côte sud).

6.5. CONCLUSIONS SUR LES HOULES NON CYCLONIQUES

Houles de références non cycloniques

En résumé (Figure 91), les houles australes apparaissent comme les plus impactantes et font référence sur les façades Ouest et Sud avec des valeurs Hs de 6 à 7 m notamment pour les houles de mai 2007.

Sur les façades Nord et Est, les houles d'alizés sont prédominantes bien que les hauteurs significatives restent relativement faibles (< 4m).

Compte-tenu des houles de référence retenues, les côtes Ouest et Sud présente des houles de forte incidence. La zone du Grand Brulé (entre la Pointe de la Table et la Pointe Lacroix), à cheval entre les façades Sud et Est est également exposée de manière orthogonale vis-à-vis de la houle d'alizé.

Occurrence des houles de référence non cycloniques

La méthode d'ajustement GEV ML apparaît comme la plus adaptée pour déterminer la période de retour des houles non cycloniques.

Elle présente une hauteur significative d'occurrence centennale de 7.3m (décennale de 6.5m) pour les houles australes (Tableau 9) et de 5.6m (décennale de 5m) pour les houles d'alizés (Tableau 12).

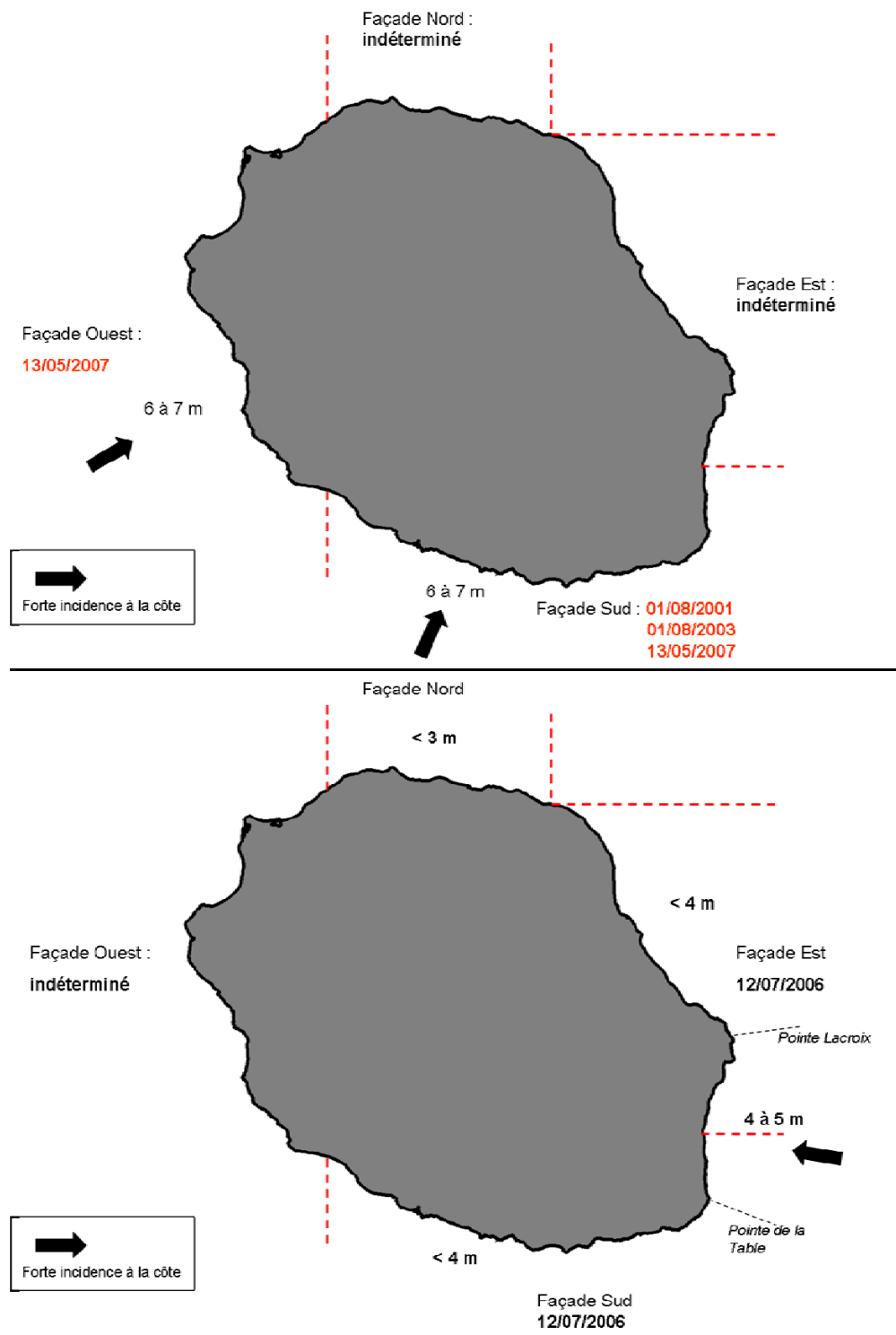


Figure 91. Synthèse des houles australes (haut) et d'alizés (bas) impactants par façade (Hs par 20 m de fond et zones de forte incidence de la houle)

7. Synthèse par façade

Pour rappel, la comparaison des hauteurs des différentes houles doit se faire proche de la côte (20 m de profondeur dans notre cas) afin de déterminer quelle est la houle la plus impactante à la côte en prenant en compte la réfraction des houles d'incidence oblique. En revanche, les valeurs devant être utilisées dans le cadre de la méthodologie mise en place pour la caractérisation de l'aléa de submersion marine (application de formules paramétrique de run-up) doivent correspondre à la houle au large.

Nous utiliserons donc les caractéristiques de la houle par 20 m de fond pour déterminer la houle de référence et proposerons les valeurs correspondantes au large en vue de leur réutilisation.

7.1. DETERMINATION DES HOULES DE REFERENCE

Lorsque l'on considère l'ensemble des houles (Figure 92), il apparaît que ce sont les houles cycloniques (bleu) qui génèrent les plus hautes vagues au large quelle que soit la façade concernée. Cependant, à la côte, la forte obliquité de la houle cyclonique induit une perte d'énergie importante par réfraction et ce sont les houles australes (vert), frontales, qui sont les plus impactantes pour les façades Ouest (de la pointe des Aigrettes à la Pointe des Avirons) et Sud (sauf au Nord de la Pointe de la Table).

On distingue donc :

- pour la façade Nord, une influence prépondérante de la houle cyclonique ;
- pour la façade Ouest, une subdivision entre la zone au nord de la Pointe de Aigrettes exposée vers le nord-ouest qui est sous l'influence prépondérante des houles cycloniques et une zone de la Pointes de Aigrettes à la Pointe des Avirons, orientée vers le sud-ouest, sur laquelle ce sont les houles australes qui sont les plus impactantes à la côte ;
- pour la façade Sud, une subdivision entre la zone de la Pointe des Avirons à la Pointe de la Table, globalement orientée sud, sous l'influence majeure des houles australes et une zone au nord de la Pointe de la Table, exposée vers l'est, où les houles cycloniques génèrent les plus hautes vagues ;
- pour la façade Est, une influence prépondérante de la houle cyclonique.

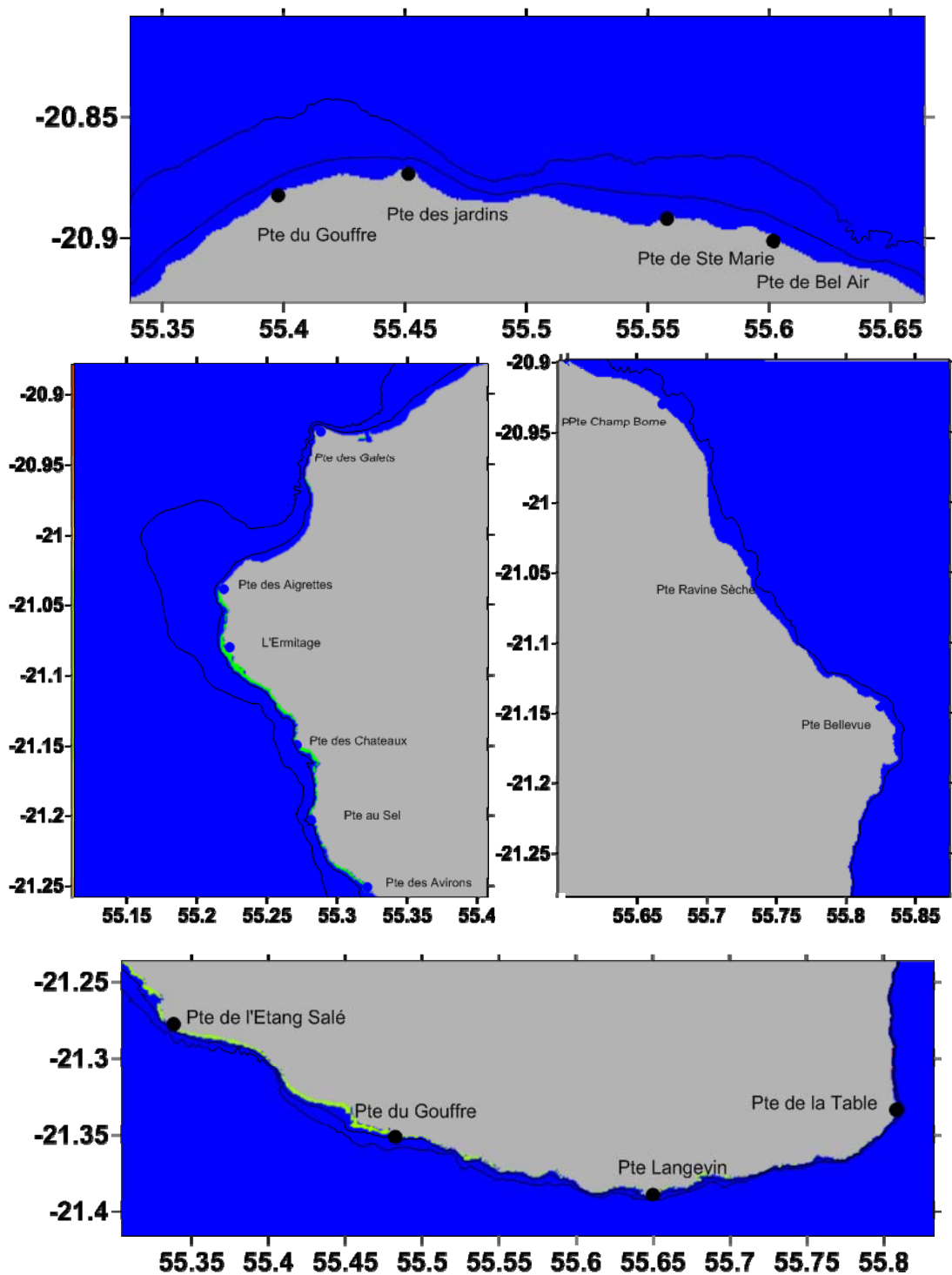


Figure 92 – Code couleur indiquant le type de houle ayant généré les vagues les plus hautes toute houle confondue (bleu : cyclonique, rouge : alizé, vert : australe).

7.2. CARACTERISTIQUES DES HOULES DE REFERENCE AU LARGE

Sur la base du découpage retenu, les caractéristiques des houles de référence, c'est à dire d'occurrence centennale, au large, sont les suivantes (Figure 93) :

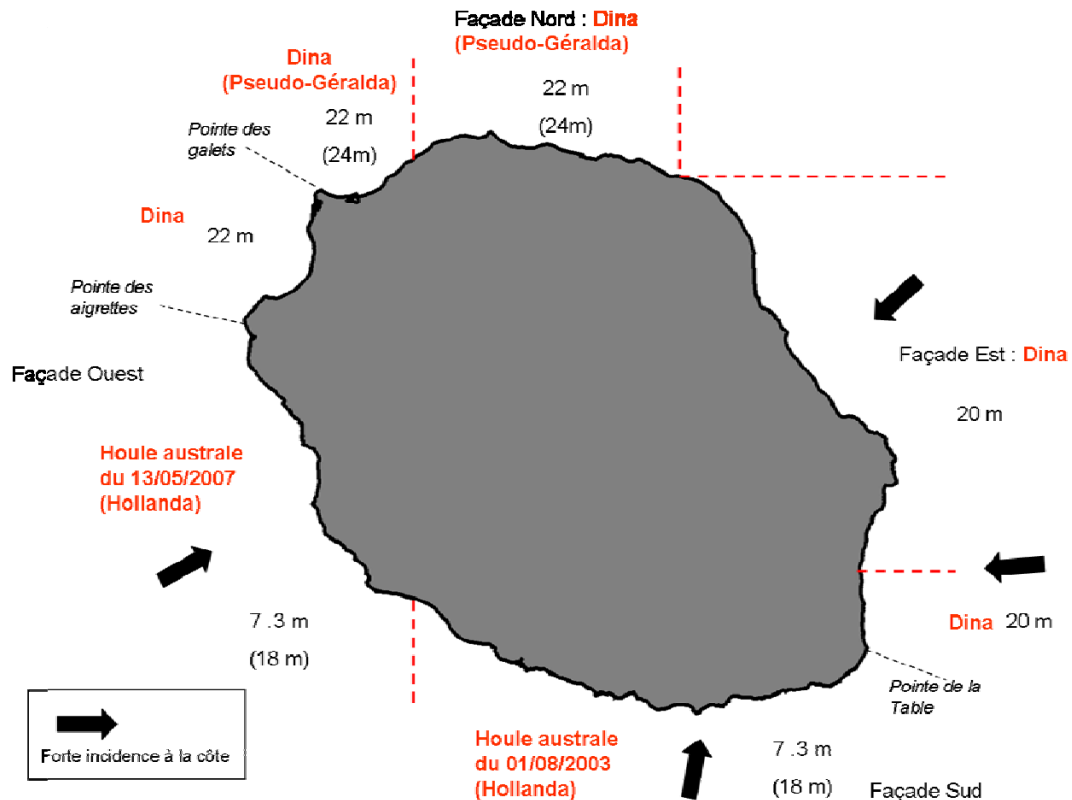


Figure 93 – Synthèse des houles de référence et caractéristiques au large

- pour la façade Nord et le nord-ouest de la façade Ouest (au Nord de la Pointe des aigrettes), c'est le cyclone Dina qui fait référence avec des valeurs Hs au large de l'ordre de 22 m (cf. 5.1) au pic de houle le 22/01/2002 à 14h. Il est également important de noter qu'un cyclone de type pseudo-Géralda peut générer des houles 10% plus hautes que Dina ;
- pour la façade Est et la partie au nord de la Pointe de la Table de la façade Sud, Dina reste également la référence avec une hauteur significative au large de 20m (cf. 5.1) ;
- Pour la façade Ouest au sud de la Pointe des aigrettes, la houle australe du scénario du 13/05/2007 est la plus impactante et pour une hauteur significative au point NWW3 « sud » rapportée à 7m (valeur centennale - cf. 6.3.4) ;

- Pour la façade Sud, excepté la partie au nord de la Pointe de la Table, la houle australe du scénario du 01/08/2003 fait référence avec une hauteur significative de 7m toujours rapportée au point NWW3 « sud » (cf. 6.3.4).

Le détail des caractéristiques de houle de référence au large (Hs, Tp, Dirp) est présenté dans le Tableau 14 :

	Façades					
	Nord	Ouest		Sud		Est
		Au nord de Pte des Aigrettes	Pte des Aigrettes à Pte de l'Etang Salé	Pte de l'Etang Salé à Pte de la Table	Au nord de Pte de la Table	
Houle de réf. 1	Cyclonique Dina	Cyclonique Dina	Australe 13/05/07	Australe 01/08/03	Cyclonique Dina	Cyclonique Dina
Hs (m)	22	22	7,3	7,3	20	20
Tp (s)	18	18	16,5	13,9	15	15
Dirp (°)	80	80	210	185	70	70
Houle de réf. 2	Pseudo-Géralda	Pseudo-Géralda (au nord Pte des Galets)	Hollanda	Hollanda		

Tableau 14 – Caractéristiques au large des houles de référence par façade

Bien qu'estimées moins impactantes à la côte, des houles de référence secondaires sont également indiquées car il pourrait s'avérer intéressant de faire des tests sur ces événements en termes de modélisation du run-up.

Les houles de références retenues sont orthogonales au large des façades Est, Sud et Ouest (au sud de la Pointe des Aigrettes) et leurs caractéristiques peuvent être utilisées pour l'application de formules paramétriques de run-up sur les cordons sédimentaires.

Dans les zones, où la houle de référence est très oblique (par exemple Dina sur la façade Nord) ou alors pour les environnements coralliens (sur les façades Ouest et Sud), la modélisation de type « vagues à vagues » en faible profondeur peut être envisagée.

8. Conclusion

Selon une méthodologie adaptée aux houles cycloniques et non cycloniques, cette étude a permis de déterminer les houles de référence (d'occurrence centennale) et leurs caractéristiques au large de La Réunion :

- les façades Nord et Est ainsi qu'une partie des façades Ouest (au nord de la Pointe des Aigrettes) et Sud (au nord de la Pointe de la Table) sont sous l'influence prépondérante des houles cycloniques, **Dina** étant l'évènement de référence avec une période de retour centennale et une hauteur significative au large de l'ordre de 22 m au nord et 20 m à l'est ;
- le reste des façades Ouest et Sud est en revanche plus impacté à la côte par les **houles australes** dont la hauteur significative centennale a été évaluée à 7m au large.

Bien qu'estimées moins impactantes à la côte, des houles de référence secondaires (Pseudo-Géralda et Hollanda) sont également indiquées.

Les conditions de houle des évènements déterminés dans cette étude permettront de déterminer la submersion marine notamment grâce à l'évaluation du « wave run-up » (niveau extrême atteint par le jet de rive des vagues suite au déferlement) grâce à des formules paramétriques ou à la modélisation « vagues à vagues » en faible profondeur.

Compte tenu de la présence récif corallien et/ou de l'orientation de la houle cyclonique sur certaines façades, l'utilisation des formulations paramétriques devra être considérée avec précaution.

9. Bibliographie

Bao S., Xie L. ; Pietrafesa L.J., 2006. An asymmetric wind model for storm surge and wave forecasting. Conference on Hurricanes and tropical meteorology ;

BCEOM, 2007, modélisation numérique de l'énergie des vagues sur l'île de La Réunion, MAR 50550A ;

Becker, J. J., D. T. Sandwell, W. H. F. Smith, J. Braud, B. Binder, J. Depner, D. Fabre, J. Factor, S. Ingalls, S-H. Kim, R. Ladner, K. Marks, S. Nelson, A. Pharaoh, R. Trimmer, J. Von Rosenberg, G. Wallace, P. Weatherall., 2009. Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30_PLUS, *Marine Geodesy*, 32:4, 355-371 ;

Booij, N., Haagsma I.J.G.; Holthuijsen L.H.; Kieftenburg, A.T.M.M.; Ris, R.C.; Van der Westhuysen A.J. and Zijlema M., 2004. Swan Cycle III version 40.41. User's Manual, 115p ;

Bretschneider, C.L., 1972. A non-dimensional stationary hurricane wave model. In: Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, vol. I, pp. 51–68 ;

Brodtkorb, P.A., Johannesson, P., Lindgren, G., Rychlik, I., Rychlik, J. and Sjö, E., 2000. "WAFO - a Matlab toolbox for analysis of random waves and loads", *Proc. 10th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, Seattle, USA, Vol III, pp. 343-350 ;

Cazes-Duvat V. et Paskoff R., 2004. Les littoraux des Mascareignes entre nature et aménagement, L'Harmattan, 186 p ;

De La Torre Y. et Louzé J., collab. Dewez T., 2008. Méthodologie pour l'évaluation et la cartographie des aléas côtiers à La Réunion. Phase 2. BRGM/RP-56589-FR, 36 p + annexes ;

DHI, Novembre 2007. Nouvelle liaison Saint Denis ouest La Réunion, étude des houles cycloniques, Rapport final ;

EGIS EAU, janvier 2008. Etude des houles d'alizés et houles australes, HER / 71112R ;

Holland G., 1980. An analytic model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes. *Monthly Weather Review* vol.108 1212-1218 ;

Hugodot, P., P. Dubois, 2003. Rapport de l'inspection générale de l'environnement, Cyclone Dina à La Réunion les 22 et 23 janvier 2002 ; Caractérisation, conséquences et retour d'expérience ;

Le Cozannet G., Lecacheux S., Delvallée E., Oliveros C., 2009. Analyse de climats de houle, BRGM/RP 56 878-FR ;

MAZAS, F., HAMM, L., 2008. Réconcilier théorie et pratique dans la détermination des houles extrêmes, in proc. Xèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 14-16 octobre 2008, Sophia Antipolis ;

Météo-France, 1997. Atlas climatique de La Réunion, http://www.meteo.fr/temps/dontom/La_Reunion/# ;

Météo France, 2007. Note de synthèse sur le risque lié à la surcote cyclonique à La Réunion, 8p ;

Météo France, 2009. Etude pour l'identification des évolutions des changements climatiques à La Réunion ;

Monbet V., P. Aillot, 2005, Metocean Time Series (METIS) Toolbox Documentation, Ifremer;

Phadke, A.C., Martino, C.D., Cheung, K.F., and Houston, S.H., 2003. Modeling of tropical cyclone winds and waves for emergency management. *Ocean Engineering*, 30(4), 553-578;

Tolman, H.L., 2002. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 222, 133 pp.

Xie L, Bao S., Pietrafesa L.J., Foley k., Fuentes M., 2006. A Real-Time Hurricane Surface Wind Forecasting Model: Formulation and Verification. *American Meteorological Society - Monthly Weather Review*, vol. 134 pp.1355-1370.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Réunion

5, rue Sainte-Anne
BP

97400 – Saint-Denis de La Réunion – France
Tél. : 02 62 21 22 14