



DEPARTEMENT DE LA REUNION

COMMUNE DE SAINT-LEU

MAITRE D'OUVRAGE



## Extension du port de Saint-Leu

# AVANT-PROJET

Notice technique Annexe N°1

## Étude d'agitation sur modèle numérique

GROUPEMENT DE MAITRISE D'OEUVRE

Mandataire : 

DIRECTION OCEAN INDIEN  
ANCIENNE USINE DE LA MARE  
BAT. A - 1er ETAGE - N°6  
7, RUE ANDRE LARDY  
97438 SAINT-MARIE  
Tél : 02 62 20 34 75  
Fax : 02 62 41 82 77  
e.mail : launion.egis-reunion@egis.fr

Cotraitants :



MODIFICATIONS	INDICES	DATE	OBSERVATIONS	Emetteur / Réf.interne	Réalisé par :	Vérifié par :
	0	16.04.2010				Ph.S



Extension du port de  
Saint-Leu

Modélisation numérique  
-  
Etude d'agitation

MGC 96202L

Avril 2010



- Etudes générales
- Assistance au Maître d'Ouvrage
- Maîtrise d'œuvre conception
- Maîtrise d'œuvre travaux
- Formation

Siège social  
78, allée John Napier  
CS 89017  
34965 - Montpellier Cedex 2

Tél. : 04 67 99 22 00  
Fax : 04 67 65 03 18  
montpellier.egis-eau@egis.fr  
<http://www.egis-eau.fr>

## TABLE DES MATIERES

---

<b>1. OBJET DE L’ETUDE</b>	<b>3</b>
<b>2. DONNEE OCEANO-CLIMATIQUES</b>	<b>4</b>
<b>2.1. RECUEIL DES DONNEES</b>	<b>4</b>
<b>2.2. DONNEES DE HOULES</b>	<b>5</b>
2.2.1. Les différentes houles à la Réunion	5
2.2.2. Houles cycloniques	5
2.2.3. Houles australes	6
<b>2.3. LES NIVEAUX D’EAU</b>	<b>6</b>
<b>3. DESCRIPTION DES PLANS MASSES MODELISES</b>	<b>8</b>
<b>3.1. ETAT ACTUEL</b>	<b>8</b>
<b>3.2. ETAT PROJET</b>	<b>8</b>
<b>3.3. ETAT PROJET 2</b>	<b>9</b>
<b>4. MODELISATIONS</b>	<b>10</b>
<b>4.1. PRESENTATION DU MODELE D’AGITATION</b>	<b>10</b>
4.1.1. Emprise du modèle et présentation du maillage	10
4.1.2. Conditions aux limites	13
<b>4.2. ANALYSE DES RESULTATS DES MODELISATIONS D’AGITATIONS</b>	<b>14</b>
4.2.1. Agitations admissibles	14
4.2.2. Analyses des résultats	15
<b>4.3. ANALYSE DES RESONANCES PORTUAIRE</b>	<b>17</b>
4.3.1. Introduction	17
4.3.2. Calcul des périodes propres du lagon	18
4.3.3. Calcul des périodes propres du port	19
4.3.4. Comparaison entre les périodes propres du lagon et du bassin	20
4.3.5. Modélisations	21
<b>5. CONCLUSION</b>	<b>23</b>

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1 : Localisation géographique du port de Saint-Leu .....	3
Figure 2 : Rose des vents – station étang salé – Pont Mathurin (22m) (source : Météofrance) .....	4
Figure 3 : Plan de l’état actuel.....	8
Figure 4 : Plan de l’état projet .....	9
Figure 5 : Plan de l’état projet 2 .....	9
Figure 6 : Maillage du modèle d’agitation .....	11
Figure 7 : Bathymétrie du modèle d’agitation .....	12
Figure 8 : Oscillation du plan d’eau portuaire liée aux variations du niveau d’eau dans le lagon en cas de fortes houles .....	18
Figure 9 : Position des points de calcul de la résonance.....	21

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Statistiques de houles cycloniques (régimes extrêmes).....	5
Tableau 2 : Statistiques de houles australes (régimes extrêmes).....	6
Tableau 3 : Hauteur de la marée astronomique à la Pointe des Galets.....	6
Tableau 4 : Exemple de décompositions des niveaux d’eau de projet.....	7
Tableau 5 : Niveaux associé aux houles cycloniques .....	7
Tableau 6 : Niveaux d’eau associés aux houles australes .....	7
Tableau 7 : Liste des états de mer modélisés .....	13
Tableau 8 : Coefficients de réflexion des limites solides du modèle d’agitation.....	14

## 1. OBJET DE L’ETUDE

---

### ▪ OBJET DE LETUDE

La Commune de Saint-Leu souhaite étendre son port et profiter de se projet pour le réaménager et le moderniser.

Afin de connaître les hauteurs de houle aux abords des futurs ouvrages de protection et l’agitation résiduelle dans le nouveau bassin portuaire et définir les conditions de mise en œuvre de pontons flottants, Egis Eau a réalisé une étude d’agitation sur modèle numérique.

### ▪ PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE

Le Port de Saint Leu se situe sur la côte Sud-Ouest de l’île de la Réunion et présente un platier corallien qui le protège des fortes houles comme le montre la figure suivante :

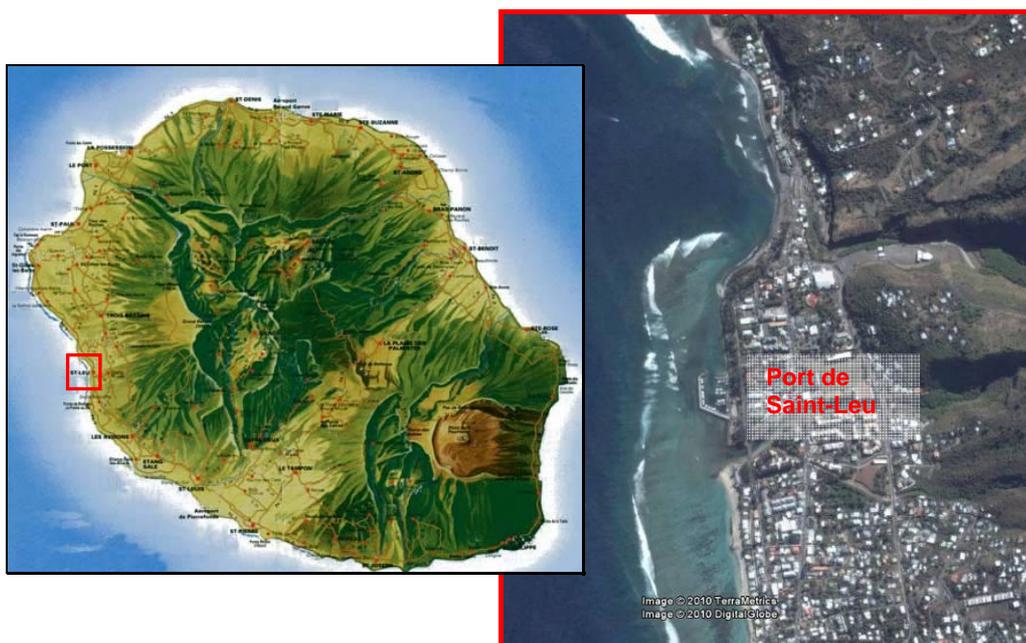


Figure 1 : Localisation géographique du port de Saint-Leu

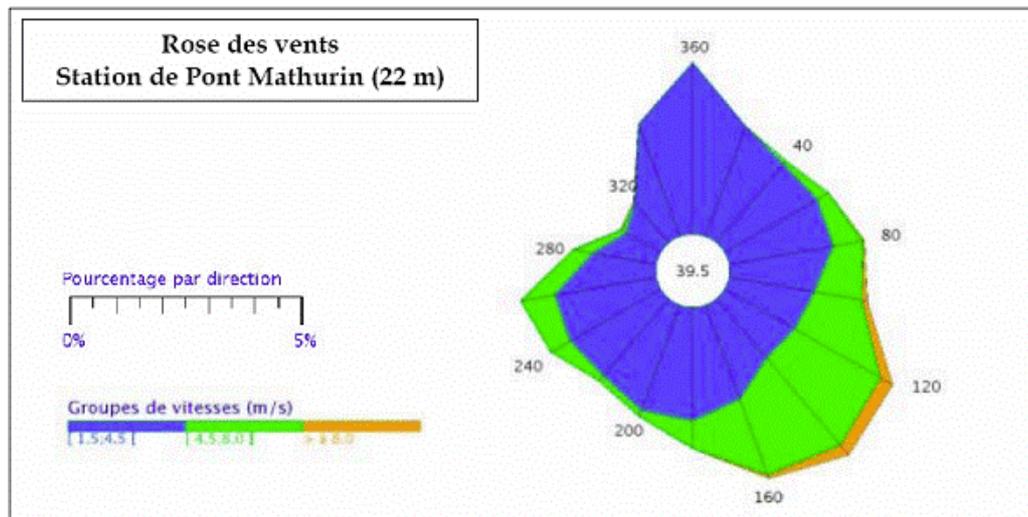
## 2. DONNEE OCEANO-CLIMATIQUES

### 2.1. Recueil des données

Les données de **houle** disponibles dans la zone d'étude sont :

- les données de houles issues de l'étude pour la réalisation de la Nouvelle Liaison Saint-Denis Ouest (NLSDO) réalisée par Egis Eau en 2007 pour le compte de la DDE 974.
- L'analyse statistique des données d'enregistrement du houlographe de Saint-Pierre.

La donnée de **vent** disponible est la rose des vents de la station Météo France de l'Etang Salé - Pont Mathurin.



**Figure 2 : Rose des vents – station étang salé – Pont Mathurin (22m)  
(source : Météofrance)**

La dominance des alizés d'Est à Sud-Est est nette sur cette station. Ces vents sont générés par l'anticyclone des Mascareignes, principalement durant l'hiver austral. Leurs vitesses dépassent rarement les 8 m/s.

Les brises maritimes diurnes en provenance de l'Ouest et du Sud-Ouest sont également représentées avec des vitesses inférieures à 8 m/s.

Les vents de secteur Nord à Nord-Est sont assez fréquents mais de faible intensité (<5m/s). Ces conditions sont rencontrées durant l'été austral.

Le pourcentage de calmes est relativement important (39,5 %).

**L'ouverture du port au Nord et l'analyse des données de vents (orientation et force) montrent qu'il ne s'agit pas du facteur dimensionnant pour la protection contre les agitations résiduelles du bassin.**

## 2.2. Données de houles

### 2.2.1. Les différentes houles à la Réunion

Il existe trois principaux régimes de houle à la Réunion :

- les houles d’alizés,
- les houles australes,
- les houles cycloniques

**Les houles d’alizés** de secteurs Est Nord-Est à Sud-Est sont générées par des vents réguliers (« les alizés ») provenant des mêmes directions, elles présentent généralement des périodes courtes à moyennes ;

**Les houles australes** de secteurs Sud à Sud-Ouest sont issues des fortes tempêtes qui se produisent dans le grand sud : (40<sup>ème</sup> rugissants), elles présentent des périodes longues ;

**Les houles cycloniques** sont générées par les cyclones qui passent à proximité de la Réunion. Les caractéristiques de ces houles évoluent en fonction de la position du cyclone et de sa proximité par rapport à l’île. Ce sont généralement des houles de hauteurs importantes présentant des périodes moyennes à longues.

La position du port de Saint-Leu le protège des houles d’alizés provenant du Nord de l’île. Les houles d’alizées en provenance du Sud de la Réunion sont également fortement atténuées lorsqu’elles parviennent jusqu’à la zone d’étude. **Les houles les plus représentatives sont donc les houles australes et les houles cycloniques.**

Dans le cadre du projet de la nouvelle liaison Saint-Denis Ouest, Egis Eau a réalisé une étude complète afin de déterminer les caractéristiques des houles cycloniques et australes pour des périodes de retour de 5 à 100 ans.

### 2.2.2. Houles cycloniques

Les houles cycloniques définies dans le cadre l’étude citée précédemment (Egis Eau / DHI,2007) sont les suivantes :

Période de retour	Hauteur de houle ( $H_s$ )	Période de la houle ( $T_p$ )
5 ans	6.5 m	12.6 s
10 ans	8.5 m	13.4 s
25 ans	11.7 m	14.7 s
50 ans	13.1 m	15.2 s
100 ans	15.1 m	16 s

**Tableau 1 : Statistiques de houles cycloniques (régimes extrêmes)**

### 2.2.3. Houles australes

Les enregistrements du houlographe de Saint-Pierre ont permis de faire une analyse statistique partielle des houles australes dans le secteur sud-ouest de l’île, à proximité de la côte.

Les données de houles recueillies s’étalent de juin 2000 à mai 2007 soit 7 ans de données. Mais ces données sont parfois incomplètes et la durée réelle des enregistrements est de 5 ans et 10 mois.

Les statistiques de houles réalisées ont permis de dresser le tableau suivant associant le paramètre de hauteur significative à une période de retour en années :

Période de retour	Hauteur de houle ( $H_s$ )	Période de la houle ( $T_p$ )
5 ans	5.7 m	15 s
10 ans	5.95 m	15 s
25 ans	6.35 m	15 s
50 ans	6.75 m	17 s
100 ans	6.9 m	17 s

**Tableau 2 : Statistiques de houles australes (régimes extrêmes)**

La méthode statistique utilisée est la méthode POT (Peak Over Treshold) et la loi statistique d’ajustement retenue est une Distribution Généralisée de Pareto (cf. Annexe 1).

Compte tenu de la durée d’enregistrement des données, les valeurs des hauteurs extrapolées pour des périodes de retour supérieures à 20 ans doivent être prises avec réserves.

Les houles retenues pour réaliser ces statistiques sont uniquement les houles apparues durant l’hiver austral (période d’occurrence des houles australes et absence de cyclones).

## 2.3. Les niveaux d’eau

Les niveaux d’eau sont la combinaison de la marée astronomique, des différents phénomènes océano-météorologiques tels que : la pression atmosphérique, le vent et le phénomène d’ensachage du lagon devant le port de Saint-Leu.

- La marée :

	Pleine Mer (m)/NH	Basse Mer (m)/NH
vives eaux exceptionnelles	+0.95	+0.05
vives eaux	+0.70	+0.30
mortes eaux	+0.60	+0.40

**Tableau 3 : Hauteur de la marée astronomique à la Pointe des Galets**

Ces valeurs sont données en référence NH (Niveau Hydrographique, ou CM Cote Marine) dont le zéro correspond au niveau des plus basses mers des marées astronomiques. Ce zéro se situe, à la Réunion, 0.525 m sous le nivellement de référence terrestre NGR (Nivellement Général de la Réunion).

- Décomposition des niveaux d'eau :

Qualificatif Niveau	Niveau de la mer (m NGR)	Marée astronomique (m NGR)	Surcote cyclonique (m)	Surélévation du niveau des océans (m)
<b>Moyen</b>	1,0	0,2	0,3	0,5
<b>Moyen+</b>	1,2	0,3	0,4	0,5
<b>Haut</b>	1,7	0,3	0,9	0,5

**Tableau 4 : Exemple de décompositions des niveaux d'eau de projet**

- **NIVEAUX D’EAU ASSOCIES AUX HOULES CYCLONIQUES :**

Période de retour	Niveaux d'eau (/NGR)
<b>5 ans</b>	<b>1 m</b>
<b>10 ans</b>	<b>1 m</b>
<b>25 ans</b>	<b>1.2 m</b>
<b>50 ans</b>	<b>1.2 m</b>
<b>100 ans</b>	<b>1.7 m</b>

**Tableau 5 : Niveaux associé aux houles cycloniques**

- **NIVEAUX D’EAU ASSOCIES AUX HOULES AUSTRALES :**

Période de retour	Niveau d'eau (/NGR)	Marée (m/NGR)	Ensachage (estimé)	Elévation du niveau des océans <sup>1</sup>
<b>5 ans</b>	<b>1 m</b>	<i>0.45 m</i>	<i>0.55 m</i>	/
<b>10 ans</b>	<b>1 m</b>	<i>0.45 m</i>	<i>0.55 m</i>	/
<b>25 ans</b>	<b>1 m</b>	<i>0.45 m</i>	<i>0.55 m</i>	/
<b>50 ans</b>	<b>1.15 m</b>	<i>0.45 m</i>	<i>0.55 m</i>	<i>0.15 m</i>
<b>100 ans</b>	<b>1.5 m</b>	<i>0.45 m</i>	<i>0.55 m</i>	<i>0.5 m</i>

**Tableau 6 : Niveaux d'eau associés aux houles australes**

<sup>1</sup> Elévations estimées du niveau des océans basées sur les conclusions de l’IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2007.

### 3. DESCRIPTION DES PLANS MASSES MODELISES

Trois plans masses du port de Saint-Leu ont été modélisés :

- L’état actuel ;
- L’état projet ;
- L’état projet 2.

Une description de chacun est présentée ci-dessous.

#### 3.1. Etat actuel

L’état actuel représente le port de Saint-Leu tel qu’il est construit à ce jour. Cette modélisation permet de valider les résultats sur la base des observations de site et de la connaissance des agitations qui touchent le plan d’eau.

L’état actuel sert également d’état de référence pour les comparaisons avec les états aménagés.



Figure 3 : Plan de l’état actuel

#### 3.2. Etat projet

L’état projet représente le port de Saint-Leu avec un agrandissement de la partie Sud du bassin jusqu’à la ravine.

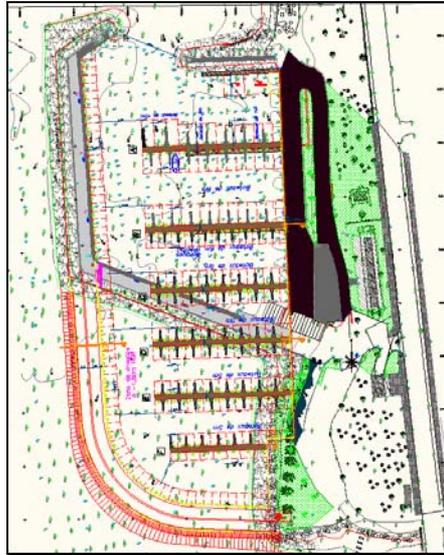


Figure 4 : Plan de l'état projet

### 3.3. Etat projet 2

L'état projet 2 correspond à une adaptation du précédent projet afin de réduire l'agitation dans le port.

Les modifications suivantes ont été apportées :

- un talus en enrochements (100-500 Kg, pente 3/2) en fond de quai Est (perte de 3 places),
- un rallongement de 5.5 m du musoir de la digue de protection.



Figure 5 : Plan de l'état projet 2

## 4. MODELISATIONS

---

### 4.1. Présentation du modèle d'agitation

L'étude d'agitation est réalisée avec le logiciel **ARTEMIS** qui permet de modéliser la propagation des vagues et l'agitation résiduelle dans les zones portuaires en prenant en compte la réfraction, la réflexion et la diffraction.

Ce logiciel fait partie de la plate-forme TELEMAC®.

ARTEMIS est basé sur la résolution complète des équations de houle (équation elliptique de Berkhoff), il n'est pas limité sur le nombre de réflexions ou de diffractions sur les ouvrages côtiers et portuaires.

Il est utilisé pour calculer les champs de vagues en combinant les effets de réfraction, diffraction, réflexion sur de petits domaines semi-fermés (baie, avant-port, etc.). Il est donc particulièrement bien adapté au calcul des agitations dans les ports et à la recherche de résonances (seiches).

Les principaux avantages d'ARTEMIS sont :

- La possibilité de travailler en houle monochromatique monodirectionnelle ou au contraire en houle aléatoire multidirectionnelle,
- L'utilisation d'un maillage en éléments finis qui permet de modéliser les détails des zones d'intérêt et les zones où il y a une rapide variation des fonds,
- La prise en compte de la réfraction, du shoaling, de la diffraction, de la réflexion, du frottement sur les fonds et du déferlement,
- La souplesse d'utilisation, en particulier le maillage de calcul est indépendant des directions des houles.

#### 4.1.1. Emprise du modèle et présentation du maillage

Le modèle d'agitation s'étend jusqu'à des profondeurs de -160 mètres à plus de 2000 mètres vers le large et sur plus de 3 000 mètres du Nord au Sud.

Le maillage est composé de plus de 40 000 mailles. La taille des mailles est fonction de la bathymétrie.

La figure suivante présente la bathymétrie et le maillage élaborée pour le modèle d'agitation :

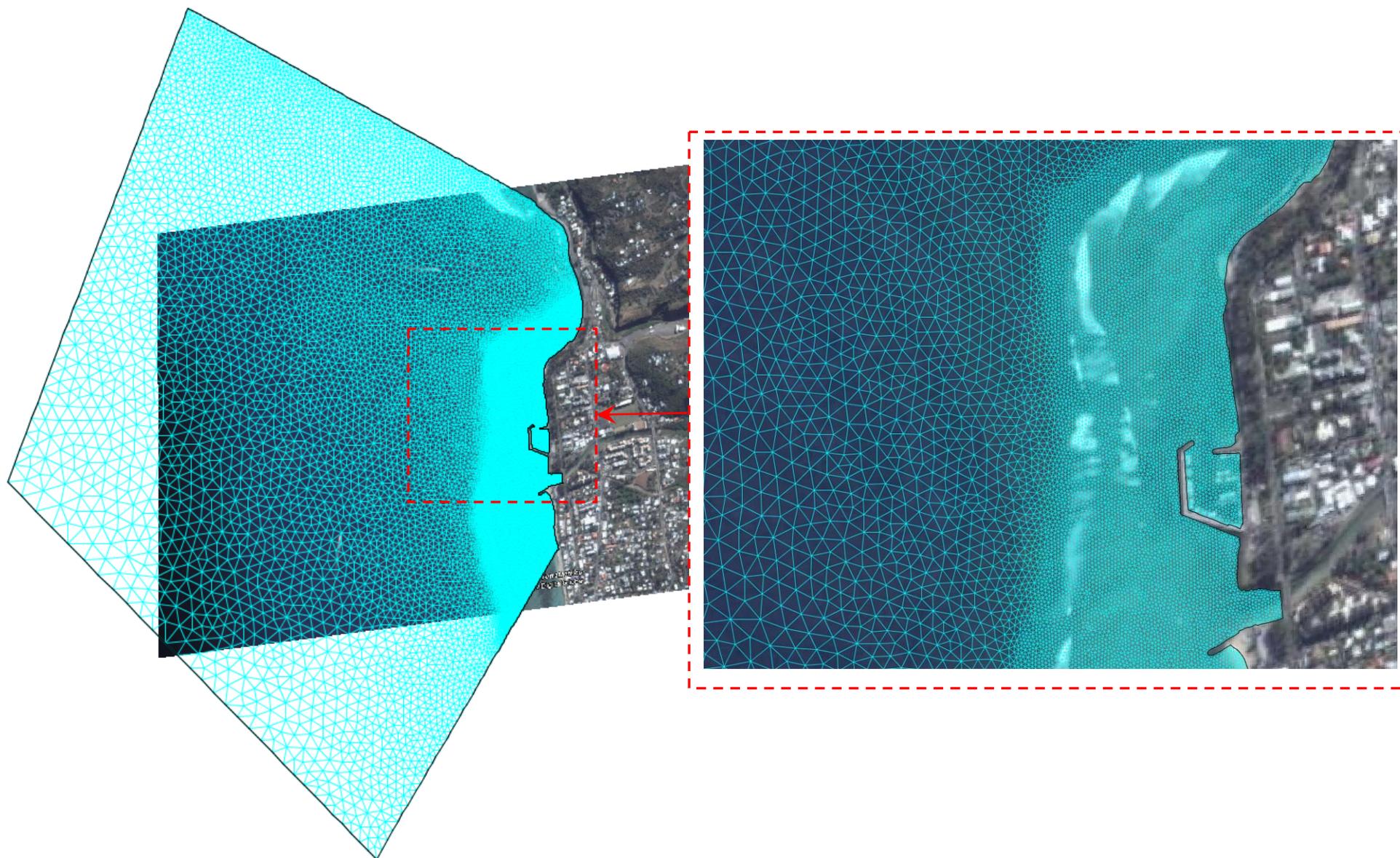


Figure 6 : Maillage du modèle d’agitation

Commune de Saint-Leu  
Extension du port de Saint-Leu – Etude d’agitation

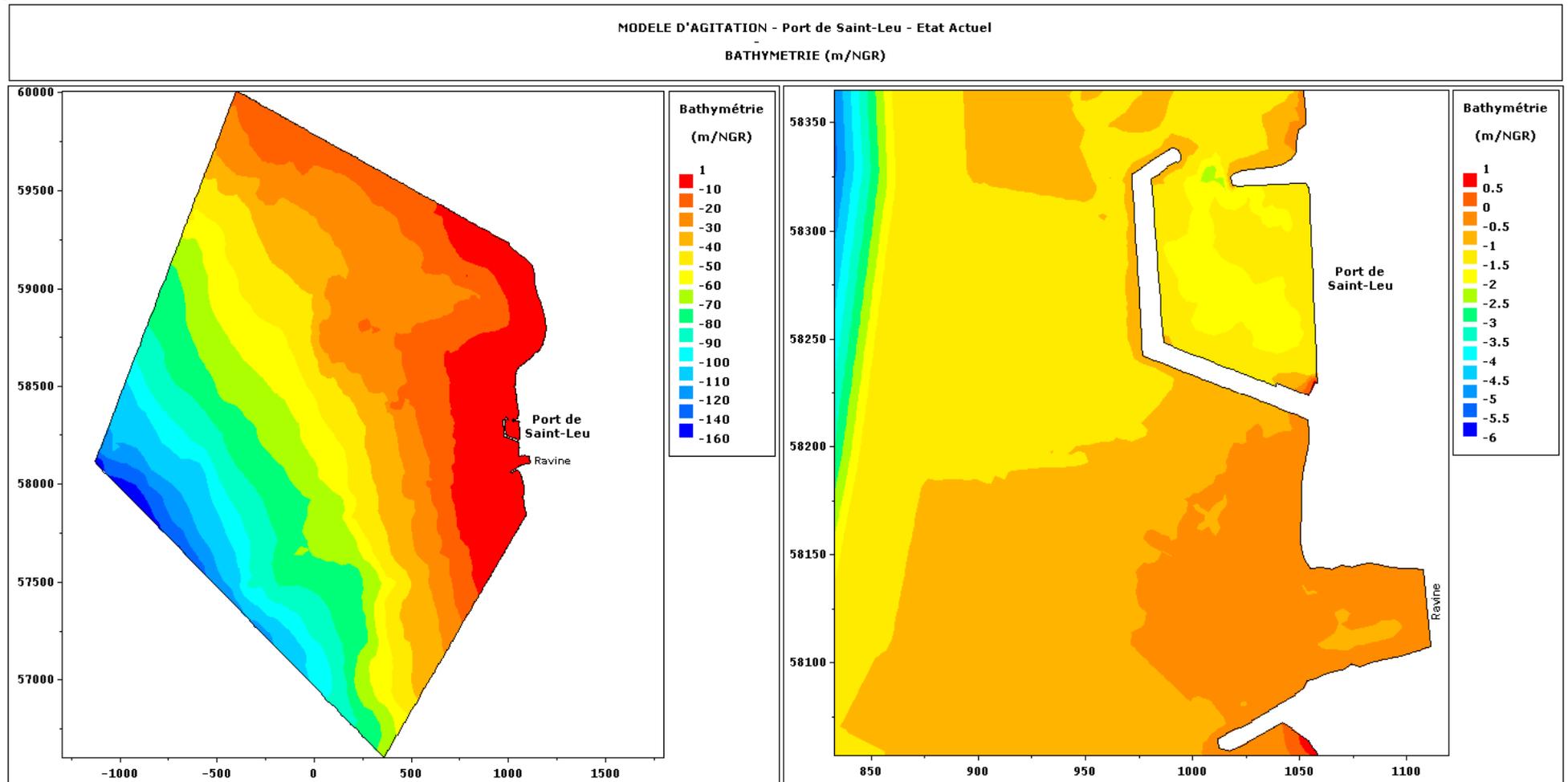


Figure 7 : Bathymétrie du modèle d’agitation

#### 4.1.2. Conditions aux limites

▪ **FRONTIERES LIQUIDES**

Les **houles** introduites aux limites du modèle d’agitation sont les suivantes :

	Période de retour	Hauteur (H <sub>s</sub> )	Période (T <sub>p</sub> )	Niveau d’eau (m/NGR)
<b>Houles australes</b>	5 ans	5.7 m	15 s	1 m
	10 ans	5.95 m	15 s	1 m
	25 ans	6.35 m	15 s	1 m
	50 ans	6.75 m	17 s	1.15 m
	100 ans	6.9 m	17 s	1.5 m
<b>Houles cycloniques</b>	5 ans	6.5 m	12.6 s	1 m
	10 ans	8.5 m	13.4 s	1 m
	25 ans	11.7 m	14.7 s	1.2m
	50 ans	13.1 m	15.2 s	1.2 m
	100 ans	15.1 m	16 s	1.7 m

**Tableau 7 : Liste des états de mer modélisés**

Par précaution, les niveaux d’eau retenus sont des niveaux d’eau hauts car ils sont les plus pénalisants.

Les **modélisations** de houles sont complétées par des recherches de période de mise en **résonance** du port à l’état actuel et dans les états projets. Ces essais consistent à un balayage des périodes entre 0 et 200 secondes avec un pas de 0.5 secondes afin de mettre en évidence une réponse « anormale » du plan d’eau à une période donnée. Des calculs sur la base de formules empiriques ont également été réalisés.

▪ **FRONTIERES SOLIDES**

Chaque limite solide est représentée par un coefficient de réflexion lui correspondant.

Le potentiel réfléchissant des différents types d’ouvrages (quai vertical, talus en enrochement, plage) est variable en fonction de son inclinaison, du matériau de construction (béton, enrochements, sable, etc.).

Le tableau suivant présente les valeurs des coefficients de réflexion utilisées dans le modèle d’agitation :

Type de limite	Coefficient de réflexion
Quai droit	95 %
Talus en enrochements > 2T fortement exposé à la houle	35%
Talus en enrochements < 2T faiblement exposé à la houle	50%
Talus en enrochements < 2T faiblement exposé à la houle	60%
Cale de mise à l’eau	20 %
Plage inclinée (sable grossier)	15 %

**Tableau 8 : Coefficients de réflexion des limites solides du modèle d’agitation**

## 4.2. Analyse des résultats des modélisations d’agitations

Les représentations graphiques des résultats des modélisations sont présentées en Annexe 2.

Les modélisations ont été réalisées pour l’état actuel et deux états projet. L’état actuel sert de validation du modèle numérique et également d’état de référence.

### 4.2.1. Agitations admissibles

#### ▪ POUR LES BATEAUX :

Les agitations admissibles généralement admises dans un port de plaisance sont :

	Hs
Confort	0.2 - 0.3 m
Sécurité	0.45 m
maximum	0.6. m

(source : AIPCN, STCPMVN)

#### ▪ POUR LES PONTONS :

Le « guide de conception des pontons de plaisance » préconise une hauteur d’agitation annuelle inférieure à 0.30 m. Les pontons peuvent toutefois supporter des clapots de 1 m d’amplitude au maximum mais les bateaux, au-delà de 40 à 50 cm de clapots, risquent de toser contre les appontements.

On retiendra :

→ Une agitation maximale de 0.5m pour les bateaux,

→ Une agitation maximale de 1 m pour les pontons.

## 4.2.2. Analyses des résultats

### 4.2.2.1. Etat actuel

#### ▪ HOULES AUSTRALES :

Les résultats en houles australes montrent des agitations résiduelles de l'ordre de 0.30 m admissibles pour les pontons et les bateaux pour des périodes de retour inférieures à 50 ans.

La houle de période de retour de 50 et 100 ans présentent respectivement des agitations qui peuvent atteindre 0.6 à 0.8 m et 0.8 à 1.0 m principalement localisées sur les postes Sud et Ouest contre la digue.

#### ▪ HOULES CYCLONIQUES :

Les résultats en houles cycloniques montrent des agitations résiduelles de l'ordre de 0.30 m admissibles pour les pontons et les bateaux pour des périodes de retour inférieures à 25 ans.

Les houles de périodes de retour de 25 ans et 50 ans présentent des agitations pouvant atteindre 0.6 à 0.8 m principalement sur les postes Sud et Ouest contre la digue.

La houle cyclonique centennale génère des agitations qui peuvent atteindre 1 à 1.2 m principalement localisées sur les postes Sud et Ouest contre la digue.

**→ Sur l'ensemble des modélisations, la majorité de la moitié Est du plan d'eau portuaire présente des agitations qui ne dépassent pas 0.6 m.**

### 4.2.2.2. Etat projet

#### ▪ HOULES AUSTRALES :

Les résultats en houles australes montrent des agitations résiduelles de l'ordre de 0.30 m admissibles pour les pontons et les bateaux pour des périodes de retour inférieures à 50 ans.

La houle de période de retour de 50 ans et 100 ans présentent respectivement des agitations pouvant atteindre 0.2 à 0.6 m et 0.4 à 0.8 m sur la plus grande partie du plan d'eau.

Des agitations de 0.8 à 1 m et 1 à 1.2 m, localisées dans l'angle Sud-Est du bassin et sur les postes Ouest, sont respectivement présentes pour les houles cinquantennales et centennales.

#### ▪ HOULES CYCLONIQUES :

Les résultats en houles cycloniques montrent des agitations résiduelles de l'ordre de 0.30 m admissibles pour les pontons et les bateaux pour des périodes de retour inférieures à 25 ans.

Les houles de période de retour de 50 ans et 100 ans présentent respectivement des agitations pouvant atteindre 0.2 à 0.6 m et 0.4 à 1.0 m sur la plus grande partie du plan d'eau.

Des agitations de 0.8 à 1 m et 1.0 m à 1.5 m, localisées dans l'angle Sud-Est du bassin, apparaissent respectivement pour les houles cinquantennales et centennales.

→ Sur l'ensemble des modélisations, la majorité de la moitié Est du plan d'eau portuaire présente des agitations qui ne dépassent pas 0.6 m, excepté en houle cyclonique centennale.

#### 4.2.2.3. Etat projet 2

##### ▪ HOULES AUSTRALES :

Les résultats des houles australes montrent des agitations résiduelles admissibles (de l'ordre de 0.30 m) pour les pontons les bateaux. La houle cinquantennale présente des agitations de 0.5 m localement et 0.6 à 0.8 m dans l'angle Sud-Est du bassin

Seule la houle centennale présente des agitations pouvant atteindre 0.6 à 0.8 m localisées dans le Sud-Est du bassin et localement au Sud-Ouest de la passe d'entrée.

##### ▪ HOULES CYCLONIQUES :

Les résultats des houles australes montrent des agitations résiduelles admissibles (de l'ordre de 0.30 m) pour les pontons les bateaux. La houle cinquantennale présente des agitations de 0.5 m localement et 0.6 à 0.8 m dans l'angle Sud-Est du bassin

Seule la houle centennale présente des agitations pouvant atteindre 0.6 à 0.8 m localisées dans le Sud-Est du bassin et localement au Sud-Ouest de la passe d'entrée.

→ Sur l'ensemble des modélisations, la majorité de la moitié Est du plan d'eau portuaire présente des agitations qui ne dépassent pas 0.6 m excepté pour la houle cyclonique centennale.

#### 4.2.2.4. Conclusion

Les résultats des modélisations de l'agitation portuaires montrent que les projets d'aménagements offre une protection équivalente ou meilleure que celle du port actuel.

Les projets modélisés offre une agitation résiduelle très acceptable jusqu'à des houles de période de retour cinquantennales. Au-delà certaines zones du port peuvent dépasser 0.5m d'agitation résiduelle mais cela reste localisé le plus souvent dans l'angle Sud-Est du bassin.

→ Des deux états projetés, le « projet 2 » présente des agitations légèrement inférieures. Il sera privilégié car les pontons flottants et la plupart des équipements portuaires ont une meilleure durabilité dans un plan d'eau plus calme.

## 4.3. Analyse des résonances portuaire

### 4.3.1. Introduction

Le phénomène de résonance dans les ports de petite à moyenne taille peut être associé à la houle elle-même ou à la propagation d’ondes de longue période appelées ondes infragravitaires, découvertes seulement en 1949 et qui restent encore mal connues.

Un port peut être considéré comme une masse d’eau enfermée qui possède une forme et un volume propres et qui constitue un système oscillant possédant une période naturelle d’oscillation. Cette période et ses harmoniques constituent les modes d’oscillation du système. Si la masse d’eau est soumise à l’incidence d’une onde dont la période correspond à l’une de ces périodes caractéristiques, le système entre en résonance et l’amplitude de l’oscillation ne cesse de croître jusqu’à ce que les mécanismes hydrodynamiques de dissipation établissent un équilibre. Dans la réalité le couplage entre l’oscillation dans le port et l’oscillation du plan d’eau extérieur est de courte durée.

Le phénomène de résonance donne lieu à des oscillations de plus ou moins grande amplitude qui excèdent rarement le mètre. Les plus gros dysfonctionnements sont dus aux courants puissants et alternatifs générés par l’onde stationnaire, qui soumettent les embarcations à un mouvement de va-et-vient provoquant l’usure rapide voire la cassure des amarres.

Les lagons sont particulièrement soumis à des oscillations du niveau d’eau de grande période associées au déferlement des houles sur la barrière (phénomène d’ensachage, remplissage et vidange du lagon). Le port de Saint-Leu subit actuellement les conséquences de ces oscillations.

Le lagon a lui-même ses périodes propres d’oscillation qu’il convient de calculer et de comparer à celles du bassin portuaire.



Figure 8 : Oscillation du plan d’eau portuaire liée aux variations du niveau d’eau dans le lagon en cas de fortes houles

#### 4.3.2. Calcul des périodes propres du lagon

Les périodes propres du lagon sont calculées sur la base de la formule empirique suivante :

$$T_n = \frac{4l_B}{(2n+1)\sqrt{gd}}$$

- où :
- $T_n$  : période propre de résonance du bassin,
  - $l_B$  : longueur du bassin,
  - $n$  : nombre de nœud ( $n=0,1,2,3 \dots$ ),
  - $g$  : accélération de la pesanteur ( $9.81\text{m.s}^{-2}$ ),
  - $d$  : profondeur du bassin.

Les valeurs calculées sont présentées ci-dessous :

<b>LAGON</b>	Largeur du lagon ≈ 272 m
	Hauteur d'eau considérée 2.4 m ( <i>bathy. 1.4m + 1 marée/surcote</i> )
Mode fondamental (1 nœud)	224 s
Deuxième ordre (2 nœuds)	75 s
Troisième ordre (3 nœuds)	45 s
Quatrième ordre (4 nœuds)	32 s
Cinquième ordre (5 nœuds)	25 s
Sixième ordre (6 nœuds)	20 s
Septième ordre (7 nœuds)	17 s
Huitième ordre (8 nœuds)	13.2 s

Les périodes propres du lagon sont calculées en ordres de grandeur qui doivent être comparés avec ceux des périodes propres du port dans son état actuel et surtout dans son état futur.

### 4.3.3. Calcul des périodes propres du port

Les périodes propres du lagon sont calculées sur la base de la formule empirique suivante :

$$T_n = \frac{2l_B}{n\sqrt{gd}}$$

- où :
- $T_n$  : période propre de résonance du bassin,
  - $l_B$  : longueur du bassin,
  - $n$  : nombre de nœud ( $n=1,2,3 \dots$ ),
  - $g$  : accélération de la pesanteur ( $9.81\text{m.s}^{-2}$ ),
  - $d$  : profondeur du bassin.

Les valeurs calculées sont présentées ci-dessous :

<b>ACTUEL</b>	Longueur du bassin = 90 m	Largeur du bassin = 70 m
Mode fondamental (1 nœud)	34 s	27 s
Deuxième ordre (2 nœuds)	17 s	13 s
Troisième ordre (3 nœuds)	11 s	9 s

*Hauteur d'eau considérée : 2.8 m (bathy 1.8m + surcote+marée 1m)*

<b>PROJET &amp; PROJET 2</b>	Longueur du bassin = 165 m	Largeur du bassin = 70 m
Mode fondamental (1 nœud)	63 s	27 s
Deuxième ordre (2 nœuds)	31 s	13 s
Troisième ordre (3 nœuds)	21 s	9 s

*Hauteur d'eau considérée : 2.8 m (bathy 1.8m + surcote+marée 1m)*

La hauteur d'eau peut faire varier les valeurs des fréquences propres de résonance du bassin. Cette hauteur d'eau est variable en fonction de la combinaison de la marée, des conditions atmosphériques et de l'ensachage du lagon.

Les valeurs calculées sont donc des valeurs indicatives des périodes d'oscillation propres du bassin portuaire. Elles peuvent également être comparées entre état actuel et états projets.

#### **4.3.4. Comparaison entre les périodes propres du lagon et du bassin**

Le port et le lagon présentent des périodes propres communes (pour des modes d'oscillation différents bien sûr). Celles du lagon sont toutefois des périodes propres de quatrième ordre à septième ordre, ce qui augmente les incertitudes associées à l'occurrence d'une résonance commune.

Même s'ils sont de courtes durées, on peut toutefois penser que des couplages peuvent avoir lieu (résonances très ponctuelles dans le temps) générant les phénomènes parfois violent de remplissage et de vidange du bassin portuaire.

### 4.3.5. Modélisations

Les résultats des modélisations de mise en résonance du port sont présentés en Annexe 2.

#### METHODOLOGIE :

Les résultats se présentent sous la forme de graphiques qui donnent le pourcentage d’agitation par rapport à la houle du large en quatre points dans le bassin portuaire.

La position des points est choisie pour permettre de mettre en évidence une oscillation dans le sens longitudinal et transversal du plan d’eau. Les figures suivantes présentent la position des points pour l’état actuel et projet :

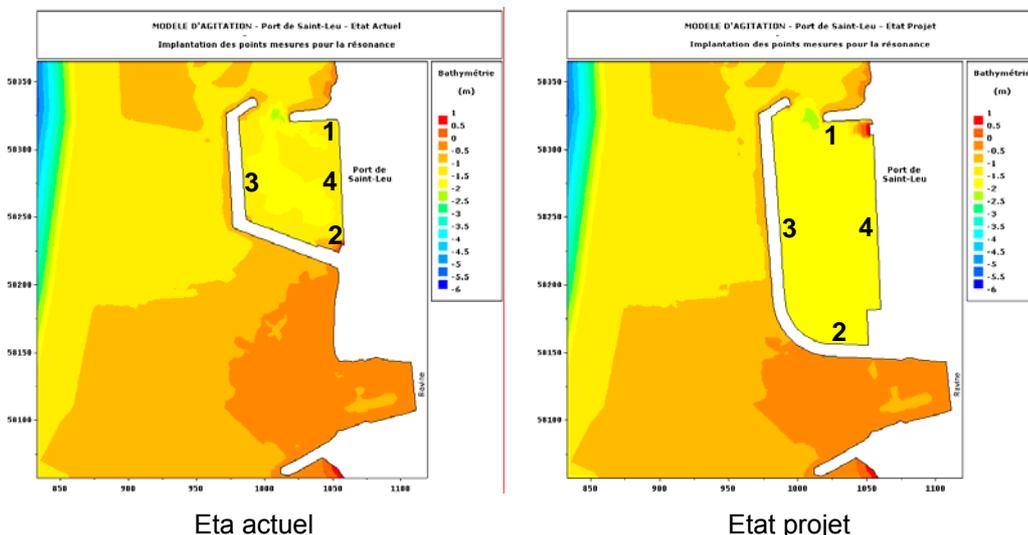


Figure 9 : Position des points de calcul de la résonance

#### RESULTATS :

Les résultats des modélisations de la recherche de mise en résonance du port de Saint-Leu **actuel** montrent que certaines périodes telles que : 20 s, 23s et 34 s génèrent des excitations du bassin portuaire.

Dans l’état **projet**, les résultats des modélisations montrent que des périodes de l’ordre de 20 s génèrent des excitations du bassin portuaire.

Dans l’état **projet 2**, les résultats des modélisations montrent que des périodes de l’ordre de 20 s génèrent des excitations du bassin portuaire.

Sur l’ensemble des périodes modélisées, l’état projet 2 montre des réponses du plan d’eau aux agitations extérieures inférieures à celles observées pour l’état actuel et à l’état projet.

Les résultats des modélisations et la localisation très particulière du port de Saint-Leu à l’intérieur d’un petit lagon montrent que le port peut être mis en mouvement par des ondes de longues périodes pouvant exister. Toutefois, les observations faites sur site ne permettent pas de conclure à un véritable phénomène de résonance mais plutôt à

des mouvements de remplissage et de vidange du plan d’eau portuaire (l’oscillation ne se répète généralement pas plusieurs fois à des amplitudes croissantes).

Ces oscillations du niveau d’eau dans le bassin portuaire sont directement liées aux celles du lagon qui sont provoquées par le déferlement des trains de houles (généralement australes ou cycloniques) qui arrivent par « séries » et remplissent de façon irrégulière le lagon. Entre chaque série, le niveau d’eau sur le platier baisse à nouveau entraînant la vidange du port.

## 5. CONCLUSION

---

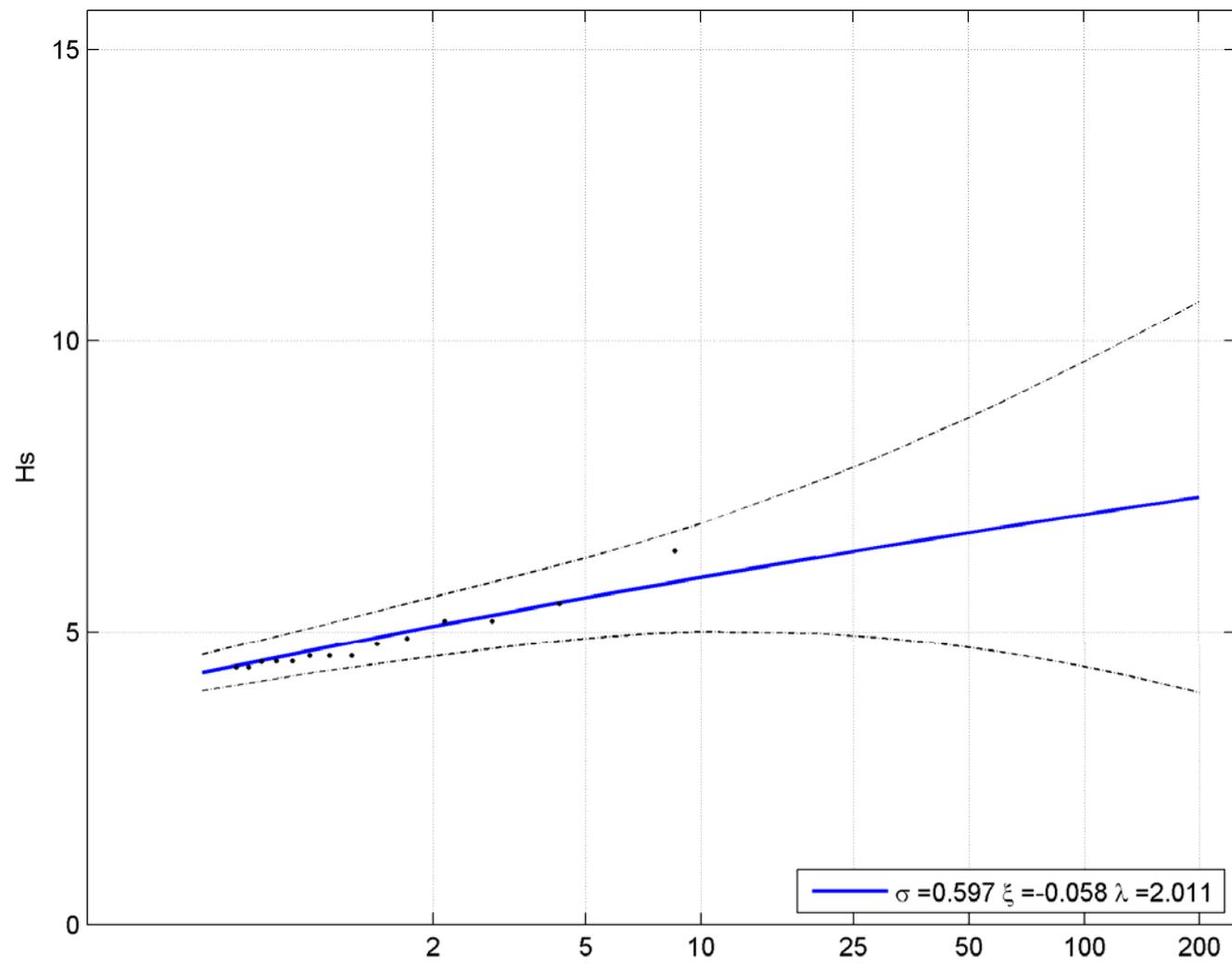
Les modélisations ont permis d’analyser l’agitation dans le port de Saint-Leu dans l’état actuel et dans deux états projets.

Les résultats des modélisations montrent que **l’état projet 2** avec un allongement de la digue de protection d’environ 5 m et le remplacement sur une vingtaine de mètres d’un quai par un talus en enrochements à l’Est en fond de bassin présente une protection satisfaisante contre les houles.

Les deux états projetés ne présentent pas de sensibilité particulière aux ondes longues. Les résultats de l’état projet 2 montrent même une réponse moins importante aux ondes longues que dans l’état actuel et l’état projet.

## **ANNEXES**

**ANNEXE N°1**  
**Loi d'ajustement – Période de retour, houllographe de**  
**Saint-Pierre**

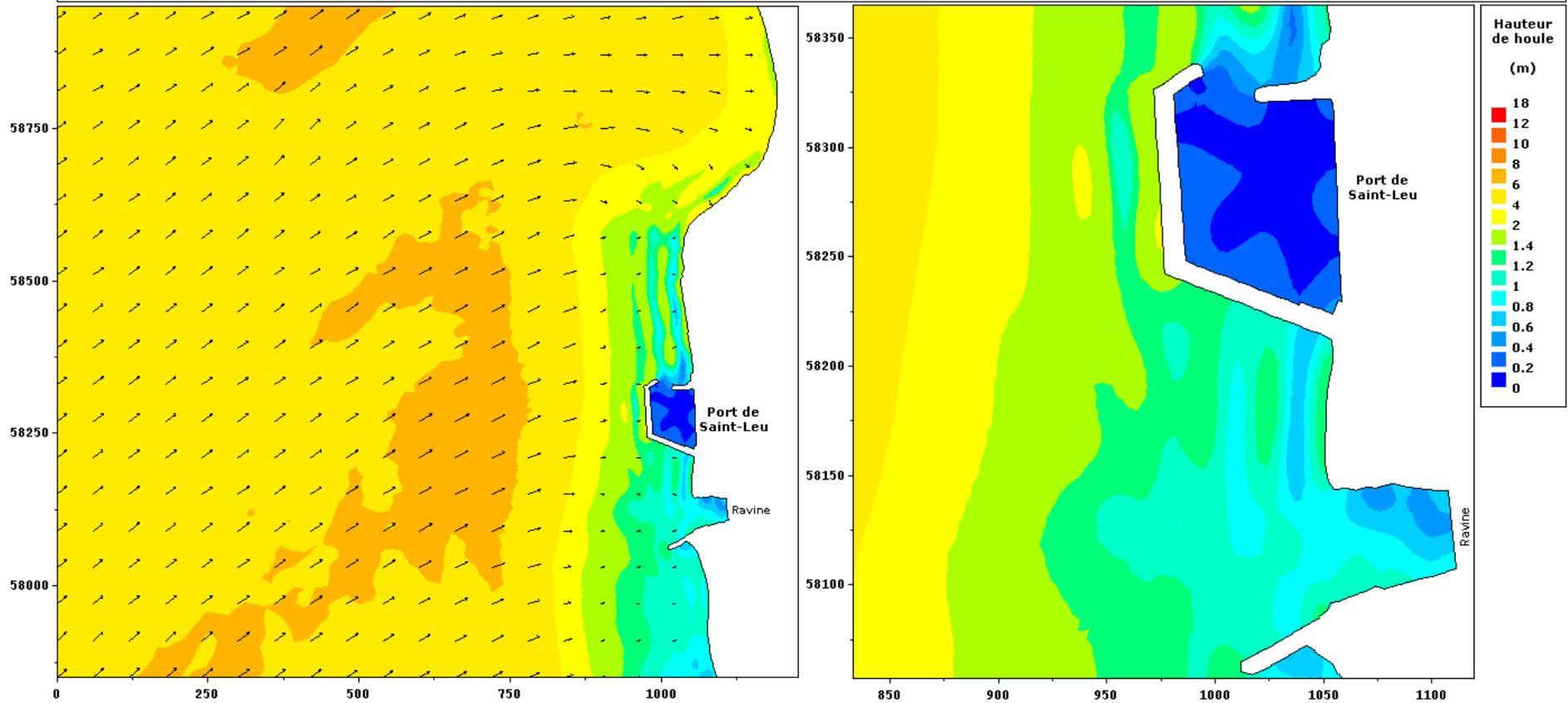


**ANNEXE N°2**  
**Résultats des modélisations**

**ETAT ACTUEL**

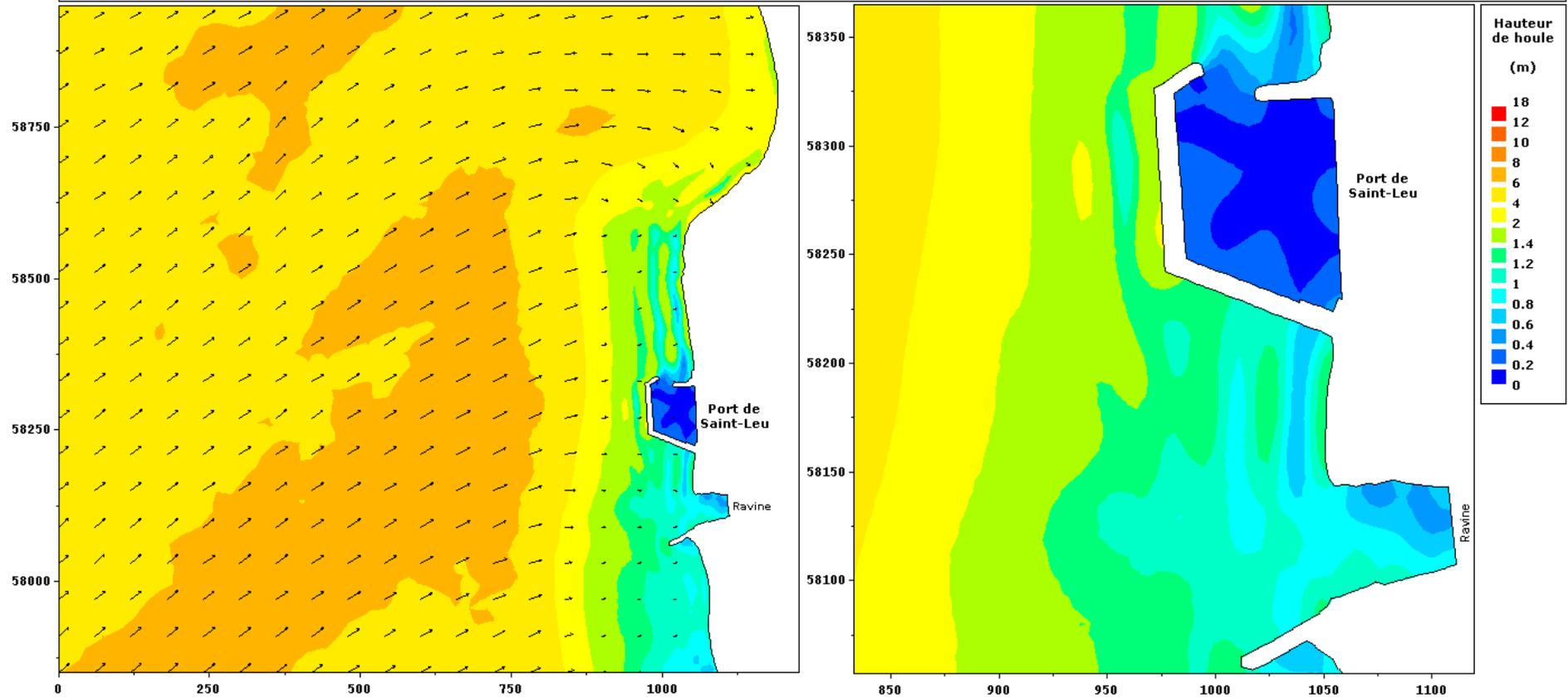
MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Actuel

Houle australe SW (225° Nord), Tretour=5ans, Hs=5.7m, Tp=15s, Niveau d'eau=+1m/NGR



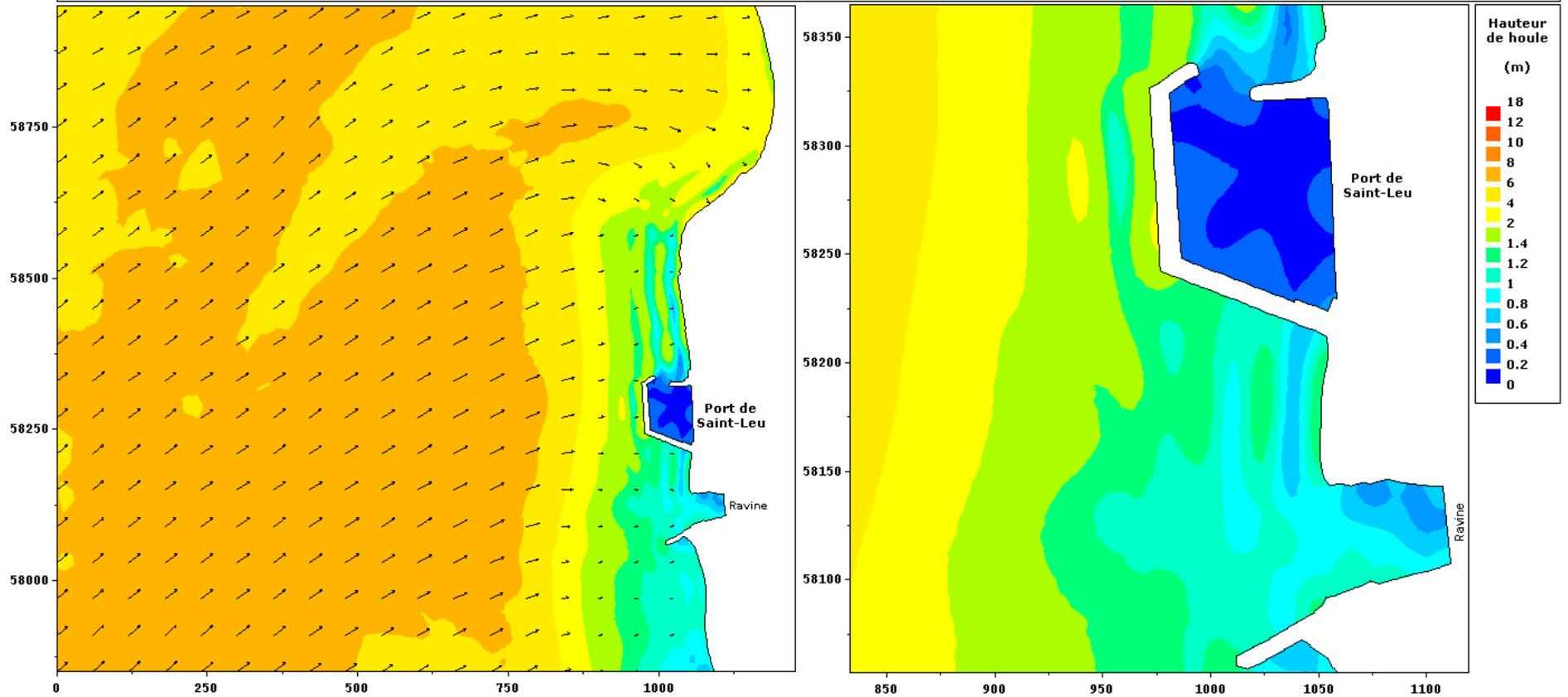
MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Actuel

Houle australe SW (225° Nord), Tretour=10ans, Hs=5.95m, Tp=15s, Niveau d'eau=+1m/NGR



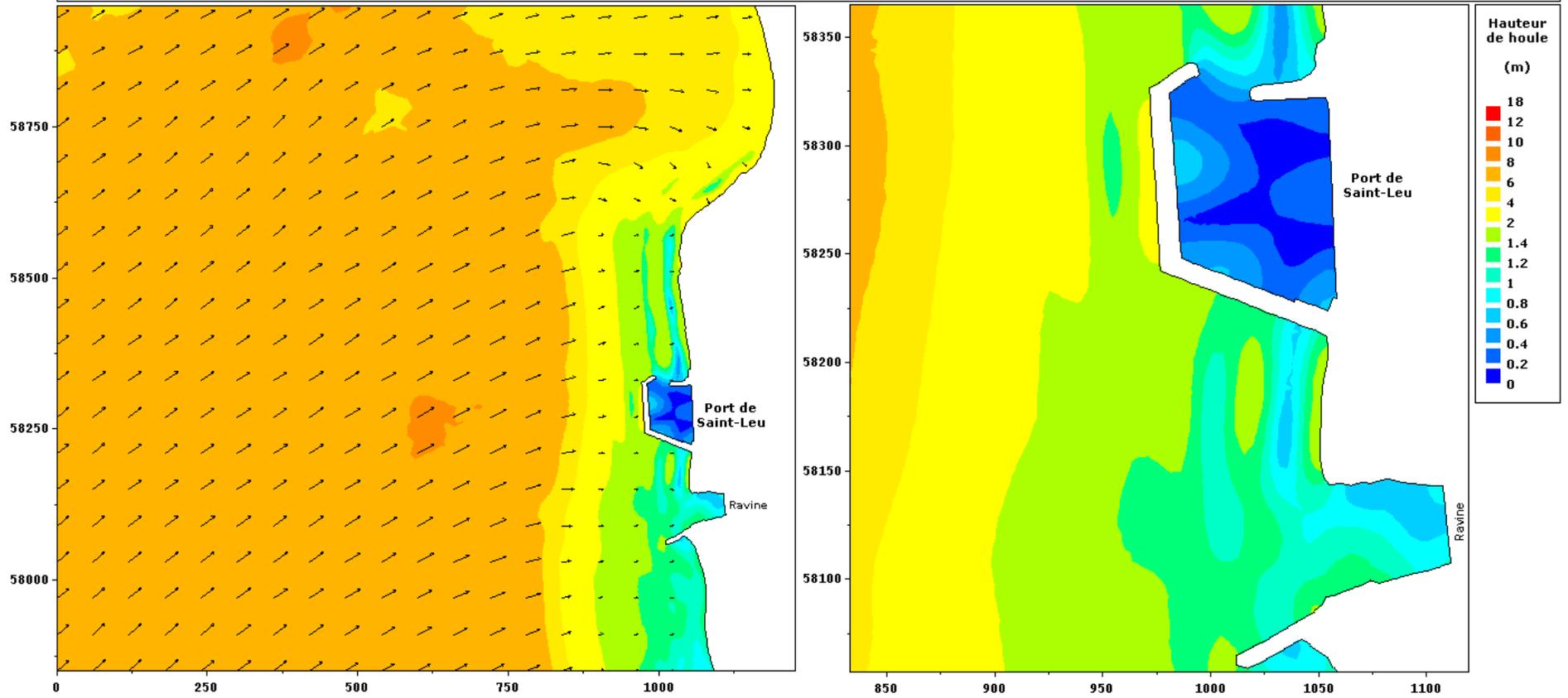
MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Actuel

Houle australe SW (225° Nord), Tretour=25ans, Hs=6.35m, Tp=15s, Niveau d'eau=+1m/NGR

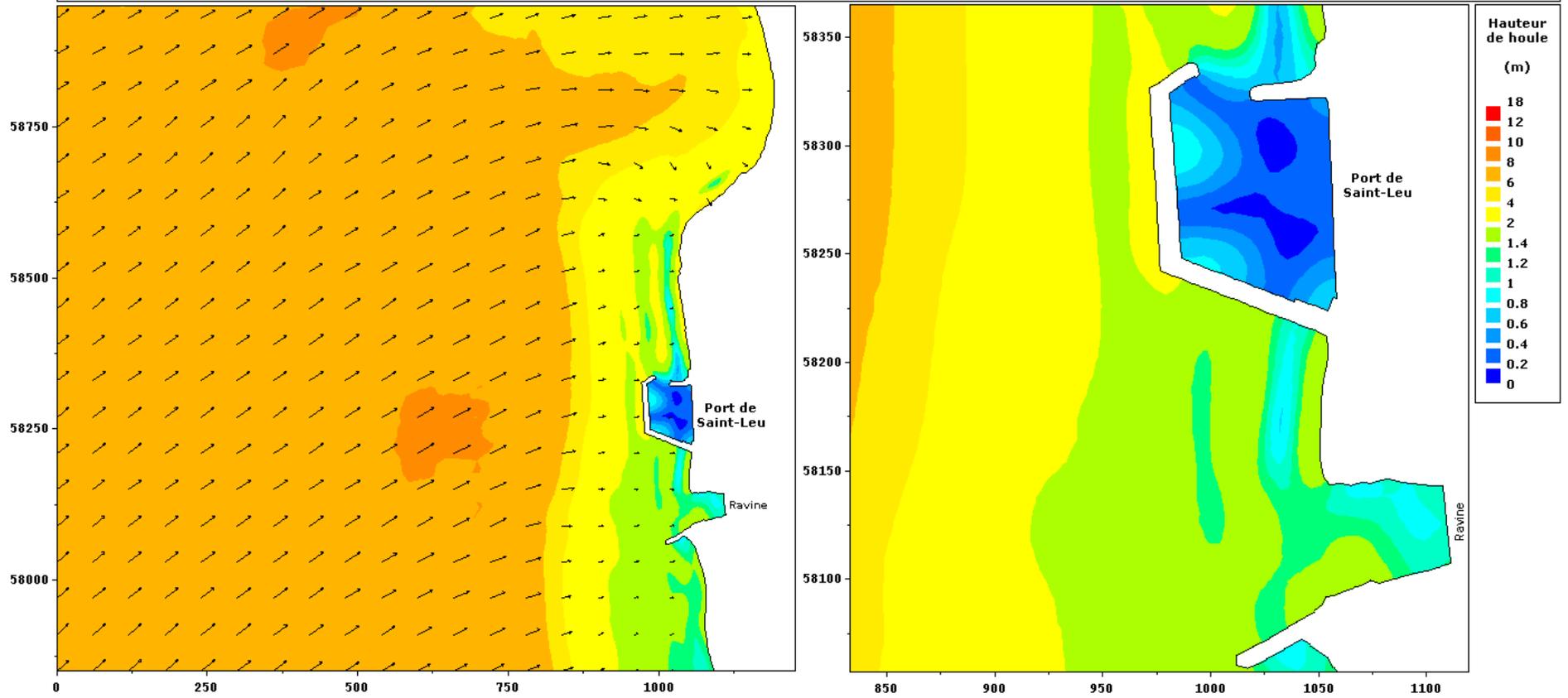


MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Actuel

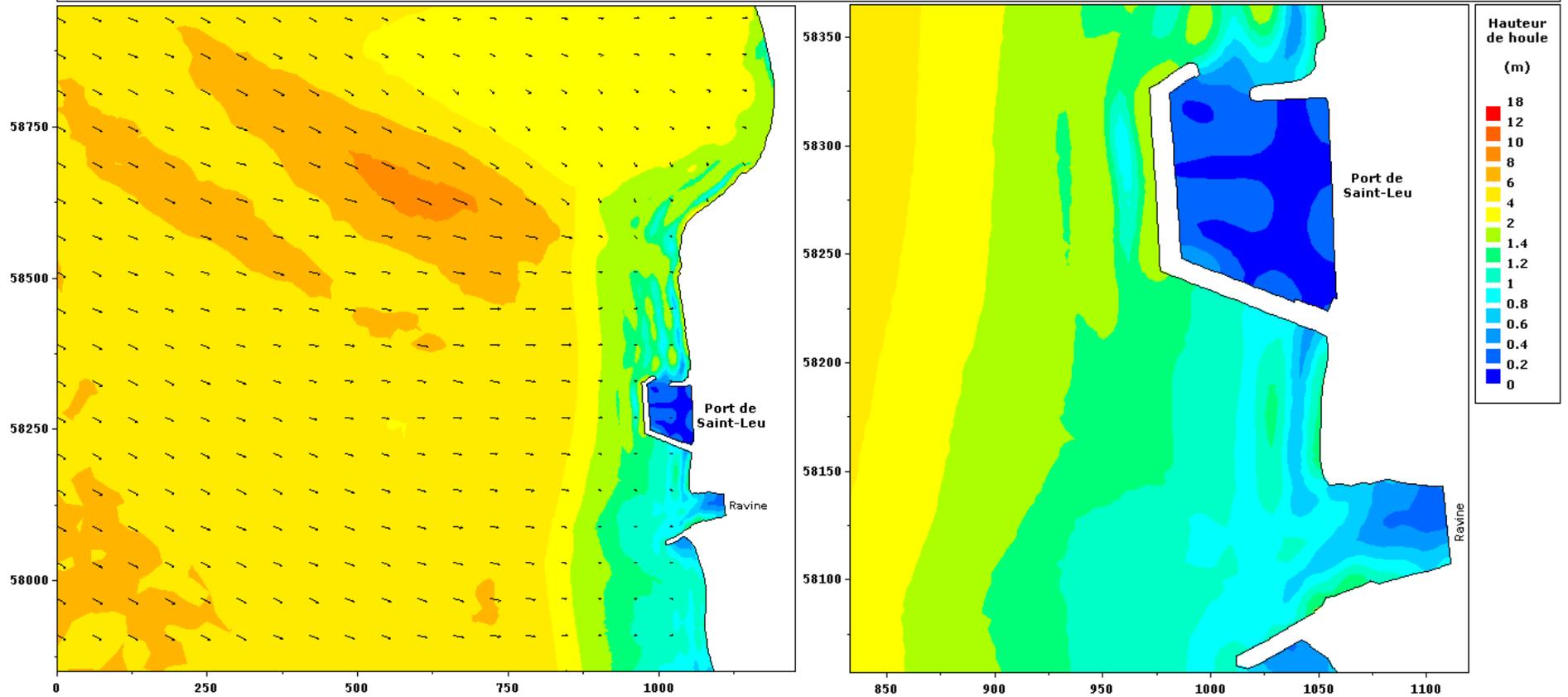
Houle australe SW (225° Nord), Tretour=50ans, Hs=6.75m, Tp=17s, Niveau d'eau=+1.15m/NGR



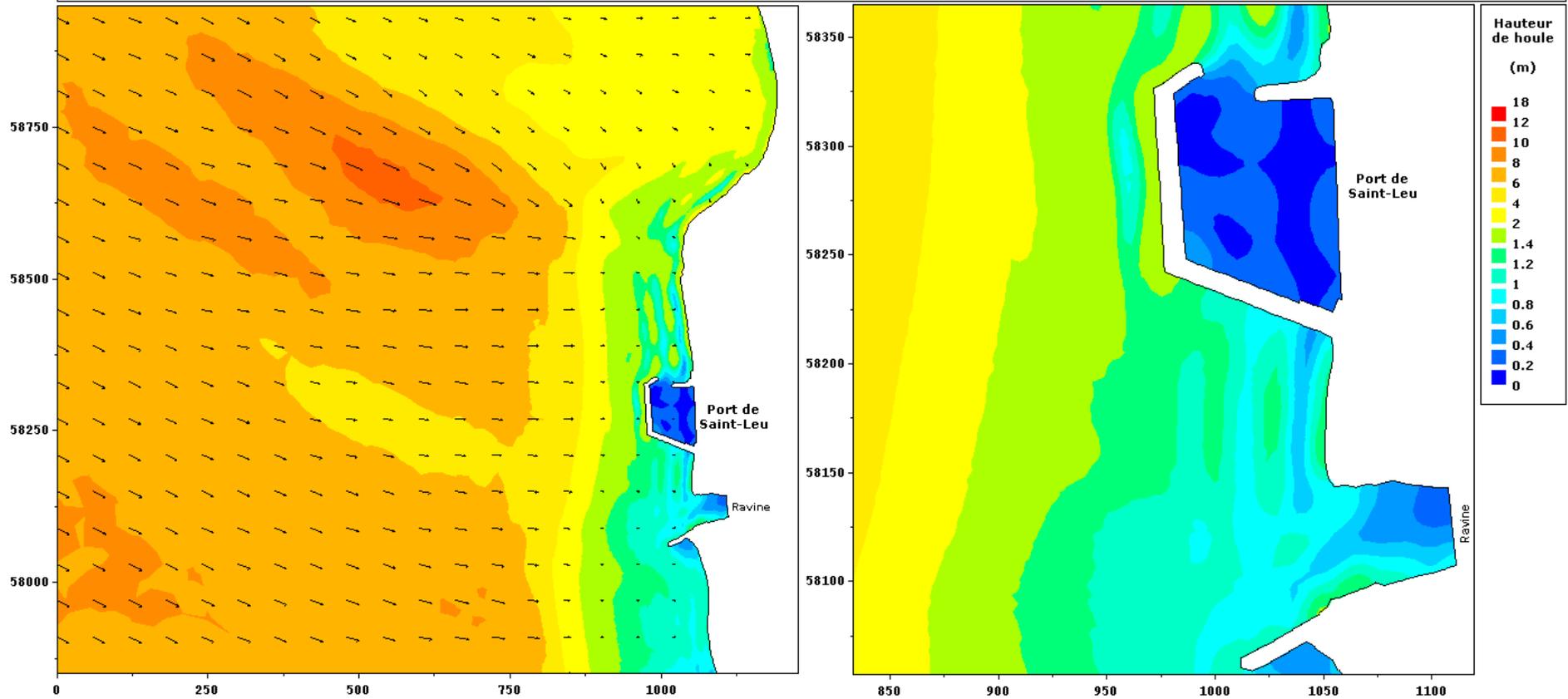
MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Actuel  
Houle australe SW (225° Nord), Tretour=100ans, Hs=6.9m, Tp=17s, Niveau d'eau=+1.5m/NGR



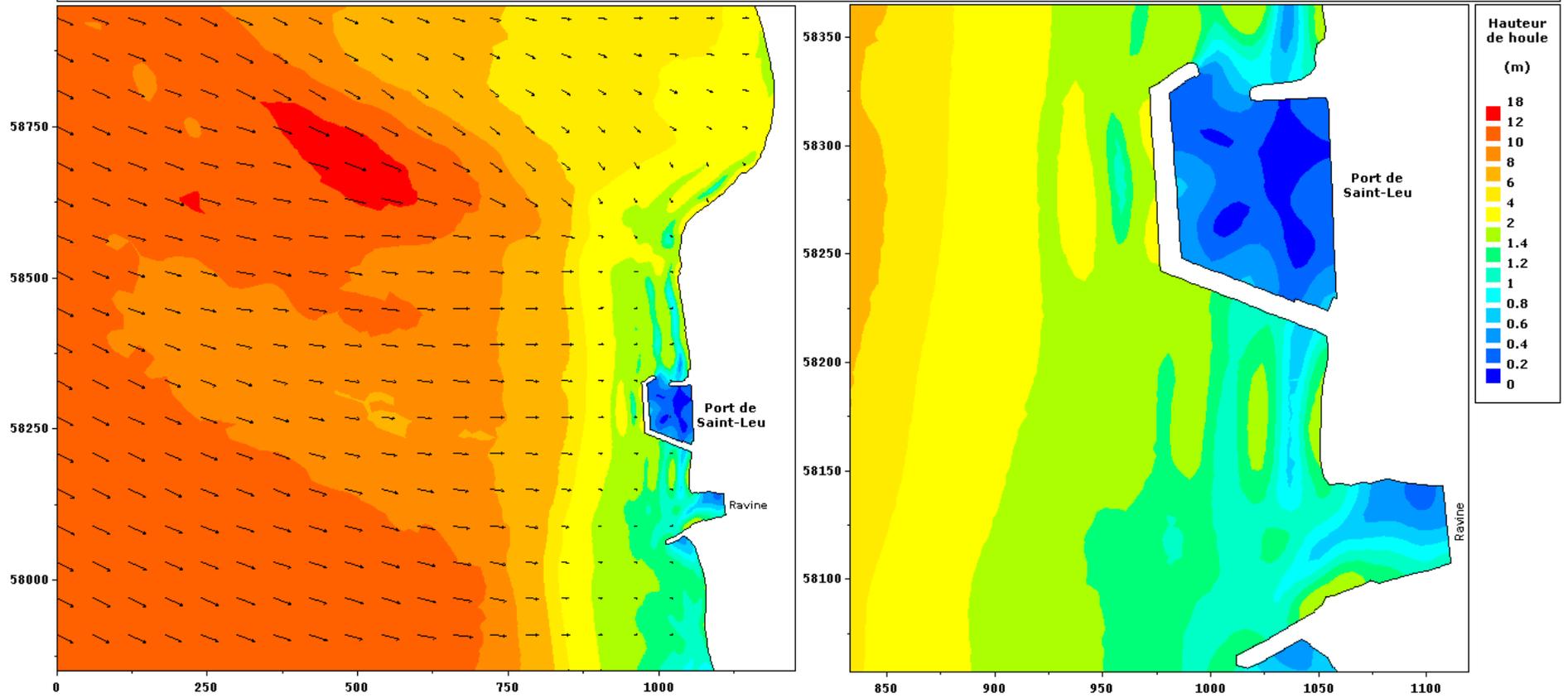
MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Actuel  
Houle cyclonique NW (310° Nord), Tretour=5ans, Hs=6.5m, Tp=12.6s, Niveau d'eau=+1m/NGR



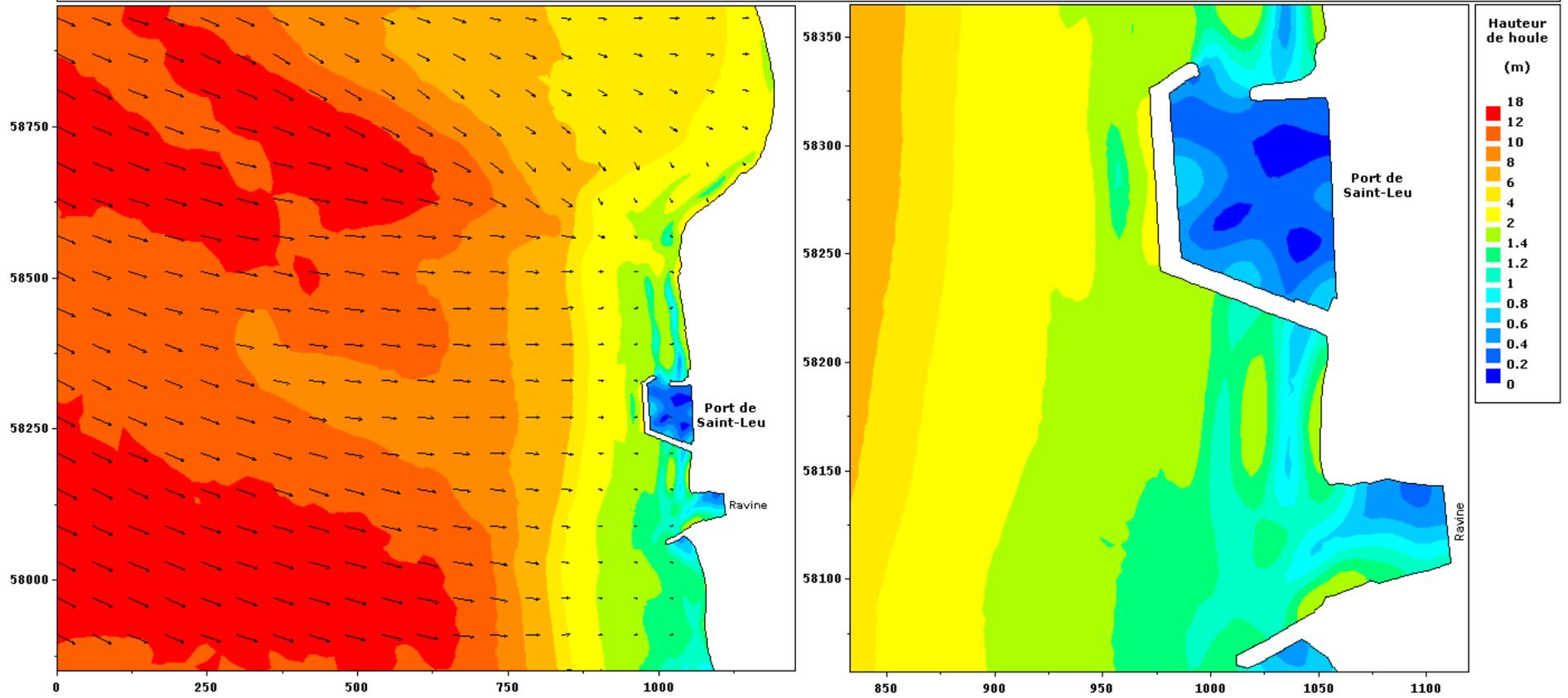
MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Actuel  
Houle cyclonique NW (310° Nord), Tretour=10ans, Hs=8.5m, Tp=13.4s, Niveau d'eau=+1m/NGR



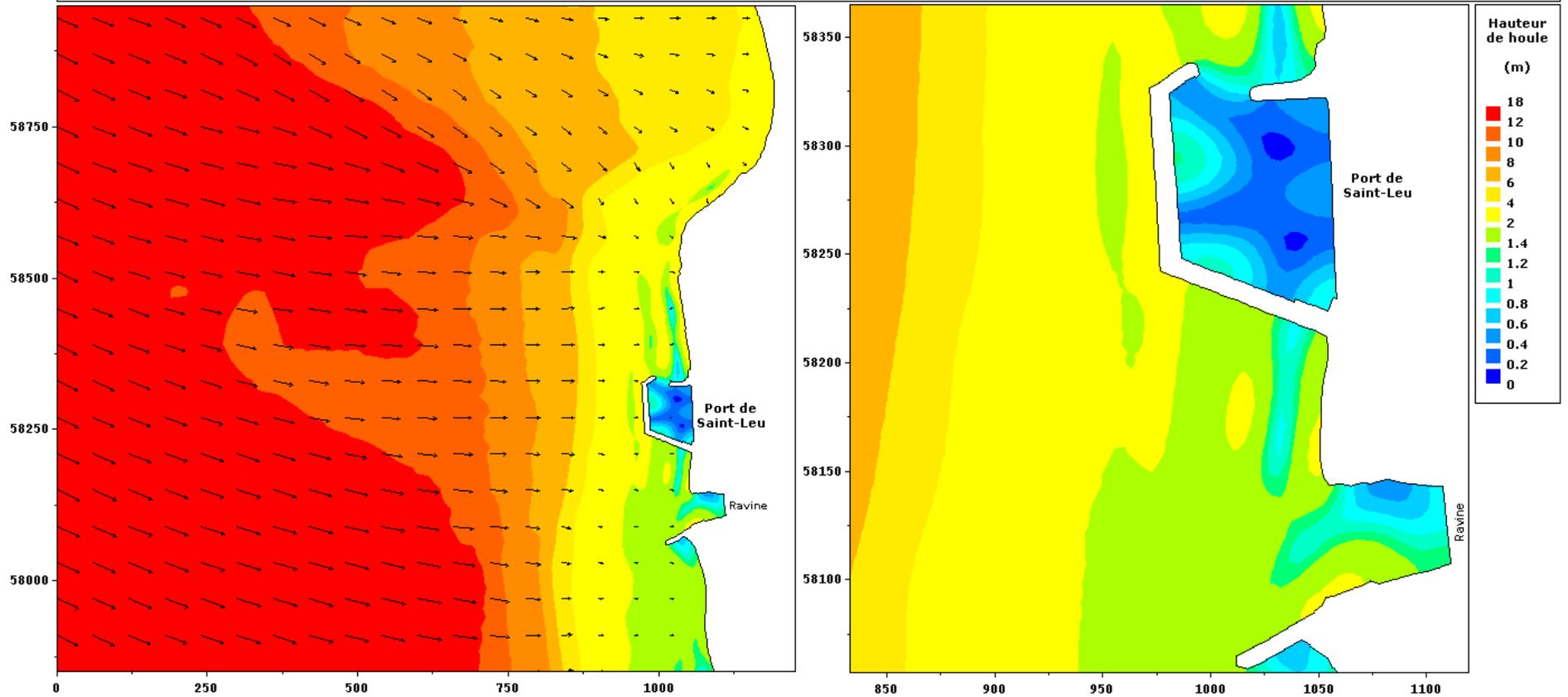
MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Actuel  
Houle cyclonique NW (310° Nord), Tretour=25ans, Hs=11.7m, Tp=14.7s, Niveau d'eau=+1.2m/NGR



MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Actuel  
Houle cyclonique NW (310° Nord), Tretour=50ans, Hs=13.1m, Tp=15.2s, Niveau d'eau=+1.2m/NGR

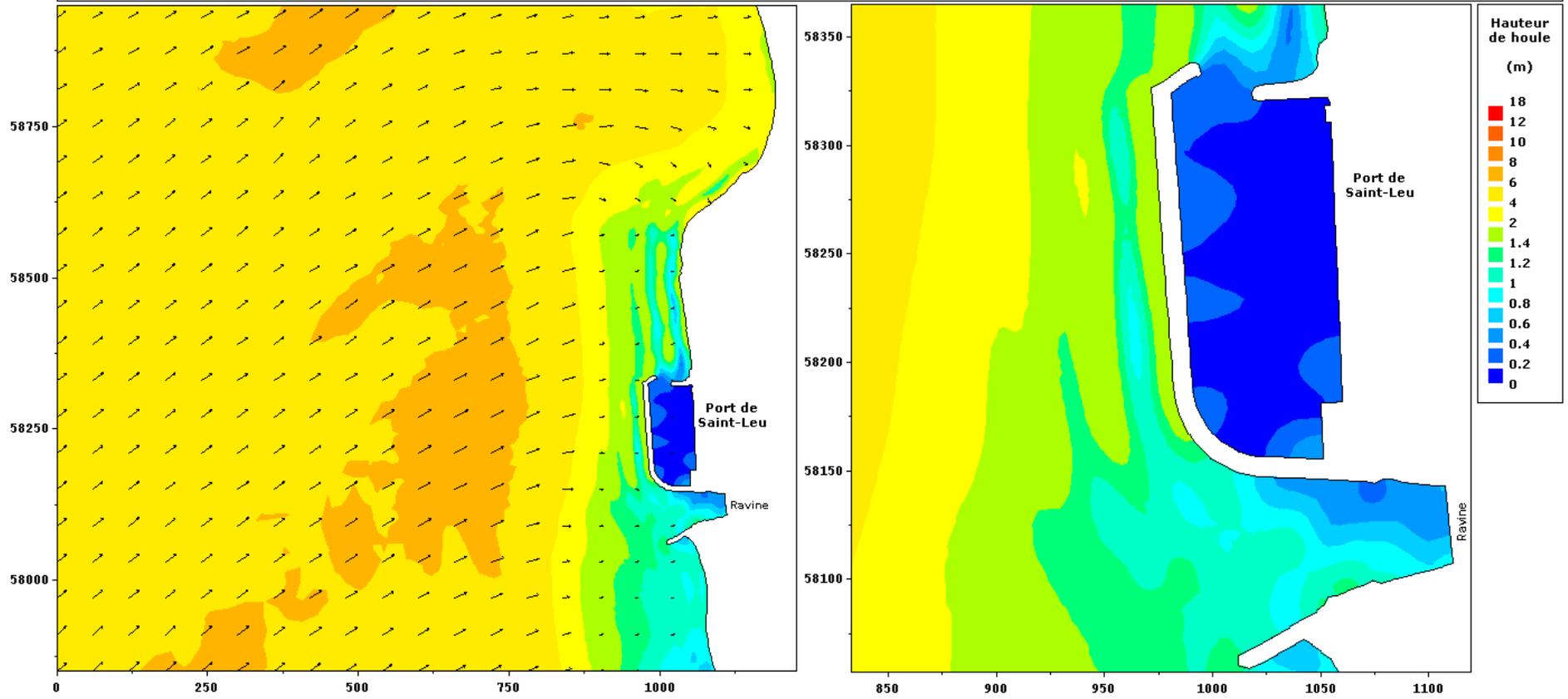


MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Actuel  
Houle cyclonique NW (310° Nord), Tretour=100ans, Hs=15.1m, Tp=16s, Niveau d'eau=+1.7m/NGR



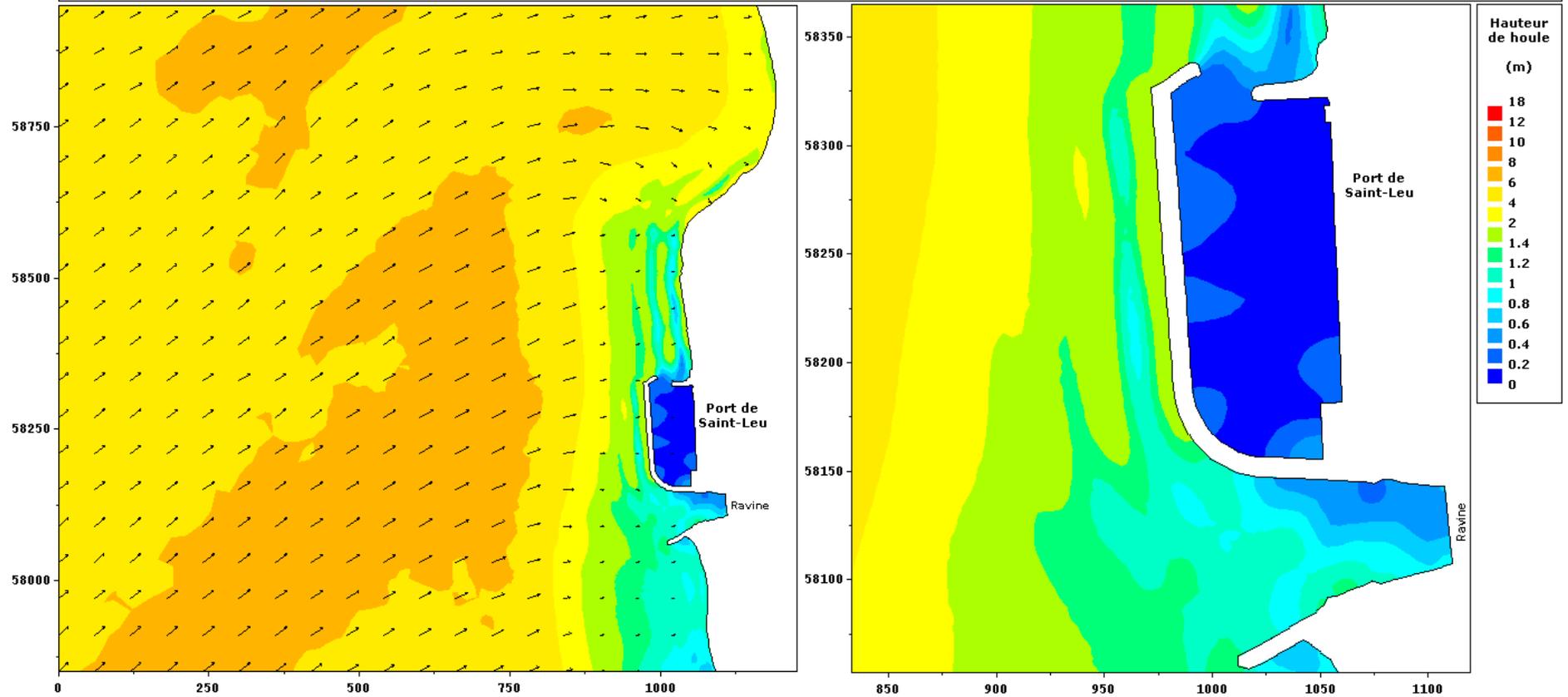
**ETAT PROJET**

MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet  
Houle australe SW (225° Nord), Tretour=5ans, Hs=5.7m, Tp=15s, Niveau d'eau=+1m/NGR



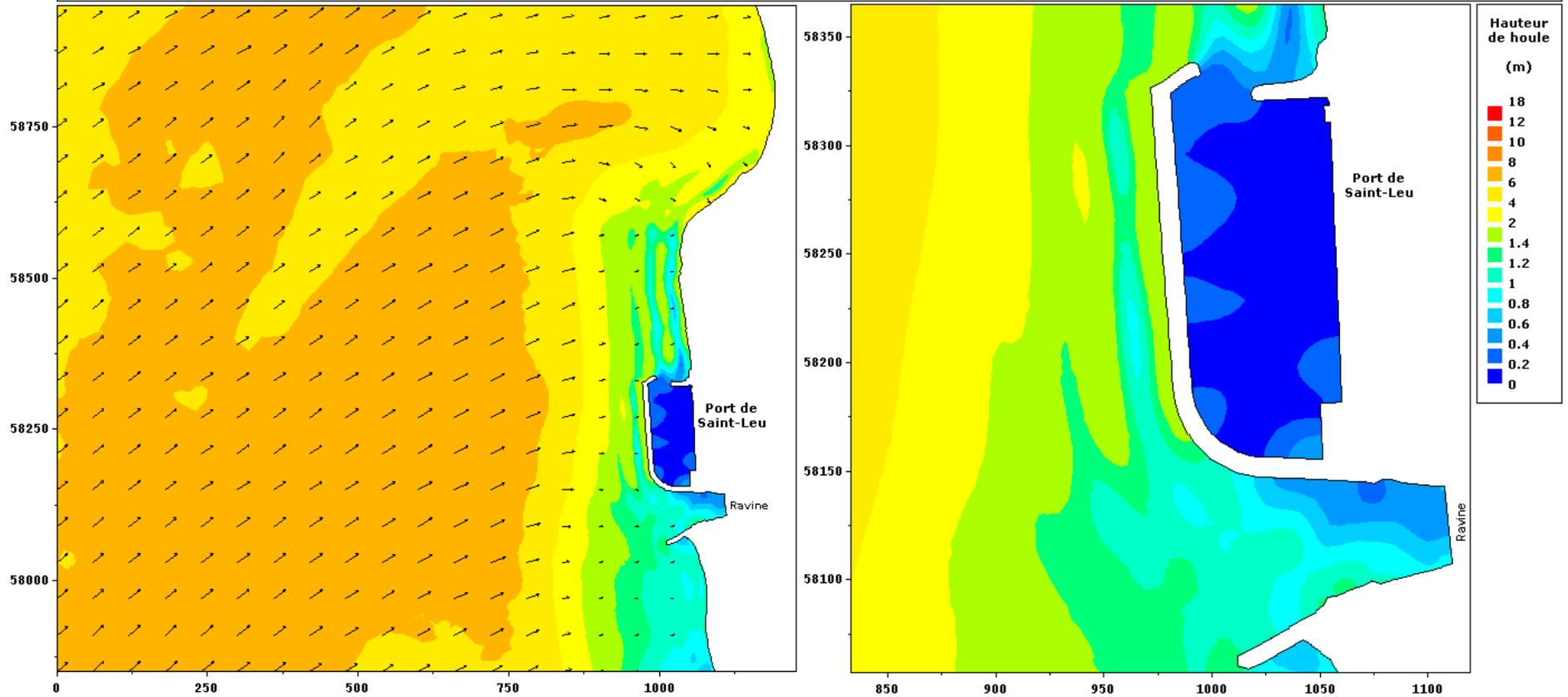
MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet

Houle australe SW (225° Nord), Tretour=10ans, Hs=5.95m, Tp=15s, Niveau d'eau=+1m/NGR

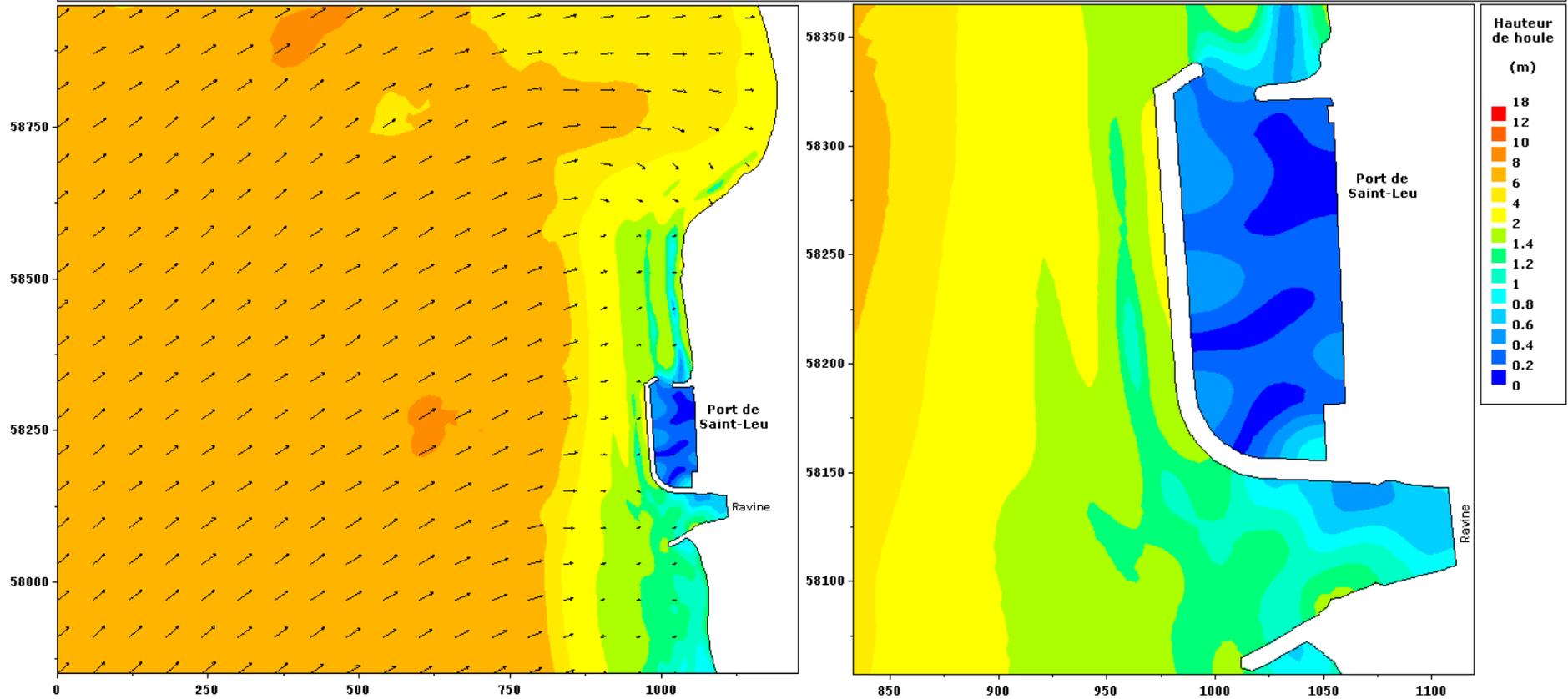


MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet

Houle australe SW (225° Nord), Tretour=25ans, Hs=6.35m, Tp=15s, Niveau d'eau=+1m/NGR

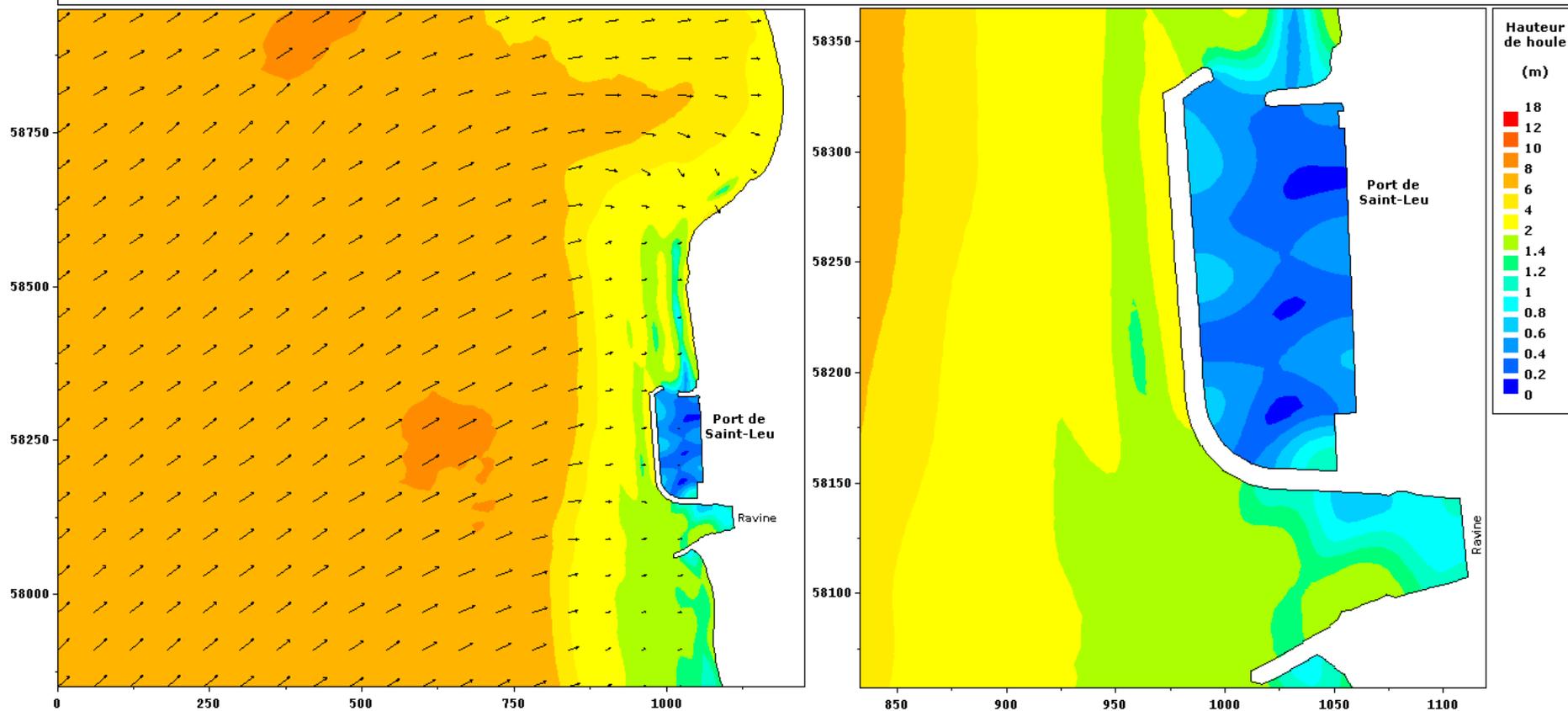


MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet  
Houle australe SW (225° Nord), Tretour=50ans, Hs=6.75m, Tp=17s, Niveau d'eau=+1.15m/NGR

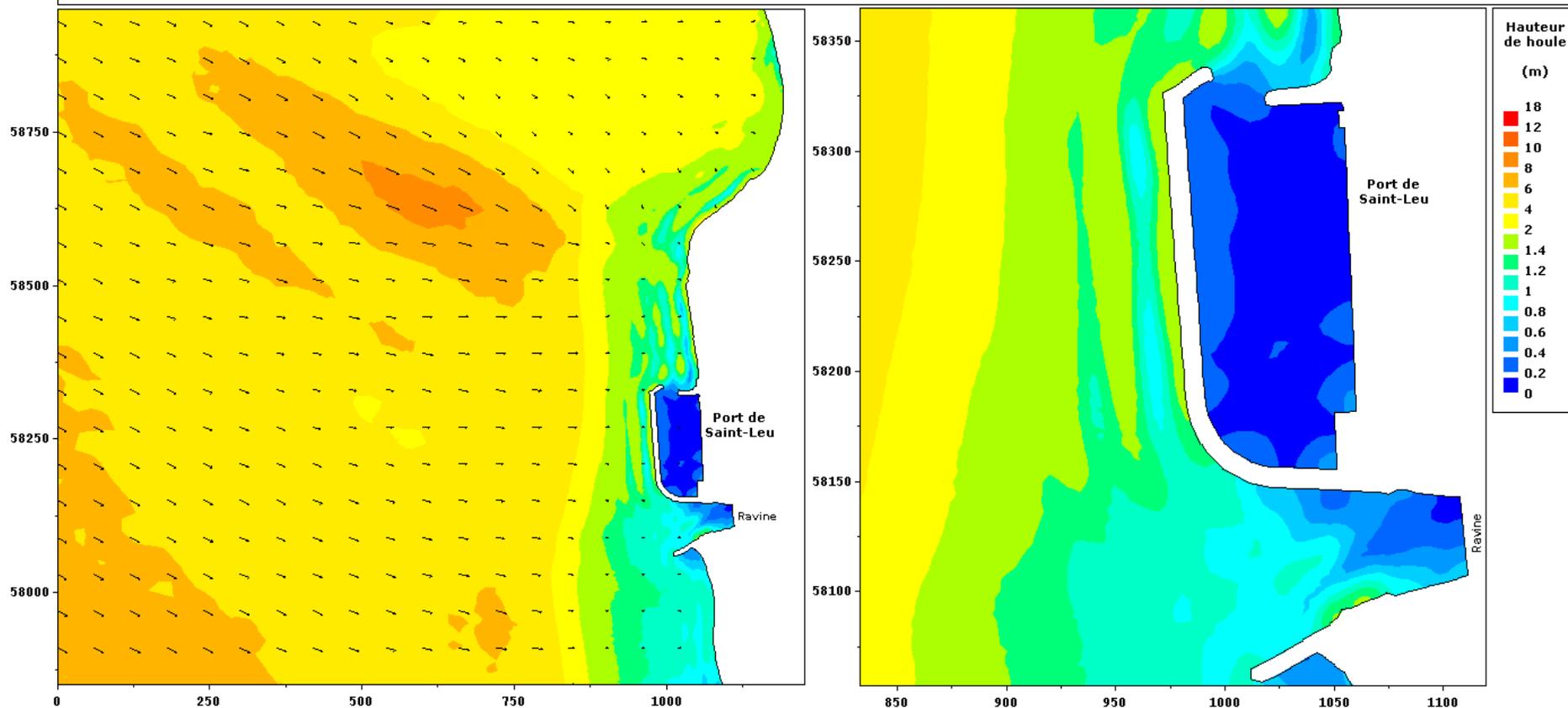


MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet

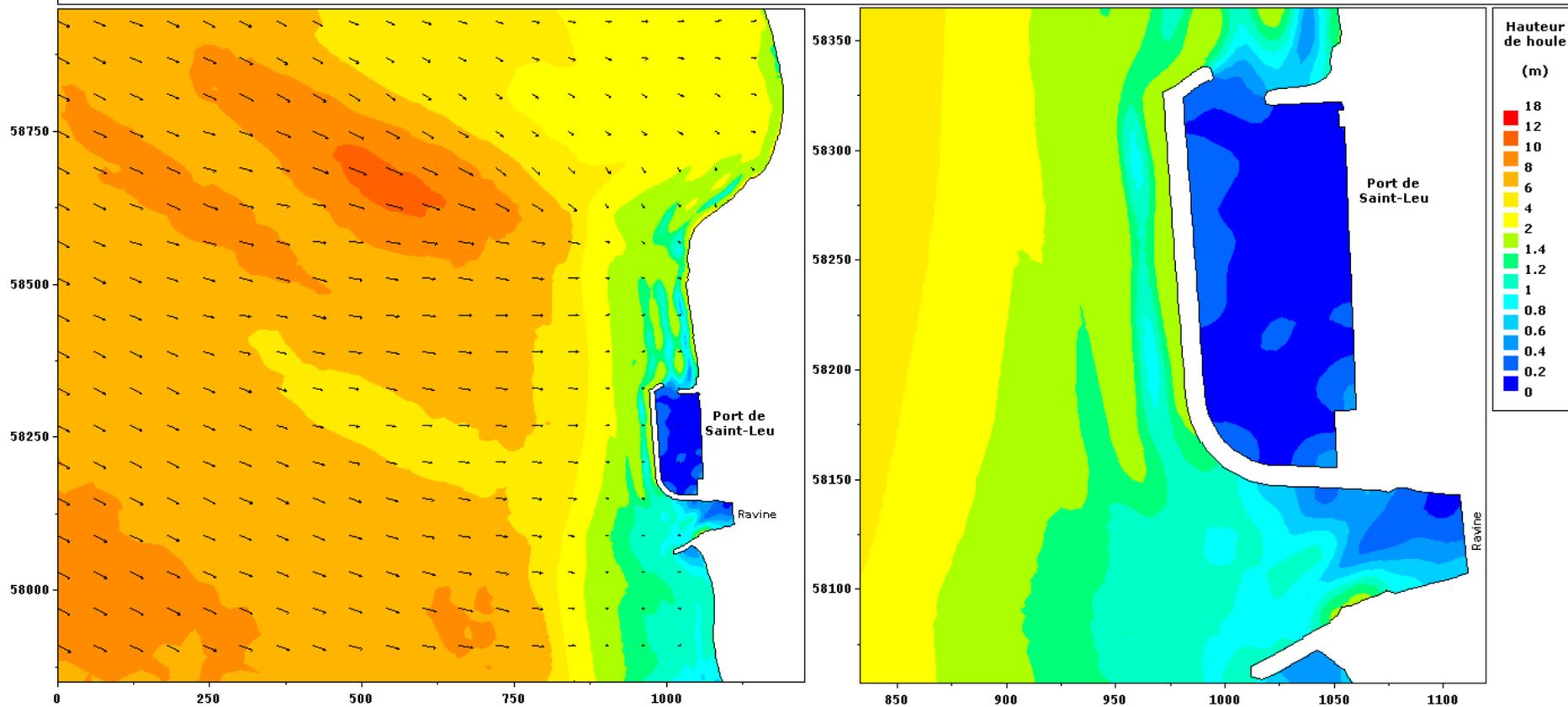
Houle australe SW (225° Nord), Tretour=100ans, Hs=6.9m, Tp=17s, Niveau d'eau=+1.5m/NGR



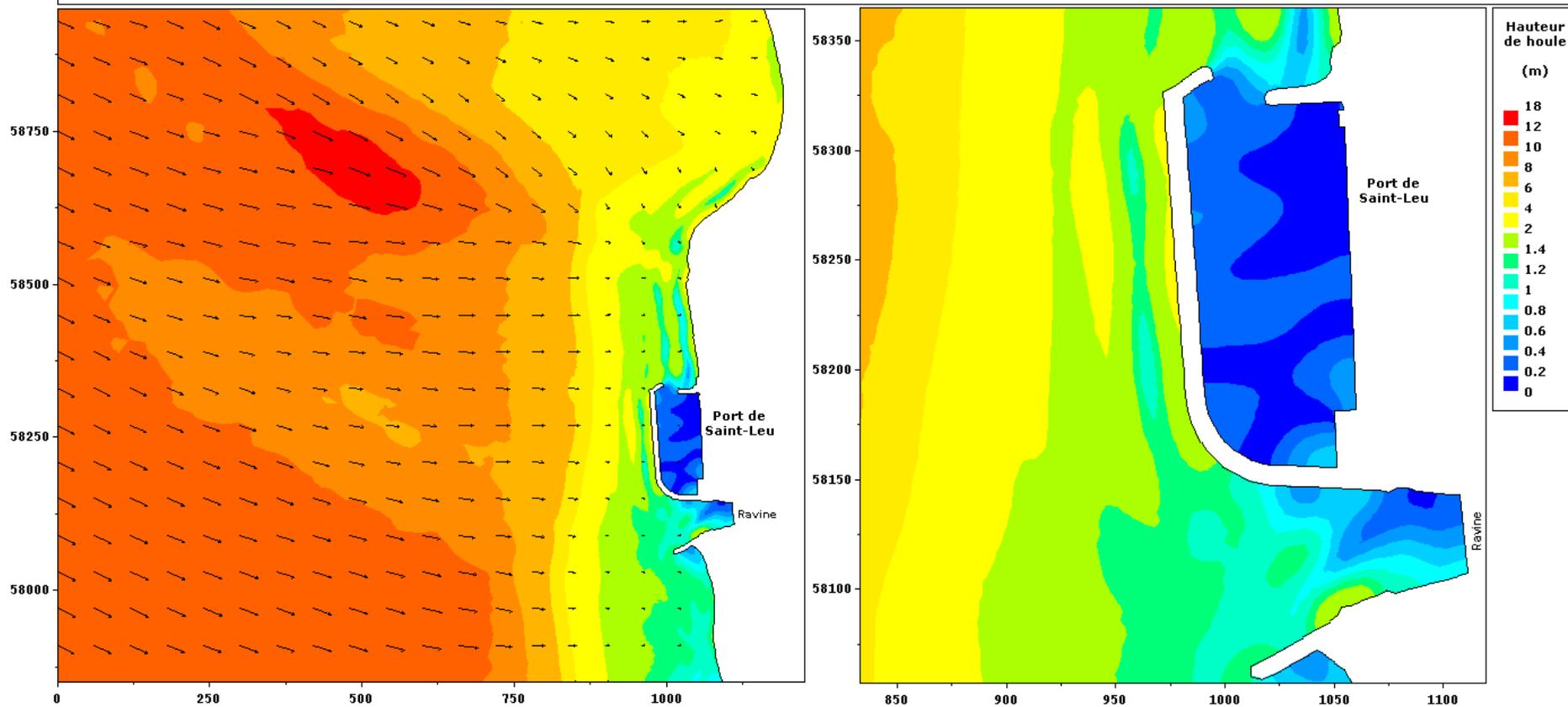
MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet  
Houle cyclonique NW (310° Nord), Tretour=5ans, Hs=6.5m, Tp=12.6s, Niveau d'eau=+1m/NGR



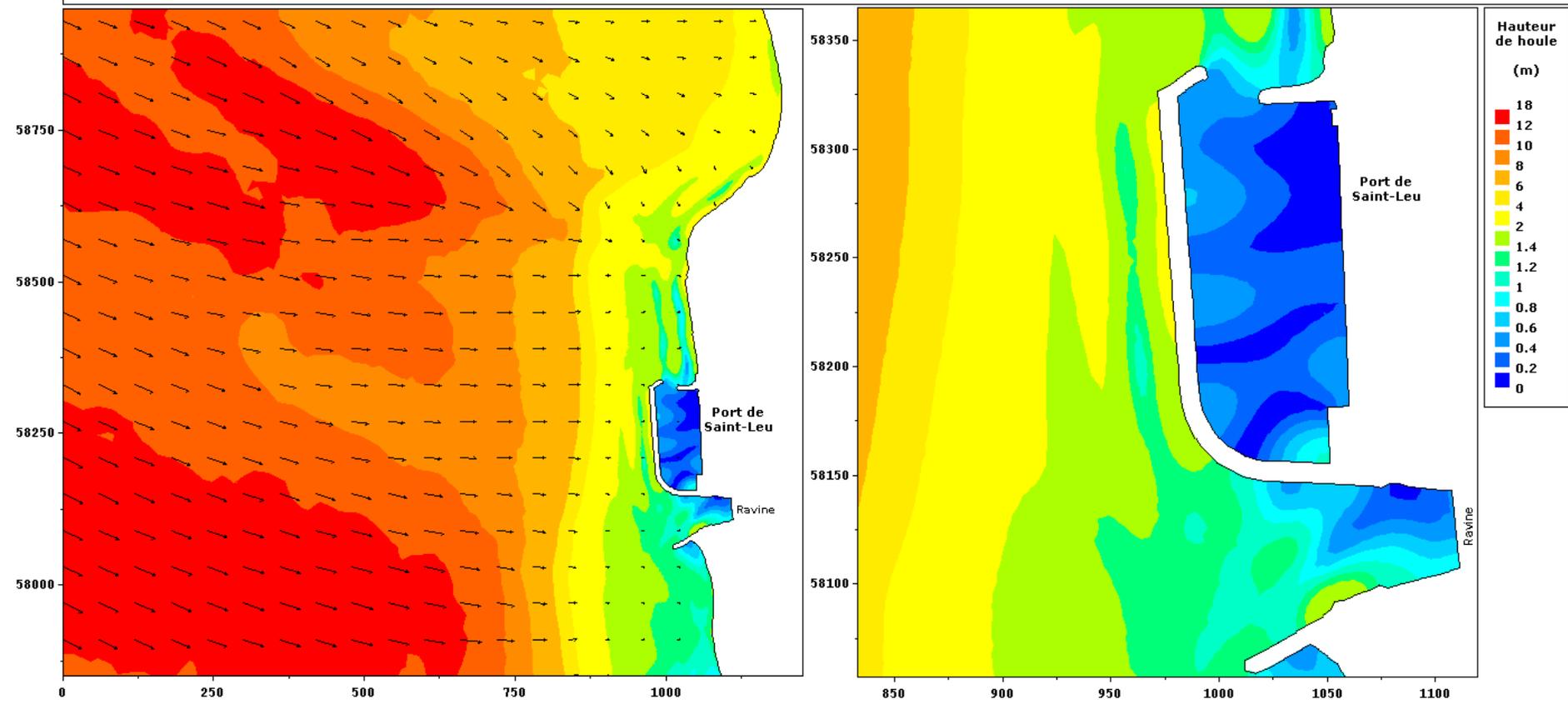
MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet  
Houle cyclonique NW (310° Nord), Tretour=10ans, Hs=8.5m, Tp=13.4s, Niveau d'eau=+1m/NGR



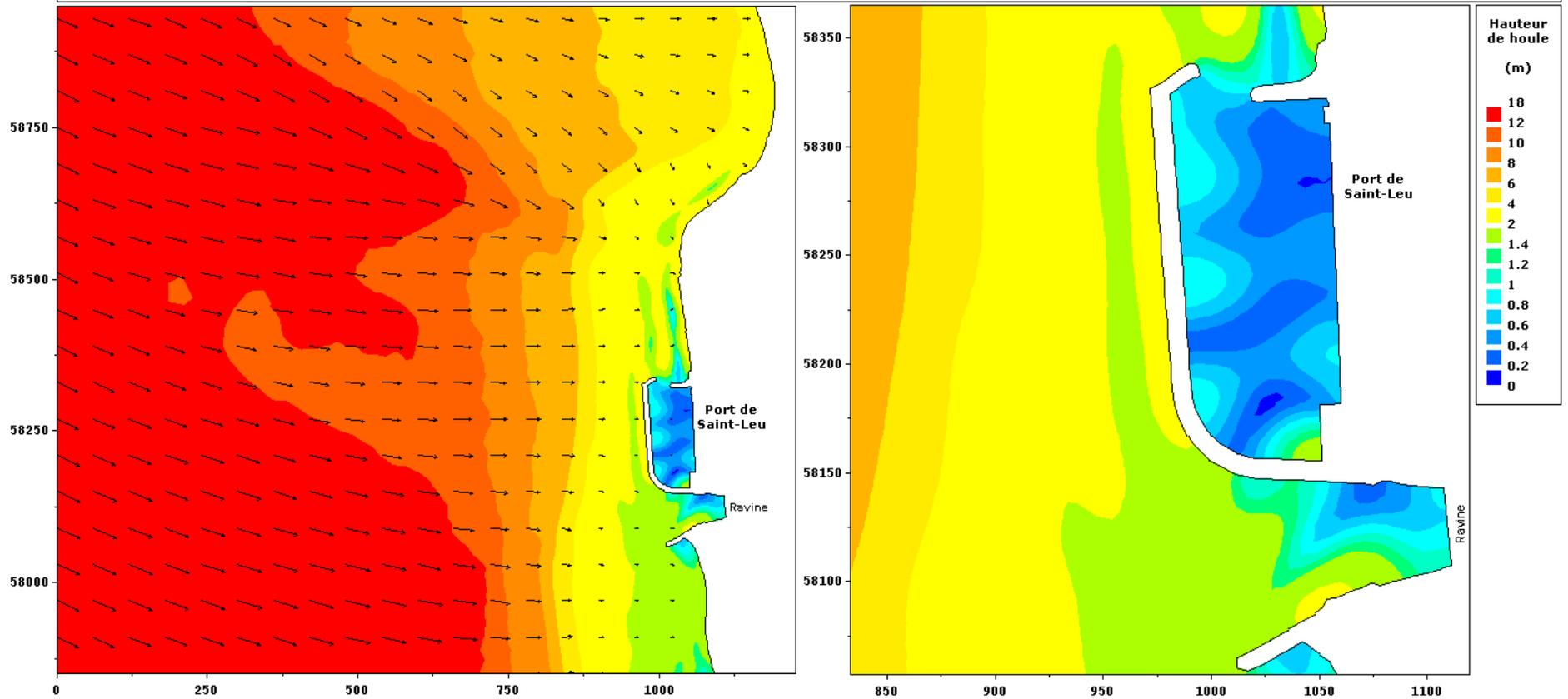
MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet  
Houle cyclonique NW (310° Nord), Tretour=25ans, Hs=11.7m, Tp=14.7s, Niveau d'eau=+1.2m/NGR



MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet  
Houle cyclonique NW (310° Nord), Tretour=50ans, Hs=13.1m, Tp=15.2s, Niveau d'eau=+1.2m/NGR

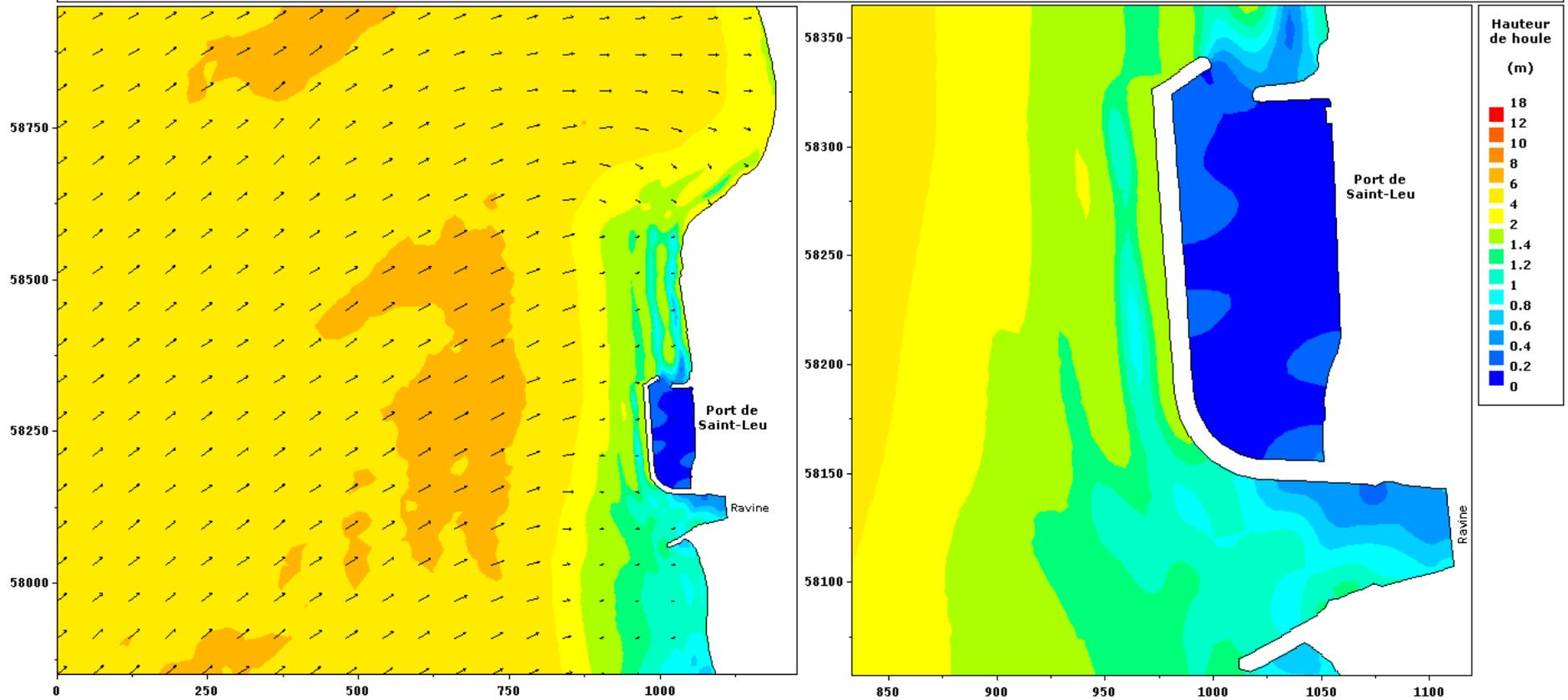


MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet  
Houle cyclonique NW (310° Nord), Tretour=100ans, Hs=15.1m, Tp=16s, Niveau d'eau=+1.7m/NGR



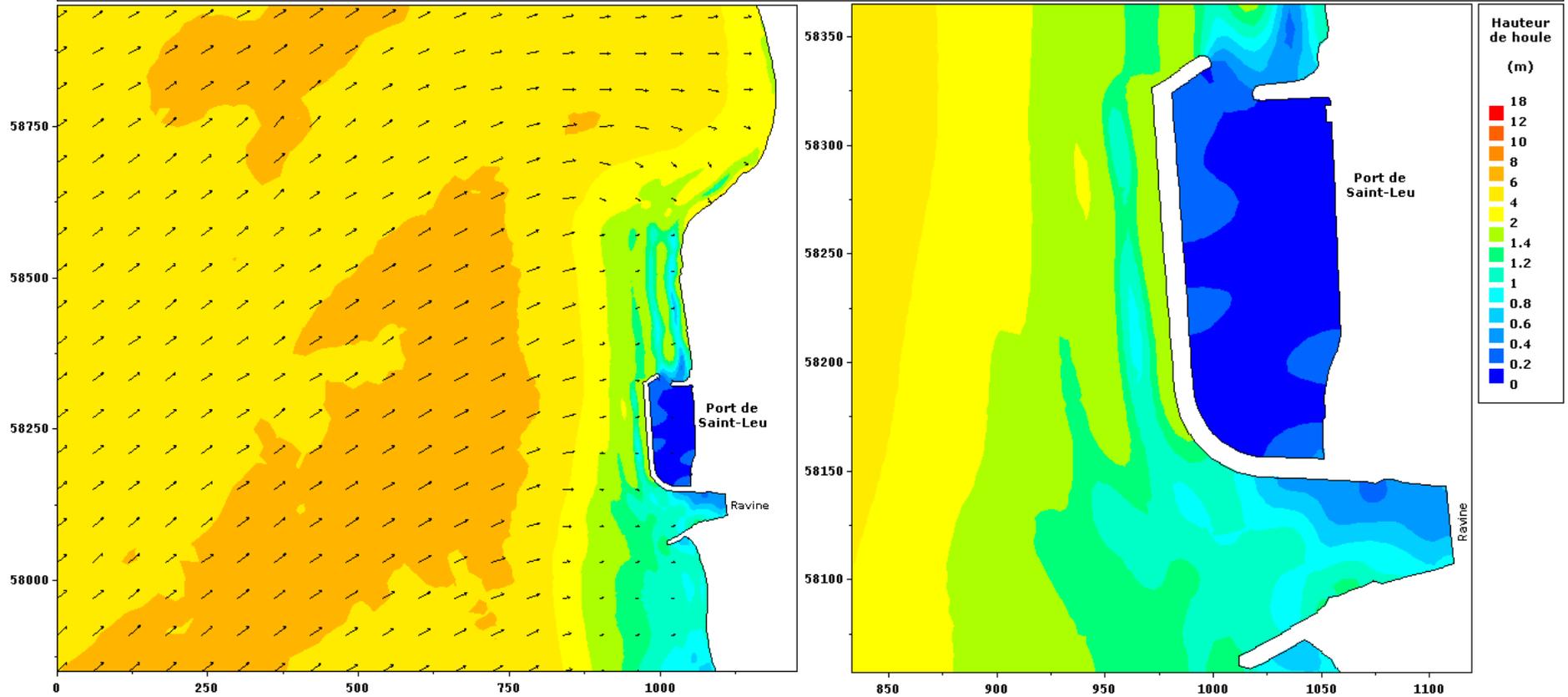
**ETAT PROJET 2**

MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet 2  
Houle australe SW (225° Nord), Tretour=5ans, Hs=5.7m, Tp=15s, Niveau d'eau=+1m/NGR



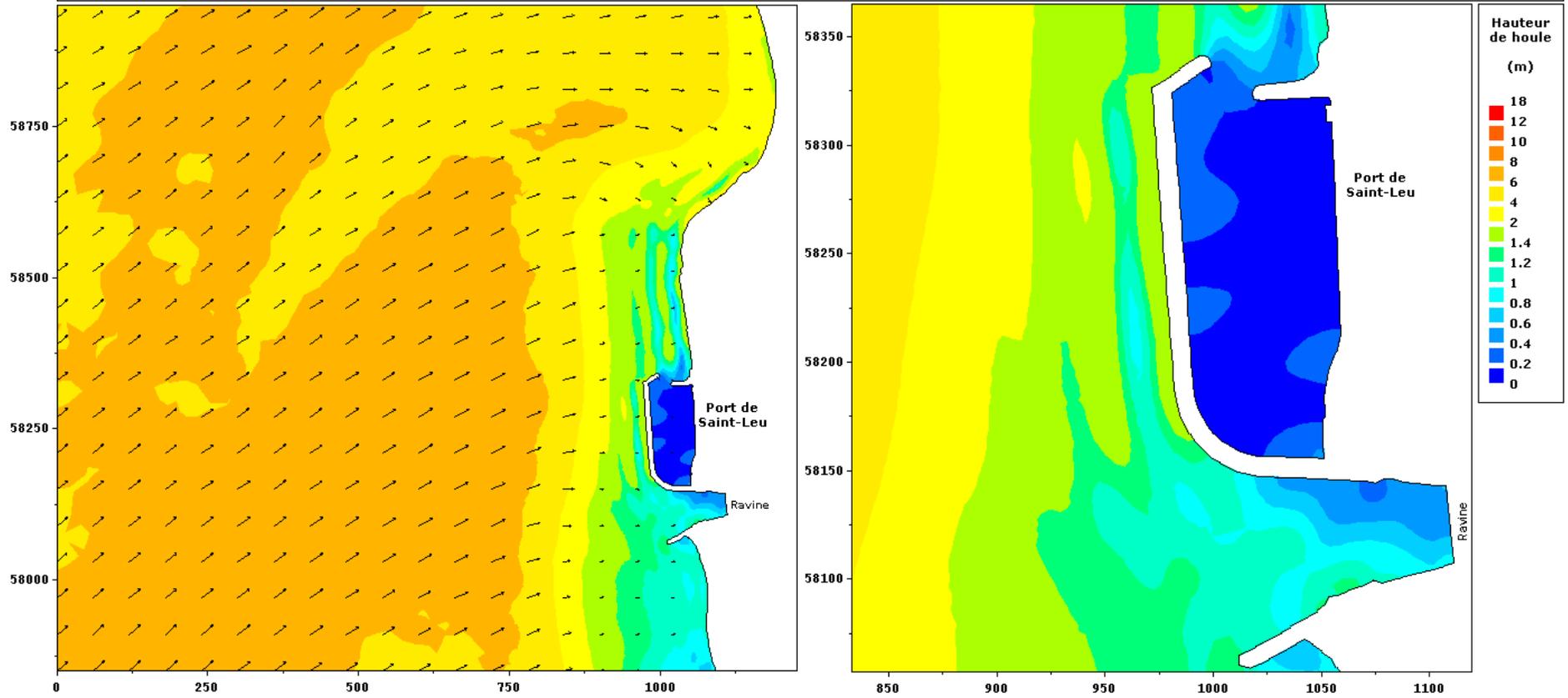
MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet 2

Houle australe SW (225° Nord), Tretour=10ans, Hs=5.95m, Tp=15s, Niveau d'eau=+1m/NGR



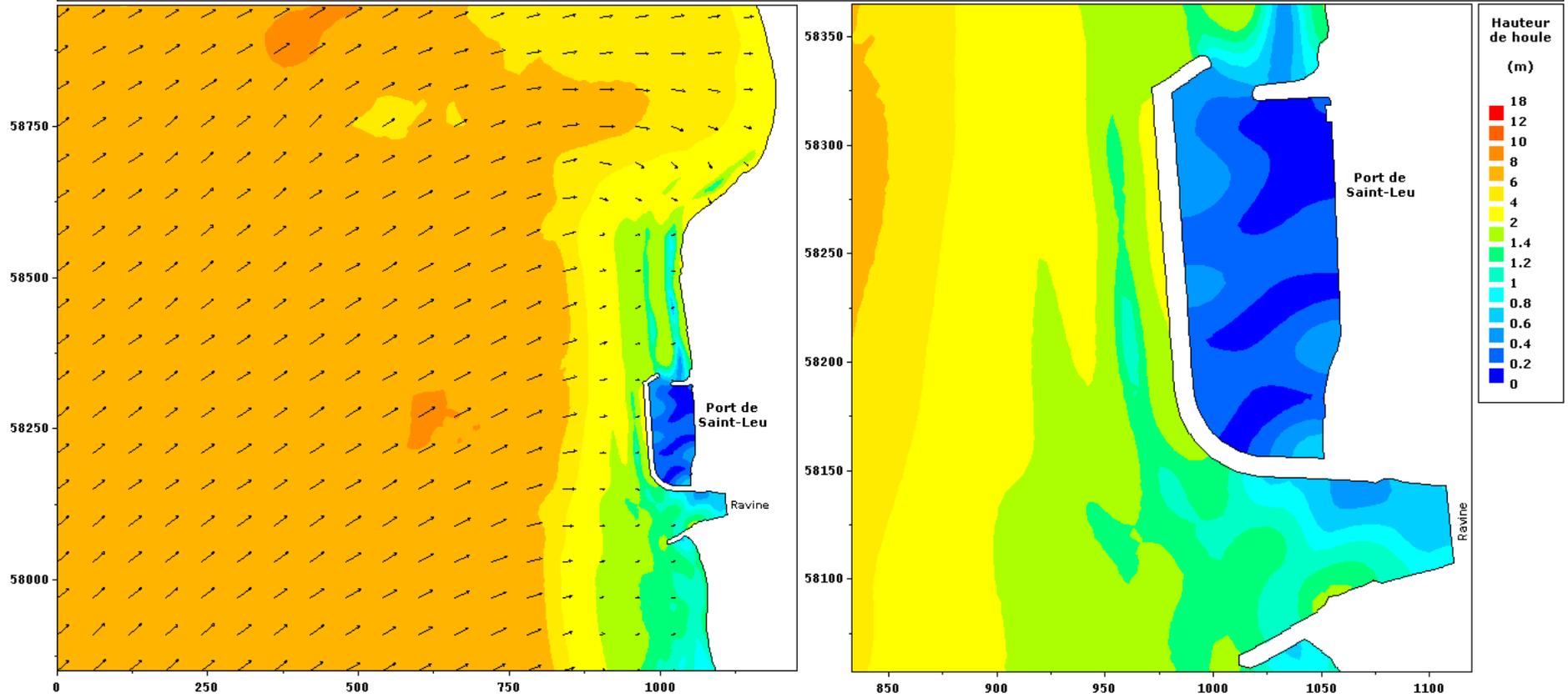
MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet 2

Houle australe SW (225° Nord), Tretour=25ans, Hs=6.35m, Tp=15s, Niveau d'eau=+1m/NGR



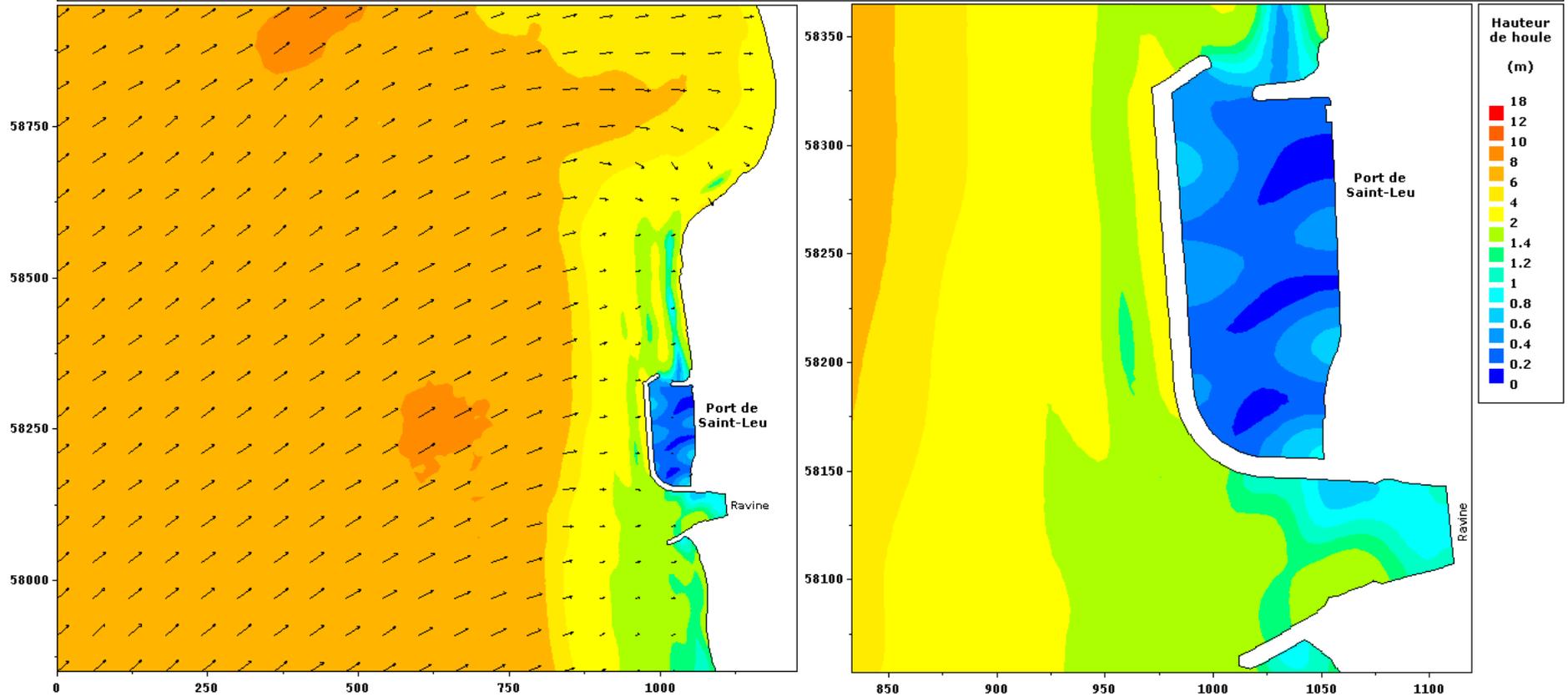
MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet 2

Houle australe SW (225° Nord), Tretour=50ans, Hs=6.75m, Tp=17s, Niveau d'eau=+1.15m/NGR

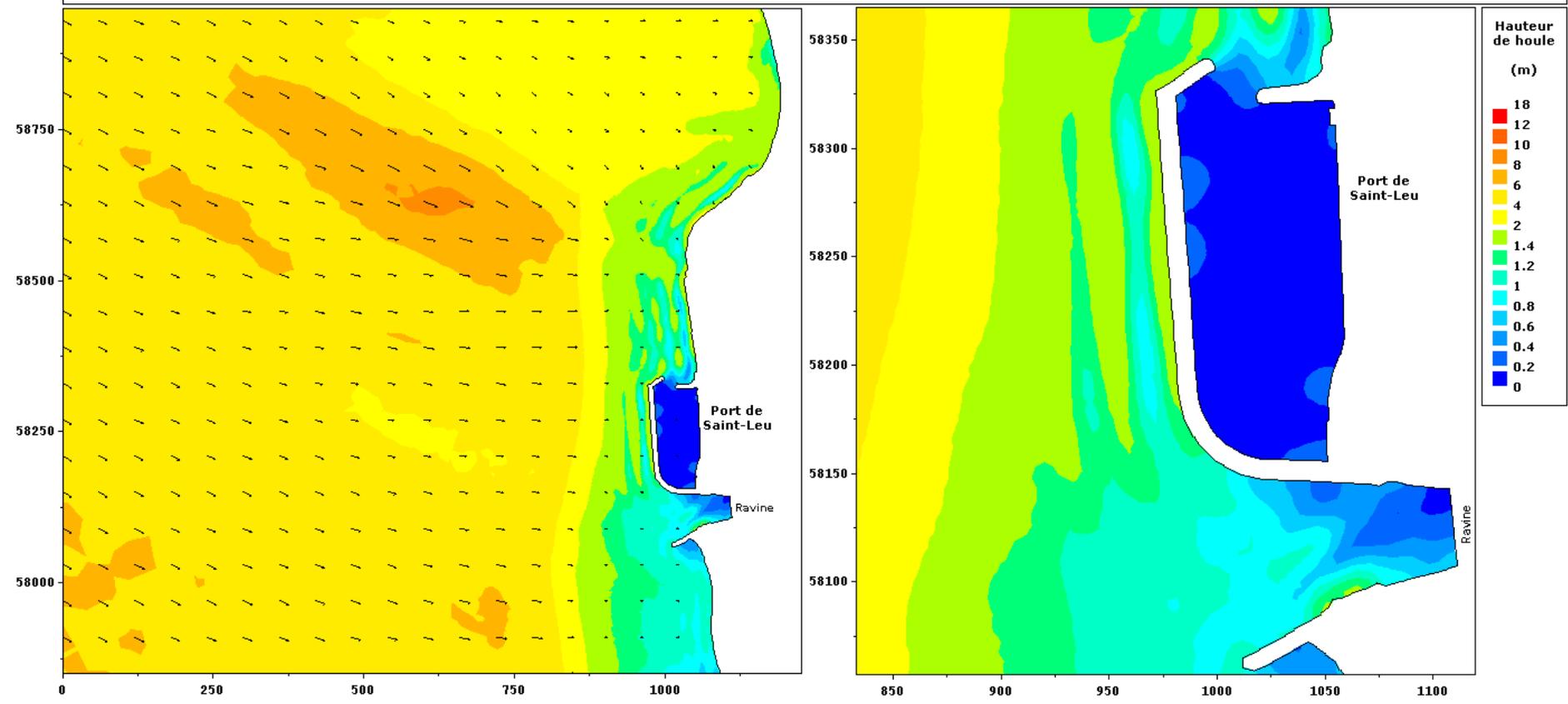


MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet 2

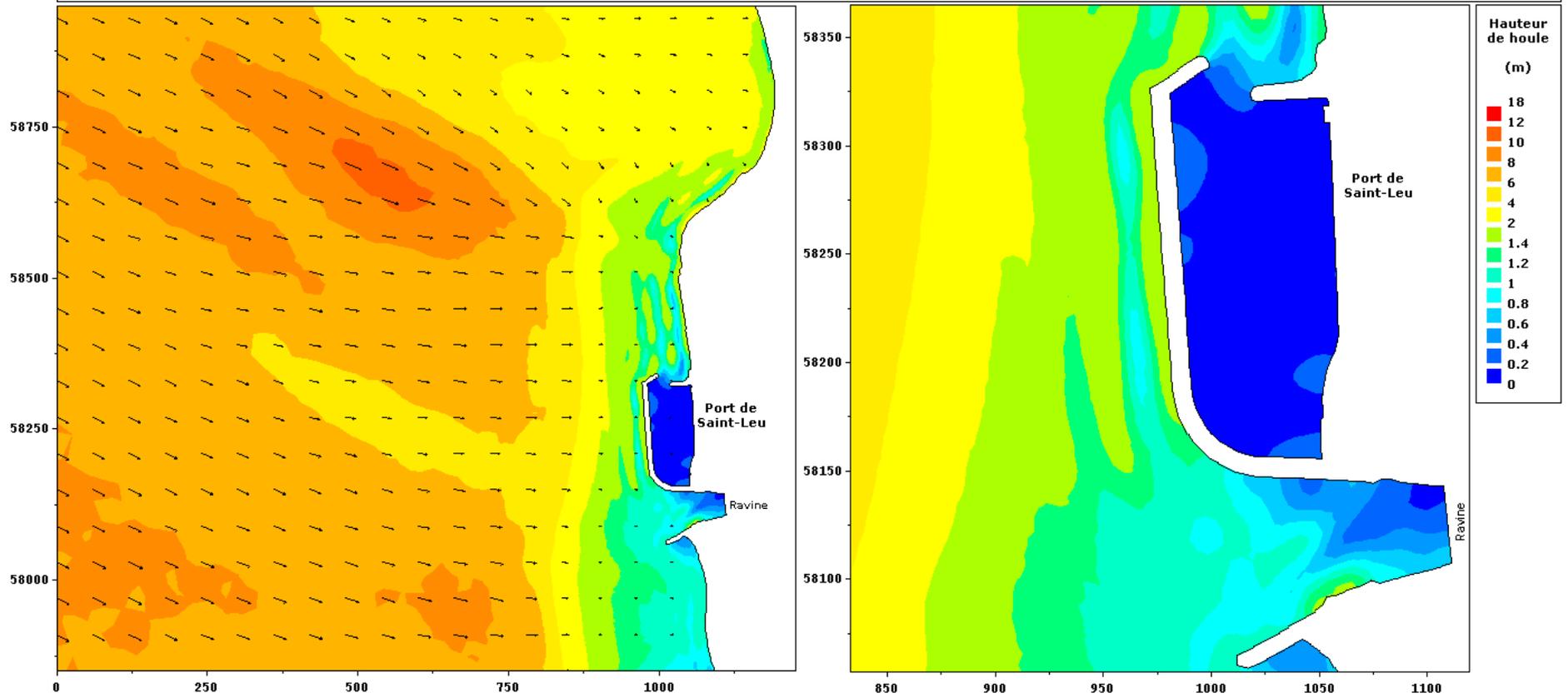
Houle australe SW (225° Nord), Tretour=100ans, Hs=6.9m, Tp=17s, Niveau d'eau=+1.5m/NGR



MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet 2  
Houle cyclonique NW (310° Nord), Tretour=5ans, Hs=6.5m, Tp=12.6s, Niveau d'eau=+1m/NGR

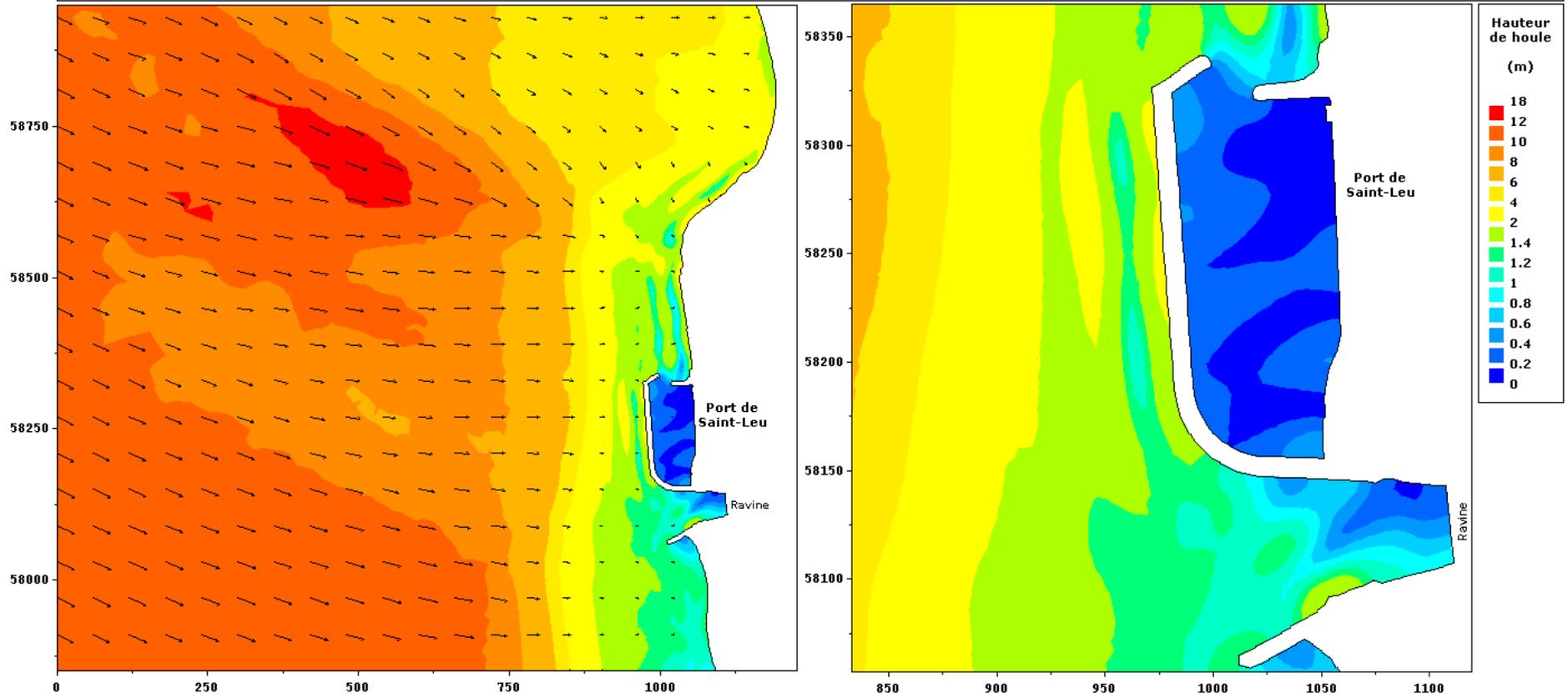


MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet 2  
Houle cyclonique NW (310° Nord), Tretour=10ans, Hs=8.5m, Tp=13.4s, Niveau d'eau=+1m/NGR



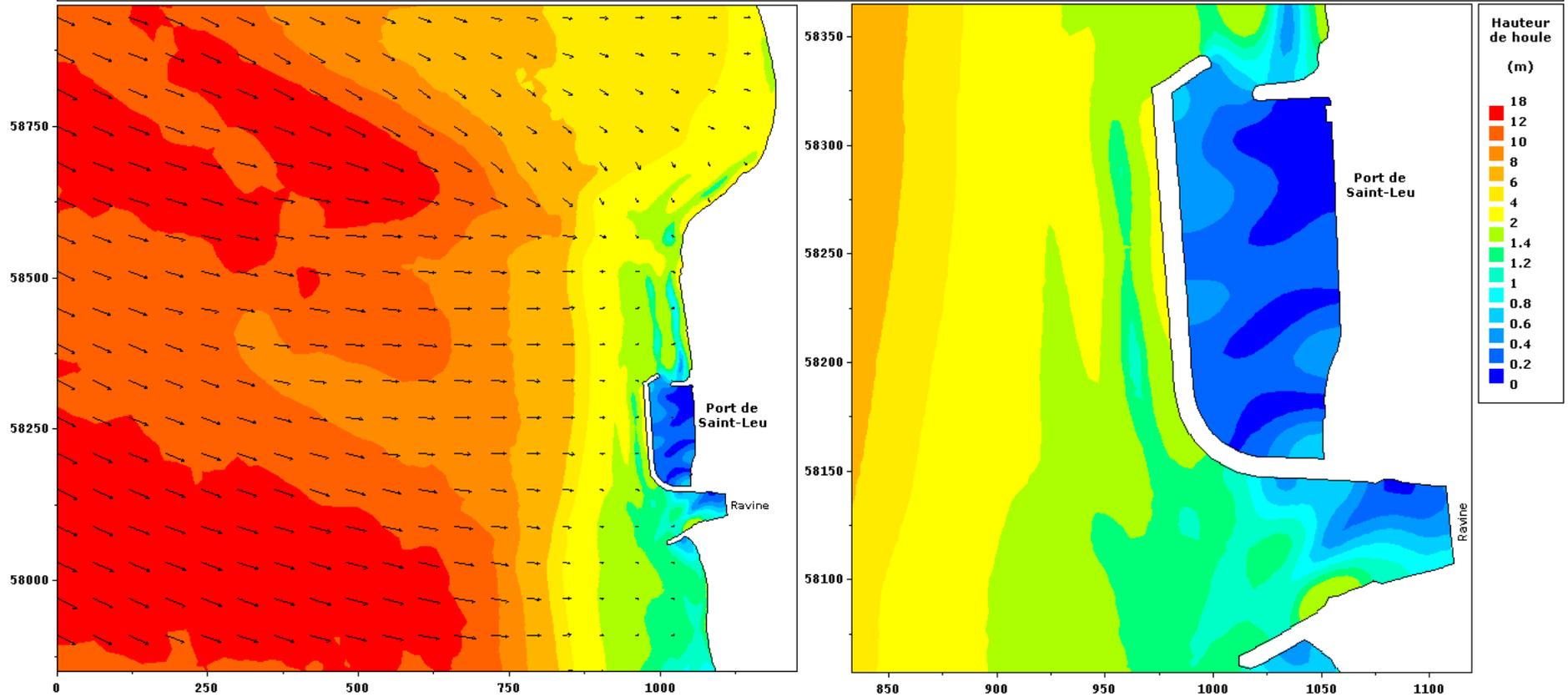
MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet 2

Houle cyclonique NW (310° Nord), Tretour=25ans, Hs=11.7m, Tp=14.7s, Niveau d'eau=+1.2m/NGR



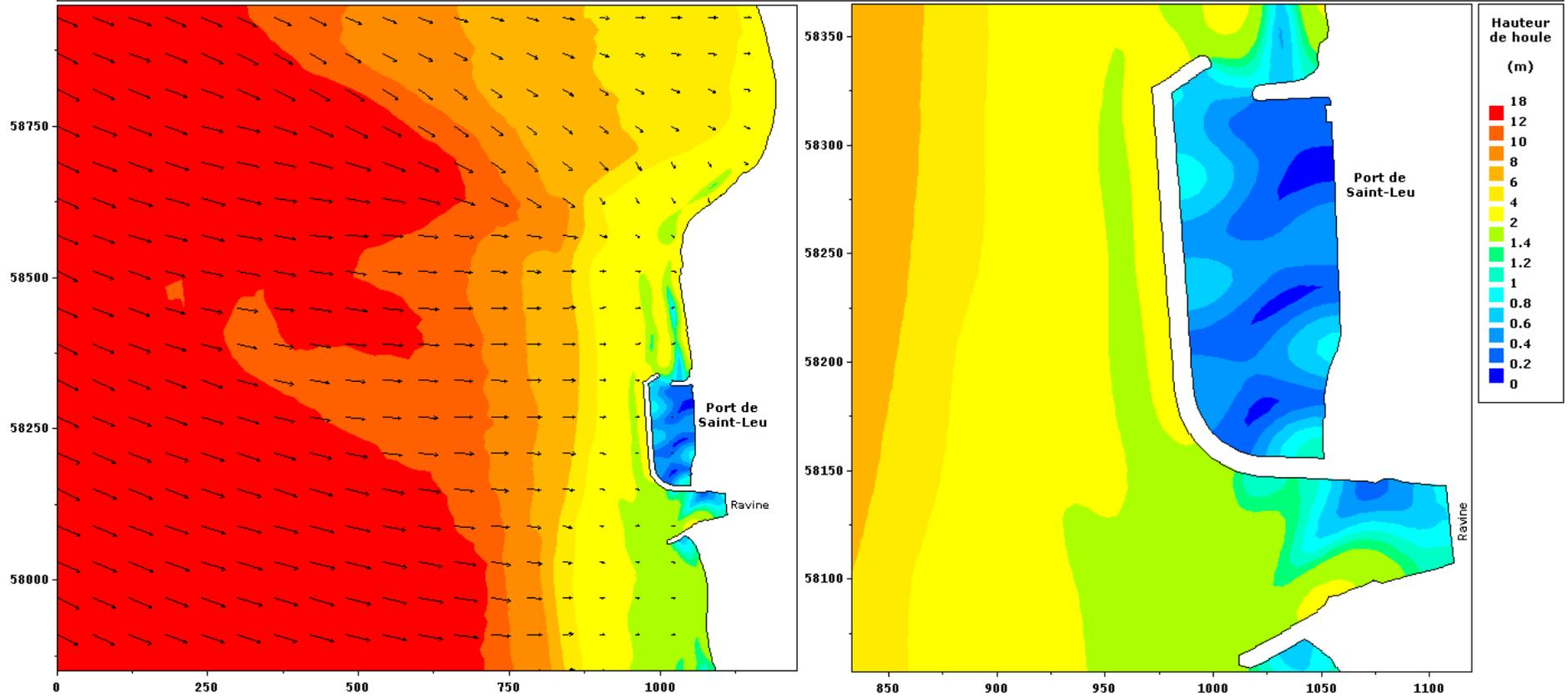
MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet 2

Houle cyclonique NW (310° Nord), Tretour=50ans, Hs=13.1m, Tp=15.2s, Niveau d'eau=+1.2m/NGR



MODELE D'AGITATION - Port de Saint-Leu - Etat Projet 2

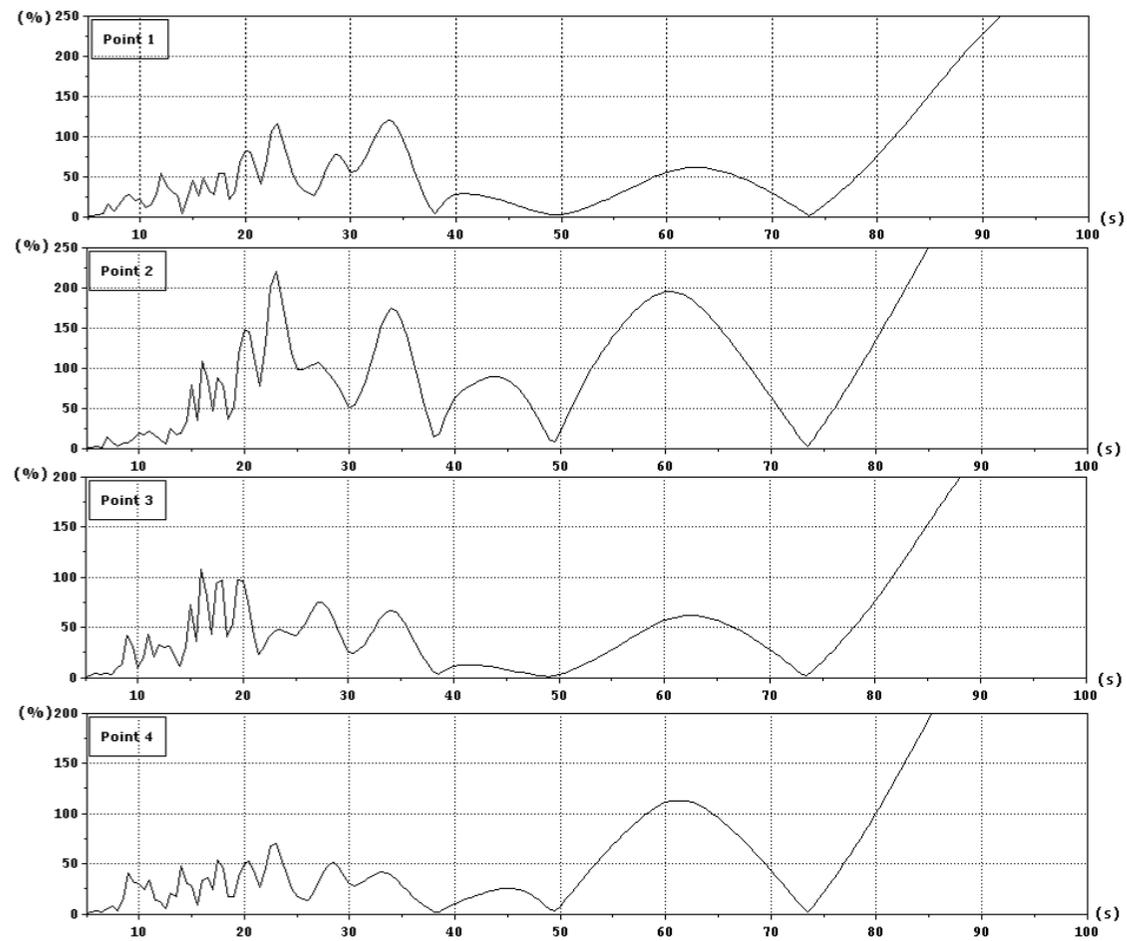
Houle cyclonique NW (310° Nord), Tretour=100ans, Hs=15.1m, Tp=16s, Niveau d'eau=+1.7m/NGR



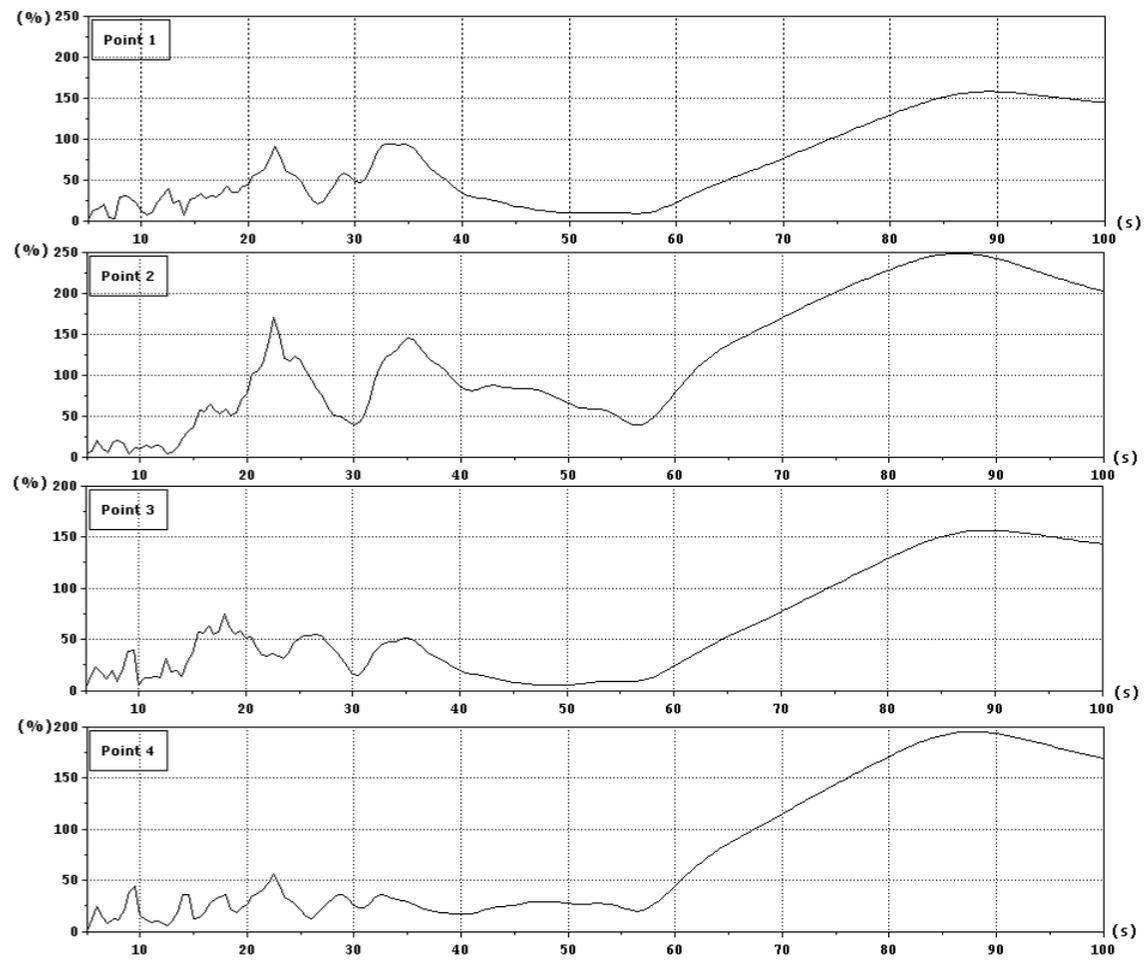
**ANNEXE N°3**  
**Résultats des modélisations de recherche de périodes de**  
**résonances**

**ETAT ACTUEL**

# Résultats résonance Direction 225° Nord

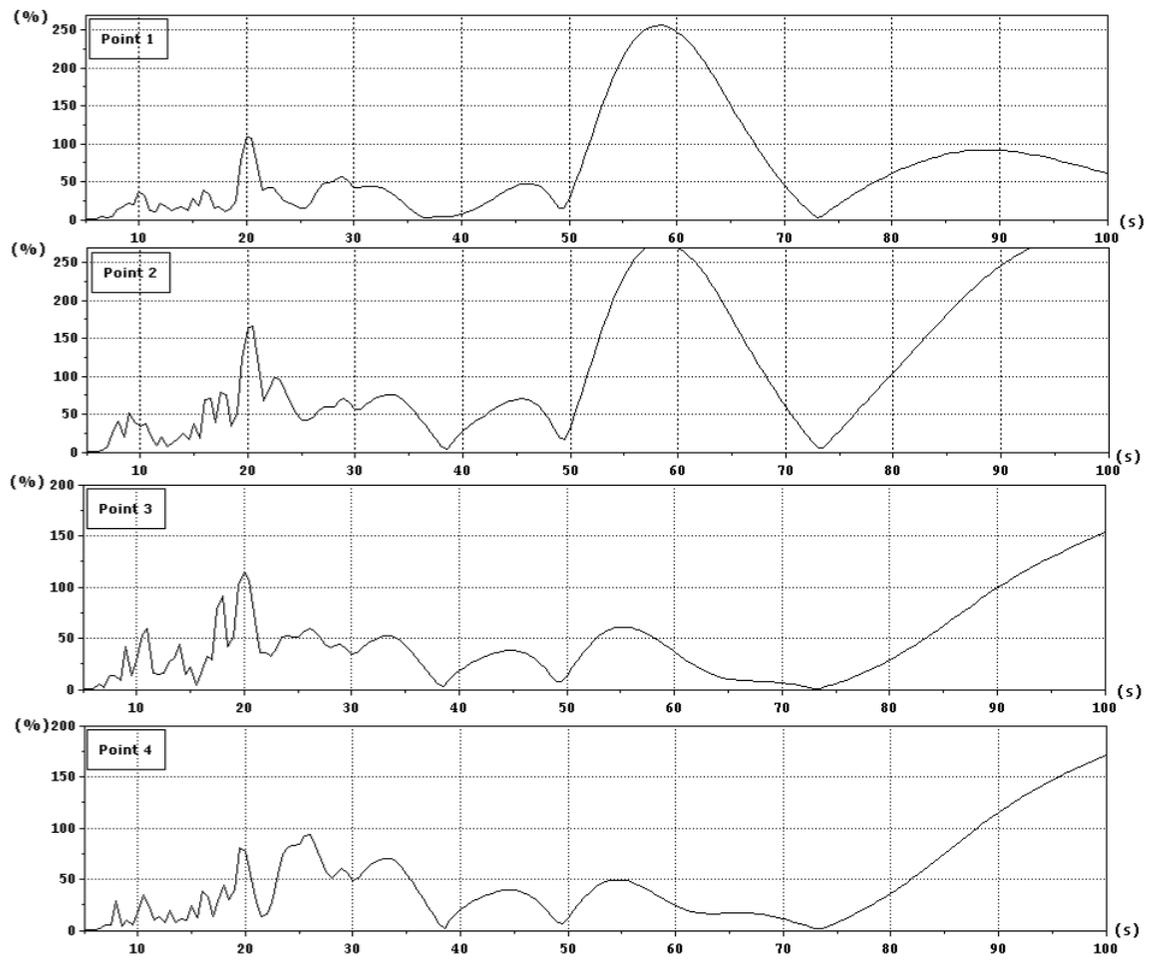


### Résultats résonance Direction 310° Nord

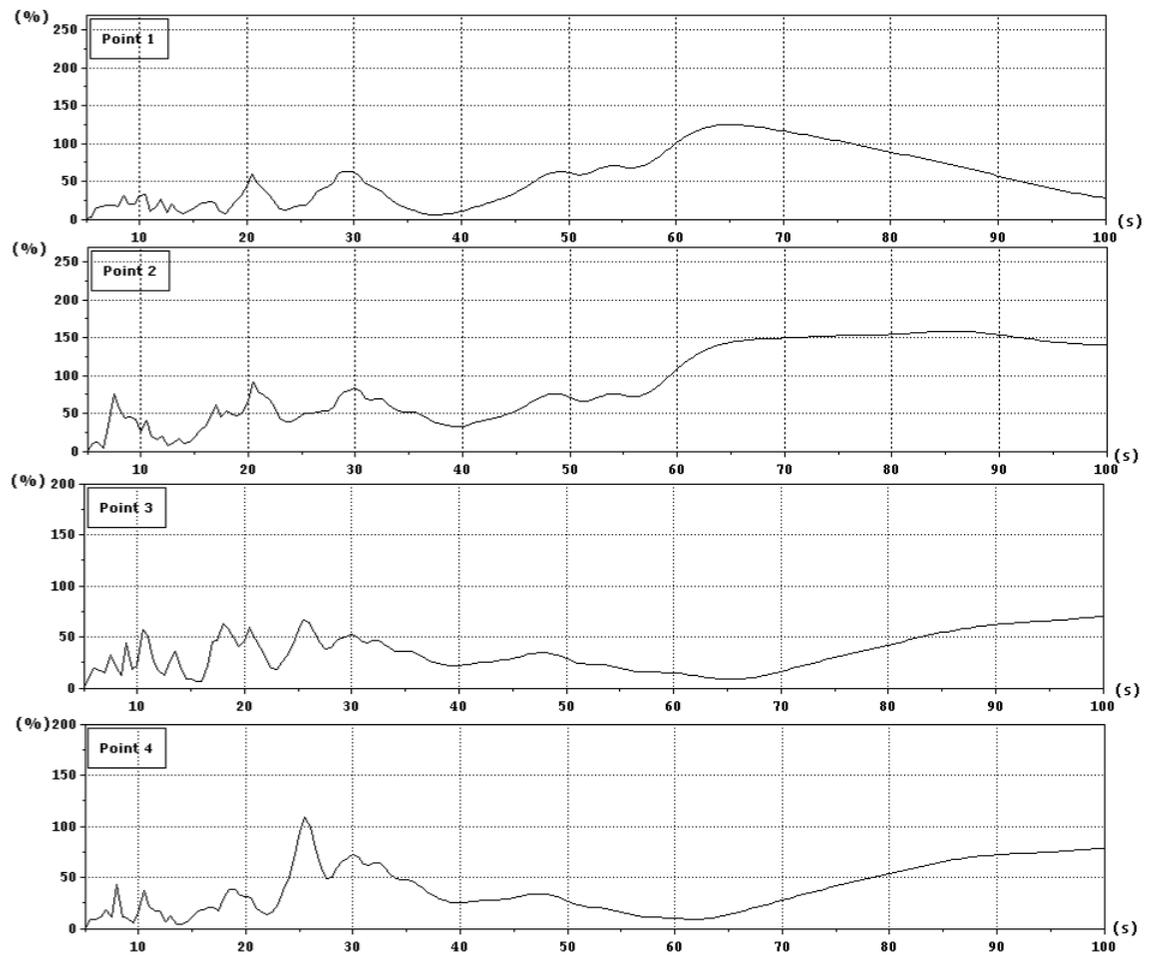


**ETAT PROJET**

# Résultats résonance Direction 225° Nord

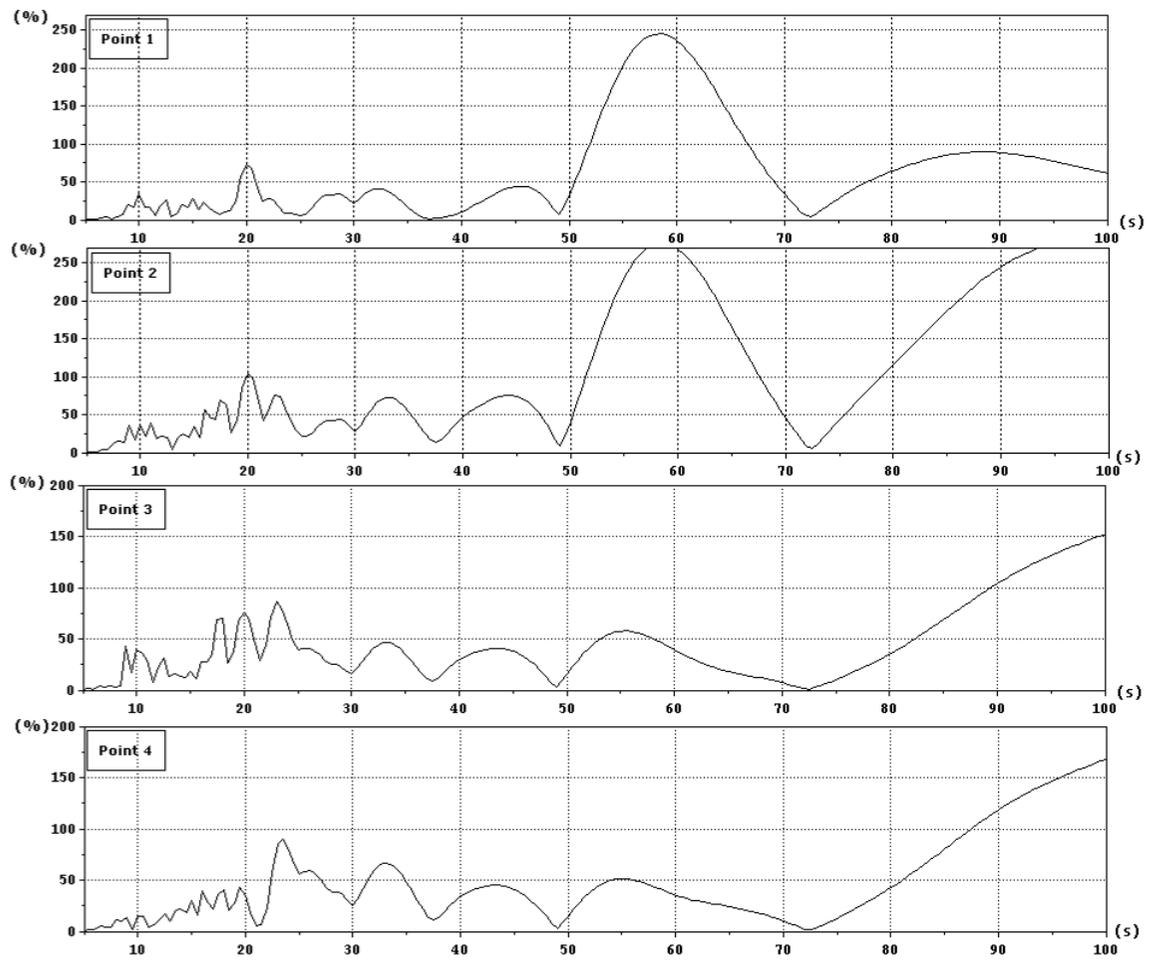


# Résultats résonance Direction 310° Nord



**ETAT PROJET 2**

# Résultats résonance Direction 225° Nord



### Résultats résonance Direction 310° Nord

