

ANNEXE V : ETUDE DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES DANS LE CADRE DU PROJET DE CANALISATION SOUS-MARINE ENTRE LE CONTINENT ET PORQUEROLLES – RAPPORT D'ETUDE TRANCHE FERME, OCEANIDE



Zone portuaire de Brégaillon
B.P 63
83502 La Seyne/mer – France
Tel : 00 33 4.94.10.97.40
Fax : 00 33 4.94.94.42.27
contact@Océanide.net



Etude des conditions hydrodynamiques dans le cadre du projet de canalisation sous-marine entre le continent et Porquerolles

Rapport d'étude :
TRANCHE FERME

2	Version finale	AL	BB	BB	12/02/2019
1	Pour commentaires	AL	BB	BB	09/01/2019
0	Provisoire	AL	BB	BB	18/12/2018
Révision	Statut	Rédigé par	Revu par	Approuvé par	Date
NUMERO DE DOCUMENT : 18.7.054.R.002					

TABLE DES MATIERES

1.	REFERENCES.....	3
2.	INTRODUCTION.....	4
3.	CONDITIONS NATURELLES (TF 1 & 2).....	6
3.1.	REFERENTIELS.....	6
3.1.1.	<i>Altimétrie</i>	6
3.1.2.	<i>Repère</i>	6
3.2.	BATHYMETRIE.....	6
3.3.	CONDITIONS OCEANO-METEOROLOGIQUES.....	7
3.3.1.	<i>Base de données vent/houle</i>	7
3.3.2.	<i>Vent (TO 1)</i>	8
3.3.3.	<i>Niveaux d'eau</i>	15
3.3.3.1.	<i>Niveau moyen</i>	15
3.3.3.2.	<i>Surcotes</i>	15
3.3.3.3.	<i>Surélévation lente du niveau des mers</i>	15
3.3.3.4.	<i>Niveaux de projet</i>	16
3.3.4.	<i>Houles au large</i>	17
3.3.4.1.	<i>Climat de houle</i>	17
3.3.4.3.	<i>Traitement statistique</i>	18
3.3.4.4.	<i>Houles extrêmes</i>	21
3.3.5.	<i>Clapots levés par le vent</i>	27
4.	PROPAGATION DE LA HOULE DU LARGE (TF 3).....	28
4.1.	CARACTERISTIQUES DU MODELE DE PROPAGATION.....	28
4.2.	CAS DE CALCULS.....	31
4.2.1.	<i>Conditions extrêmes</i>	31
4.3.	RESULTATS.....	32
5.	VITESSES ORBITALES (TF 4).....	34
5.1.	POINTS D'EXTRACTION DES RESULTATS.....	34
5.2.	VITESSE ORBITALE - DETERMINATION.....	36
5.3.	VITESSE ORBITALE - RESULTATS.....	37

ANNEXE

ANNEXE 1 : Résultats de la modélisation numérique de la propagation de la houle

1. **REFERENCES**

[Réf. 1] Métropole Toulon Provence Méditerranée, « Etude des conditions hydrodynamiques dans le cadre du projet de canalisation sous-marine entre le continent et Porquerolles – Proposition technique et commerciale », 18.7.054.P.001 rev0, 07/09/2018, OCEANIDE

[Réf. 2] « Références Altimétriques Maritimes – Ports de France métropolitaine et d'outre-mer », Edition 2017, SHOM

[Réf. 3] « Analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaines », CETMEF, avril 2013

[Réf. 4] Circulaire du 27 juillet 2011 relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux, Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement

[Réf. 5] Base de données cartographiques SHOM : <https://diffusion.shom.fr/pro/>

[Réf. 6] Cours d'hydraulique maritime (1992) – René BONNEFILLE

[Réf. 7] Les houles périodiques simples (1993) – Université de Toulon et du Var – Jean BOUGIS

[Réf. 8] Métropole Toulon Provence Méditerranée, « Etude des conditions hydrodynamiques dans le cadre du projet de canalisation sous-marine entre le continent et Porquerolles – Etude préliminaire des courants de fond », 18.7.054.R.001 rev0, 08/11/2018, OCEANIDE

2. INTRODUCTION

Afin d'améliorer et de sécuriser l'alimentation en eau potable de l'île de Porquerolles, la commune d'Hyères projette de poser une canalisation d'alimentation en eau entre l'extrémité de la presqu'île de Giens (site de la Tour Fondue) et Porquerolles.

La canalisation, posée sur le fond, sera soumise à l'action des courants et des vagues. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces éléments au moment de sa conception.

La société OCEANIDE a été mandatée afin de mener les études permettant de déterminer les contraintes hydrodynamiques qui seront subies par la conduite. Le présent document constitue le rapport d'étude de cette mission d'analyse des conditions sur site et de leur effet sur les fonds marins dans la zone de la future implantation de la conduite.

Concernant l'implantation de la canalisation, plusieurs fuseaux étaient envisagés au démarrage de l'étude et ils sont illustrés par la figure ci-dessous :



Figure 2-1 : Implantation de la canalisation – Fuseaux initiaux envisagés

Au moment de la réalisation des études et de la rédaction du présent rapport, le dernier COTECH ayant été tenu a orienté le projet vers un tracé de canalisation entre le port de la Tour Fondue et le port de Porquerolles tel qu'illustré par la figure suivante. Le tracé exact en mer sera déterminé après la fin des études environnementales en cours.

Un tracé a néanmoins été confirmé auprès de la commune d'Hyères afin de positionner les points pour le calcul des vitesses orbitales (cf. dernière partie du présent rapport).

3. CONDITIONS NATURELLES (TF 1 & 2)

3.1. Référentiels

3.1.1. Altimétrie

Le SHOM (2017, réf. [2]) fournit les données suivantes pour les ports proches du site étudié, dont Toulon où se situe le marégraphe de référence en Méditerranée :

	PHMA	NM	PBMA	Zéro CM / NGF (IGN69)
Toulon	+ 0,64m CM	+ 0,42m CM	+ 0,17m CM	- 0,253m NGF
Port Pothuau	+ 0,70m CM	+ 0,47m CM	+ 0,19m CM	- 0,306m NGF

Tableau 3-1 : Marée SHOM (réf. [2])

La référence la plus proche du tracé de canalisation étudié est celle de Port Pothuau où le niveau d'eau de référence est : 0m NGF = +0,306m CM

Cette valeur est arrondi afin de retenir : 0m NGF = +0,31m CM

3.1.2. Repère

Le référentiel spatial est le Lambert 93.

3.2. Bathymétrie

Plusieurs sources de données sont utilisées afin de modéliser la bathymétrie et le trait de côte :

- Les données bathymétriques du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine Française) pour le large (MNT) ;
- Les dalles bathymétriques du SHOM, acquise sous format numérique par OCEANIDE (Litto3D), qui permettent de préciser les zones de moyenne profondeur (réf. [5]) ;
- Dans les petits fonds à proximité de la zone d'étude :
 - Utilisation des données d'un levé bathymétrique à proximité de l'île du Petit Ribaud,
 - Utilisation des données du SHOM (Litto3D®).
- Pour le trait de côte : HistoLitt ® (© IGN-SHOM 2009).

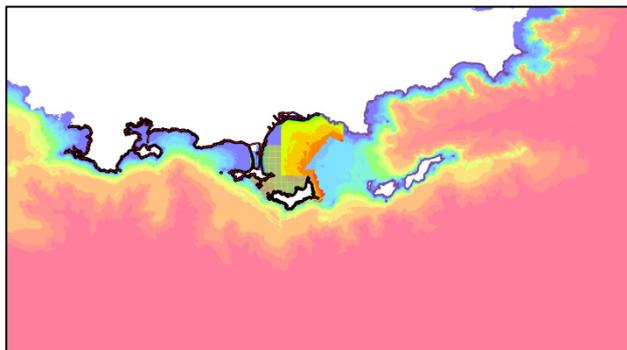
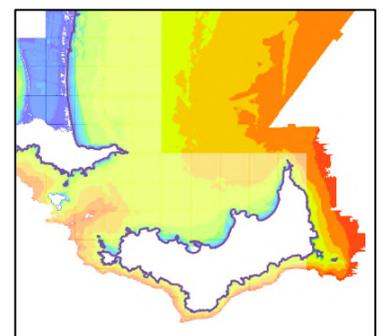


Figure 3-1 : Illustration de la base de données bathymétrique

3.3. Conditions océano-météorologiques

3.3.1. Base de données vent/houle

Pour déterminer les conditions de vent et de houle au large du site, la base de données IOWAGA & CFSR a été analysée en 2 points proches de la zone d'étude. Les bases de données sont explicitées dans les chapitres suivants.

Concernant les points analysés, il s'agit :

- Pour les houles de secteur Ouest, les données au point de coordonnées 43°N/6°E, situé à l'Ouest du port de la Tour Fondue ;
- Pour les houles de secteur Est, les données au point de coordonnées 43°N/6,5°E, situé à l'Est des îles de Hyères.

Ces deux points sont illustrés par la figure suivante :



Figure 3-2 : Points de données de houle IOWAGA

- Point Ouest :
 - Coordonnées : [43°N – 6°N],
 - Profondeur d'eau : environ 1100m,
 - Positionnement : au large de la rade de Toulon, à environ 13,5km à l'Ouest de la zone d'étude
 - Points d'analyse pour les houles provenant du secteur Ouest atteignant le site
- Point Est :
 - Coordonnées : [43°N – 6,5°N],
 - Profondeur d'eau : environ 250m,
 - Positionnement : à 3km au large de l'île du Levant, à environ 27km à l'Est de la zone d'étude
 - Points d'analyse pour les houles provenant du secteur Est atteignant le site

3.3.2. Vent (TO 1)

Les données utilisées pour caractériser les vents locaux sont les sorties du modèle climatique global CFSR (SAHA et al. 2010) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)¹ : il s'agit d'une double analyse des données climatiques qui comprend un modèle couplé {atmosphère - océan - continent - banquise} et une assimilation de données satellitaires. Elle fournit des données tri-horaires de vent à 10 m, sur la période 1990-2016, avec une résolution spatiale de 0,5° x 0,5°. OCEANIDE a récupéré ces données au point de coordonnées 6°E/43°N.

L'analyse de ces données permet de connaître les régimes de vent dominants pour le secteur d'étude. Les caractéristiques des vents extrêmes sont aussi déterminées pour les incidences pouvant avoir un effet sur la courantologie du site.

a. Point Ouest [43°N - 6°E]

L'analyse du vent au large au point de coordonnées 43°N-6°E permet de tracer la rose des vents suivante :

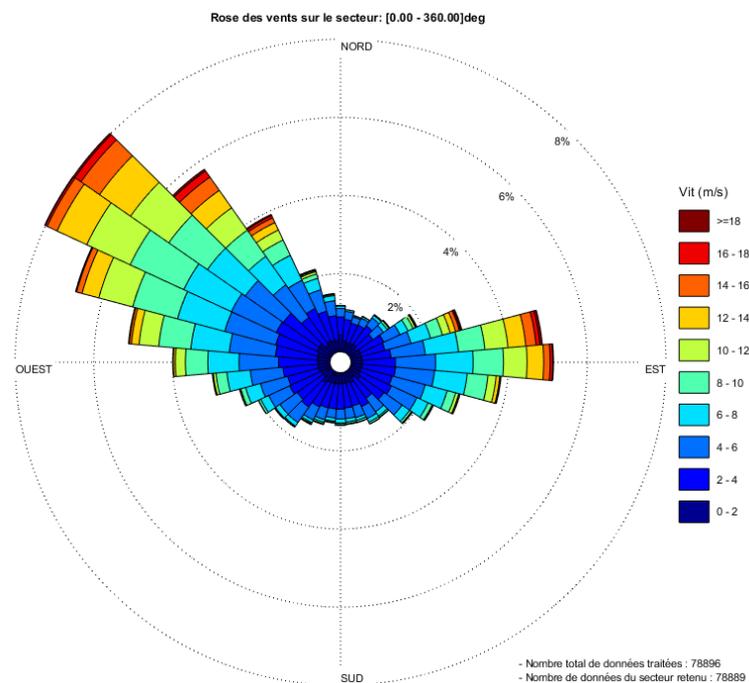


Figure 3-3 : Données de vent CFSR – Rose des vents et distribution Direction/Vitesse – Point Ouest

Les secteurs Est et Nord-Ouest se distinguent en fréquence et intensité.

¹ Saha, Suranjana, and Coauthors, 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. Bull. Amer. Meteor. Soc., 91, 1015.1057. doi: 10.1175/2010BAMS3001.1

La distribution entre l'incidence et la vitesse du vent permet de visualiser la répartition du vent en intensité :

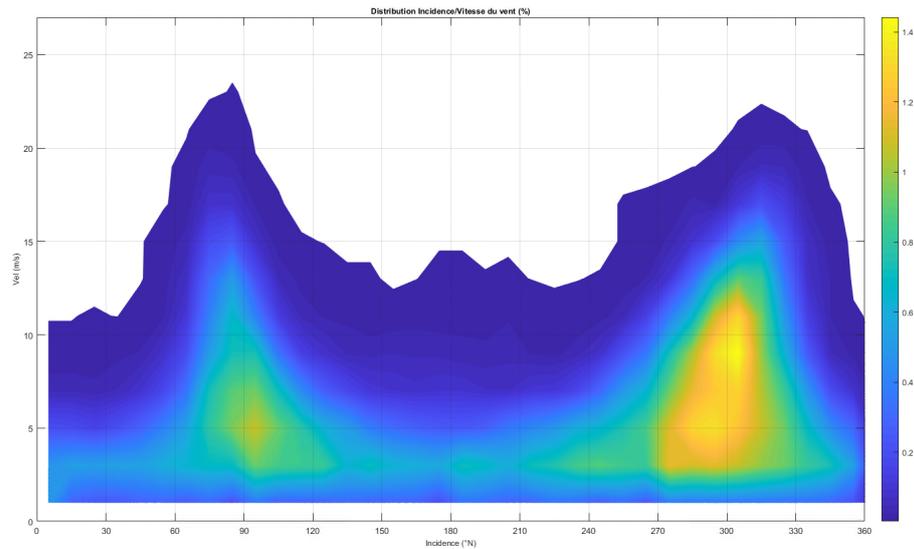


Figure 3-4 : Distribution Direction / Vitesse du vent – Point Ouest

On peut noter :

- Secteur Nord-Ouest :
 - Incidence nettement majoritaire en proportion,
 - Répartition centrée entre les directions 270°N et 315°N.
- Secteur Est :
 - Incidence secondaire en proportion,
 - Répartition centrée vers 90°N.

Une analyse statistique a été réalisée pour les 2 secteurs d'incidence identifiés afin d'établir la répartition de l'incidence principale du vent en fonction de sa vitesse. Les résultats sont présentés dans les tableaux ci-après.

Vit (m/s) \ Dir (°N)	245 - 255	255 - 265	265 - 275	275 - 285	285 - 295	295 - 305	305 - 315	315 - 325	325 - 335	335 - 345	345 - 355	Total (%)
0 - 2	3.03	3.11	3.09	3.28	3.41	3.88	2.70	4.03	3.37	3.13	2.92	35.95
2 - 4	8.20	8.90	9.99	10.65	10.95	11.46	9.61	10.08	9.13	7.75	6.38	103.08
4 - 6	7.16	8.35	10.04	11.78	13.42	12.59	11.04	10.94	7.97	5.65	3.84	102.79
6 - 8	3.90	5.96	7.92	9.79	12.41	13.34	11.17	9.47	7.02	3.02	1.32	85.31
8 - 10	1.27	2.78	5.69	8.19	11.79	15.05	11.57	8.58	4.34	1.13	0.29	70.67
10 - 12	0.28	0.68	2.55	5.02	8.92	12.17	11.38	7.48	2.81	0.65	0.10	52.05
12 - 14	0.05	0.15	0.49	1.95	4.41	8.33	9.33	5.73	2.12	0.30	0.09	32.96
14 - 16	0.00	0.09	0.09	0.56	1.43	2.79	5.65	4.23	1.36	0.20	0.03	16.43
16 - 18	0.03	0.03	0.09	0.18	0.25	0.51	1.83	1.98	0.62	0.11	0.04	5.65
18 - 20	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.16	0.43	0.49	0.28	0.04	0.00	1.45
20 - 22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.08	0.06	0.04	0.00	0.00	0.19
22 - 24	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03
>=24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	23.92	30.04	39.95	51.41	67.03	80.28	74.79	63.08	39.07	21.98	15.00	506.55

Tableau 3-2 : Répartition vitesse/direction du vent (%) - Secteur NO

⇒ L'incidence principale des forts vents de Nord-Ouest est plutôt 310-320°N

Vit (m/s) \ Dir (°N)	35 - 45	45 - 55	55 - 65	65 - 75	75 - 85	85 - 95	95 - 105	105 - 115	115 - 125	125 - 135	Total (%)
0 - 2	1.93	3.23	2.86	2.74	2.79	2.94	2.83	2.71	2.86	2.50	27.39
2 - 4	5.05	5.89	6.57	6.30	7.40	8.34	8.53	8.21	8.72	6.46	71.48
4 - 6	2.35	3.42	4.56	6.82	8.73	10.20	9.95	8.67	7.14	5.21	67.06
6 - 8	0.75	1.20	2.24	5.13	8.48	9.53	8.33	5.78	3.17	2.18	46.80
8 - 10	0.18	0.55	1.46	3.14	6.73	7.69	5.29	2.22	1.13	0.56	28.94
10 - 12	0.04	0.15	0.63	2.02	5.89	6.00	2.09	0.82	0.27	0.22	18.13
12 - 14	0.01	0.06	0.25	1.43	4.54	4.23	0.91	0.27	0.09	0.08	11.88
14 - 16	0.03	0.05	0.14	1.00	2.61	1.64	0.27	0.08	0.01	0.01	5.83
16 - 18	0.00	0.01	0.03	0.32	1.01	0.67	0.06	0.01	0.00	0.00	2.12
18 - 20	0.00	0.00	0.00	0.25	0.43	0.14	0.01	0.00	0.00	0.00	0.84
20 - 22	0.00	0.00	0.00	0.09	0.14	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27
22 - 24	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
>=24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	10.32	14.58	18.75	29.26	48.79	51.44	38.27	28.77	23.39	17.21	280.77

Tableau 3-3 : Répartition vitesse/direction du vent (%) - Secteur Est

⇒ L'incidence principale des forts vents d'Est est plutôt 80°N

La rose des tempêtes est présentée ci-dessous, pour l'ensemble des secteurs et pour les vents au-delà de 16m/s :

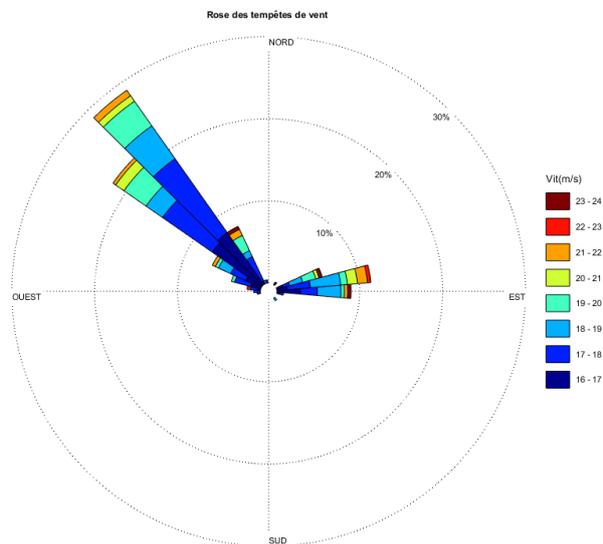


Figure 3-5 : Rose des tempêtes – Point Ouest

L'analyse statistique de ces tempêtes a été réalisée pour les deux secteurs directionnels prédominants afin d'évaluer les caractéristiques des vents extrêmes. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après.

Secteurs	Périodes de retour	1 an	5 ans	10 ans	50 ans	100 ans
Nord-Ouest	Vitesse	19.5 m/s	21 m/s	22 m/s	24.5 m/s	25.5 m/s
	Direction	310°N				
Est	Vitesse	18.5 m/s	21.5 m/s	22.5 m/s	25 m/s	26 m/s
	Direction	80°N				

Tableau 3-4 : Caractéristiques des vents extrêmes – Point Ouest

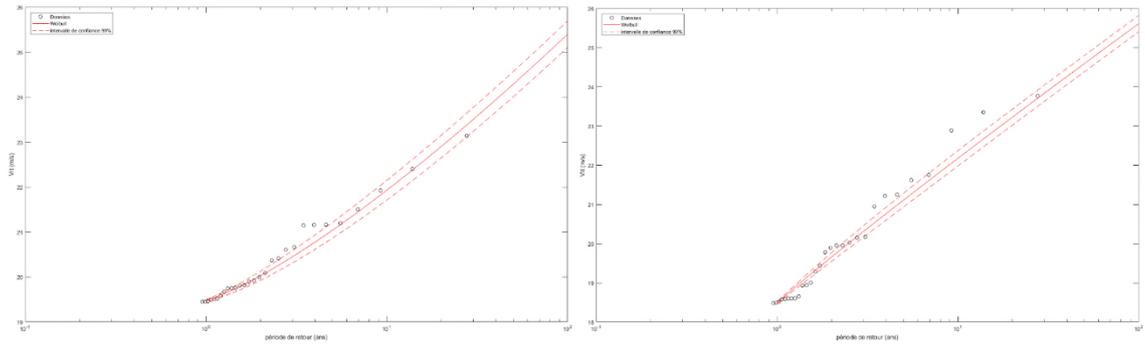


Figure 3-6 : Lois d'interpolation – Secteurs NO et E (Weibull) – Point Ouest

b. Point Est [43°N – 6,5°E]

L'analyse du vent au large au point de coordonnées 43°N-6,5°E permet de tracer la rose des vents suivante :

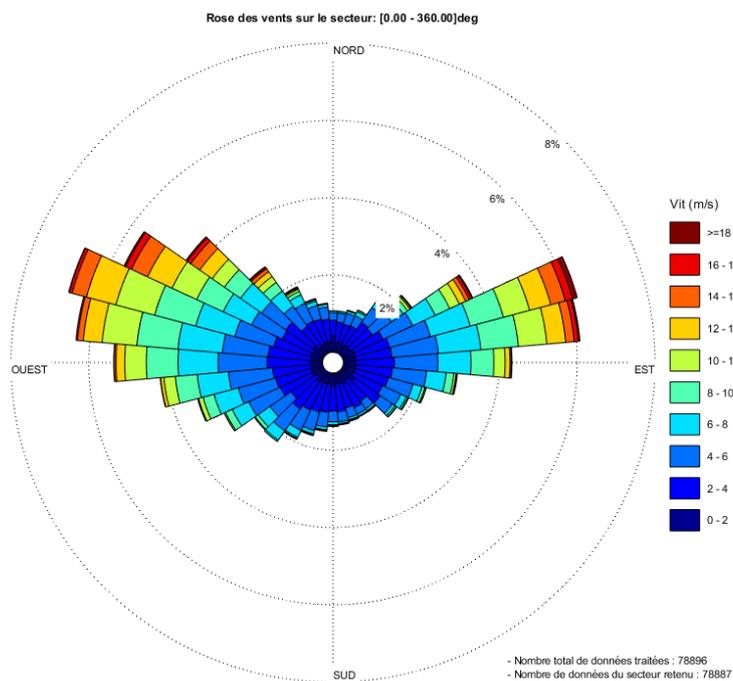


Figure 3-7 : Données de vent CFSR – Rose des vents et distribution Direction/Vitesse – Point Est

Les secteurs Est-Nord-Est et Ouest-Nord-Ouest se distinguent en fréquence et intensité.

La distribution entre l'incidence et la vitesse du vent permet de visualiser la répartition du vent en intensité :

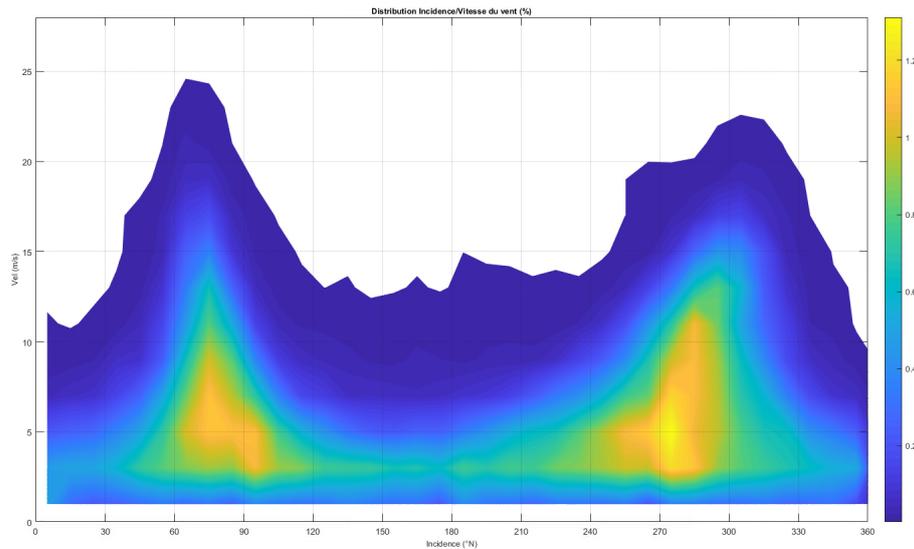


Figure 3-8 : Distribution Direction / Vitesse du vent – Point Est

On peut noter :

- Secteur Ouest-Nord-Ouest :
 - Incidence majoritaire en proportion,
 - Répartition centrée entre les directions 270°N et 290°N.
- Secteur Est :
 - Incidence secondaire en proportion, mais du même ordre de grandeur que ONO,
 - Répartition centrée entre les directions 70°N et 90°N.

Les résultats de l'analyse statistique sont présentés dans les tableaux ci-après :

Vit (m/s) \ Dir (°N)	245 - 255	255 - 265	265 - 275	275 - 285	285 - 295	295 - 305	305 - 315	315 - 325	325 - 335	335 - 345	345 - 355	Total (%)
0 - 2	2.98	2.8	3.06	2.97	3.32	2.89	2.47	3.38	2.65	2.83	2.81	32.16
2 - 4	9.62	10.12	11.18	11.08	9.8	8.82	7.52	7.52	6.54	6.17	5.81	94.17
4 - 6	9.89	11.37	12.59	11.79	10.31	8.66	6.85	7.07	5.1	3.68	3.16	90.45
6 - 8	6.45	8.02	10.26	11.42	10.39	8.06	6.49	4.97	2.45	1.13	0.74	70.38
8 - 10	2.94	5.64	8.18	10.61	10.9	7.52	4.89	2.88	1	0.39	0.19	55.14
10 - 12	1.17	2.95	5.51	8.95	10.29	6.96	3.69	1.96	0.61	0.19	0.05	42.34
12 - 14	0.2	0.82	2.24	4.86	7.83	6.95	3.87	1.58	0.3	0.06	0.04	28.76
14 - 16	0.05	0.08	0.44	1.51	3.82	4.58	2.81	0.98	0.2	0.05	0	14.51
16 - 18	0.01	0.04	0.08	0.33	0.77	1.64	1	0.46	0.13	0.01	0	4.46
18 - 20	0.01	0.01	0.08	0.03	0.13	0.38	0.32	0.2	0.03	0	0	1.18
20 - 22	0	0	0	0.01	0.03	0.04	0.1	0.05	0	0	0	0.23
22 - 24	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0.03	0	0	0.04
>=24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	33.33	41.86	53.61	63.55	67.59	56.49	40.02	31.06	19.03	14.51	12.79	433.82

Tableau 3-5 : Répartition vitesse/direction du vent (%) - Secteur NO

⇒ Les forts vents de Nord-Ouest se concentrent plutôt sur la direction 310°N

Vit (m/s) \ Dir (°N)	35 - 45	45 - 55	55 - 65	65 - 75	75 - 85	85 - 95	95 - 105	105 - 115	115 - 125	125 - 135	Total (%)
0 - 2	1.95	3.49	3.23	3.08	3.12	3.14	3.23	3.25	3.09	2.85	30.44
2 - 4	6.15	8.25	8.29	9.29	9.38	9.93	9.41	8.8	8.28	7.15	84.92
4 - 6	4.28	6.24	8.39	10.86	11.99	11.18	8.82	6.58	5.21	3.45	77.01
6 - 8	1.69	3.82	6.35	10.57	10.93	8.51	5.01	2.38	1.55	0.75	51.54
8 - 10	0.71	1.41	4.13	8.82	9.7	5.88	2.02	0.74	0.44	0.43	34.28
10 - 12	0.19	0.77	2.74	6.95	7.34	2.89	0.57	0.32	0.15	0.1	22.02
12 - 14	0.06	0.34	1.75	5.64	4.84	1.25	0.18	0.04	0.05	0.04	14.2
14 - 16	0.01	0.11	1.03	3.87	2.19	0.33	0.11	0.04	0.01	0	7.71
16 - 18	0.03	0.16	0.67	1.88	1.09	0.14	0.04	0	0	0	4.01
18 - 20	0	0.01	0.18	0.84	0.34	0.03	0.01	0	0	0	1.41
20 - 22	0	0	0.14	0.32	0.04	0.01	0	0	0	0	0.51
22 - 24	0	0	0.01	0.13	0.01	0	0	0	0	0	0.15
>=24	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0.01
Total	15.07	24.6	36.93	62.24	60.97	43.29	29.4	22.13	18.79	14.77	328.19

Tableau 3-6 : Répartition vitesse/direction du vent (%) - Secteur Est

⇒ L'incidence principale des forts vents d'Est est plutôt 70°N

La rose des tempêtes est présentée ci-dessous, pour l'ensemble des secteurs et pour les vents au-delà de 16m/s :

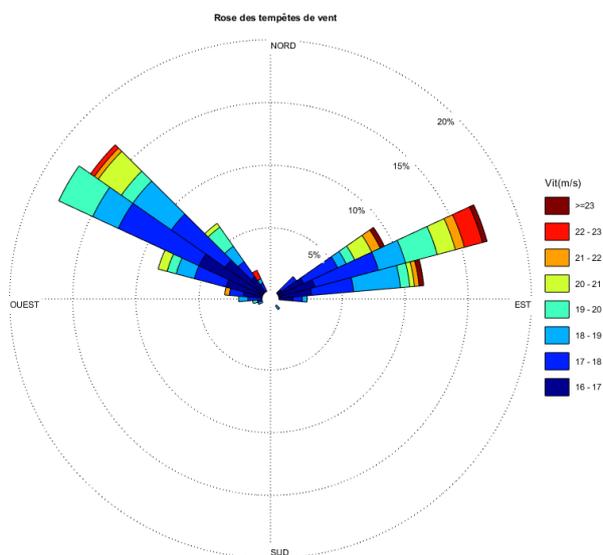


Figure 3-9 : Rose des tempêtes – Point Est

L'analyse statistique de ces tempêtes a été réalisée pour les deux secteurs directionnels prédominants afin d'évaluer les caractéristiques des vents extrêmes. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après.

Secteurs	Périodes de retour	1 an	5 ans	10 ans	50 ans	100 ans
ONO	Vitesse	20.5 m/s	23 m/s	24 m/s	26 m/s	27 m/s
	Direction	310°N				
ENE	Vitesse	19.5 m/s	22.5 m/s	24 m/s	26.5 m/s	27.5 m/s
	Direction	70°N				

Tableau 3-7 : Caractéristiques des vents extrêmes – Point Est

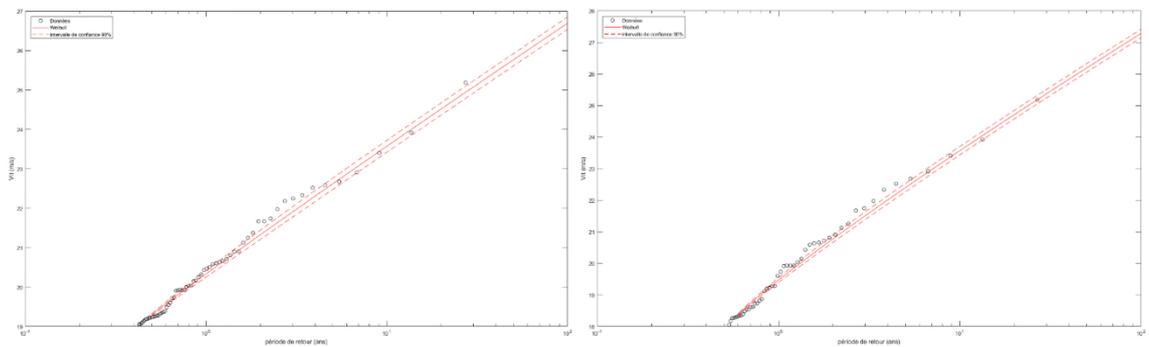


Figure 3-10 : Lois d'interpolation – Secteurs NO et E (Weibull) – Point Est

c. Vents extrêmes retenus

Les valeurs retenues pour le projet et applicables à l'ensemble du modèle (courantologie) sont les valeurs les plus fortes obtenues entre les 2 points de données. Ce sont celles du point Est qui sont les plus dimensionnantes pour les 2 secteurs d'incidence et que l'on réprécise ci-dessous :

Secteurs	Périodes de retour	1 an	10 ans	50 ans
ONO	Vitesse	20.5 m/s	24 m/s	26 m/s
	Direction	310°N		
ENE	Vitesse	19.5 m/s	24 m/s	26.5 m/s
	Direction	75°N		

Tableau 3-8 : Caractéristiques des vents extrêmes de projet

3.3.3. Niveaux d'eau

3.3.3.1. Niveau moyen

Le niveau moyen (NM) est à +0,47 m CM, soit +0,16 m NGF.

3.3.3.2. Surcotes

Le niveau de la mer varie autour de ce niveau moyen en fonction de différents facteurs. Ceux qui peuvent jouer un rôle sur le niveau d'eau dans la zone étudiée sont :

- La **marée astronomique** : elle est de type semi-diurne (courbe de marée sinusoïdale) et son amplitude est très faible en Méditerranée.

Les valeurs relatives à la marée sont (SHOM 2017 [2]) :

Marée	PHMA	NM	Zéro NGF (IGN 1969)	PBMA	Zéro CM
(m CM)	+ 0,70	+ 0,47	+ 0,31	+ 0,19	0
(m NGF)	+ 0,39	+ 0,16	0	- 0,12	- 0,31

Tableau 3-9 : Marée SHOM

Ce sont les niveaux bas qui seront utilisés dans la détermination des niveaux de projet : plus le niveau d'eau est faible, plus les vitesses orbitales au fond sont importantes tant que la houle ne déferle pas.

- La **surcote météorologique** : elle est liée aux pressions atmosphériques (surcote barométrique) et aux vents.

En particulier, les conditions d'Ouest/Nord-Ouest sont généralement des conditions de Mistral donc associées à des hautes pressions et par conséquent à une décote. A celle-ci peut s'ajouter une décote locale due au vent qui pousse les masses d'eau au large de la côte.

Les conditions d'Est et de Sud sont plutôt associées à des dépressions, donc à une surcote barométrique, à laquelle s'ajoute la surcote due au vent lorsqu'il y en a.

En raison de l'objectif de l'étude qui est de déterminer les vitesses au fond (un niveau bas est plus pénalisant qu'un niveau haut), et des surcotes qui ne sont pas nécessairement en corrélation avec la houle, il est proposé de ne pas ajouter de surcote météorologique aux niveaux d'eau de projet.

3.3.3.3. Surélévation lente du niveau des mers

Pour la surélévation du niveau moyen des mers due au changement climatique, la circulaire du 27/07/2011 (Circulaire relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux, Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement) fournit les valeurs suivantes :

- Aléa de référence : 20 cm
- A l'horizon 2100 : 60 cm (hypothèse « pessimiste » de l'ONERC)

En annexe 4 de cette circulaire (recommandations de l'ONERC), les projections d'élévation du niveau moyen de la mer par rapport à 2000 sont :

- Hypothèse optimiste : 10 cm d'ici 2030, 17 cm d'ici 2050, 40 cm d'ici 2100
- Hypothèse pessimiste : 14 cm d'ici 2030, 25 cm d'ici 2050, 60 cm d'ici 2100
- Hypothèse extrême : 22 cm d'ici 2030, 41 cm d'ici 2050, 100 cm d'ici 2100.

Il est proposée de retenir la surcote pessimiste de 25 cm pour l'horizon 2050 pour l'état futur.

Néanmoins, selon le même raisonnement que précédemment, nous préconisons de modéliser des houles sans la surélévation du niveau des mers (état actuel) puisqu'un niveau d'eau limité est plus pénalisant qu'un niveau d'eau élevé.

3.3.3.4. Niveaux de projet

Pour déterminer les niveaux de projet, on associe la marée basse PBMA avec les événements de faible période de retour et le niveau moyen NM avec les autres : on ne peut en effet pas corrélérer ensemble des phénomènes extrêmes de faible probabilité.

On obtient ainsi :

Période de retour	1 an	10 ans	50 ans
Etat actuel	-0,12m NGF (PBMA)	+0,16m NGF (NM)	+0,16m NGF (NM)
Etat futur	+0,13m NGF (PBMA + Surélévation)	+0,41m NGF (NM + Surélévation)	+0,41m NGF (NM + Surélévation)

Tableau 3-10 : Niveaux d'eau de projet

Il est rappelé que l'on vise des niveaux d'eau bas qui sont plus pénalisants pour la stabilité de la conduite au fond => les cas de houle seront réalisés avec le niveau d'eau pour « l'état actuel ».

3.3.4. Houles au large

3.3.4.1. Climat de houle

Les houles au large de Hyères et Porquerolles sont proposées dans le présent paragraphe au travers d'une vérification et d'une analyse détaillée des houles extraites de la base de données IOWAGA.

Une **étude statistique climatologique** des états de mer est ainsi réalisée à partir des états de mer de la base de données publique IOWAGA (The Integrated Ocean Waves for Geophysical and other Applications). Il s'agit d'une base de données développée et mise en ligne par l'Ifremer et servant notamment dans le système de prévision «Prévimer». Elle correspond à un modèle d'états de mer à grand emprise, utilisant pour les forçages météorologiques des données de modèles globaux.

La série temporelle utilisée est celle de début 1990 à fin 2016, soit 27 années de données, pour les deux points précisés en début de chapitre (cf. 3.3.1). Les données disponibles sont la hauteur significative (Hs), la période (Tp) et la direction principale (Dp) avec un pas de temps de 3h.

Comme l'illustre la figure ci-dessous, tous les secteurs d'incidence de houle ne sont pas pertinents par rapport à l'étude du tracé potentiel de la canalisation. En effet, les îles offrent une protection contre les houles provenant du secteur Sud à Est, et la presqu'île contre les houles provenant du secteur Nord.



Figure 3-11 : Secteurs d'incidence sur le site d'étude

3.3.4.3. Traitement statistique

Les données de vagues sous forme spectrale ont été récupérées, ce qui a permis d'effectuer un traitement statistique au large et de caractériser des événements extrêmes.

a. Point Ouest [43°N – 6°E]

La distribution des données, sous forme (Hs/Tp) ou (Hs/Dir), peut être représentée ainsi :

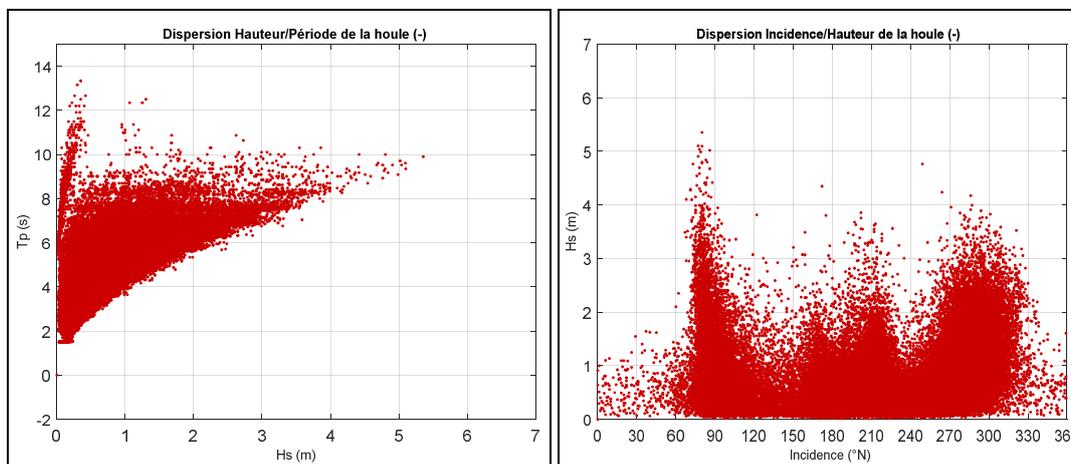


Figure 3-12 : Dispersion (Hs/Tp) et (Hs/Dir) des houles au large de Porquerolles – Point Ouest

Ces graphiques permettent de montrer que la période T_p des fortes houles tend vers une valeur autour de 10s et que les incidences de houle notables se regroupent principalement autour de 80°N, 170°N, 210°N et 290°N.

Les houles dominantes au large peuvent donc être classées en 4 catégories :

- Les houles majoritaires en proportion provenant du secteur Ouest à Ouest-Nord-Ouest (mistral) ;
- Les houles les plus puissantes provenant du secteur Est. Ce sont les houles d'Est tirées du point Est (cf. paragraphe suivant) qui seront utilisées pour les calculs numériques ;
- Les houles secondaires en proportion mais impactant le site provenant du secteur Sud-Ouest ;
- Les houles plus faibles en proportion, mais notables, provenant du secteur Sud. Ces dernières n'atteignent pas la zone d'étude.

Le traitement des données permet notamment d'établir les roses suivantes :

- La rose des houles pour toutes les directions ;
- La rose pour les secteurs d'incidence Ouest et Sud-Ouest : il s'agit des directions considérés comme pouvant impacter directement le site d'étude d'après la configuration du rivage et des îles.

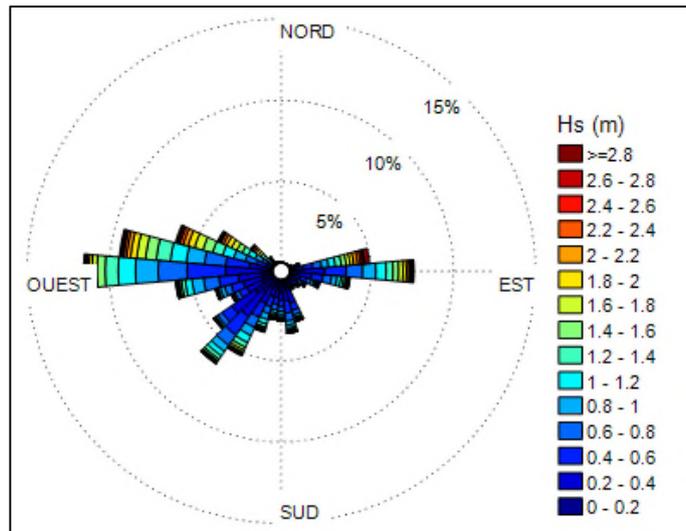


Figure 3-13 : Roses des houles: toutes incidences – Données IOWAGA (point Ouest)

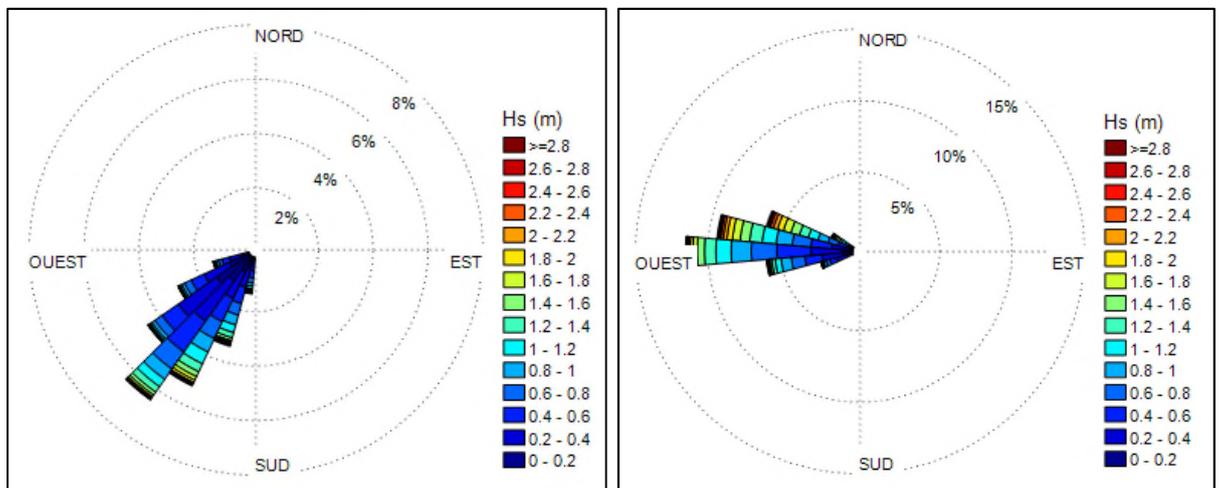


Figure 3-14 : Roses des houles: Secteur SO et secteur O – Données IOWAGA (point Ouest)

b. Point Est [43°N – 6,5°E]

La distribution des données, sous forme (Hs/Tp) ou (Hs/Dir), peut être représentée ainsi :

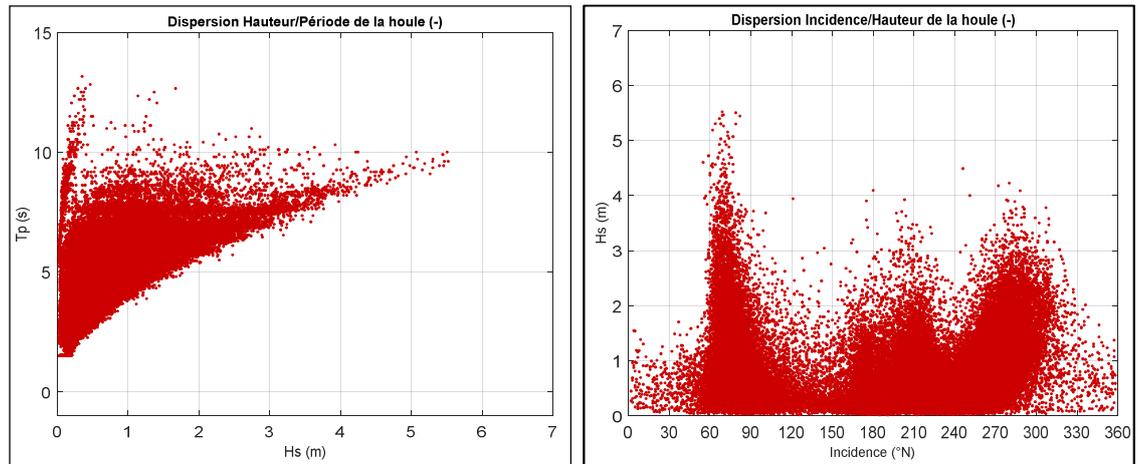


Figure 3-15 : Dispersion (Hs/Tp) et (Hs/Dir) des houles au large de Porquerolles – Point Est

Ces graphiques permettent des tendances comparables à celles du point Ouest avec la période Tp des fortes houles qui tend vers une valeur autour de 10s et les incidences de houle notables qui se regroupent principalement autour de 70°N, 210°N et 280°N.

Les houles dominantes au large peuvent donc être classées en 3 catégories :

- Les houles les plus puissantes provenant du secteur Est. Ce seront ces dernières qui seront analysées et modélisées pour la propagation ;
- Les houles majoritaires en proportion, moins puissantes, provenant du secteur Ouest ;
- Les houles secondaires en proportion provenant du secteur Sud-Ouest ;
- Les autres secteurs sont quasi inexistantes.

Le traitement des données permet d'établir les roses suivantes :

- La rose des houles pour toutes les directions ;
- La rose spécifique au secteur Est-Nord-Est qui peut impacter directement le site d'étude d'après la configuration du rivage et des îles.

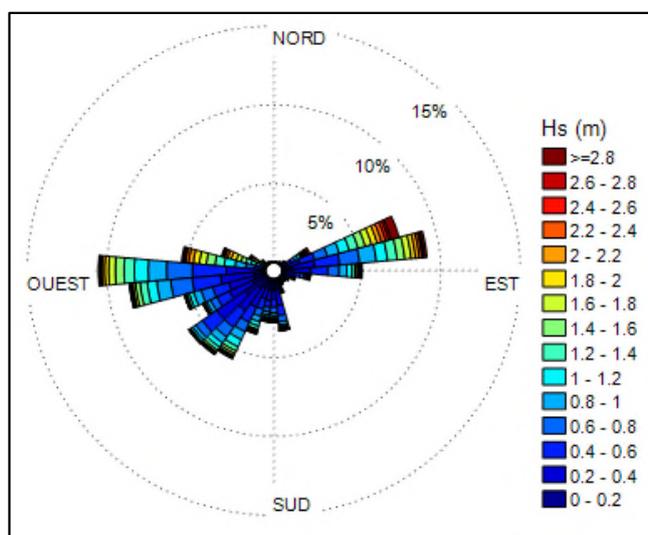


Figure 3-16 : Roses des houles: toutes incidences – Données IOWAGA (point Est)

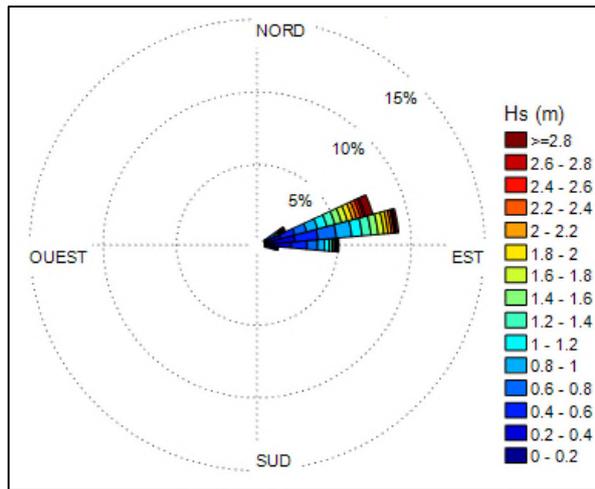


Figure 3-17 : Roses des houles: Secteur Est-Nord-Est – Données IOWAGA (point Est)

3.3.4.4. Houles extrêmes

a. Point Ouest [43°N – 6°E]

Sur les secteurs de houle pouvant atteindre directement le site, nous avons extrait les conditions de houle les plus fortes en préparation de l’analyse statistique des houles extrêmes et pour permettre de visualiser les roses des tempêtes.

Ces roses sont présentées ci-dessous sur les secteurs utiles à l’étude :

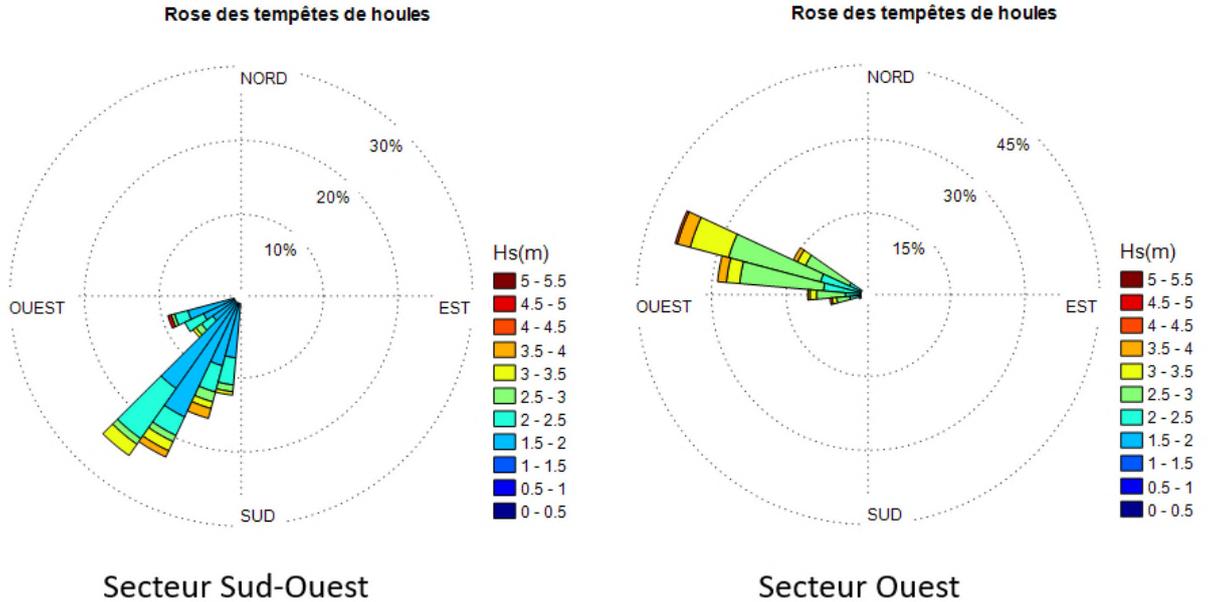


Figure 3-18 : Roses des tempêtes – Secteurs SO [190°-250°N] et O [250°-300°N]

Le découpage des secteurs directionnels des tempêtes représenté ci-dessus est le découpage que nous avons choisi pour déterminer les houles extrêmes.

L'analyse statistique pour estimer les houles extrêmes est donc effectuée pour les secteurs d'incidence suivant :

- Secteur Sud-Ouest (190°-250°N) :

Les houles sont regroupées en 4 incidences représentatives des extrêmes : 200°N, 215°N, 225°N et 245°N.

Le tableau ci-dessous, contenant la corrélation entre la hauteur et la direction de la houle pour les tempêtes, permet d'identifier ces incidences :

Nombre total de données initiales: 75965

Hs (m) \ Dir (°N)	190 - 195	195 - 200	200 - 205	205 - 210	210 - 215	215 - 220	220 - 225	225 - 230	230 - 235	235 - 240	240 - 245	245 - 250	Total
0 - 0.5	5.66	6.48	7.49	10.08	11.29	15.1	19.75	24.64	14.81	10.47	10.61	11.18	147.55‰
0.5 - 1	3.45	4.11	6.37	7.02	8.77	10.02	8.75	5.07	2.91	2.72	3.07	4.33	66.58‰
1 - 1.5	1.33	2.24	2.88	4	4.8	4.49	2.55	1.08	0.5	0.39	0.61	0.76	25.64‰
1.5 - 2	0.55	0.68	0.72	1.54	1.74	1.42	0.65	0.24	0.08	0.17	0.08	0.33	8.20‰
2 - 2.5	0.24	0.3	0.32	0.33	0.47	0.47	0.26	0.08	0.03	0.01	0.12	0.09	2.72‰
2.5 - 3	0.11	0.05	0.14	0.17	0.24	0.07	0.05	0.03	0.03	0	0	0.03	0.91‰
3 - 3.5	0.01	0.08	0.05	0.09	0.08	0.07	0.03	0	0.01	0.01	0	0	0.43‰
3.5 - 4	0	0.03	0.05	0	0.04	0	0	0.01	0	0	0	0	0.13‰
4 - 4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00‰
4.5 - 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01‰
5 - 5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00‰
>=5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00‰
Total	11.35‰	13.97‰	18.03‰	23.23‰	27.43‰	31.63‰	32.04‰	31.15‰	18.36‰	13.78‰	14.48‰	16.73‰	252.20‰

200°N
215°N
225°N
245°N

Une analyse de la sensibilité de la houle sera réalisée : ces 4 directions seront modélisées pour la houle annuelle, et celle qui est la plus pénalisante pour le projet sera conservée pour les conditions plus importantes 10 ans et 50 ans.

- Secteur Ouest (250°-300°N) :

Les houles sont regroupées en 3 incidences représentatives des extrêmes : 260°N, 275°N, et 290°N.

Le tableau ci-dessous, contenant la corrélation entre la hauteur et la direction de la houle pour les tempêtes, permet d'identifier ces incidences :

Nombre total de données initiales: 75965

Hs (m) \ Dir (°N)	250 - 255	255 - 260	260 - 265	265 - 270	270 - 275	275 - 280	280 - 285	285 - 290	290 - 295	295 - 300	Total
0 - 0.5	11.95	12.07	14.12	19.21	21.27	15.99	8.23	5.52	2.99	2.33	113.68‰
0.5 - 1	5.52	7.94	12.87	18.32	23.14	20.09	13.35	10.56	7.77	6.44	125.99‰
1 - 1.5	1.21	2.29	4.33	8.11	12.03	11.94	10.11	10.03	6.88	6.07	73.01‰
1.5 - 2	0.21	0.38	1.11	2.12	4.24	6.19	5.79	6.7	6.25	4.27	37.25‰
2 - 2.5	0.07	0.21	0.26	0.75	1.3	2.44	2.4	2.62	3.04	2.61	15.69‰
2.5 - 3	0.03	0.05	0.14	0.26	0.29	0.67	0.79	0.58	0.84	0.83	4.49‰
3 - 3.5	0.01	0	0.04	0.04	0.08	0.14	0.24	0.25	0.33	0.18	1.32‰
3.5 - 4	0	0	0	0.01	0.01	0.03	0.11	0.05	0.08	0.05	0.34‰
4 - 4.5	0	0	0.01	0	0	0	0	0.01	0	0	0.03‰
4.5 - 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00‰
5 - 5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00‰
>=5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00‰
Total	19.00‰	22.94‰	32.90‰	48.83‰	62.37‰	57.49‰	41.01‰	36.32‰	28.18‰	22.77‰	371.80‰

260°N
275°N
290°N

Une analyse de la sensibilité de la houle sera réalisée pour ces 3 directions selon la même méthodologie que pour le secteur Sud-Ouest.

- Les autres secteurs (0°-190°N) et (300°-360°N) n'impactent pas le site depuis ce point d'analyse.

Pour chaque secteur, les conditions extrêmes sont établies en appliquant la méthode POT (Peak Over Threshold), au-dessus d'un seuil choisi en fonction des comportements des lois d'ajustement extrêmes, sur les périodes de retour étudiées.

Dans cette méthode, une valeur de chaque événement dépassant le seuil fixé (la valeur maximale de l'événement) est conservée afin de garantir l'indépendance entre les échantillons et diverses lois extrêmes traditionnelles (Weibull, GPD, Gamma, Exponentielle, etc..) sont ajustées sur ces distributions. La loi qui s'ajuste le mieux est sélectionnée et les valeurs extrêmes attendues sur différentes périodes de retour en sont extrapolées.

Pour chaque secteur étudié, les graphiques suivants présentent la loi d'extrapolation retenue et illustrent l'analyse statistique des conditions de houle.

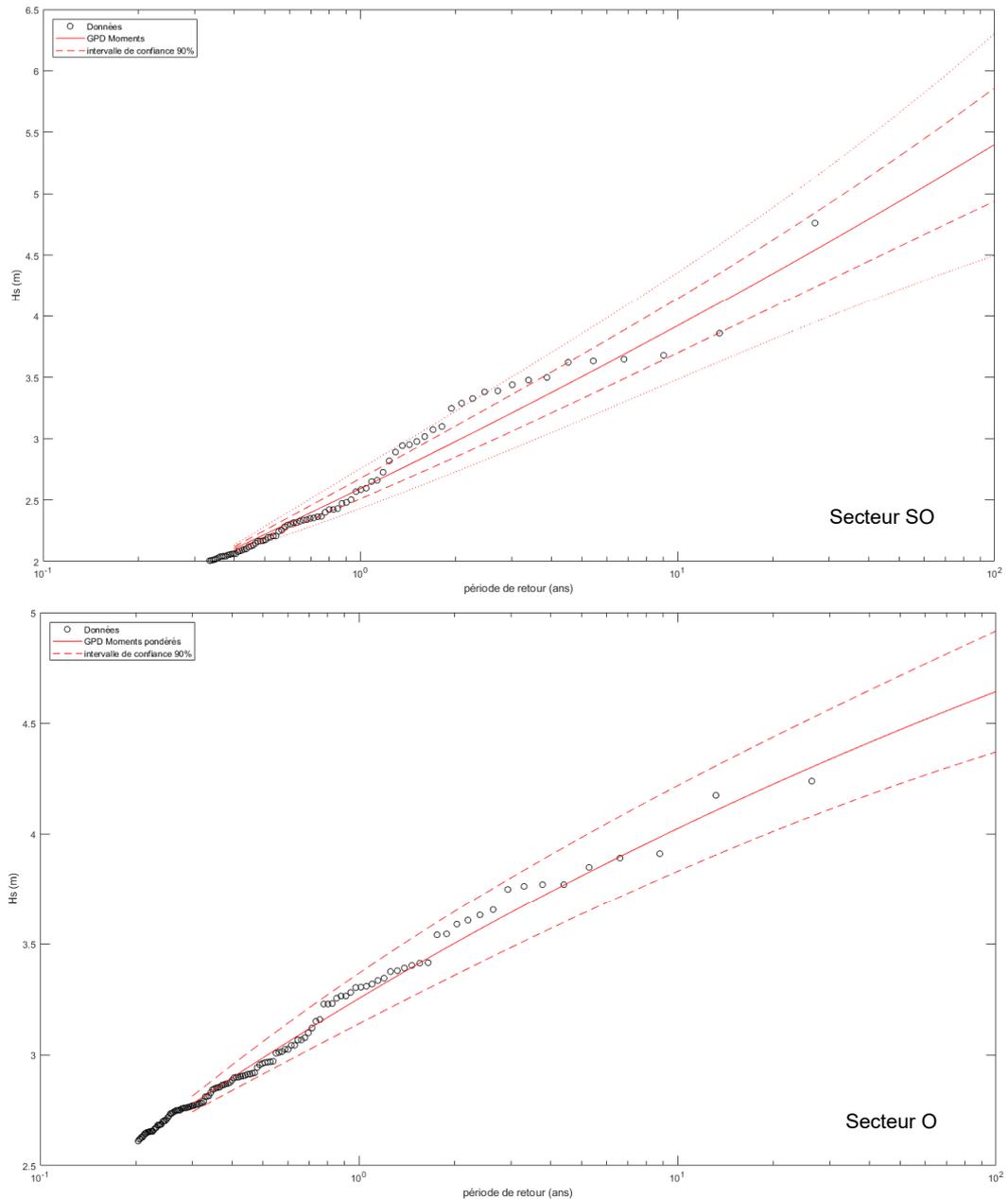


Figure 3-19 : Analyse statistique des hauteurs de houle des secteurs SO et O – Lois d'extrémum

Pour chaque secteur directionnel, les valeurs de la période T_p à associer avec les hauteurs extrêmes tirées de l'analyse statistique sont estimées à partir des courbes de tendance (fonction linéaire ou polynomiale) des nuages de points H_s/T_p puis légèrement arrondies.

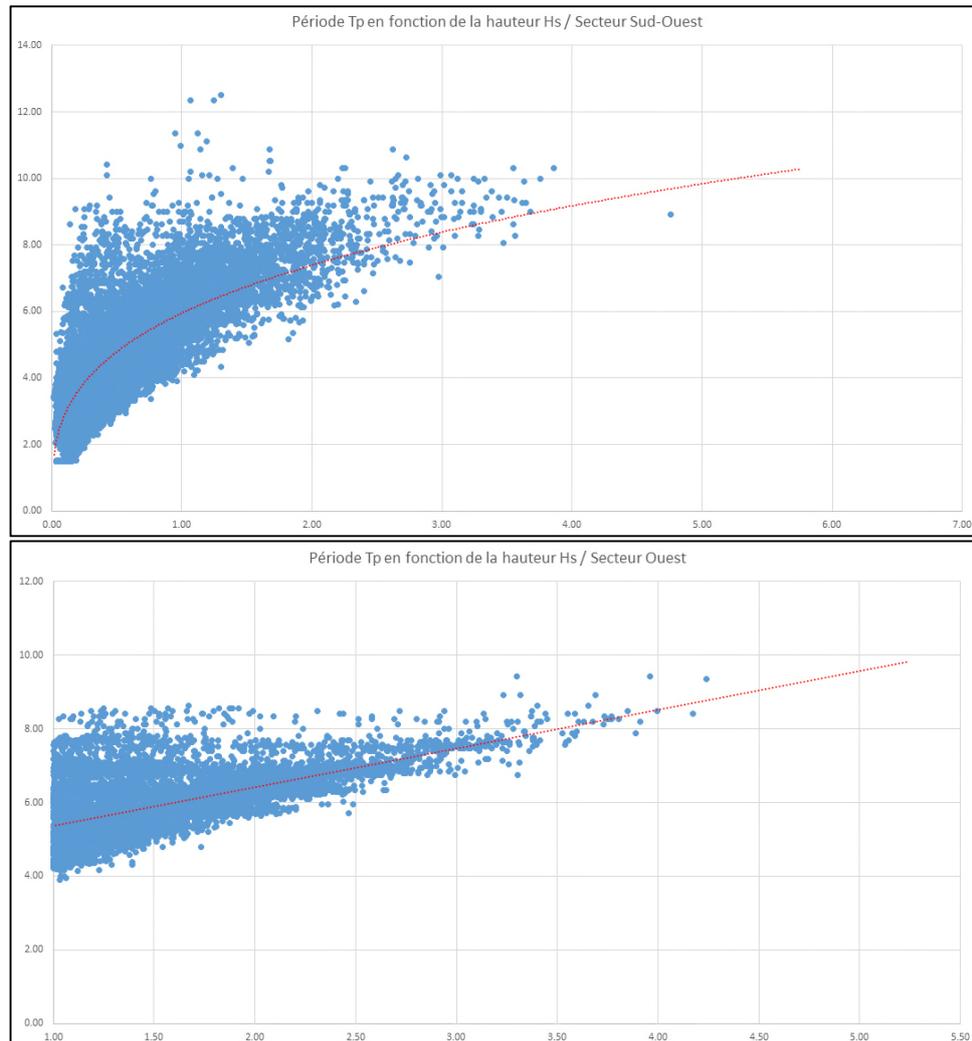


Figure 3-20 : Corrélation H_s/T_p pour les secteurs Sud-Ouest et Ouest

b. Point Est [43°N – 6,5°E]

Sur le secteur de houle ENE retenu pouvant atteindre directement le site, nous avons extrait les conditions de houle les plus fortes en préparation de l'analyse statistique des houles extrêmes et pour permettre de visualiser la rose des tempêtes.

Cette rose est présentée ci-dessous.

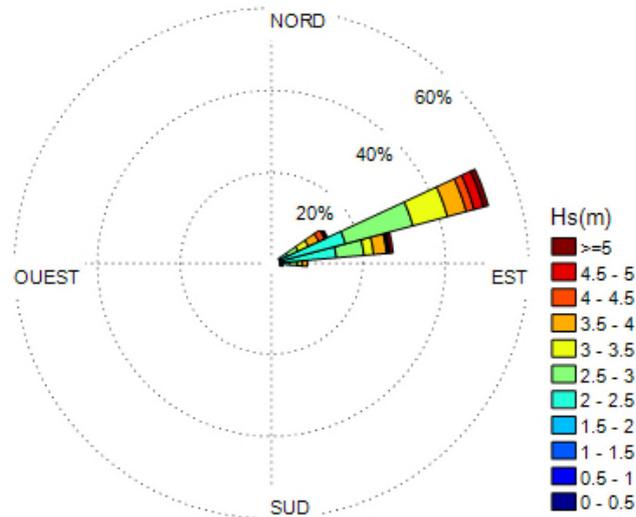


Figure 3-21 : Roses des tempêtes – Secteurs ENE [60°-100°N]

L'analyse statistique pour estimer les houles extrêmes est effectuée selon la répartition suivante :

- Secteur Est-Nord-Est (60°-100°N) :
Les houles sont regroupées en 2 incidences représentatives des extrêmes : 65°N et 75°N. On observe que les houles extrêmes se concentrent autour de ces directions et ne sont pas ou très peu présentes pour les incidences entre 80°N et 100°N

Le tableau ci-dessous, contenant la corrélation entre la hauteur et la direction de la houle pour les tempêtes, permet d'identifier ces incidences :

Nombre total de données initiales: 75965									
Hs (m) \ Dir (°N)	60 - 65	65 - 70	70 - 75	75 - 80	80 - 85	85 - 90	90 - 95	95 - 100	Total
0 - 0.5	3.59	6.11	9.04	13.44	15.02	15.89	10.24	6.71	80.05‰
0.5 - 1	3.4	7.42	11.52	14.98	16.05	11.6	6.7	3.41	75.07‰
1 - 1.5	1.88	5.42	8.28	9.16	7.4	4.65	2.17	1.12	40.08‰
1.5 - 2	1.15	3.48	5.71	5.9	4	1.62	0.9	0.49	23.23‰
2 - 2.5	0.82	2.72	3.76	3.08	1.86	0.68	0.39	0.21	13.53‰
2.5 - 3	0.58	1.61	1.99	1.45	0.46	0.34	0.08	0.07	6.57‰
3 - 3.5	0.43	0.92	0.97	0.58	0.25	0.05	0.05	0.04	3.30‰
3.5 - 4	0.11	0.62	0.62	0.24	0.16	0.05	0.03	0	1.82‰
4 - 4.5	0.07	0.22	0.26	0.04	0.01	0	0	0	0.61‰
4.5 - 5	0.05	0.08	0.11	0.04	0	0	0	0	0.28‰
5 - 5.5	0.03	0.05	0.07	0.03	0.01	0	0	0	0.18‰
>=5.5	0	0.01	0	0.01	0	0	0	0	0.03‰
Total	12.10‰	28.67‰	42.34‰	48.94‰	45.22‰	34.88‰	20.56‰	12.05‰	244.76‰

65°N

75°N

Une analyse de la sensibilité de la houle sera réalisée pour ces 2 directions selon la même méthodologie que pour les secteurs Sud-Ouest et Ouest.

- Les autres secteurs (0°-60°N) et (100°-360°N) n'impactent pas le site depuis ce point d'analyse.

Le graphique suivant présente la loi d'extrapolation retenue pour le secteur ENE et illustre l'analyse statistique des conditions de houle.

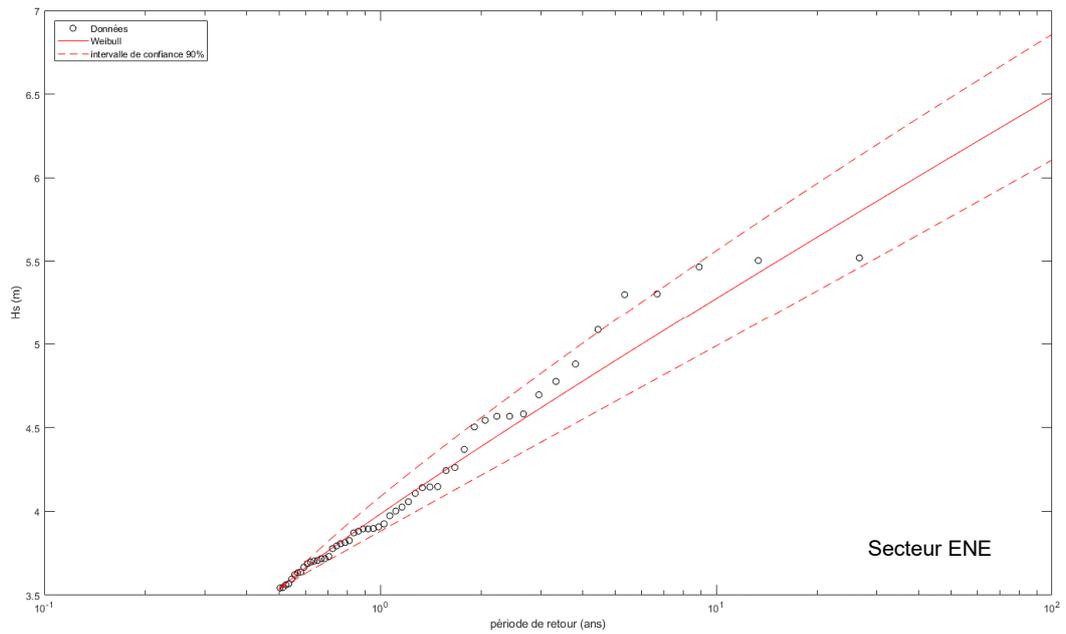


Figure 3-22 : Analyse statistique des hauteurs de houle du secteur ENE – Lois d'extremum

Les valeurs de la période T_p à associer avec les hauteurs extrêmes tirées de l'analyse statistique sont estimées à partir des courbes de tendance (fonction linéaire ou polynomiale) des nuages de points H_s/T_p puis légèrement arrondies.

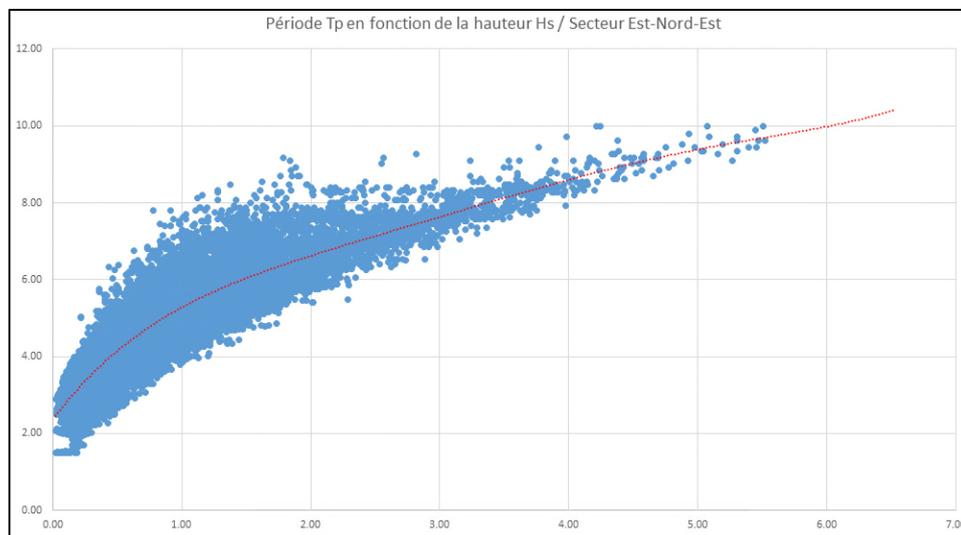


Figure 3-23 : Corrélation H_s/T_p pour le secteur Est-Nord-Est

c. Houles au large

Les caractéristiques des houles au large qui en ont été déduites sont ainsi les suivantes :

Période de retour	Incidence des houles au large					
	Est-Nord-Est (60-100°N)		Sud-Ouest (190-250°N)		Ouest (250-300°N)	
	Hsmoyen / Hsup90% (m)	Tp (s)	Hsmoyen / Hsup90% (m)	Tp (s)	Hsmoyen / Hsup90% (m)	Tp (s)
1 an	3,98 / 4,09	8,6	2,59 / 2,73	8,0	3,25 / 3,37	7,8
5 ans	4,90 / 5,14	9,4	3,51 / 3,80	8,8	3,81 / 3,98	8,3
10 ans	5,28 / 5,56	9,7	3,92 / 4,29	9,1	4,02 / 4,22	8,5
20 ans	5,64 / 5,97	10,0	4,34 / 4,80	9,4	4,22 / 4,44	8,7
50 ans	6,12 / 6,48	10,4	4,94 / 5,54	9,8	4,47 / 4,72	9,0
100 ans	6,48 / 6,86	10,8	5,40 / 6,16	10,1	4,64 / 4,92	9,1

Tableau 3-11 : Houles extrêmes au large (IOWAGA)

Pour les études de dimensionnement des ouvrages de protection, nous recommandons de considérer les valeurs moyennes pour chaque période de retour, et non pas les maximums de l'intervalle de confiance 90%.

3.3.5. Clapots levés par le vent

Etant donné que le secteur d'étude entre la presqu'île de Giens et Porquerolles est ouvert aux houles du large, les phénomènes de clapots dû au vent sont couverts par les houles et sont négligeables dans le cadre des études.

4. PROPAGATION DE LA HOULE DU LARGE (TF 3)

La modélisation de la propagation de la houle réelle (irrégulière) du large vers la côte sera effectuée avec le logiciel TOMAWAC de la chaîne de modélisation TELEMAC-MASCARET (www.opentelemac.org).

Ce logiciel modélise la propagation d'une houle multidirectionnelle en prenant notamment en compte les phénomènes de :

- Réfraction sur les fonds
- Gonflement par les fonds
- Déferlement de la houle.

4.1. Caractéristiques du modèle de propagation

Les principaux éléments constitutifs du modèle numérique de propagation sont décrits ci-après.

Les éléments caractéristiques du modèle sont :

- L'emprise du modèle :

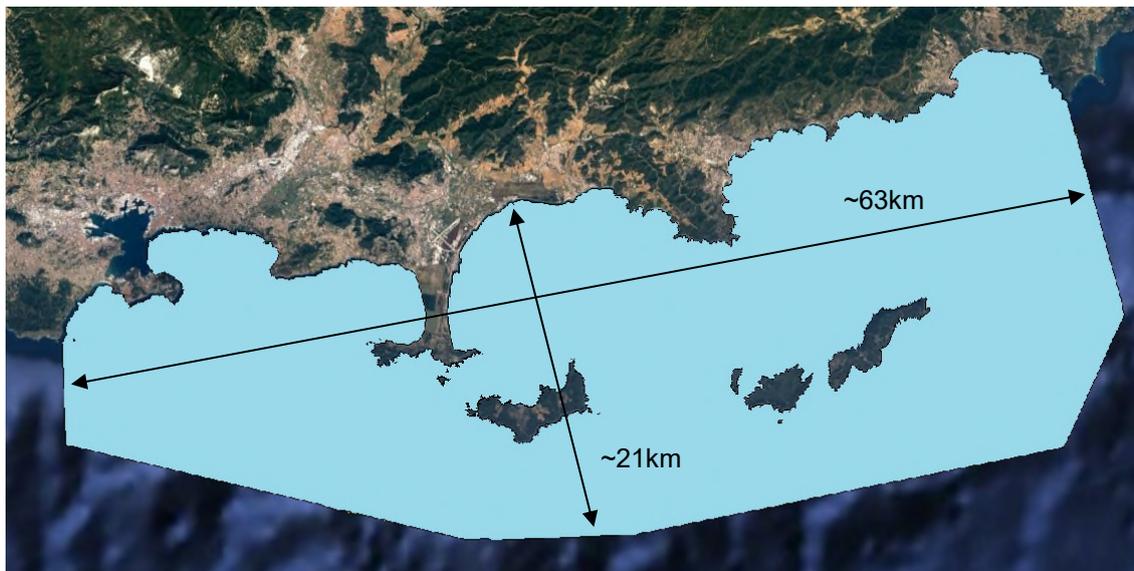


Figure 4-1 : Emprise du modèle de propagation

Il s'agit d'un modèle de très grandes dimensions dont les limites ont été choisies pour les raisons suivantes :

- Nécessité d'étendre le modèle jusqu'au niveau des **grandes profondeurs d'eau** afin de pouvoir générer une houle du large non influencée par les fonds marins ;
- Intégration des **îles d'Hyères** qui ont un impact sur la houle et le courant ;
- Extension du modèle aussi bien à l'**Est** qu'à l'**Ouest** afin de pouvoir simuler des conditions de houle et de courant provenant des deux secteurs d'incidence ;
- Modèle de grande taille pour pouvoir établir une **courantologie globale** stable et liée au courant général ligurien.

Des modèles de cette dimension afin d'analyser des phénomènes hydrodynamiques locaux sont peu fréquents.

- La bathymétrie des fonds marins :

Pour rappel, les données bathymétriques utilisées sont indiquées au paragraphe 3.2.

Les figures présentées ci-dessous correspondent ainsi à la bathymétrie modélisée à partir de cette base de données :

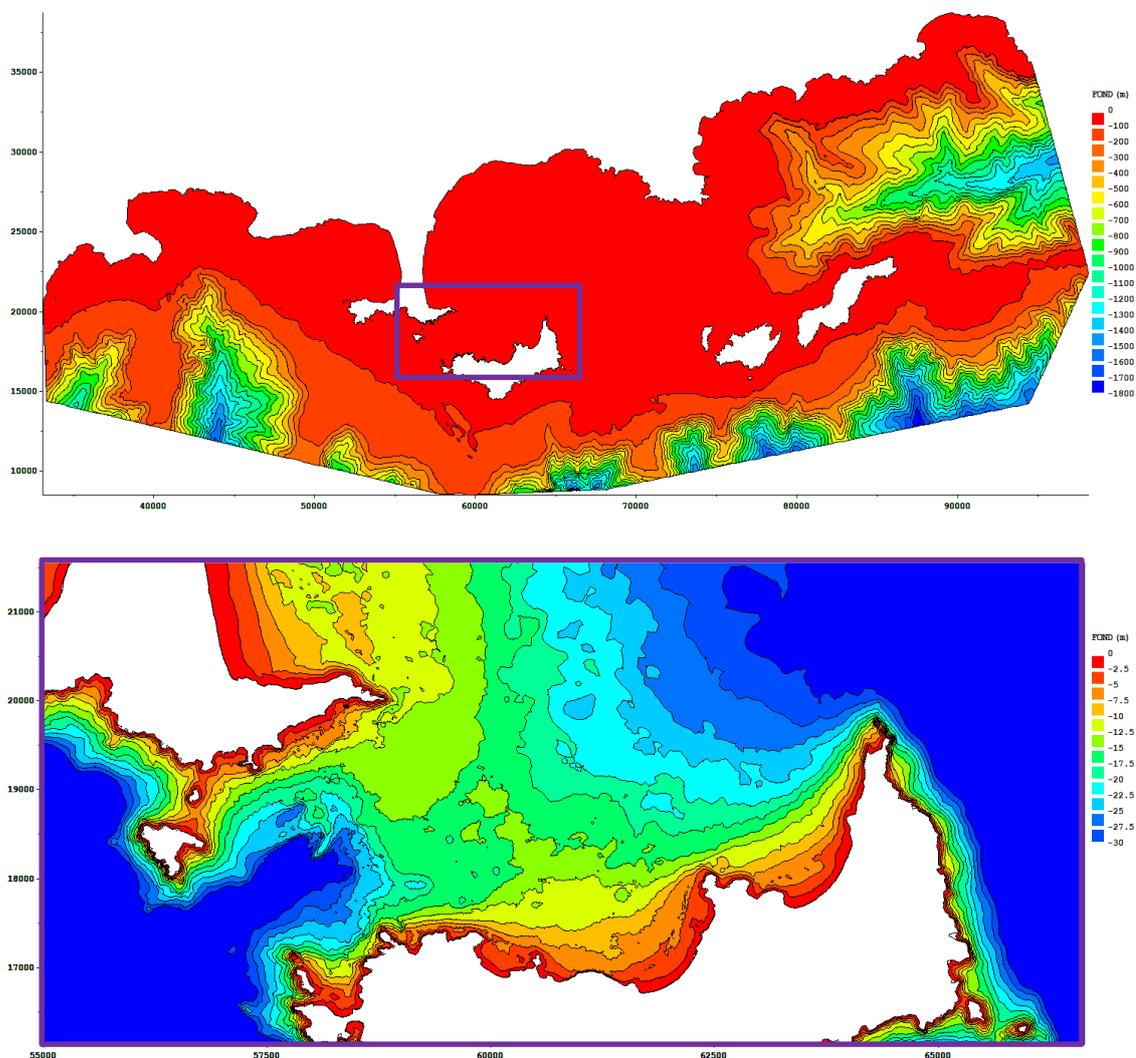


Figure 4-2 : Bathymétrie modélisée : Vue globale et secteur étudié

Le maillage détaillé (cf. page suivante) entre Giens et Porquerolles permet de bien représenter la bathymétrie et donc de rester précis dans les résultats fournis : la transformation de la houle et du courant est bien corrélée avec l'évolution des fonds.

- Maillage :

La construction du maillage du modèle a été établie selon le principe suivant :

- Maillage « grossier » dans les fonds importants où les calculs de propagation ne nécessitent pas une forte précision : mailles de taille unitaire de 200m,
- Raffinage du maillage à proximité du littoral et des îles afin de bien représenter le trait de côte et permettre une bonne prise en compte de l'évolution des fonds : mailles de taille unitaire de 30m,
- Raffinage supplémentaire dans la zone d'étude dans les limites de capacité de calcul : mailles de taille unitaire de 25m.

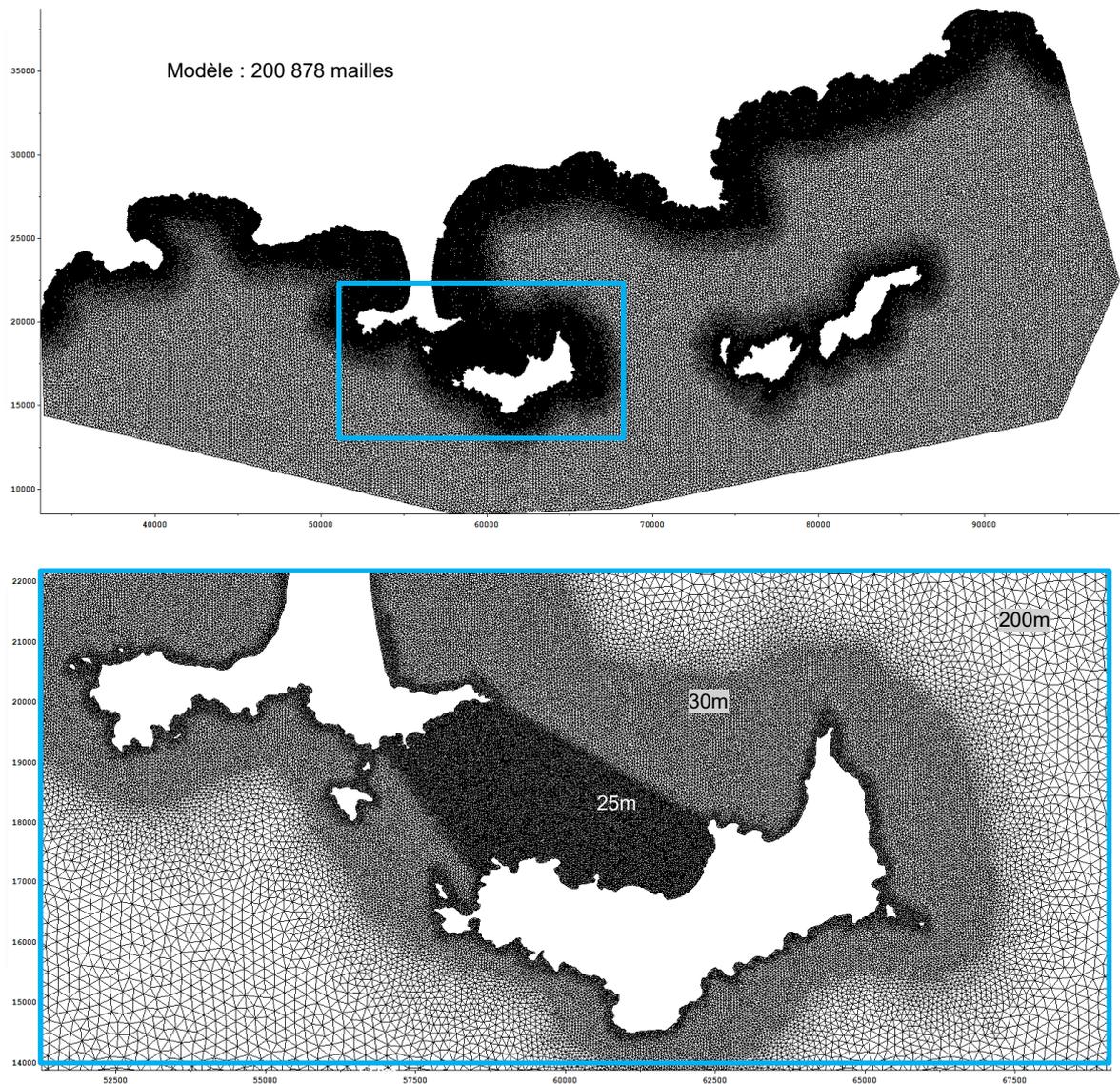


Figure 4-3 : Maillage numérique

4.2. Cas de calculs

4.2.1. Conditions extrêmes

La corrélation entre les besoins du projet, les niveaux d'eau indiqués ci-avant et les conditions de houle au large déterminées grâce à l'analyse statistique amène à proposer le tableau de cas à modéliser suivant :

Période de retour	Conditions au large (Hs / Tp / Niv. NGF) par secteur d'incidence		
	Est-Nord-Est	Sud-Ouest	Ouest
1 an	Cas 1 et 2 65°N – 75°N 4,0m / 8,6s / -0,13m	Cas 3, 4, 5 et 6 200°N – 215°N – 225°N – 245°N 2,6m / 8,0s / -0,13m	Cas 7, 8 et 9 260°N – 275°N – 290°N 3,3m / 7,8s / -0,13m
10 ans	Cas 10 Direction 75°N (*) 5,3m / 9,7s / +0,16m	Cas 11 Direction 225°N (*) 3,9m / 9,1s / +0,16m	Cas 12 Direction 260°N (*) 4,0m / 8,5s / +0,16m
50 ans	Cas 13 Direction 75°N (*) 6,1m / 10,4s / +0,16m	Cas 14 Direction 225°N (*) 4,9m / 9,8s / +0,16m	Cas 15 Direction 260°N (*) 4,5m / 9,0s / +0,16m

Tableau 4-1 : Propagation - Conditions de houles extrêmes

(*) Sensibilité directionnelle

Pour chaque secteur d'incidence, plusieurs directions de houle pertinentes ont été définies à partir des données et de l'analyse statistique. Ces directions sont modélisées pour les conditions annuelles et les résultats obtenus permettent de déterminer quelle est la condition la plus pénalisante par secteur d'incidence. Cette direction pénalisante, indiquée dans le tableau, est celle qui est retenue pour la réalisation des conditions décennales et cinquanteennes.

La méthodologie suivie est donc la suivante :

- Conditions 1 an : modélisation des incidences couvrant ce secteur (selon analyse statistique),
- Analyse et comparaison des résultats : choix de la direction la plus pénalisante,
- Conditions > 1 an : modélisation de la direction précédemment choisie.

Au total, 15 cas de conditions extrêmes sont modélisés.

4.3. Résultats

Les résultats de la modélisation numérique de la propagation seront présentés sous deux formes :

- **Des graphiques** indiquant la hauteur et la direction de la houle pour l'ensemble du modèle, ainsi qu'un zoom au niveau du secteur d'étude.
Les figures ci-dessous sont des exemples illustratifs tirés des cas simulés pour ce projet, l'intégralité des résultats sont présentés dans l'annexe 1.

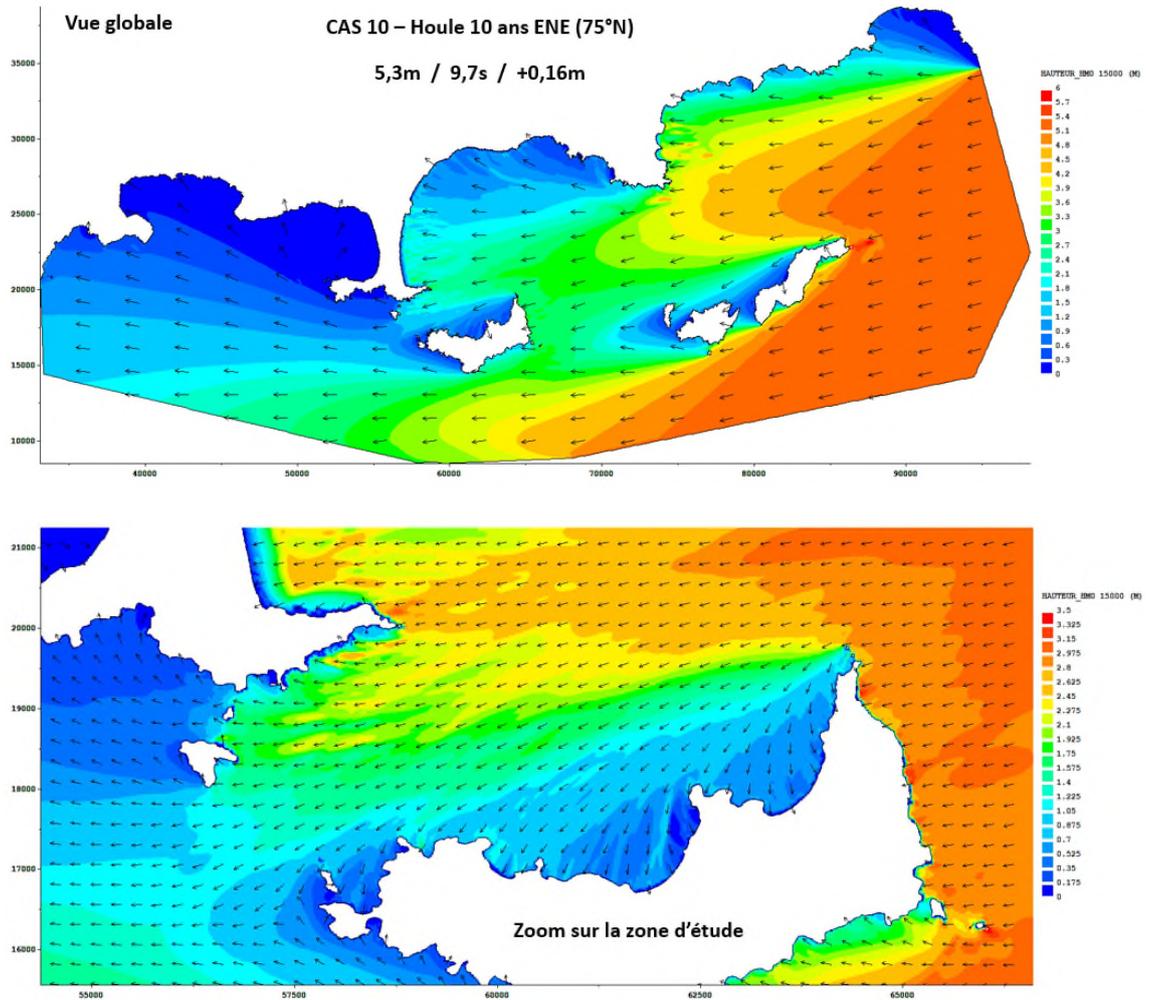


Figure 4-4 : Propagation de la houle atteignant le futur linéaire de pose de la canalisation – Exemples de résultats numériques – Houle 10 ans ENE

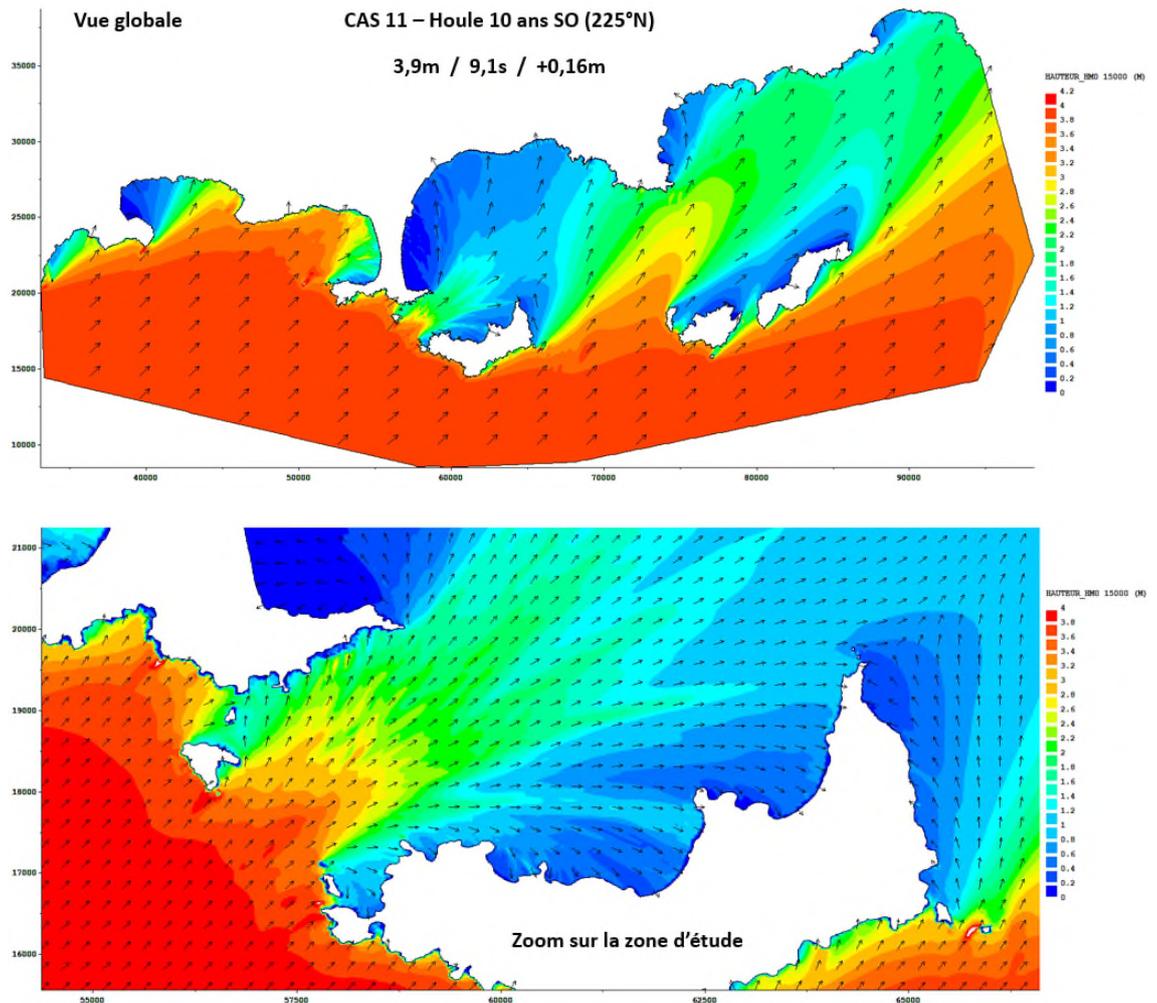


Figure 4-5 : Propagation de la houle atteignant le futur linéaire de pose de la canalisation – Exemples de résultats numériques – Houle 10 ans SO

- **Un tableau** indiquant les résultats de la propagation de la houle est fourni pour chaque cas modélisés, indiquant :
 - La dénomination et la profondeur en chaque point,
 - La hauteur et la direction de la houle en chaque point d'extraction des résultats,
 - Le calcul de la vitesse orbitale (cf. chapitre suivant) en conséquence.

- ⇒ Le tableau synthétisant l'ensemble des résultats de la propagation de la houle avec les valeurs obtenues en chaque point du tracé de la canalisation est fourni en page 37 (tableau 5-2).
- ⇒ Le tableau présentant le calcul de la vitesse orbitale en chaque point du tracé et pour chaque cas modélisé est fourni en page 38 (tableau 5-3).

5. VITESSES ORBITALES (TF 4)

5.1. Points d'extraction des résultats

Les résultats de la propagation de la houle sont extraits en 12 points et la vitesse orbitale de la houle est déduite des valeurs obtenues. OCEANIDE a proposé un positionnement de ces 12 points sur la base de la bathymétrie et des résultats des calculs de propagation :

- Les fonds sont davantage impactés par la houle lorsque la profondeur d'eau est réduite (hors déferlement) : il est donc pertinent de se concentrer sur les faibles fonds, tout en conservant une partie des points pour analyser ce qui se passe pour le reste du tracé ;
- La moitié du tracé côté Giens est davantage impactée par la houle que la moitié côté Porquerolles : la répartition des points est adaptée pour être un peu plus dense dans ce secteur.

A l'issue de cette analyse préliminaire, le Maître d'Ouvrage a transmis un positionnement des points d'analyse selon le tracé envisagé pour la pose de la canalisation. La figure suivante, réalisée par OCEANIDE sur la base des données fournies, illustre l'implantation de ces points :

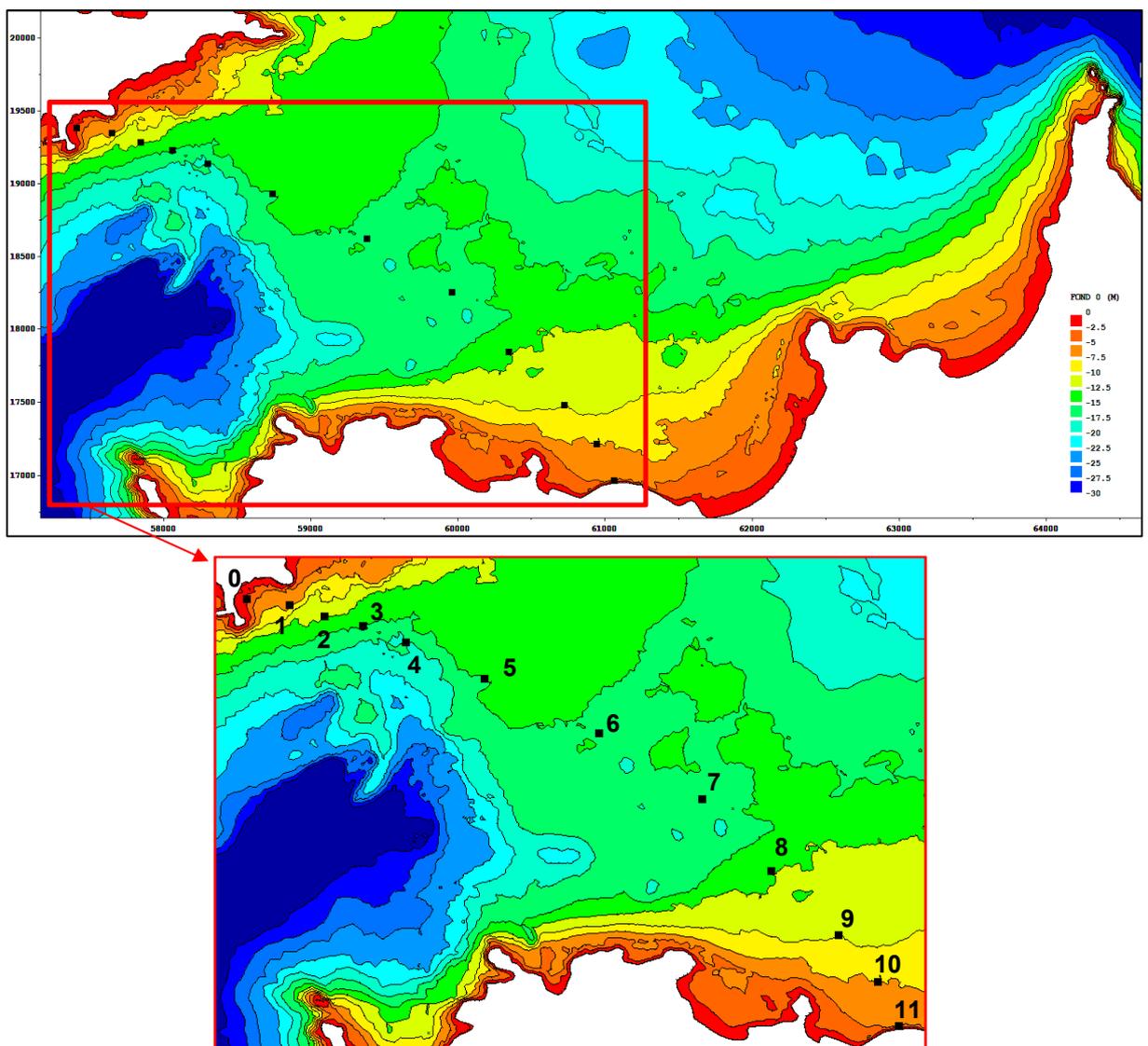


Figure 5-1 : Points d'extraction des résultats – Emplacements validés (19/12/2018)

Note : Les points n°0 et n°11 ont été rajoutés ultérieurement (après émission du rapport en révision 1) suite à la demande de l'assistant du Maître D'ouvrage. Il est précisé que le point n°11 est très proche de Porquerolles et donc des limites du modèle : les résultats sont à considérer avec précaution en raison des effets de bord potentiels.

Le tableau suivant précise les points qui ont été considérés :

POINTS	Coordonnées		Profondeur
	En Lambert 93		
0	957 409 / 6 216 388	N 43°1,6507' / E 6°9,3796'	-2,6m
1	957 646 / 6 219 347,5	N 43°1,6237' / E 6°9,5527'	-6,2m
2	957 845 / 6 219 285	N 43°1,5857' / E 6°9,6967'	-12,3m
3	958 058 / 6 219 225	N 43°1,5489' / E 6°9,8520'	-14,5m
4	958 298 / 6 219 138	N 43°1,4966' / E 6°10,0253'	-17,3m
5	958 738 / 6 218 924,5	N 43°1,3720' / E 6°10,3423'	-15m
6	959 375 / 6 218 622	N 43°1,1949' / E 6°10,8015'	-15,1m
7	959 959 / 6 218 250	N 43°0,9817' / E 6°11,2201'	-15,9m
8	960 346 / 6 217 838	N 43°0,7515' / E 6°11,4920'	-12,6m
9	960 717,5 / 6 217 476	N 43°0,5482' / E 6°11,7542'	-10,2m
10	960 941 / 6 217 217	N 43°0,4034' / E 6°11,9109'	-7,5m
11	961 061 / 6 216 965	N 43°0,2649' / E 6°11,9913'	-4,9m

Tableau 5-1 : Points du tracé retenus pour l'extraction des résultats

5.2. Vitesse orbitale - Détermination

La houle peut se résumer à la propagation d'une onde d'énergie mettant localement en mouvement les particules d'eau à son passage.

La trajectoire des particules fluides correspond une ellipse qui est fonction de la profondeur à laquelle elles se trouvent et qui peut être schématisée ainsi :

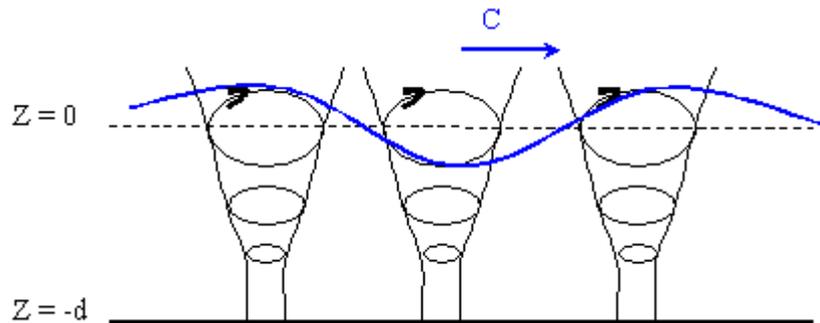


Figure 5-2 : Ellipsoïdes des particules fluides au passage de la houle (réf. [6])

Les équations qui définissent le mouvement de ces particules (hors zone de déferlement) sont les suivantes (réf. [6] et [7]) :

$$\tilde{V}_r(M) = +\frac{H}{2} \omega \frac{\operatorname{ch} k(z+h)}{\operatorname{sh} kh} \exp(ikr) \quad \text{Vitesse horizontale}$$

$$\tilde{V}_z(M) = -i \frac{H}{2} \omega \frac{\operatorname{sh} k(z+h)}{\operatorname{sh} kh} \exp(ikr) \quad \text{Vitesse verticale}$$

Avec :

- H : la hauteur de la houle ;
- ω : la pulsation de l'onde ($\omega = 2\pi/T$) ;
- k : le nombre d'onde qui dépend de la longueur d'onde L de la houle ($k = 2\pi/L$) ;
- z : la profondeur où est calculée la vitesse orbitale, en général à une distance comprise entre 0,5m et 1m du fond. Le paramètre z est négatif et il vaut $z = 0$ au niveau de la surface libre ;
- r : la distance horizontale entre le pic de la houle et le point de calcul. La vitesse orbitale est maximale sur le plan horizontal en prenant $r = 0$;
- h : la hauteur de la colonne d'eau (profondeur totale au point de calcul avec surcote).

Dans le cadre de l'analyse des vitesses orbitales pouvant impacter la future conduite de Porquerolles, les hypothèses suivantes sont retenues :

- On s'intéresse uniquement à la vitesse horizontale, la composante verticale est négligeable à proximité du fond marin ;
- Les calculs sont effectués pour le pic de la houle, soit $r = 0$. Donc $\Rightarrow V = \frac{H}{2} \omega \frac{\operatorname{ch} k(z+h)}{\operatorname{sh} kh}$
- On effectue les calculs à environ 50cm du fond marin :
 - Si on prend une valeur plus éloignée du fond, on s'éloigne de la position théorique de la canalisation et les résultats seraient trop conservatifs,
 - Si on prend une valeur plus proche du fond, on s'approche des limites de validité des équations définissant les mouvements et les résultats des calculs peuvent s'avérer trop réduits par rapport à la réalité du phénomène.

Cette hypothèse amène ainsi à poser : $z + h = 0,5\text{m}$

5.3. Vitesse orbitale - Résultats

Afin d'être conservatif dans les valeurs calculées, et donc de fournir les vitesses maximales pouvant impacter la conduite sous-marine, **c'est la hauteur de houle maximale H_{max} qui est utilisée dans les calculs** (procédure conservatrice).

La valeur du H_{max} est définie selon la formule d'hydrodynamique statistique $H_{max} = 1,86 \times H_{1/3}$ en prenant comme hypothèse que $H_{m0} = H_{1/3}$. Il est précisé que les hauteurs de houle extraites des modélisations numériques sont les valeurs H_{m0} .

Le déferlement dans les faibles profondeurs (selon le critère de Munk) a été vérifié sur les résultats obtenus, mais aucune correction des valeurs tirées des calculs numériques n'a été nécessaire.

Les tableaux suivants présentent les résultats obtenus, celui ci-dessous concerne la houle :

CAS	Hm0 / Tp en chaque point du tracé préliminaire											
	Point 0	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7	Point 8	Point 9	Point 10	Point 11
1	1,16 m 8,8 s	1,31 m 8,8 s	1,42 m 8,8 s	1,51 m 8,8 s	1,50 m 8,8 s	1,44 m 8,8 s	1,38 m 8,8 s	1,19 m 8,8 s	0,76 m 8,8 s	0,52 m 8,8 s	0,46 m 8,8 s	0,36 m 8,8 s
2	1,10 m 8,8 s	1,40 m 8,8 s	1,52 m 8,8 s	1,60 m 8,8 s	1,59 m 8,8 s	1,51 m 8,8 s	1,40 m 8,8 s	1,20 m 8,8 s	0,77 m 8,8 s	0,53 m 8,8 s	0,47 m 8,8 s	0,36 m 8,8 s
3	0,95 m 8,2 s	1,66 m 8,2 s	1,68 m 8,2 s	1,47 m 8,2 s	1,68 m 8,2 s	1,24 m 8,2 s	0,89 m 8,2 s	0,41 m 8,2 s	0,34 m 8,2 s	0,16 m 8,2 s	0,15 m 8,2 s	0,12 m 8,2 s
4	0,82 m 8,2 s	1,54 m 8,2 s	1,65 m 8,2 s	1,58 m 7,6 s	1,83 m 7,6 s	1,50 m 7,6 s	1,23 m 8,2 s	0,65 m 8,2 s	0,52 m 8,2 s	0,26 m 8,2 s	0,24 m 8,2 s	0,19 m 8,2 s
5	0,70 m 8,2 s	1,35 m 8,2 s	1,50 m 8,2 s	1,52 m 7,6 s	1,76 m 7,6 s	1,56 m 7,6 s	1,42 m 8,2 s	0,85 m 8,2 s	0,68 m 8,2 s	0,34 m 8,2 s	0,31 m 8,2 s	0,25 m 8,2 s
6	0,50 m 8,2 s	0,96 m 8,2 s	1,07 m 8,2 s	1,21 m 8,2 s	1,37 m 8,2 s	1,37 m 7,6 s	1,49 m 7,6 s	1,19 m 8,2 s	0,95 m 8,2 s	0,49 m 8,2 s	0,44 m 8,2 s	0,34 m 8,2 s
7	0,46 m 8 s	0,89 m 8 s	0,99 m 8 s	1,16 m 8 s	1,29 m 8 s	1,34 m 8 s	1,58 m 7,4 s	1,58 m 7,4 s	1,27 m 8 s	0,68 m 8 s	0,58 m 8 s	0,44 m 8 s
8	0,32 m 8 s	0,62 m 8 s	0,68 m 8 s	0,81 m 8 s	0,89 m 8 s	0,90 m 8 s	1,07 m 7,4 s	1,22 m 7,4 s	1,10 m 8 s	0,59 m 7,4 s	0,50 m 8 s	0,36 m 8 s
9	0,19 m 8 s	0,36 m 8 s	0,40 m 8 s	0,48 m 8 s	0,53 m 8 s	0,52 m 8 s	0,60 m 8 s	0,75 m 7,4 s	0,69 m 7,4 s	0,40 m 7,4 s	0,33 m 7,4 s	0,24 m 8 s
10	1,38 m 10 s	1,84 m 10 s	1,91 m 10 s	2,0 m 10 s	1,96 m 10 s	1,86 m 10 s	1,76 m 10 s	1,50 m 10 s	1,02 m 10 s	0,72 m 10 s	0,66 m 10 s	0,52 m 10 s
11	1,10 m 9,3 s	2,03 m 9,3 s	2,22 m 9,3 s	2,08 m 9,3 s	2,43 m 9,3 s	2,08 m 8,6 s	2,06 m 9,3 s	1,30 m 9,3 s	1,15 m 9,3 s	0,58 m 9,3 s	0,54 m 9,3 s	0,44 m 9,3 s
12	0,63 m 8,7 s	1,18 m 8,7 s	1,29 m 8,7 s	1,47 m 8,7 s	1,63 m 8,7 s	1,54 m 8,7 s	1,77 m 8 s	1,74 m 8,7 s	1,47 m 8,7 s	0,80 m 8,7 s	0,71 m 8,7 s	0,54 m 8,7 s
13	1,24 m 10,6 s	2,11 m 10,6 s	2,14 m 10,6 s	2,19 m 10,6 s	2,16 m 10,6 s	2,05 m 10,6 s	1,95 m 10,6 s	1,66 m 10,6 s	1,16 m 10,6 s	0,82 m 10,6 s	0,78 m 10,6 s	0,62 m 10,6 s
14	1,35 m 10,1 s	2,54 m 10,1 s	2,77 m 10,1 s	2,43 m 9,3 s	2,88 m 9,3 s	2,40 m 9,3 s	2,53 m 10,1 s	2,53 m 10,1 s	1,66 m 10,1 s	0,78 m 10,1 s	0,74 m 10,1 s	0,60 m 10,1 s
15	0,77 m 9,3 s	1,39 m 9,3 s	1,53 m 9,3 s	1,67 m 9,3 s	1,85 m 9,3 s	1,65 m 8,5 s	1,86 m 8,5 s	1,84 m 8,5 s	1,60 m 9,3 s	0,87 m 9,3 s	0,78 m 9,3 s	0,61 m 9,3 s

Tableau 5-2 : Valeurs des houles extraites des modélisations numériques de la propagation

Et celui des vitesses orbitales :

CAS	Vitesse orbitale horizontale en chaque point du tracé préliminaire											
	Point 0	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7	Point 8	Point 9	Point 10	Point 11
1	2,11 m/s	1,40 m/s	0,95 m/s	0,87 m/s	0,74 m/s	0,81 m/s	0,77 m/s	0,64 m/s	0,49 m/s	0,40 m/s	0,44 m/s	0,45 m/s
2	2,00 m/s	1,50 m/s	1,01 m/s	0,93 m/s	0,78 m/s	0,85 m/s	0,78 m/s	0,64 m/s	0,50 m/s	0,40 m/s	0,45 m/s	0,45 m/s
3	1,72 m/s	1,74 m/s	1,06 m/s	0,81 m/s	0,77 m/s	0,66 m/s	0,47 m/s	0,21 m/s	0,21 m/s	0,12 m/s	0,14 m/s	0,15 m/s
4	1,49 m/s	1,62 m/s	1,04 m/s	0,94 m/s	0,90 m/s	0,86 m/s	0,65 m/s	0,33 m/s	0,32 m/s	0,19 m/s	0,22 m/s	0,23 m/s
5	1,27 m/s	1,42 m/s	0,95 m/s	0,90 m/s	0,87 m/s	0,90 m/s	0,75 m/s	0,43 m/s	0,42 m/s	0,25 m/s	0,29 m/s	0,31 m/s
6	0,91 m/s	1,01 m/s	0,68 m/s	0,67 m/s	0,63 m/s	0,79 m/s	0,85 m/s	0,60 m/s	0,59 m/s	0,36 m/s	0,41 m/s	0,42 m/s
7	0,83 m/s	0,92 m/s	0,62 m/s	0,62 m/s	0,58 m/s	0,70 m/s	0,88 m/s	0,83 m/s	0,77 m/s	0,49 m/s	0,53 m/s	0,54 m/s
8	0,58 m/s	0,64 m/s	0,42 m/s	0,44 m/s	0,40 m/s	0,47 m/s	0,60 m/s	0,64 m/s	0,67 m/s	0,46 m/s	0,46 m/s	0,44 m/s
9	0,34 m/s	0,37 m/s	0,25 m/s	0,26 m/s	0,24 m/s	0,27 m/s	0,31 m/s	0,40 m/s	0,45 m/s	0,31 m/s	0,32 m/s	0,32 m/s
10	2,26 m/s	1,93 m/s	1,31 m/s	1,22 m/s	1,04 m/s	1,10 m/s	1,03 m/s	0,85 m/s	0,69 m/s	0,56 m/s	0,62 m/s	0,62 m/s
11	1,79 m/s	2,09 m/s	1,46 m/s	1,21 m/s	1,23 m/s	1,28 m/s	1,16 m/s	0,71 m/s	0,74 m/s	0,44 m/s	0,49 m/s	0,52 m/s
12	1,02 m/s	1,19 m/s	0,82 m/s	0,82 m/s	0,78 m/s	0,83 m/s	1,03 m/s	0,89 m/s	0,92 m/s	0,59 m/s	0,64 m/s	0,63 m/s
13	2,04 m/s	2,24 m/s	1,49 m/s	1,36 m/s	1,19 m/s	1,25 m/s	1,18 m/s	0,97 m/s	0,80 m/s	0,64 m/s	0,74 m/s	0,74 m/s
14	2,22 m/s	2,65 m/s	1,90 m/s	1,61 m/s	1,67 m/s	1,54 m/s	1,48 m/s	1,44 m/s	1,12 m/s	0,61 m/s	0,69 m/s	0,71 m/s
15	1,26 m/s	1,43 m/s	1,00 m/s	0,97 m/s	0,93 m/s	1,03 m/s	1,15 m/s	1,09 m/s	1,03 m/s	0,66 m/s	0,71 m/s	0,72 m/s

Tableau 5-3 : Vitesses orbitales horizontales calculées

Note : La composante verticale de la vitesse orbitale est $\leq 0,1$ m/s pour ces points de calcul à la profondeur proche du fond marin (à 0,5m du fond).

Il est rappelé que les points 0 et 11 sont situés dans des faibles fonds et à proximité des frontières du modèle.



Port de Brégaillon
Bâtiment FIRST
83502 La Seyne sur Mer

Tél : 04 94 10 97 40
Fax : 04 94 94 42 27
E-mail : contact@oceanide.net
Site : www.oceanide.net



ETUDE DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES DANS LE CADRE DU PROJET DE CANAISATION SOUS-MARINE ENTRE LE CONTINENT ET PORQUEROLLES

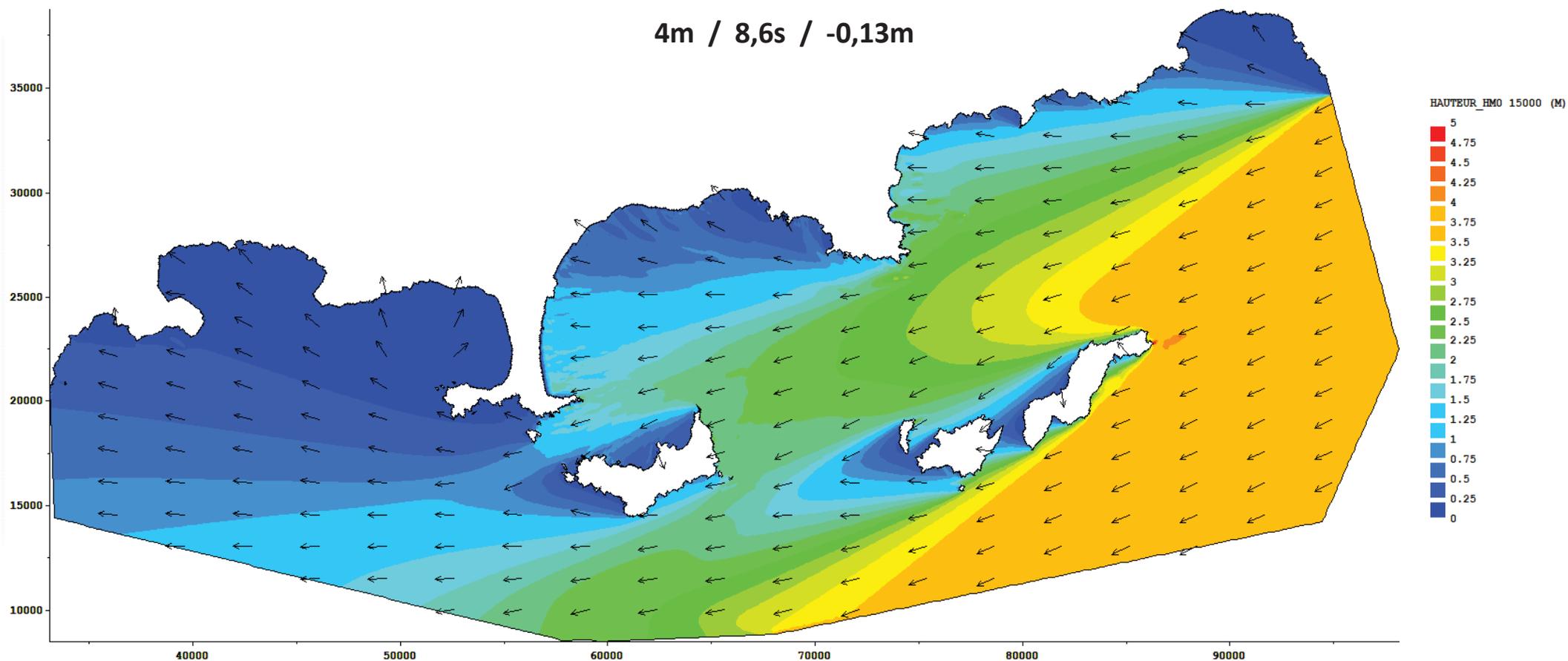
RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE LA PROPAGATION DE LA HOULE

ANNEXE 1

0	Pour commentaires	AL	BB	BB	18/12/2018
Révision	Statut / Objet de la révision	Rédigé par	Revu par	Approuvé par	Date
NUMERO DE DOCUMENT : 18.7.054.AN.001					

CAS 1 – Houle 1 an ENE (65°N)

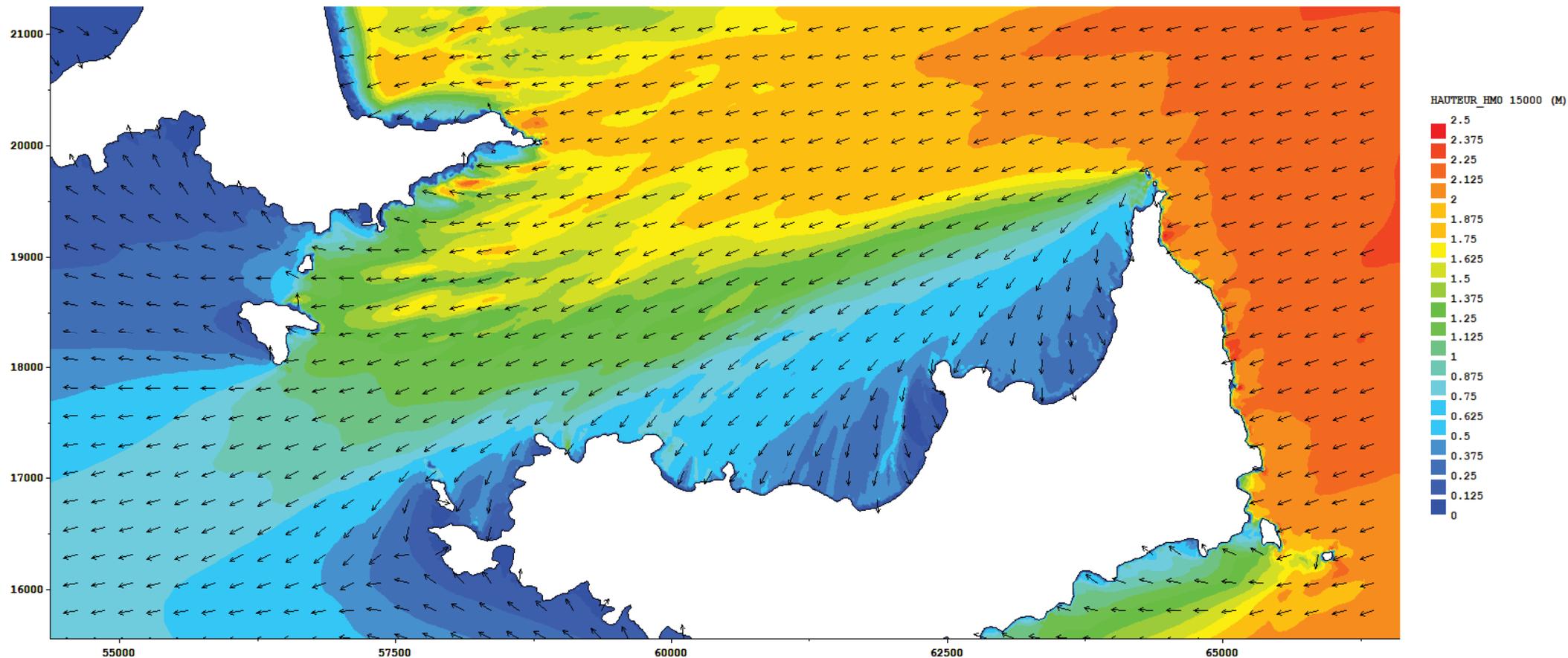
4m / 8,6s / -0,13m



Vue globale

CAS 1 – Houle 1 an ENE (65°N)

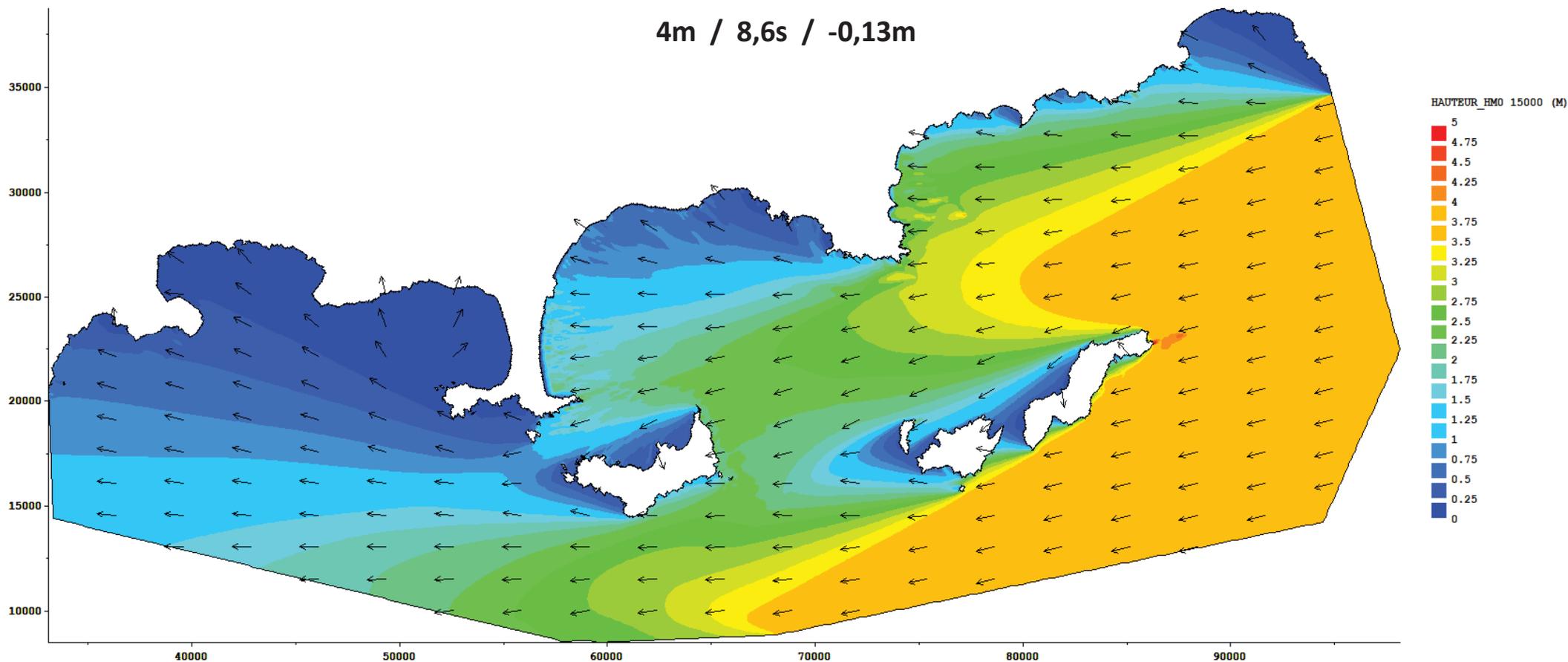
4m / 8,6s / -0,13m



Zoom sur la zone d'étude

CAS 2 – Houle 1 an ENE (75°N)

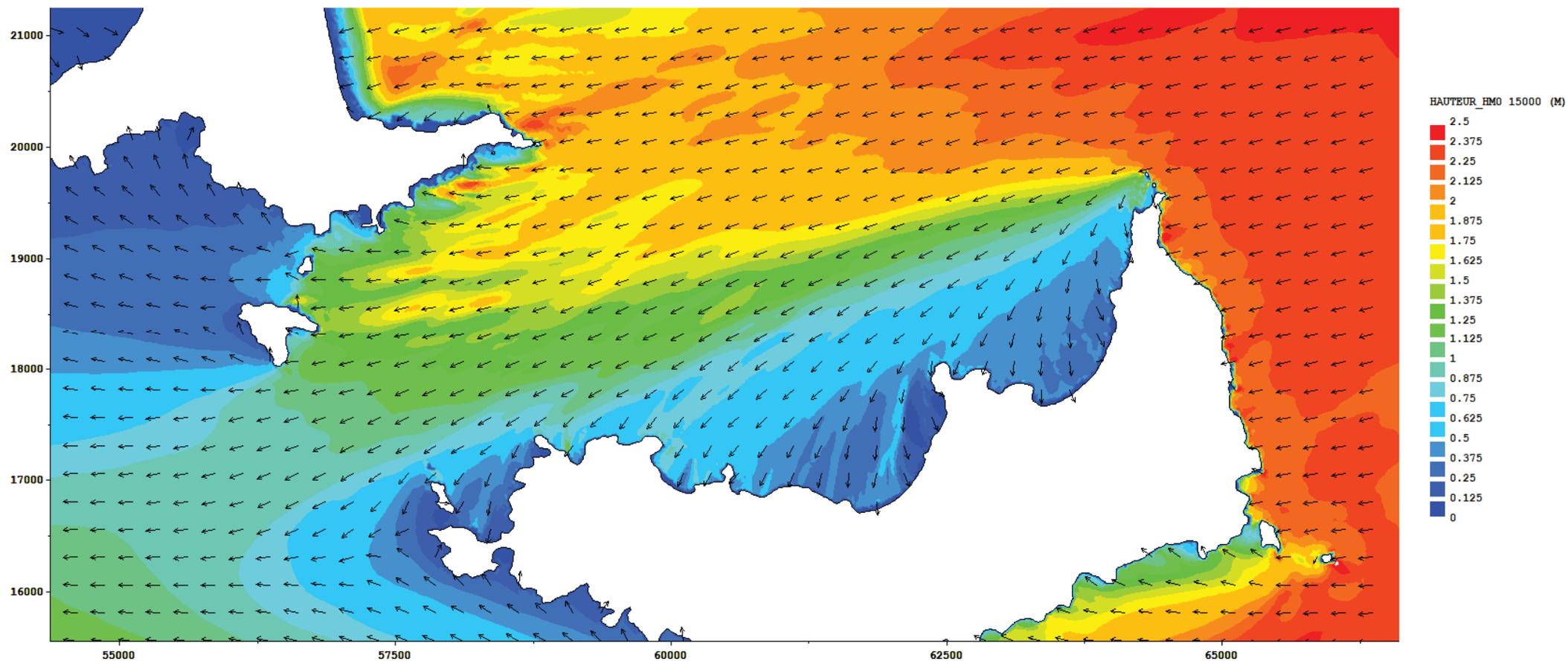
4m / 8,6s / -0,13m



Vue globale

CAS 2 – Houle 1 an ENE (75°N)

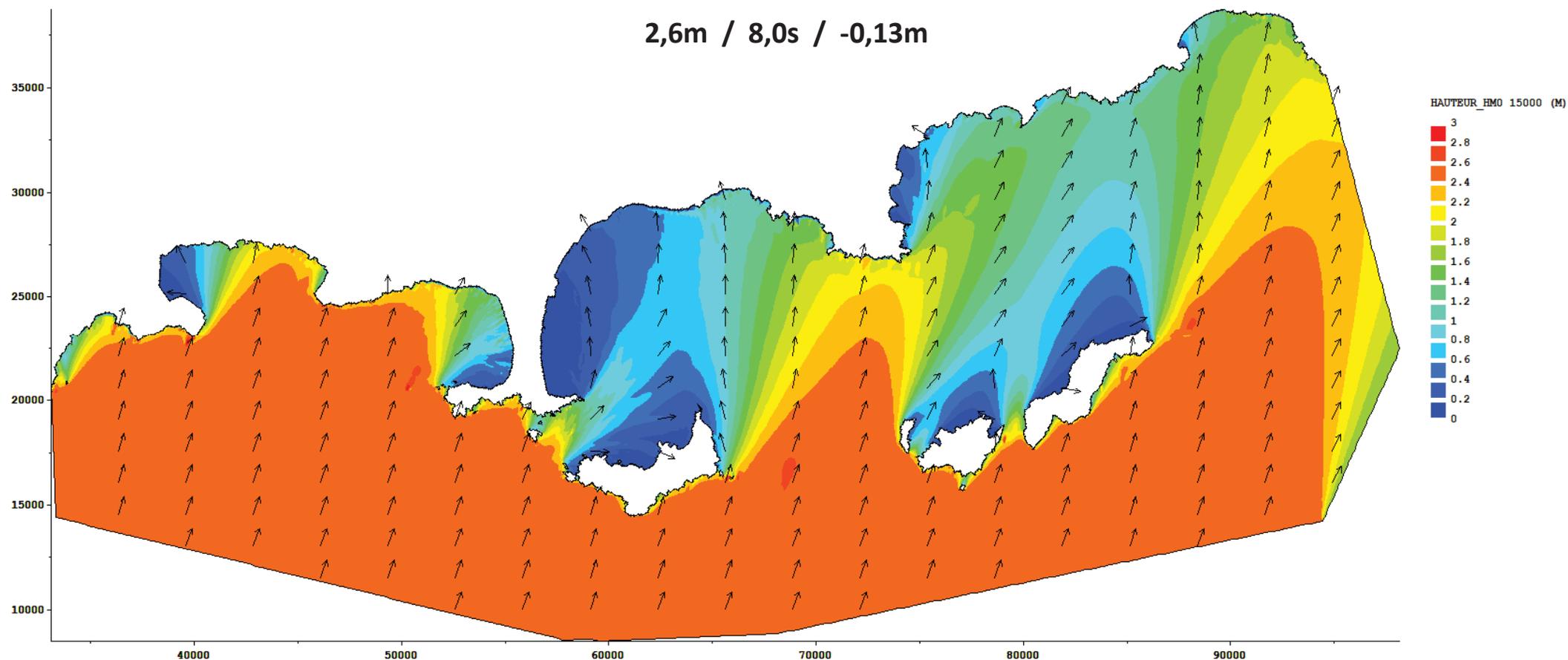
4m / 8,6s / -0,13m



Zoom sur la zone d'étude

CAS 3 – Houle 1 an SO (200°N)

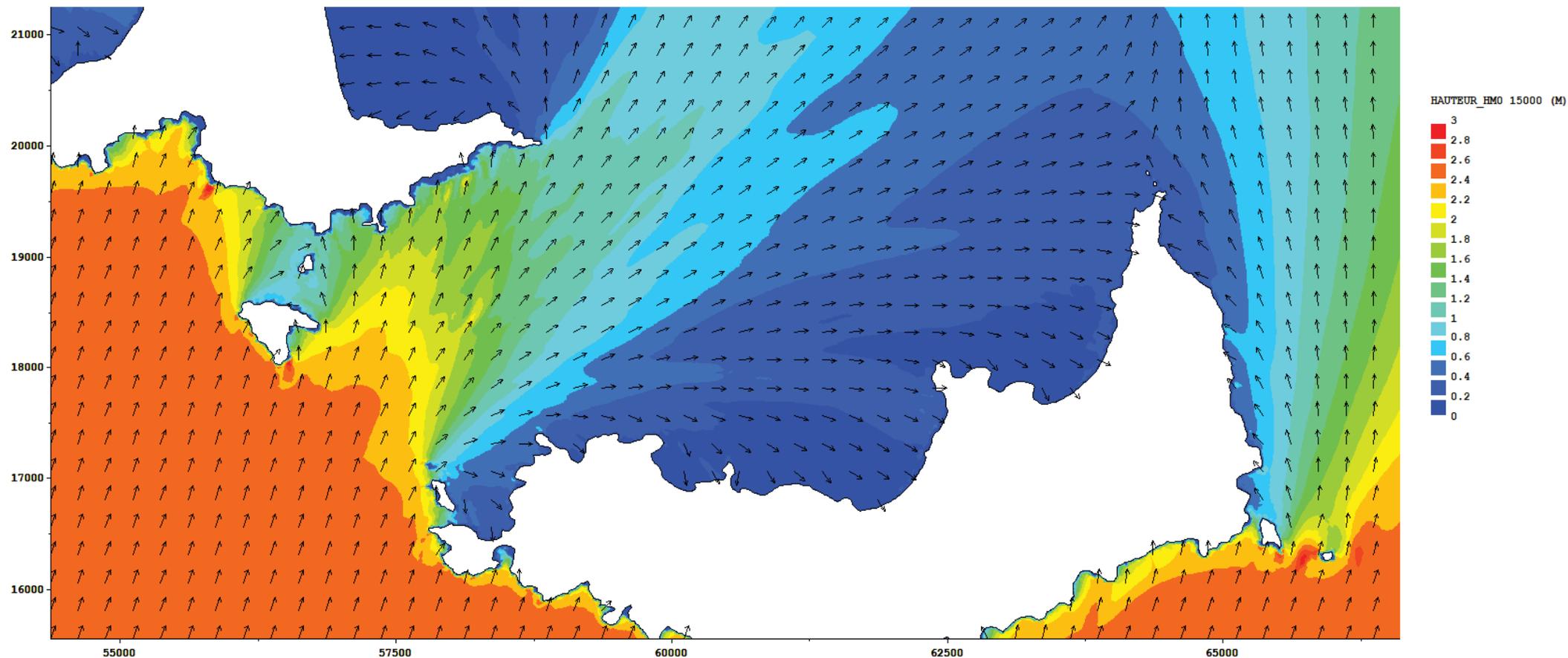
2,6m / 8,0s / -0,13m



Vue globale

CAS 3 – Houle 1 an SO (200°N)

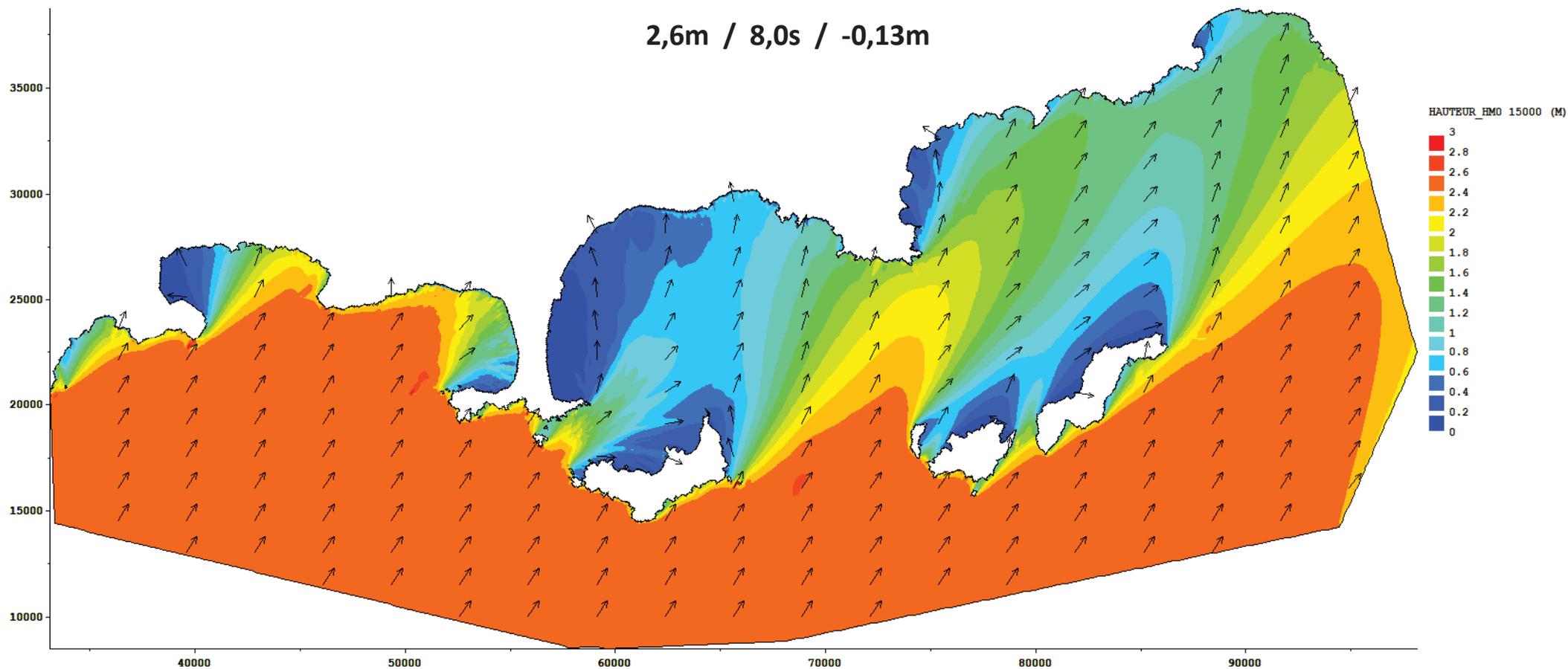
2,6m / 8,0s / -0,13m



Zoom sur la zone d'étude

CAS 4 – Houle 1 an SO (215°N)

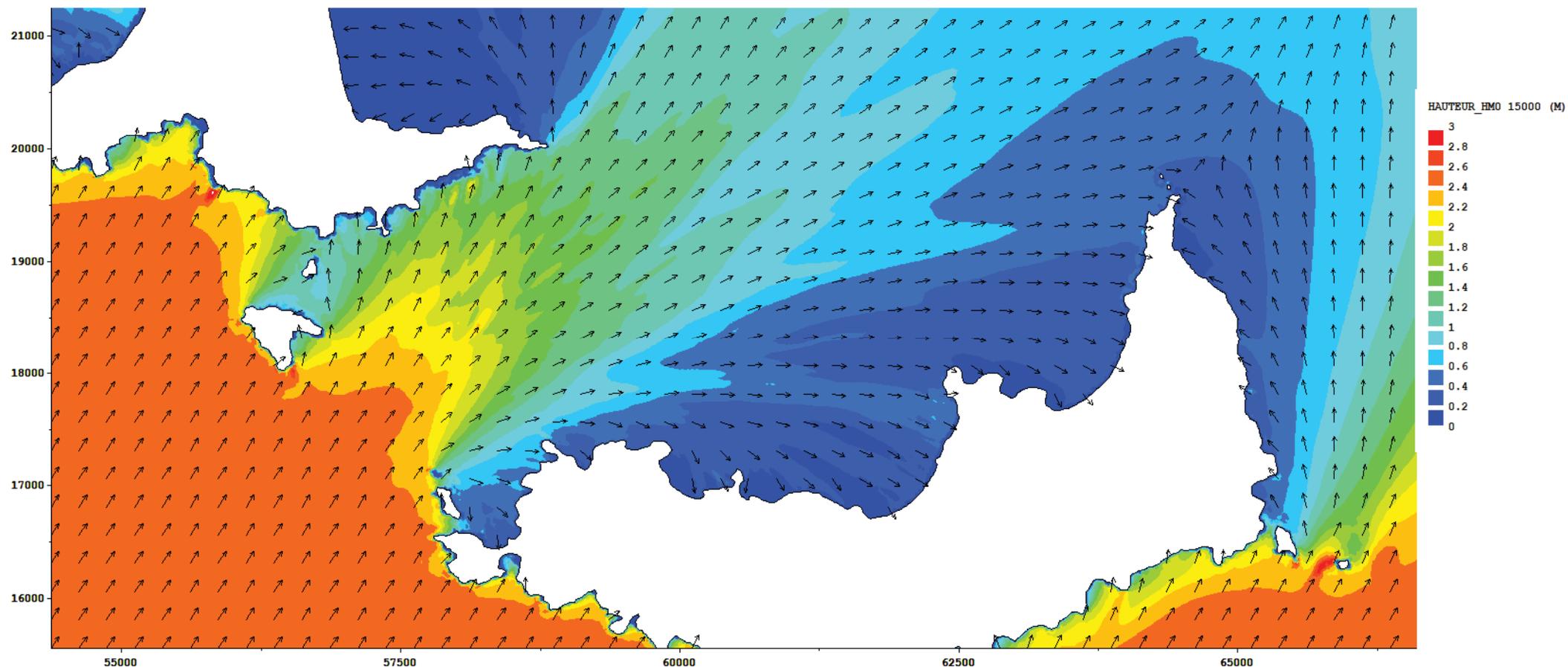
2,6m / 8,0s / -0,13m



Vue globale

CAS 4 – Houle 1 an SO (215°N)

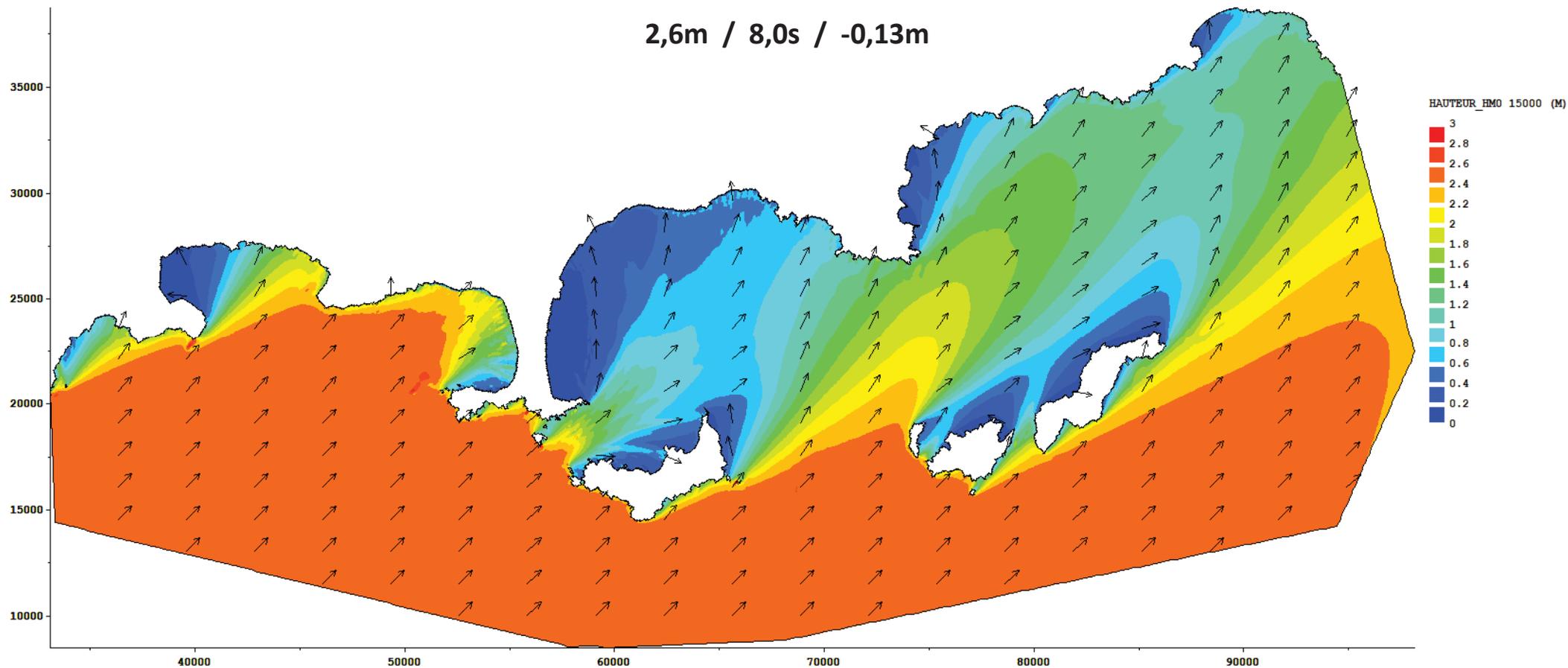
2,6m / 8,0s / -0,13m



Zoom sur la zone d'étude

CAS 5 – Houle 1 an SO (225°N)

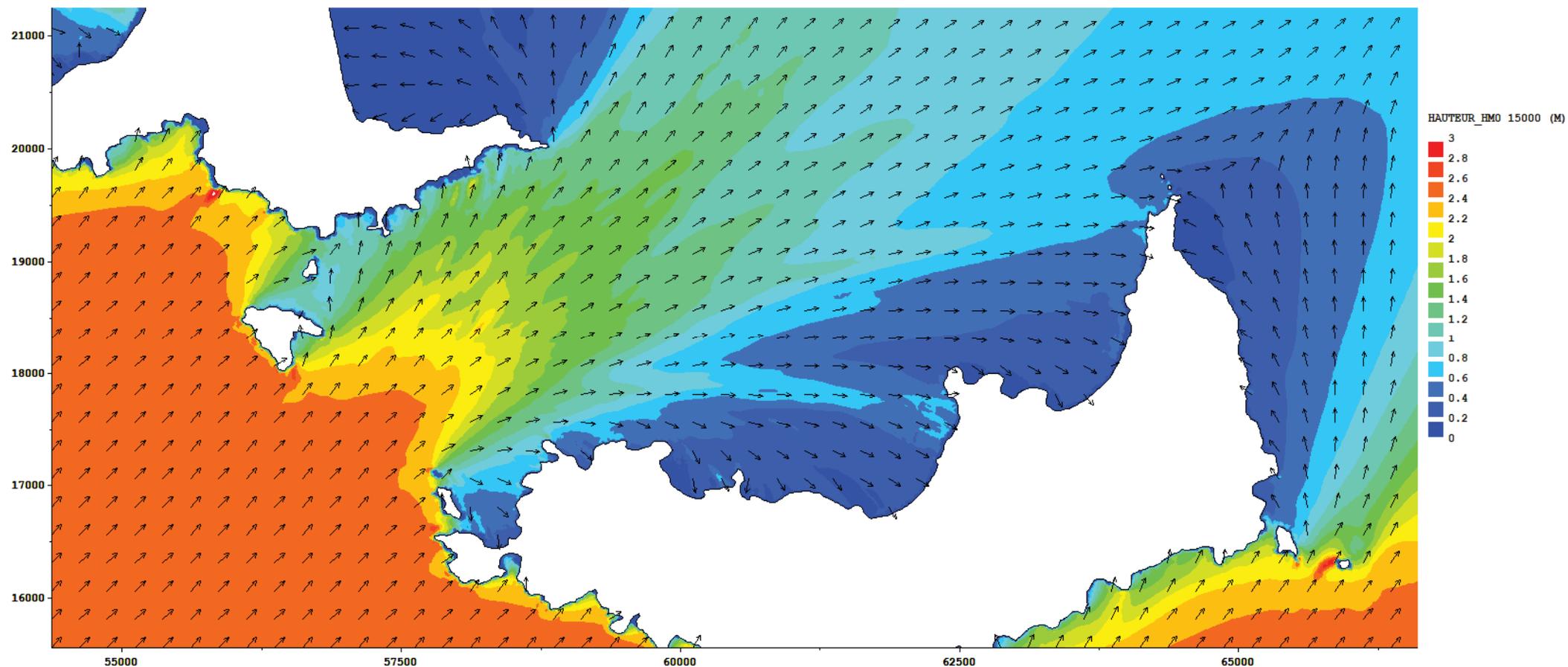
2,6m / 8,0s / -0,13m



Vue globale

CAS 5 – Houle 1 an SO (225°N)

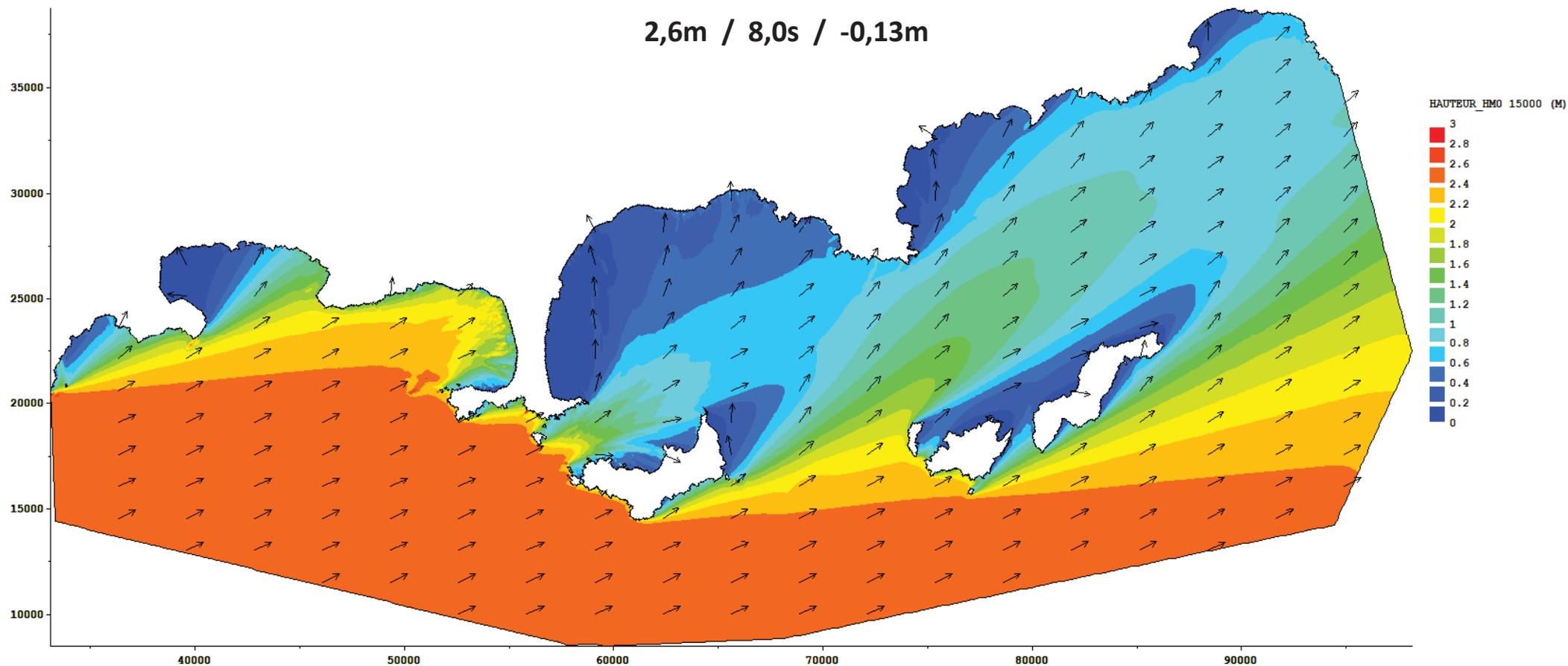
2,6m / 8,0s / -0,13m



Zoom sur la zone d'étude

CAS 6 – Houle 1 an SO (245°N)

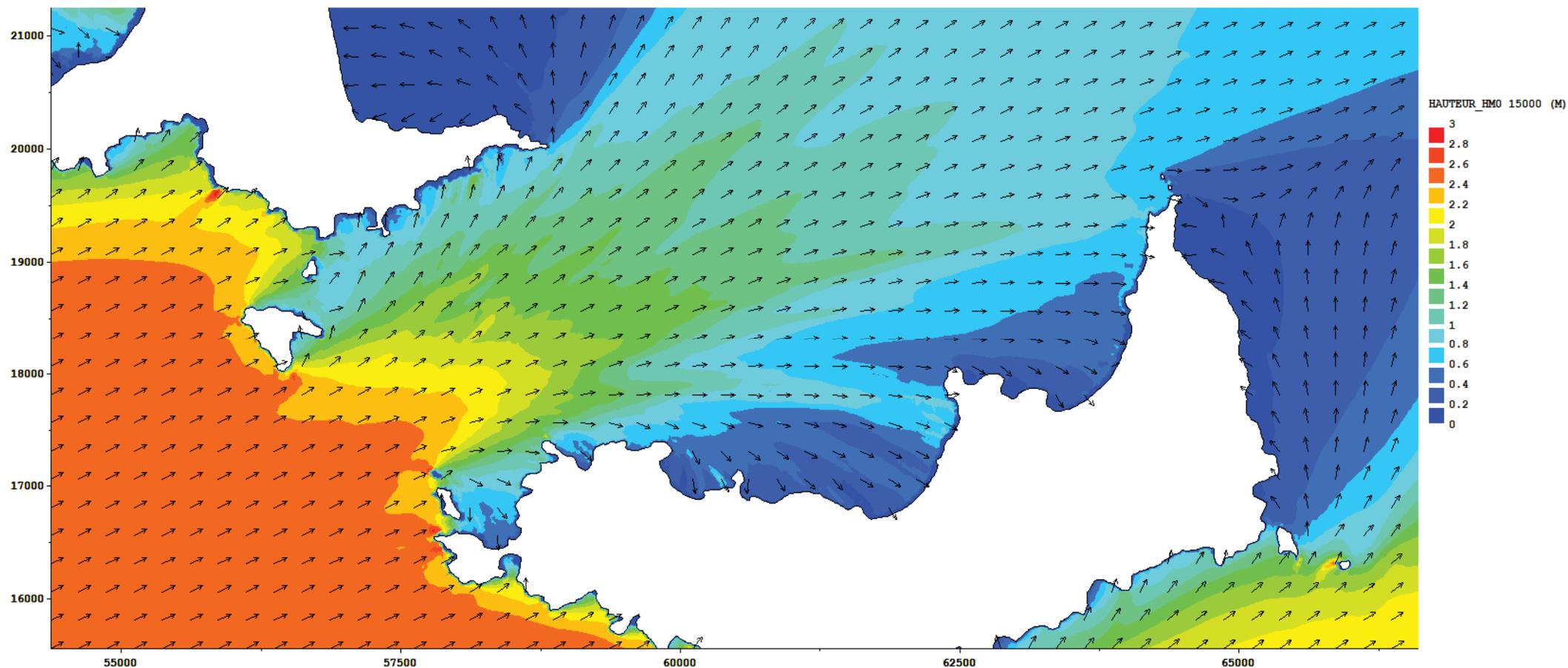
2,6m / 8,0s / -0,13m



Vue globale

CAS 6 – Houle 1 an SO (245°N)

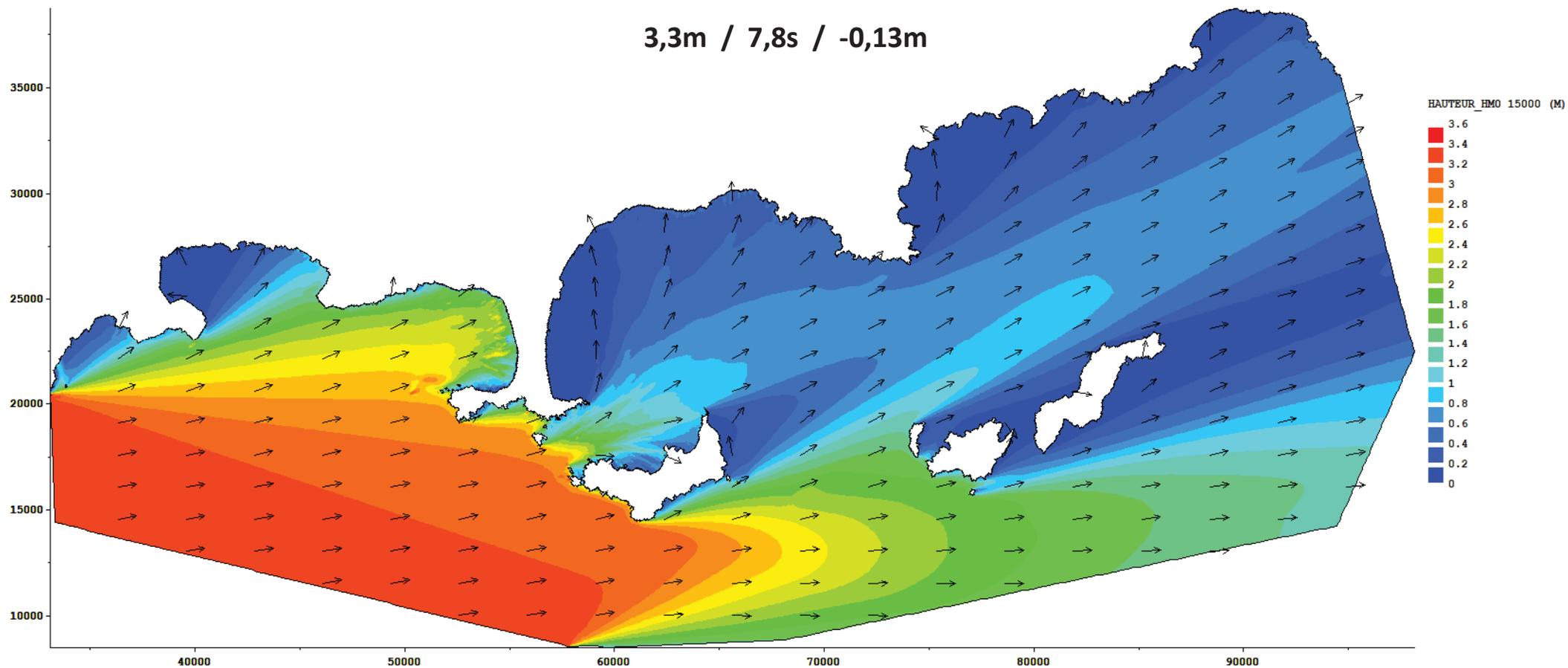
2,6m / 8,0s / -0,13m



Zoom sur la zone d'étude

CAS 7 – Houle 1 an O (260°N)

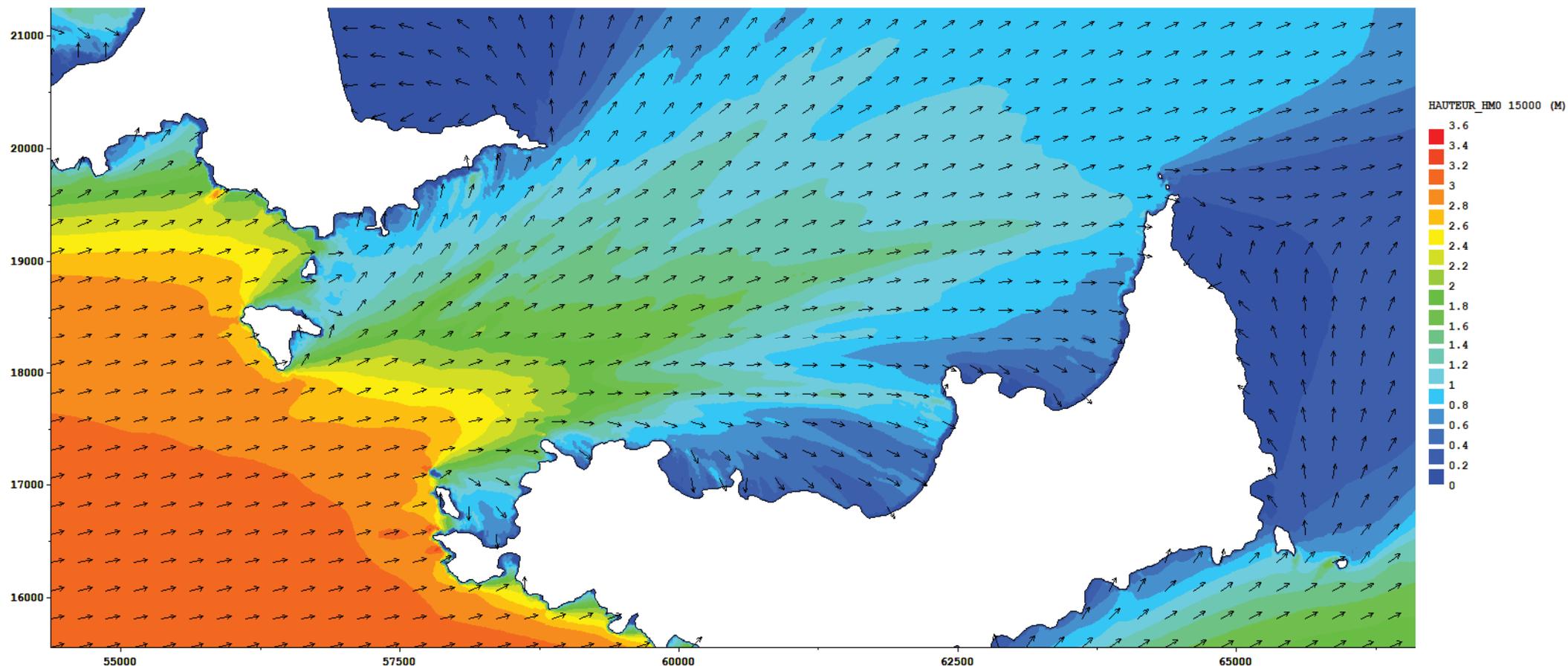
3,3m / 7,8s / -0,13m



Vue globale

CAS 7 – Houle 1 an O (260°N)

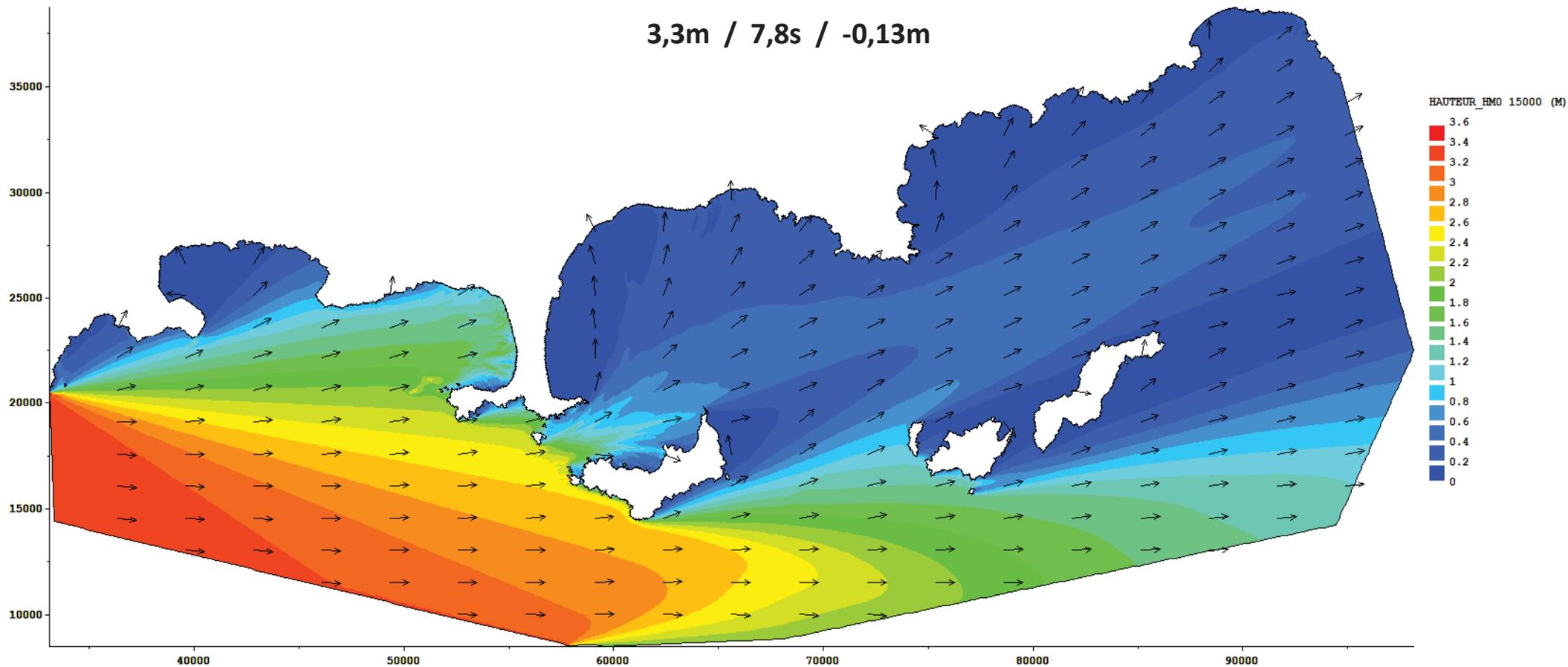
3,3m / 7,8s / -0,13m



Zoom sur la zone d'étude

CAS 8 – Houle 1 an O (275°N)

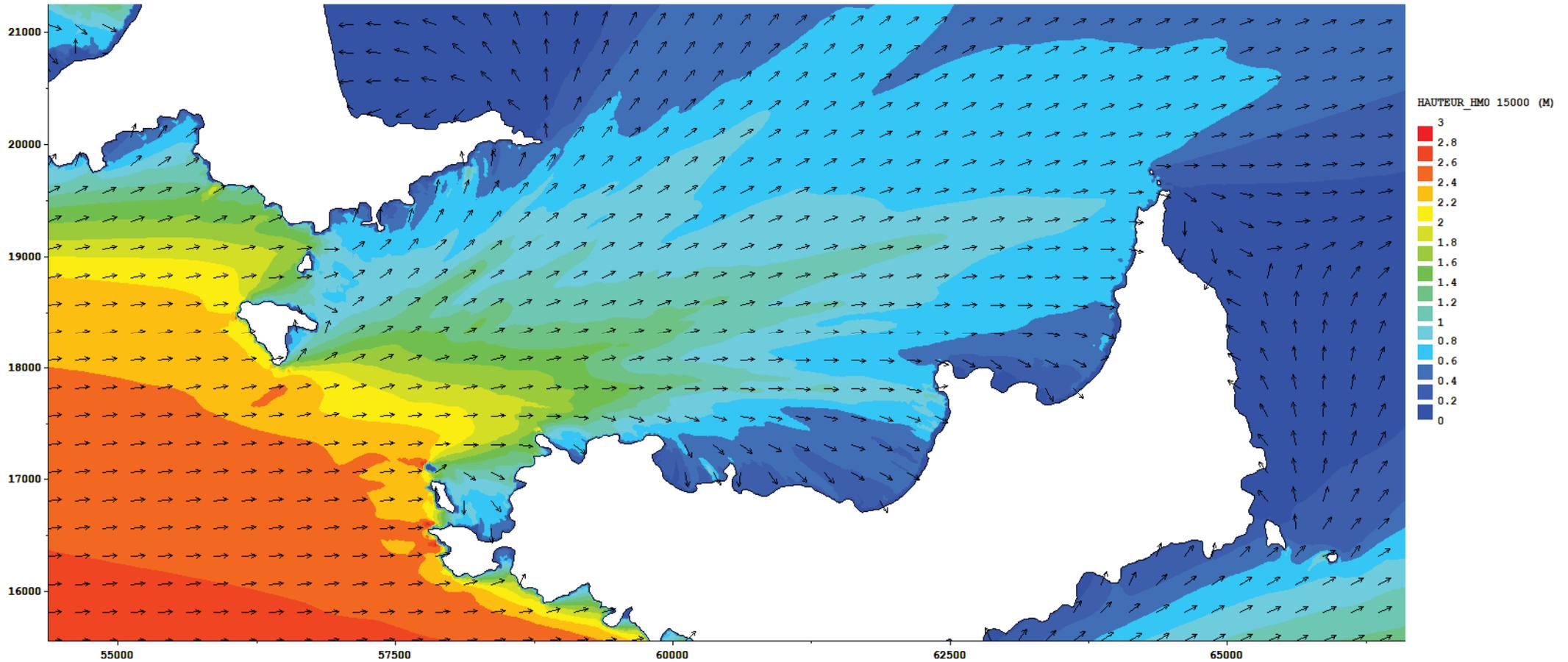
3,3m / 7,8s / -0,13m



Vue globale

CAS 8 – Houle 1 an O (275°N)

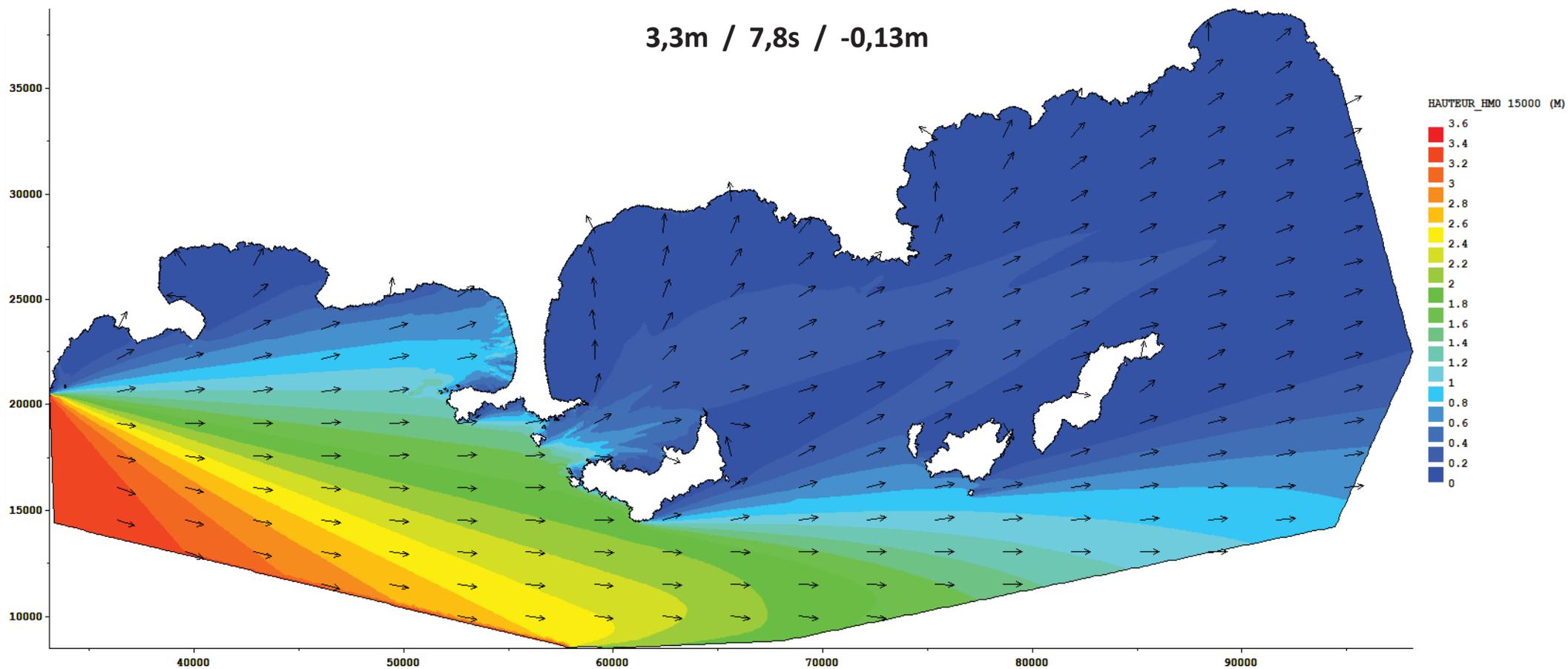
3,3m / 7,8s / -0,13m



Zoom sur la zone d'étude

CAS 9 – Houle 1 an 0 (290°N)

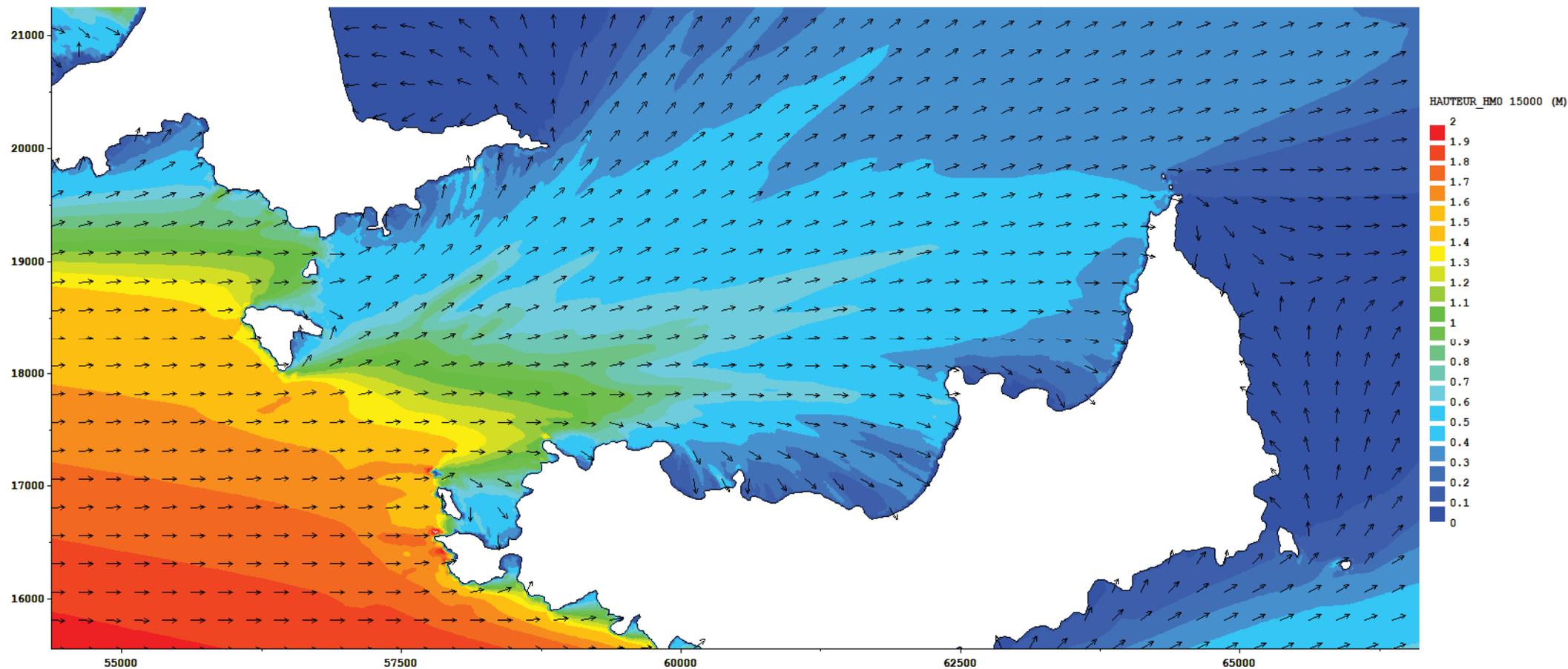
3,3m / 7,8s / -0,13m



Vue globale

CAS 9 – Houle 1 an 0 (290°N)

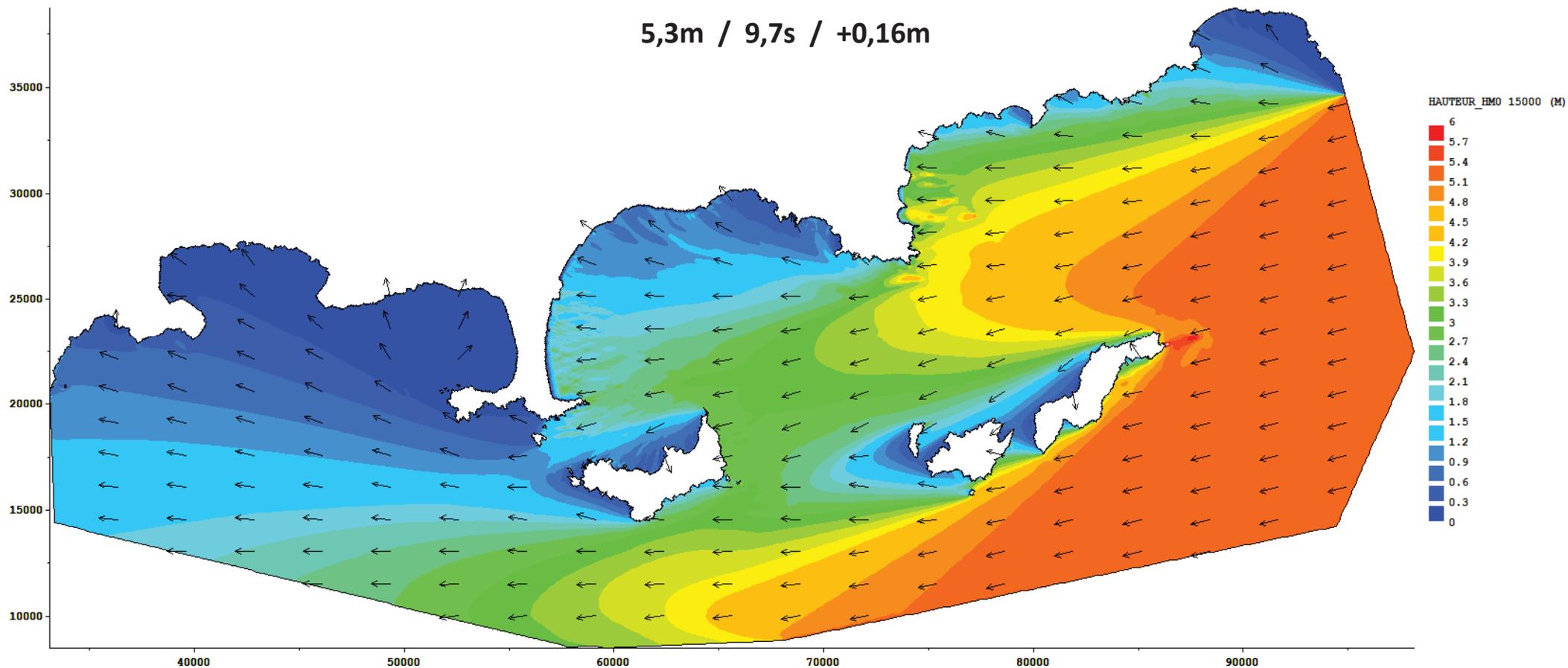
3,3m / 7,8s / -0,13m



Zoom sur la zone d'étude

CAS 10 – Houle 10 ans ENE (75°N)

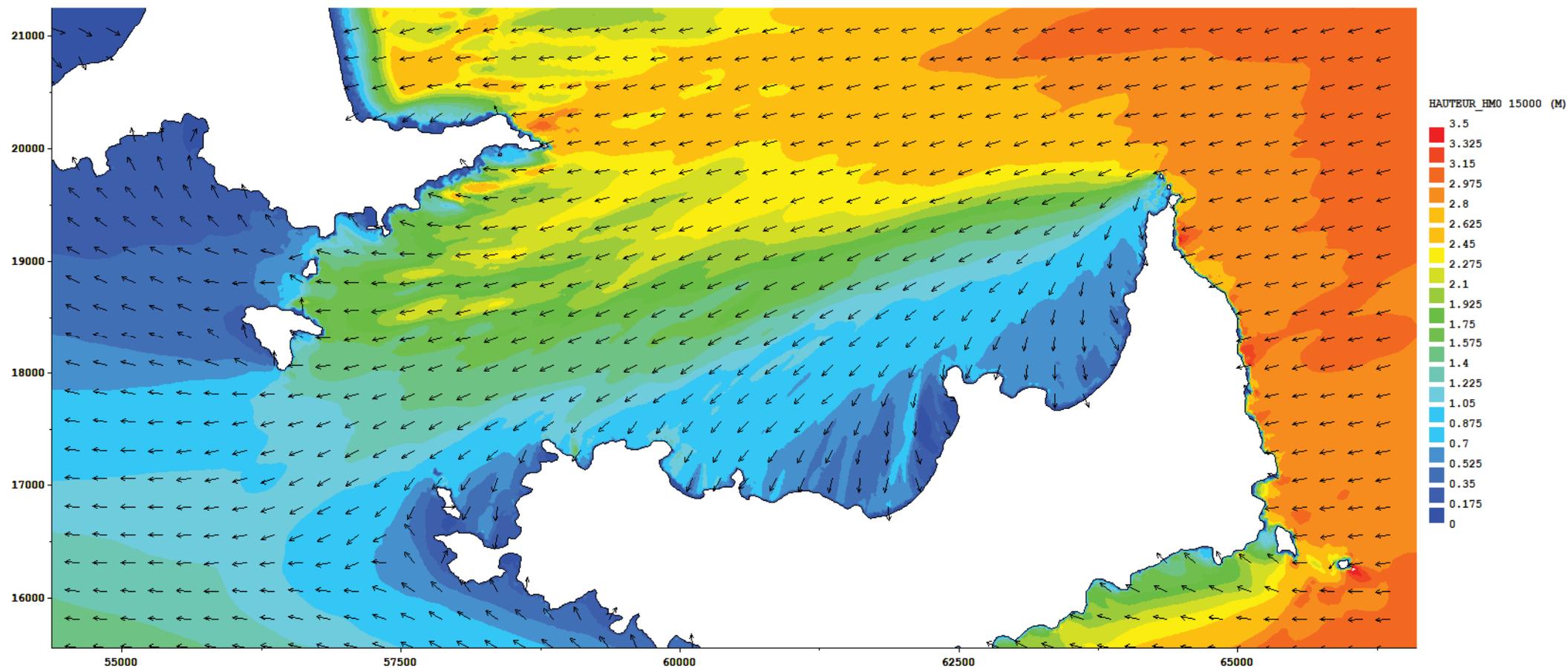
5,3m / 9,7s / +0,16m



Vue globale

CAS 10 – Houle 10 ans ENE (75°N)

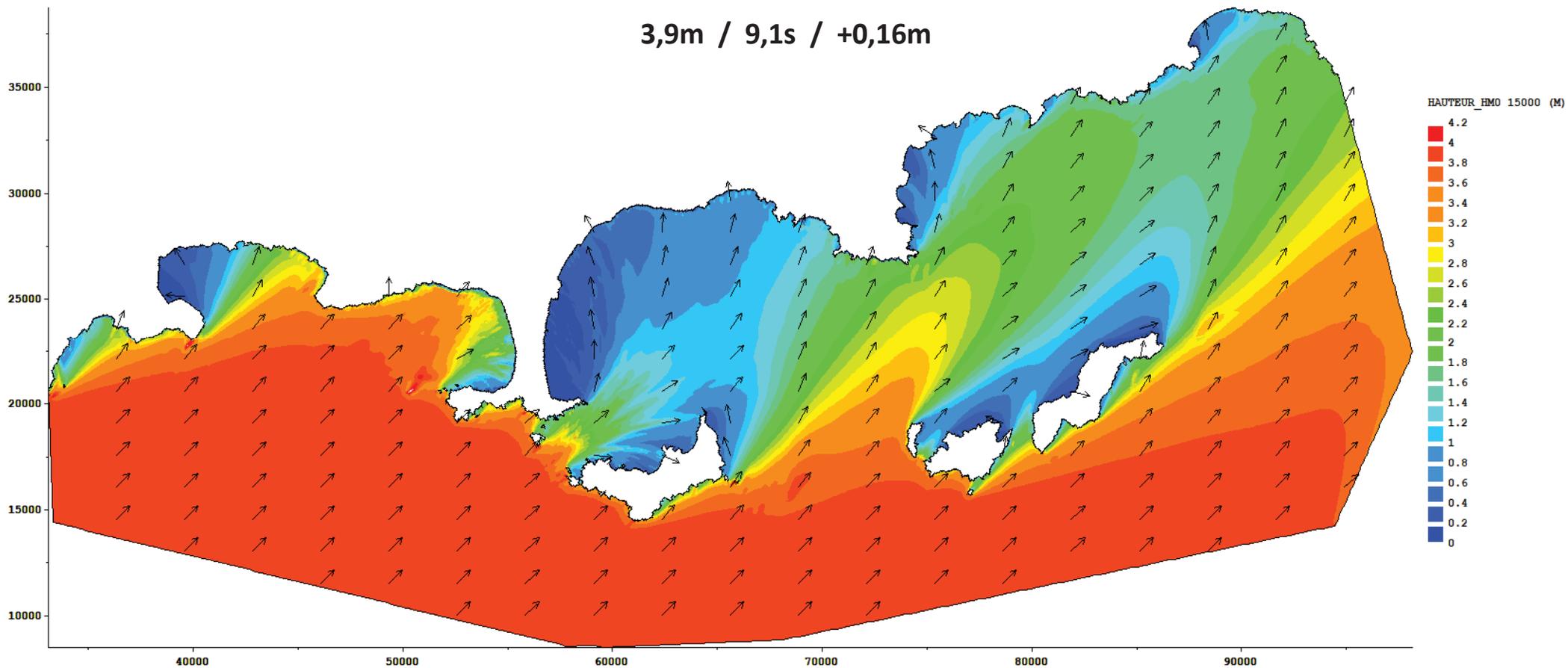
5,3m / 9,7s / +0,16m



Zoom sur la zone d'étude

CAS 11 – Houle 10 ans SO (225°N)

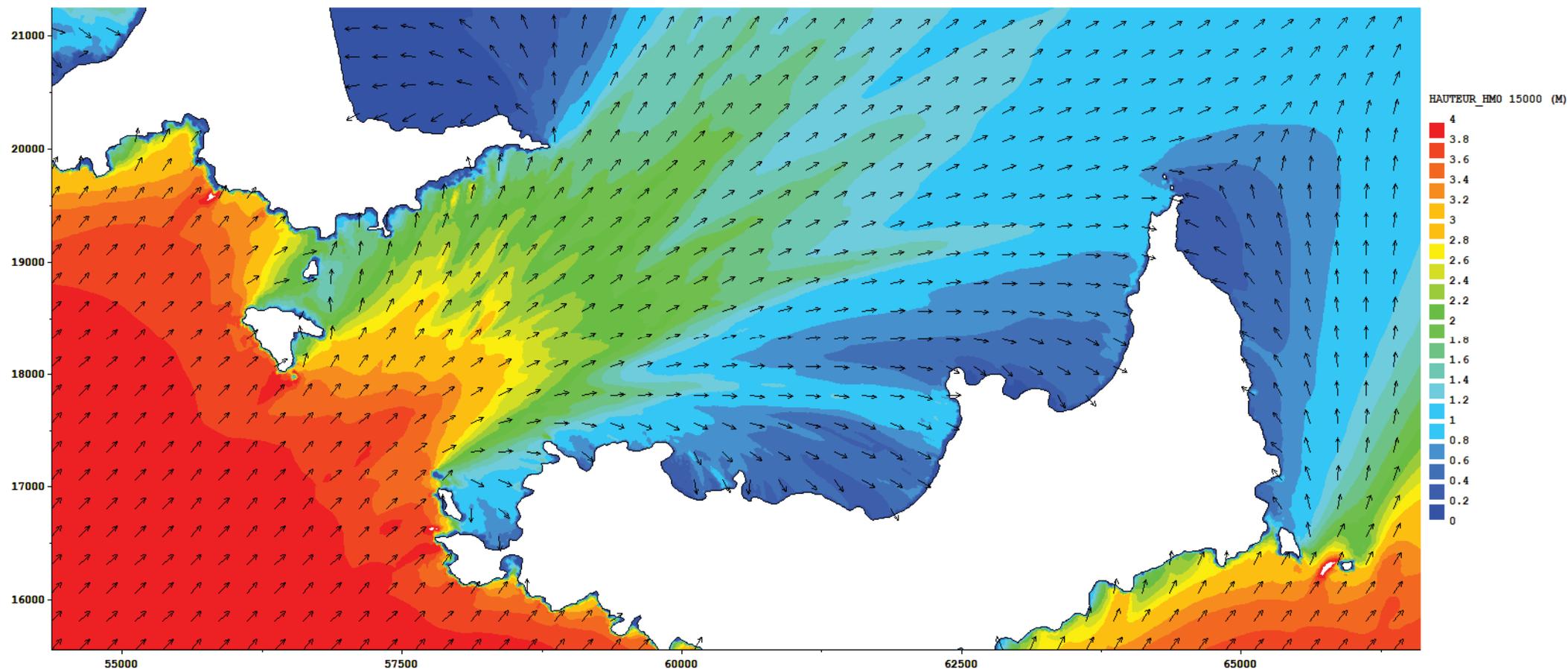
3,9m / 9,1s / +0,16m



Vue globale

CAS 11 – Houle 10 ans SO (225°N)

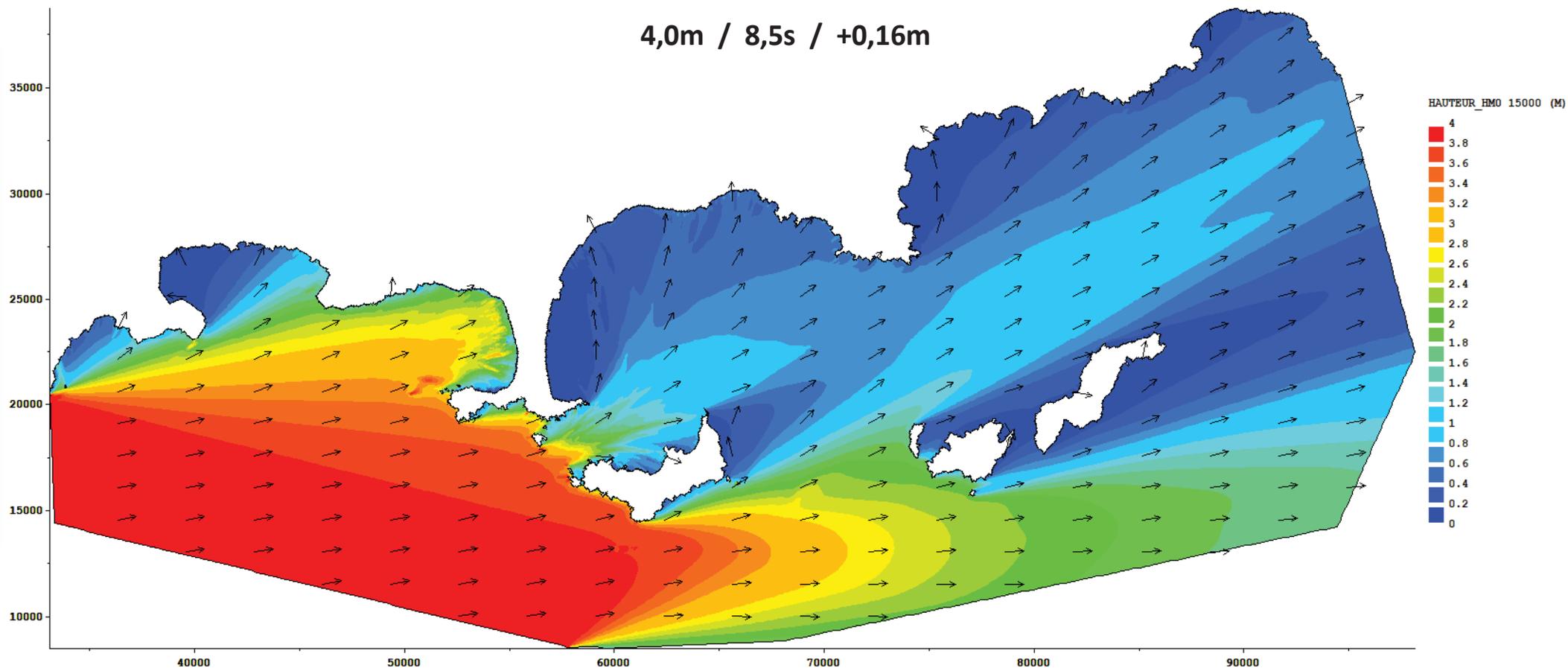
3,9m / 9,1s / +0,16m



Zoom sur la zone d'étude

CAS 12 – Houle 10 ans O (260°N)

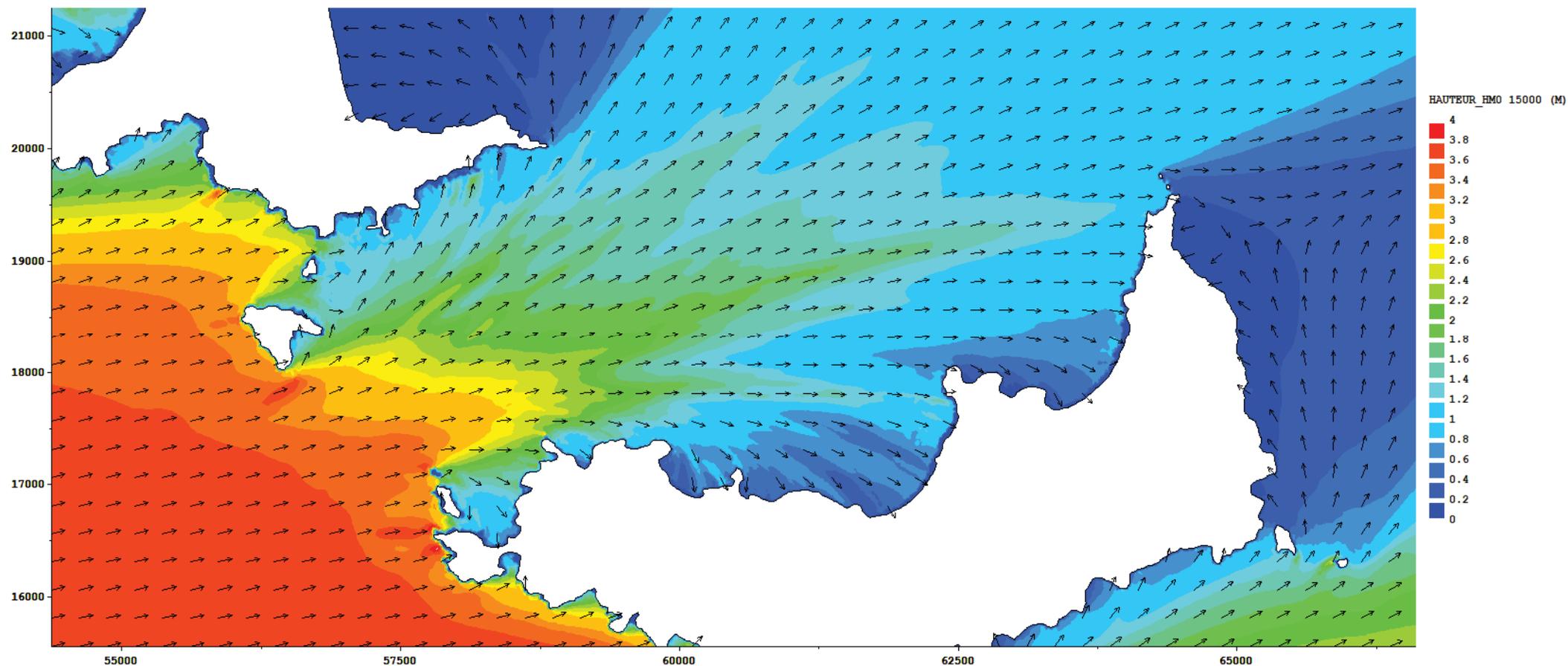
4,0m / 8,5s / +0,16m



Vue globale

CAS 12 – Houle 10 ans O (260°N)

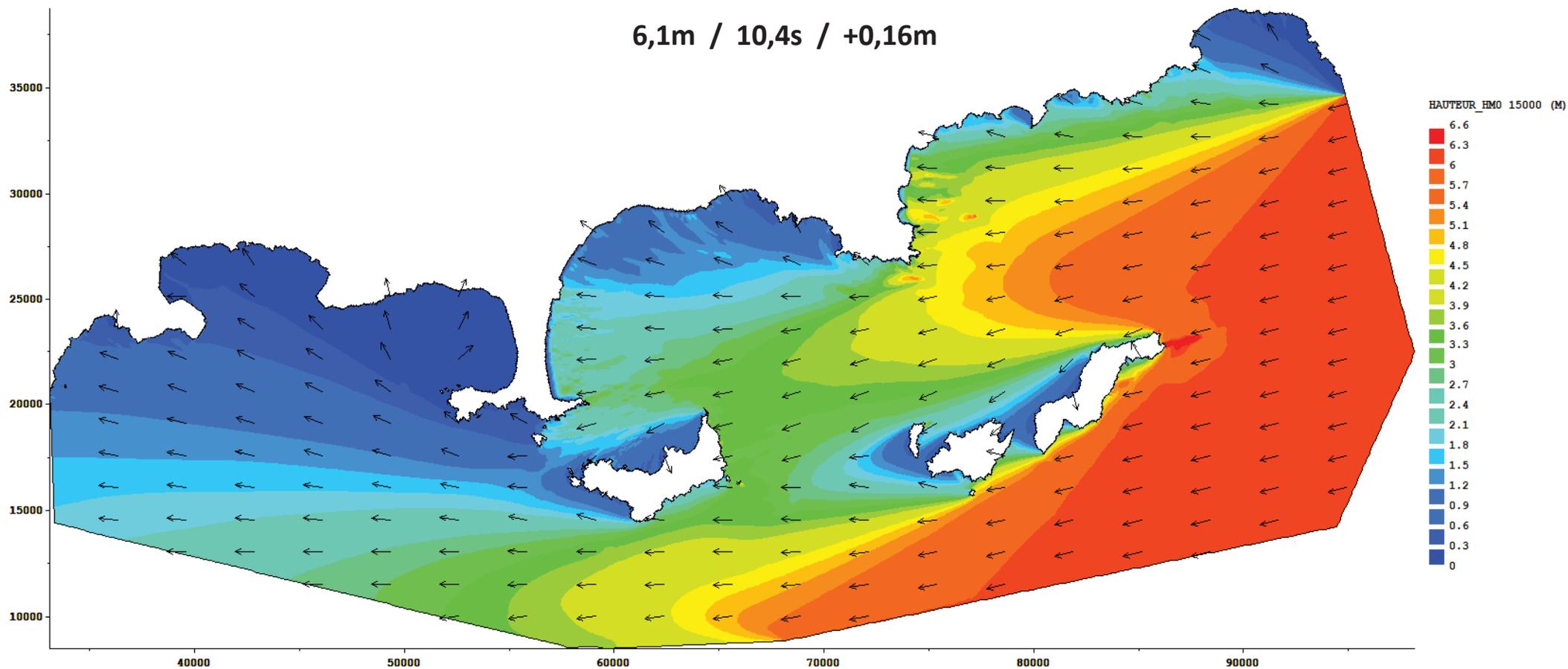
4,0m / 8,5s / +0,16m



Zoom sur la zone d'étude

CAS 13 – Houle 50 ans ENE (75°N)

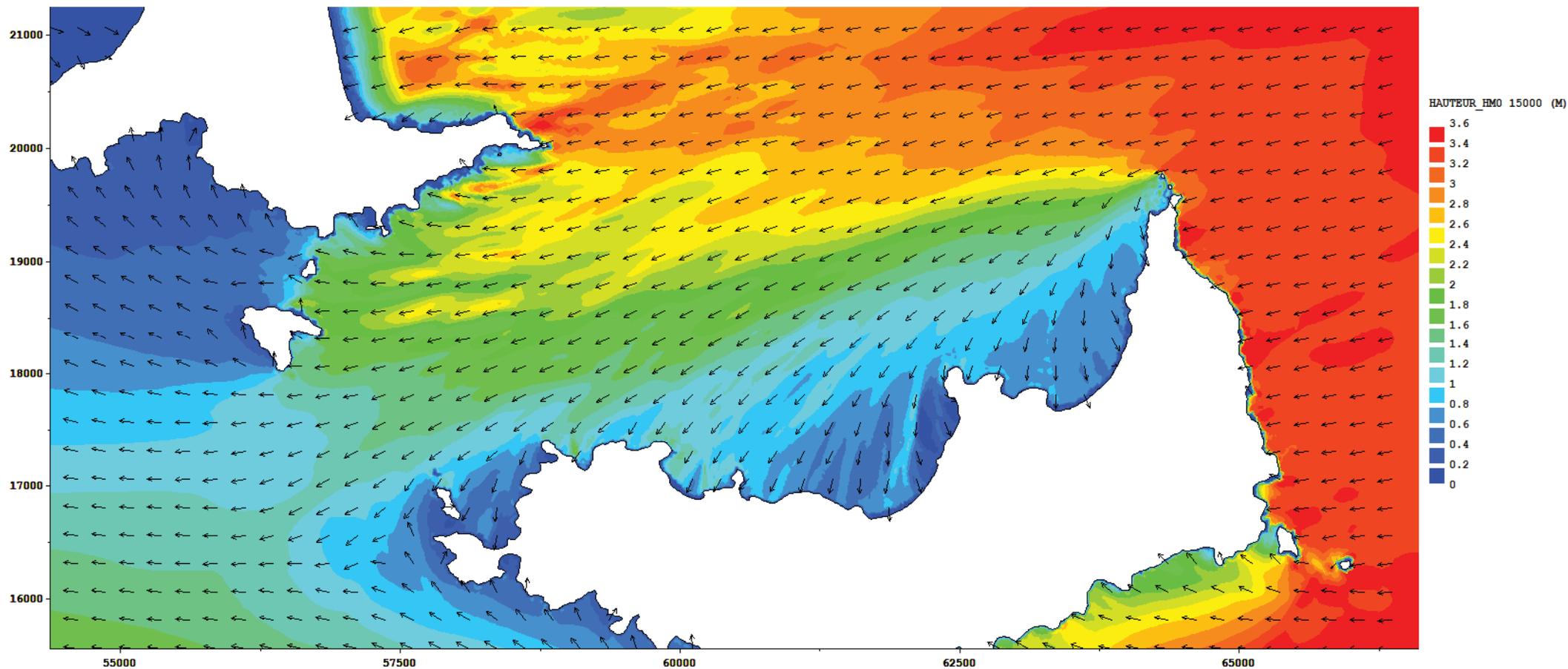
6,1m / 10,4s / +0,16m



Vue globale

CAS 13 – Houle 50 ans ENE (75°N)

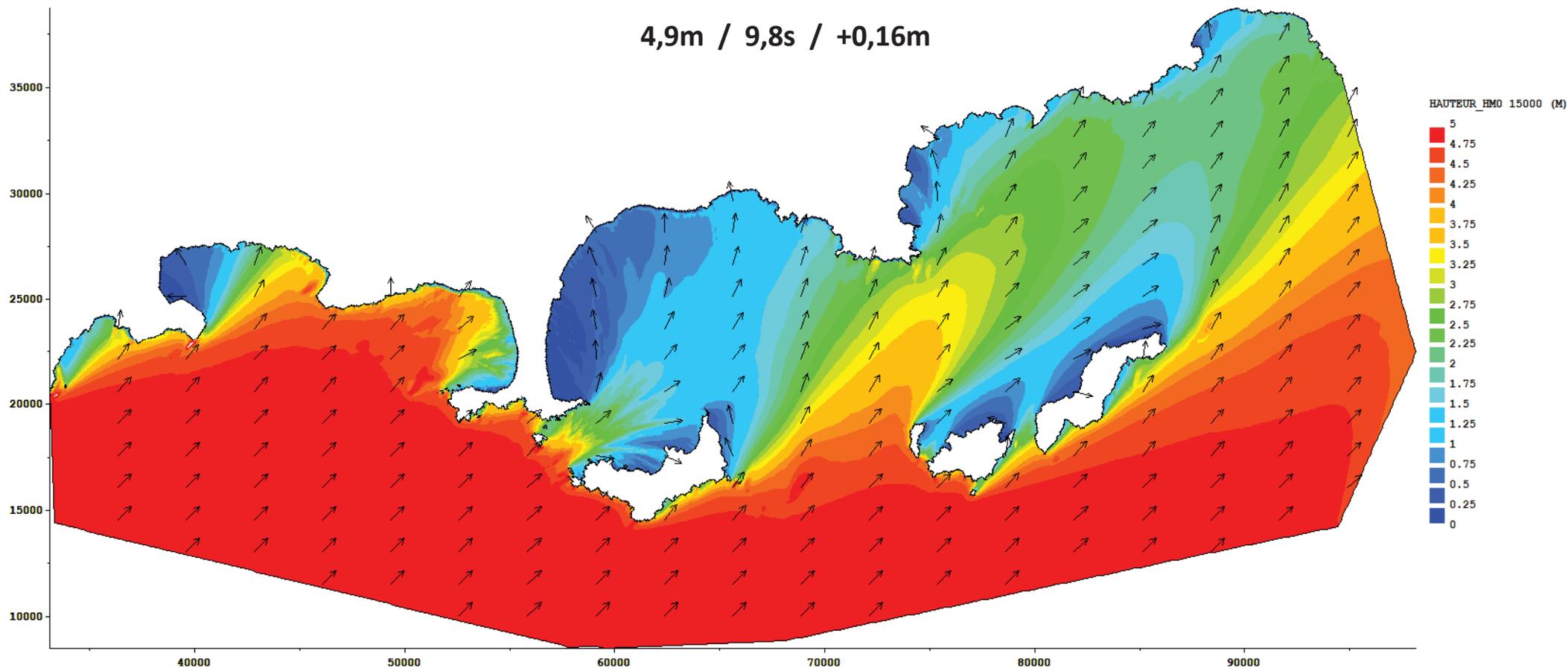
6,1m / 10,4s / +0,16m



Zoom sur la zone d'étude

CAS 14 – Houle 50 ans SO (225°N)

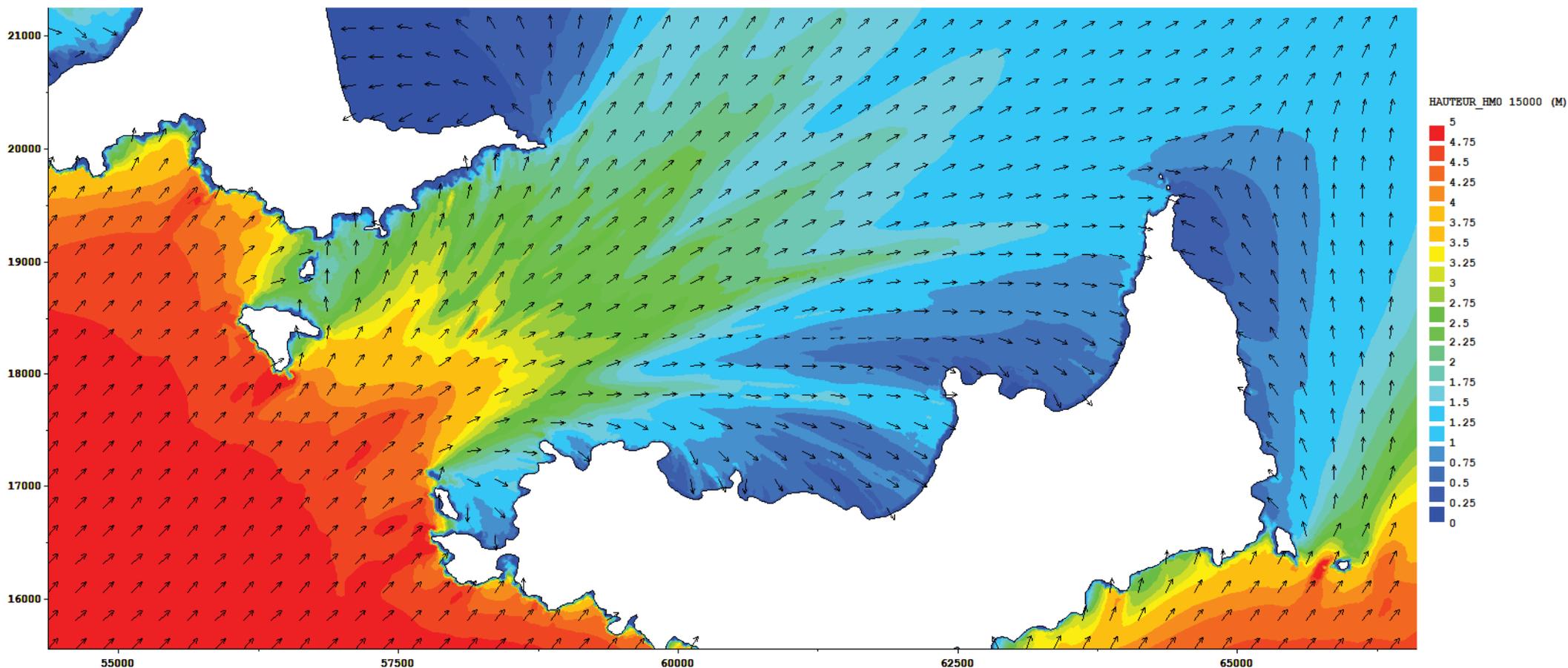
4,9m / 9,8s / +0,16m



Vue globale

CAS 14 – Houle 50 ans SO (225°N)

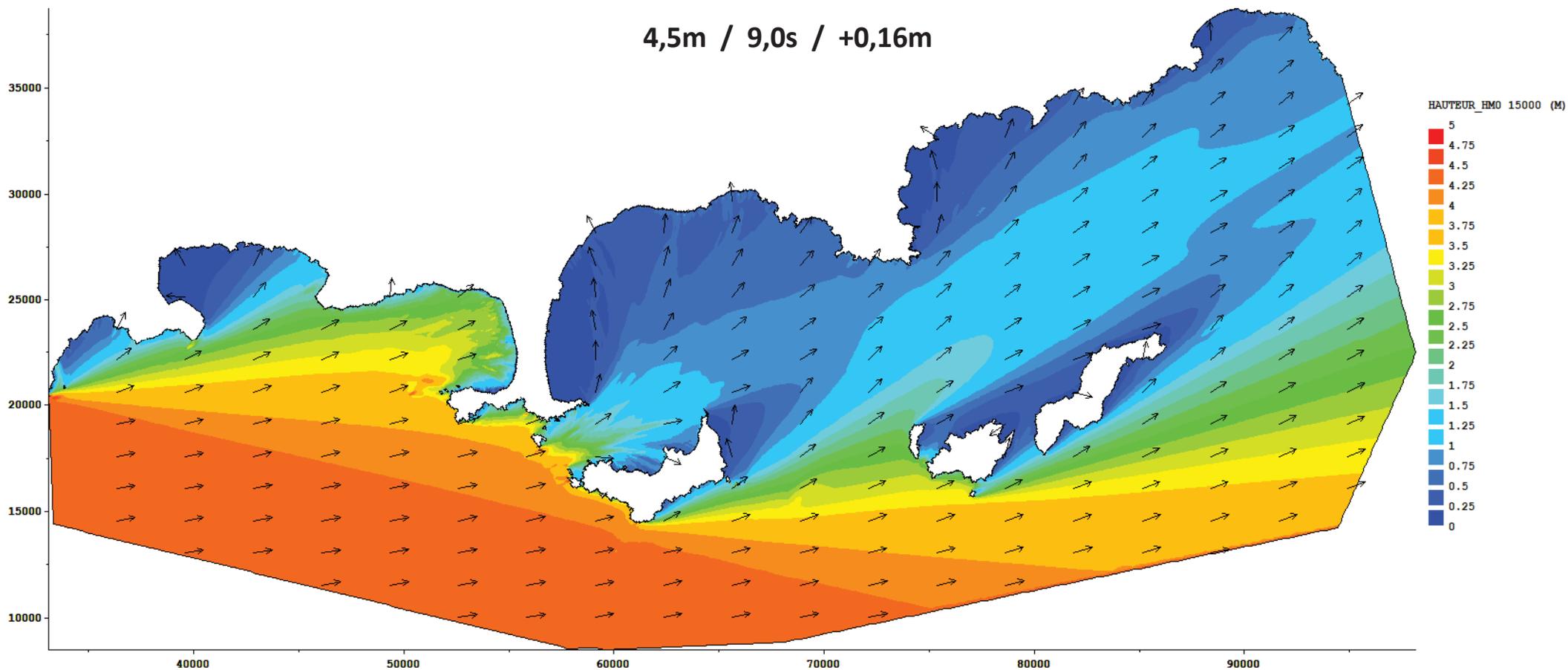
4,9m / 9,8s / +0,16m



Zoom sur la zone d'étude

CAS 15 – Houle 50 ans O (260°N)

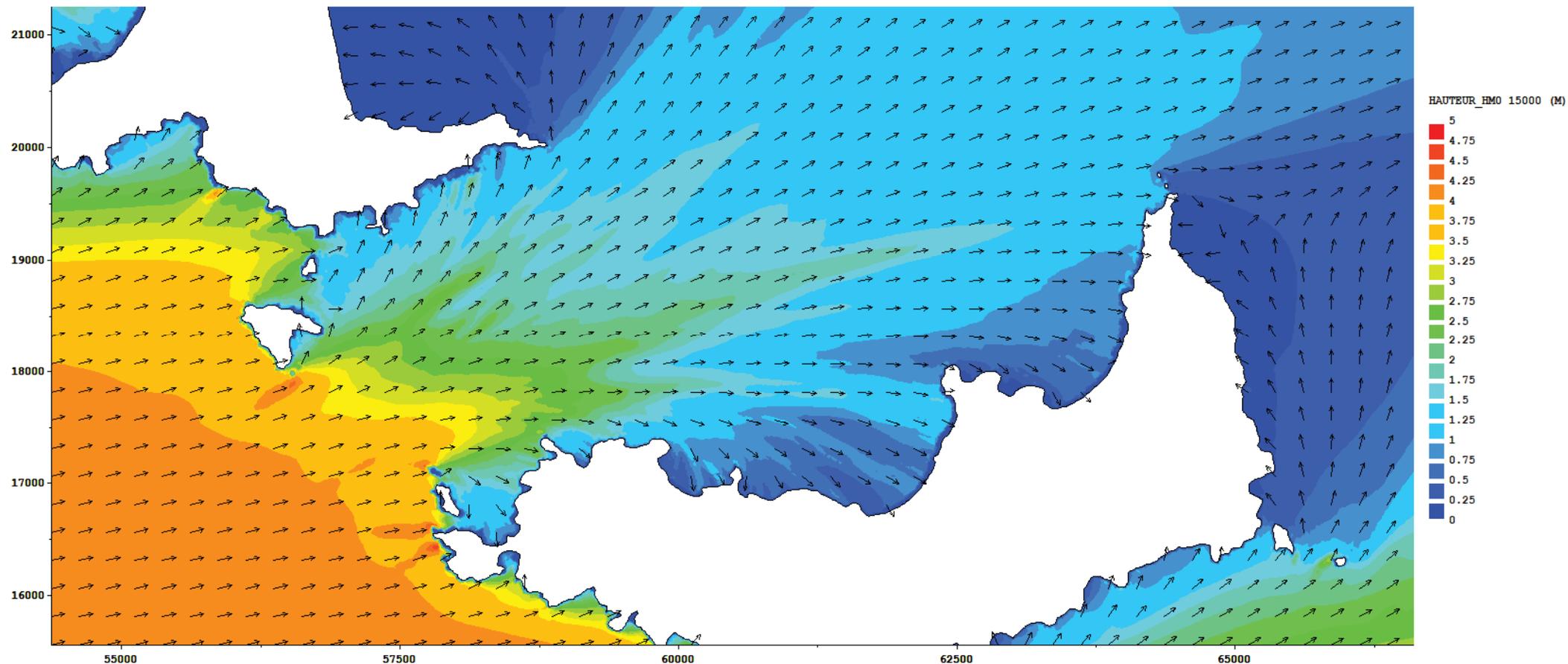
4,5m / 9,0s / +0,16m



Vue globale

CAS 15 – Houle 50 ans O (260°N)

4,5m / 9,0s / +0,16m



Zoom sur la zone d'étude

