



**MARINA DE RIVIÈRE-DU-LOUP**

**Modification des ouvrages existants visant à réduire l'envasement de la marina**



*Le Groupe-Conseil LaSalle*

**R.1696  
Novembre 2008**



**Le Groupe-Conseil LaSalle Inc.**

9620, rue Saint-Patrick, LaSalle (Québec) Canada H8R 1R8

Téléphone : (514) 366-2970 / Télécopieur : (514) 366-2971

Site Internet : [www.gcl.qc.ca](http://www.gcl.qc.ca)

Courrier électronique : [gcl@gcl.qc.ca](mailto:gcl@gcl.qc.ca)

***Rapport présenté à la  
Corporation du Carrefour maritime  
de Rivière-du-Loup***

**MARINA DE RIVIÈRE-DU-LOUP  
Modifications des ouvrages existants visant  
à réduire l'envasement de la marina**

**R. 1696**

**Novembre 2008**

**Préparé par :**

---

**Catherine Denault, ing.  
Le Groupe-Conseil LaSalle inc.**

---

**Marc Villeneuve, ing.  
Le Groupe-Conseil LaSalle inc.**

---

**Yann Ropars, ing.  
Consultants Ropars inc.**

**429-101 (1038)**

## TABLE DES MATIÈRES

<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>iv</b>
<b>1.0 INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>2.0 MISE EN CONTEXTE.....</b>	<b>2</b>
2.1 Zone à l'étude .....	2
2.2 Problématique d'envasement.....	3
2.3 Approche méthodologique .....	5
<b>3.0 MODÉLISATION HYDRODYNAMIQUE .....</b>	<b>6</b>
3.1 Description du modèle numérique.....	6
3.1.1 Modèle numérique MIKE 21 NHD.....	6
3.1.2 Limites de la zone modélisée.....	6
3.1.3 Numérisation de la bathymétrie .....	8
3.1.4 Conditions aux limites .....	10
3.1.5 Paramètres de modélisation .....	13
3.1.5.1. Rugosité des fonds .....	13
3.1.5.2. Viscosité turbulente.....	13
3.2 Validation du modèle numérique.....	13
<b>4.0 VARIANTES D'AMÉNAGEMENT .....</b>	<b>14</b>
4.1 Critères de conception .....	14
4.2 Aménagement futur de base.....	15
4.3 Scénario a .....	16
4.4 Scénario b .....	18
<b>5.0 RÉSULTATS DE MODÉLISATION.....</b>	<b>20</b>
5.1 Comparaison générale des scénarios d'aménagement.....	20
5.2 Variantes d'aménagement « a » .....	21
5.3 Variantes d'aménagement « b » .....	24

---

## TABLE DES MATIÈRES (suite)

5.3.1	Influence de la rivière du Loup.....	25
5.4	Variante recommandée.....	27
<b>6.0</b>	<b>VARIANTE FINALE.....</b>	<b>32</b>
6.1	Protection contre l'agitation des vagues.....	32
6.2	Évaluation des coûts de réalisation.....	32
6.3	Dragages d'entretien.....	35
6.3.1	Modélisation hydrosédimentologique.....	37
<b>7.0</b>	<b>CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....</b>	<b>41</b>
	<b>RÉFÉRENCES.....</b>	<b>43</b>
<b>Annexe A</b>	<b>- Champs des courants des scénarios d'aménagement à différents instants du cycle de marée, pour des conditions de morte-eau et de vive-eau</b>	

---

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Position et étendue des bathymétries numériques.....	7
Tableau 2 : Correspondance entre les niveaux de référence ZC et NMM .....	10
Tableau 3 : Évaluation préliminaire des coûts de construction.....	35
Tableau 4 : Réduction de l'envasement par la variante a3.....	38

---

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de Rivière-du-Loup .....	2
Figure 2 : Pointe de la rivière du Loup et localisation des quais.....	2
Figure 3 : Courants de marée dans le secteur à l'étude en conditions actuelles .....	4
Figure 4 : Données et limites des bathymétries numériques.....	9
Figure 5 – Bathymétries numériques utilisées dans MIKE 21 .....	11
Figure 6 – Conditions de marée aux limites du modèle d'ensemble .....	12
Figure 7 – Aménagement futur de base .....	15
Figure 8 – Variantes d'aménagement de type « a ».....	17
Figure 9 – Variantes d'aménagement de type « b ».....	19
Figure 10 : Courants de morte-eau – Deux heures après la haute mer .....	22
Figure 11 : Courants de vive-eau – Deux heures après la haute mer .....	23
Figure 12 – Données de débit et crue 1 :10 ans de la rivière du Loup .....	25
Figure 13 – Champs des vitesses de la variante b1, avec et sans la rivière du Loup .....	26
Figure 14 – Bathymétrie des fonds à l'approche de la marina .....	29
Figure 15 – Vitesse moyenne dans la marina au cours d'un cycle de marée de morte-eau ..	30
Figure 16 – Vitesse moyenne dans la marina au cours d'un cycle de marée de vive-eau.....	31
Figure 17 – Vues en coupe des passes de la variante a3.....	33
Figure 18 – Vues en élévation des passes de la variante a3 .....	34
Figure 19 – Patrons de déposition en morte-eau .....	39
Figure 20 – Patrons de déposition en vive-eau .....	40

## 1.0 INTRODUCTION

En 2001, une coentreprise formée par Tecsum, le Groupe-Conseil LaSalle (GCL) et Robert Hamelin et associés (coentreprise TLH) a été chargée par la Société des Traversiers du Québec (STQ) d'étudier diverses options de reconstruction du quai du traversier de Rivière-du-Loup. Les options proposées devaient notamment viser une réduction de l'envasement affectant les installations portuaires existantes.

Parmi les différents scénarios d'aménagement alors étudiés, le GCL avait modélisé sommairement des variantes permettant plus spécifiquement de minimiser l'envasement de la marina. La présente étude vise à approfondir cette réflexion et à proposer des modifications à la configuration actuelle des ouvrages afin de générer des courants de marée dans la marina suffisamment importants pour éviter, ou tout au moins réduire, la sédimentation fine.

Le rapport comporte cinq chapitres. Le chapitre 2 offre d'abord une description du projet, de la problématique d'envasement du site et de l'approche méthodologique adoptée. Le chapitre 3 présente les principaux paramètres de la modélisation numérique bidimensionnelle mise en œuvre pour prédire le régime hydrodynamique du secteur à l'étude. Le chapitre 4 décrit les principales variantes d'aménagement étudiées. Les résultats de modélisation numérique sont présentés au chapitre 5. Finalement, la variante retenue et l'estimation sommaire des coûts associés à cette variante font l'objet du chapitre 6.

## 2.0 MISE EN CONTEXTE

### 2.1 Zone à l'étude

Le port de Rivière-du-Loup se situe en rive sud du fleuve Saint-Laurent, environ 200 km en aval de Québec (figure 1). Le quai du traversier existant et un ancien quai commercial sont construits selon un axe est-ouest, à l'extrémité de la pointe de la rivière du Loup (figure 2). D'une longueur d'un peu plus d'un kilomètre, cette pointe est entièrement comprise dans la zone d'estran et s'aligne selon l'axe du Saint-Laurent (sud-ouest/nord-est). La portion de la batture située au sud de la pointe correspond à l'embouchure de la rivière du Loup (figure 2).

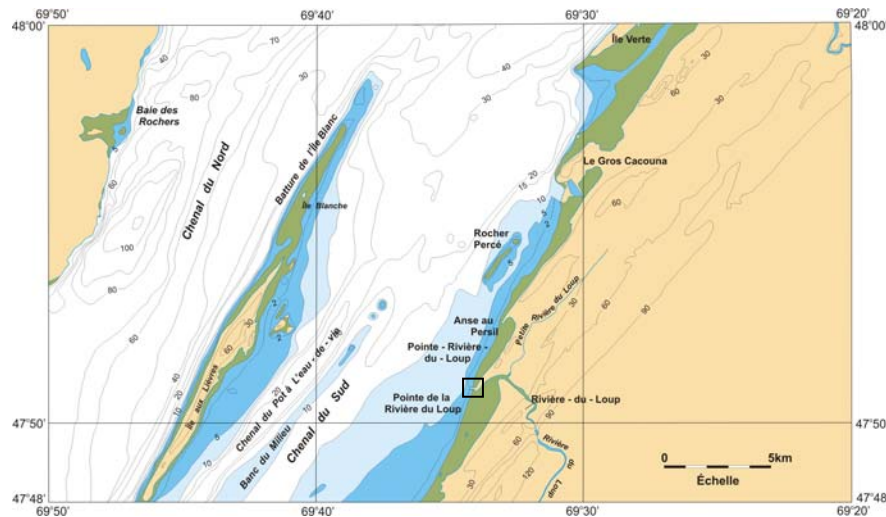


Figure 1 : Localisation de Rivière-du-Loup (source : réf. [1])



Figure 2 : Pointe de la rivière du Loup et localisation des quais (source : réf. [1])



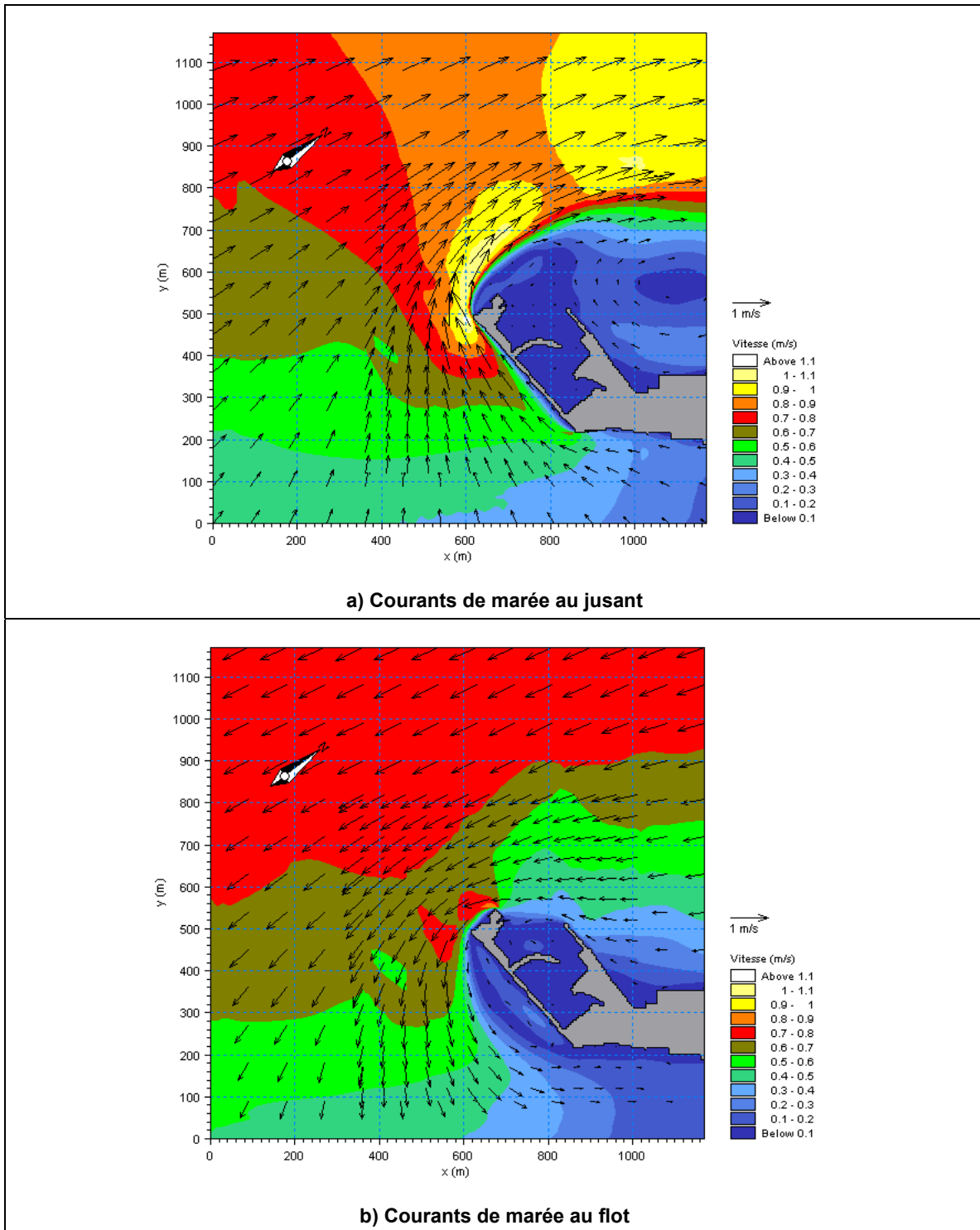
## 2.2 Problématique d'envasement

En milieu portuaire, les problèmes d'envasement surviennent lorsque l'agitation et les courants dans les zones abritées par les ouvrages ne sont pas suffisants pour empêcher la décantation des sédiments en suspension. Au site de Rivière-du-Loup, plusieurs facteurs peuvent expliquer la présence de ces sédiments (réf. [1] et [2]) :

- La turbidité de masse associée à la zone de turbidité maximale du Saint-Laurent située plus en amont;
- L'érosion de la batture par les vagues, potentiellement renforcée par la bioturbation (déplacement des sédiments par la faune benthique);
- La remise en suspension par les courants de marée et les vagues des accumulations formées en hiver sous le couvert de glace dans la zone intertidale;
- La remise en suspension des sédiments piégés par les plantes aquatiques durant l'été.

La configuration actuelle de l'ancien quai commercial et du quai du traversier crée une enclave à l'abri des courants principaux de la marée. Au jusant, l'ancien quai commercial déporte vers le large la veine principale de l'écoulement issu de la vidange de l'estuaire de la rivière du Loup (figure 3a). Au flot, la présence des deux quais force l'écoulement principal à longer la ligne imaginaire reliant leurs extrémités (figure 3b).

Le poste à quai du traversier et le bassin de la marina se trouvent donc à être en retrait de l'écoulement principal des courants de marée, dans des zones de vitesses faibles à nulles. Ces conditions sont propices à la décantation des sédiments en suspension et expliquent les problèmes d'envasement affectant le quai actuel du traversier et le havre de la marina.



**Figure 3 : Courants de marée dans le secteur à l'étude en conditions actuelles**

---

### **2.3 Approche méthodologique**

La présente étude propose l'analyse de différents scénarios d'aménagement des ouvrages portuaires afin d'induire des vitesses d'écoulement plus importantes dans le bassin de la marina, et ainsi réduire la déposition des sédiments fins en suspension.

Une modélisation hydrodynamique détaillée de la zone portuaire est utilisée pour prédire les champs des courants de marée obtenus dans le bassin de la marina. L'analyse comparative des variantes d'aménagement est ensuite basée sur l'intensité et l'efficacité des courants circulant dans l'ensemble du bassin de la marina.

### **3.0 MODÉLISATION HYDRODYNAMIQUE**

Le modèle hydrodynamique développé dans le cadre d'une étude précédente portant sur le secteur de Rivière-du-Loup (réf. [3]) a été remis en œuvre et amélioré pour les fins de la présente étude. Les zones de modélisation ont été modifiées pour mieux représenter le bassin de la marina et les infrastructures portuaires du projet, et de nouvelles données ont été ajoutées au modèle bathymétrique.

#### **3.1 Description du modèle numérique**

##### **3.1.1 Modèle numérique MIKE 21 NHD**

La modélisation numérique des conditions hydrodynamiques du secteur à l'étude a été effectuée à l'aide du modèle MIKE 21 NHD, conçu et développé au Danemark par la firme *DHI Water & Environment*. Ce logiciel commercial est reconnu à l'échelle internationale pour la modélisation bidimensionnelle des écoulements à surface libre en milieu fluvial, estuarien ou côtier.

Le modelé naturel des fonds est reproduit numériquement selon un maillage à cellules rectangulaires. Le module NHD (*Nested Hydrodynamics*) de MIKE 21 est conçu pour l'utilisation de maillages imbriqués de résolution variable, permettant de modéliser de grandes étendues avec un maillage grossier puis d'augmenter la précision de la modélisation à l'approche des secteurs d'intérêt.

D'après les conditions imposées aux limites de la zone considérée, le modèle fournit les valeurs de niveaux et de vitesses d'écoulement intégrées sur la verticale en chacun des points de maillage de la bathymétrie.

##### **3.1.2 Limites de la zone modélisée**

La modélisation hydrodynamique dans le secteur de Rivière-du-Loup nécessite d'imposer aux limites amont et aval de la zone modélisée la variation des niveaux d'eaux associée à la marée.

Ces limites doivent correspondre à des sites disposant de données marégraphiques et être suffisamment éloignées l'une de l'autre pour obtenir un décalage perceptible dans la propagation de l'onde de marée. Les limites doivent également être à une certaine distance du secteur d'intérêt afin que la schématisation du champ des courants, qui survient inévitablement aux limites du modèle, n'influence pas la représentativité de la modélisation.

Pour la modélisation du fleuve Saint-Laurent, l'approche à privilégier consiste donc à représenter un bief important de l'estuaire, en sélectionnant un maillage plus grossier dans les zones éloignées, permettant ainsi de limiter les temps de calculs, puis à augmenter la résolution du maillage à l'approche du secteur à l'étude.

Le modèle global couvre ainsi environ 160 km de l'estuaire, entre Pointe-aux-Orignaux et Pointe-au-Père. La bathymétrie de cette zone est représentée selon un maillage à cellules carrées de 162 m de côté. À l'approche de Rivière-du-Loup, la dimension des cellules est graduellement réduite à 54 m, 18 m, 6 m pour finalement atteindre un minimum de 2 m et offrir une précision optimale aux abords immédiats des installations portuaires <sup>(1)</sup>. Les bathymétries sont toutes alignées selon la même orientation, l'axe longitudinal défini dans MIKE 21 correspondant à l'azimut 36,5°. Le tableau 1 donne la position et l'étendue de chacune des bathymétries imbriquées dans le modèle numérique.

**Tableau 1 : Position et étendue des bathymétries numériques**

Numéro de bathymétrie	$\Delta x = \Delta y$ (m)	Longueur x (m)	Longueur y (m)	Origine		
				Est (UTM19)	Nord (UTM19)	Relative
1	162	162 000	72 900	449 116,00	5 241 800,00	--
2	54	16 200	9 720	454 828,89	5 289220,75	(300,180)
3	18	8 100	1 944	458 173,67	5 296 842,58	(252,252)
4	6	2 916	2 592	458 629,26	5 297 716,35	(486,432)
5	2	486	486	457 401,07	5 299 047,54	(54, 297)

<sup>(1)</sup> La formulation numérique de MIKE 21 NHD exige que les dimensions des cellules d'un maillage imbriqué soit trois fois inférieures à celles du maillage englobant.

### 3.1.3 Numérisation de la bathymétrie

Plusieurs sources de données bathymétriques étaient disponibles pour la présente étude :

- Cartes marines no 1234, 1235 et 1236 du service hydrographique du Canada (SHC), obtenues en format numérique (AutoCAD) auprès de la firme NDI;
- Minutes hydrographiques obtenues du SHC pour trois relevés :
  - No 3003582 – Fleuve Saint-Laurent, entre l'île Verte et Trois-Pistoles (30 798 points sondés en 1969);
  - No 3003583 – Fleuve Saint-Laurent, entre Trois-Pistoles et Saint-Fabien (17 881 points sondés en 1969);
  - No 3003623 – Fleuve Saint-Laurent, entre Saint-Alexandre et l'île Verte (57 789 points sondés en 1971).
- Bathymétrie relevée en 2001 par la firme Les Entreprises Normand Juneau dans le bassin de la marina et l'aire d'accostage du traversier;
- Bathymétrie relevée en 2007 par la firme Les Entreprises Normand Juneau dans la zone de mise en dépôt des déblais de dragage de Rivière-du-Loup;
- Bathymétrie relevée en 2008 par la firme Les Entreprises Normand Juneau dans l'embouchure de la rivière du Loup, la zone longeant l'ancien quai commercial et les battures au sud de l'embouchure de la rivière.

La figure 4 présente l'aspect des données bathymétriques suite à leur intégration au préprocesseur de MIKE 21. Les cartes, qui donnent également la limite de chacune des bathymétries définies au modèle, sont exprimées en coordonnées géographiques et UTM. Dans la zone immédiate du projet, la figure 4b illustre bien la forte densité des relevés bathymétriques disponibles dans le secteur à l'étude. Les sondages ont été réalisés à tous les 5 mètres, et permettent une définition précise de la bathymétrie dans la zone touchée par le réaménagement des ouvrages portuaires de la marina.

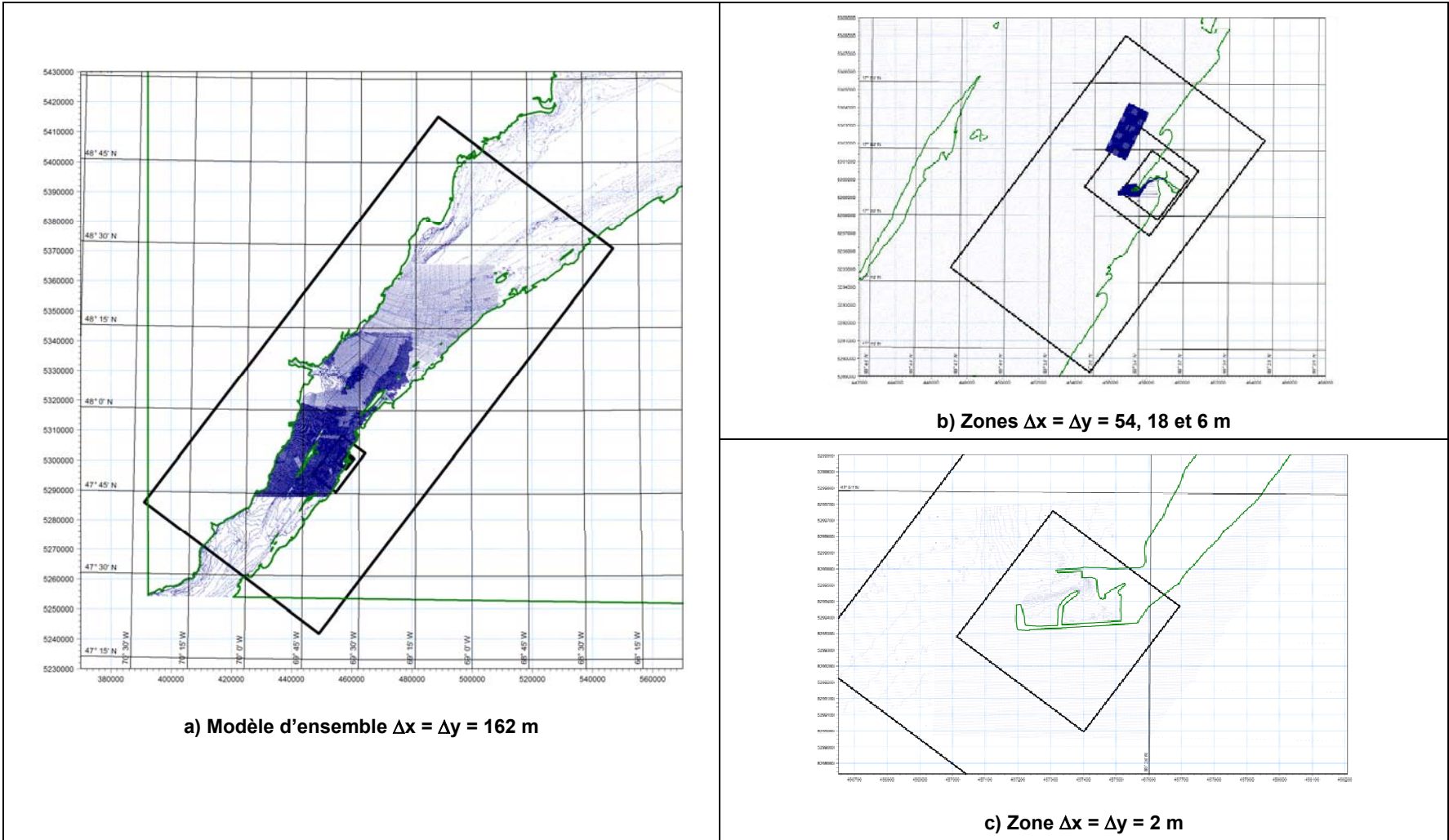


Figure 4 : Données et limites des bathymétries numériques

Les données bathymétriques ont été interpolées dans le préprocesseur de MIKE 21 selon la résolution de chacune des bathymétries numériques, en ayant au préalable modifié les niveaux bathymétriques pour les référencer au niveau moyen des mers (NMM ou niveau géodésique) plutôt qu'au zéro des cartes (ZC), qui est sensiblement modifié le long des quelques 160 km du modèle d'ensemble. Le tableau 2 indique les corrections ZC-NMM imposées le long de la zone modélisée.

**Tableau 2 : Correspondance entre les niveaux de référence ZC et NMM**

Site	Élévation (m) du zéro des cartes (ZC) par rapport au niveau moyen des mers (NMM)
Limite amont du modèle (Pointe-aux-Orignaux)	-3,0
Rivière-du-Loup	-2,636
Trois-Pistoles	-2,4
Limite aval du modèle (Pointe-au-Père)	-2,3

La figure 5 présente les bathymétries finalement obtenues dans le modèle pour les conditions d'aménagement actuelles.

### 3.1.4 Conditions aux limites

Les simulations ont été réalisées sans tenir compte du débit fluvial du Saint-Laurent. Le débit fluvial moyen du Saint-Laurent est en effet de l'ordre de 12 000 m<sup>3</sup>/s à l'amont du secteur modélisé, alors que les débits de marée maximums sont plus de dix fois plus importants, même en conditions de morte-eau.

La variation des niveaux d'eau et des courants simulée au modèle numérique est induite par l'imposition des niveaux de marée aux limites amont (Pointe-aux-Orignaux) et aval (Pointe-au-Père) du modèle d'ensemble. Les courbes de marée ont été établies d'après les enregistrements et les données des tables des marées du SHC.



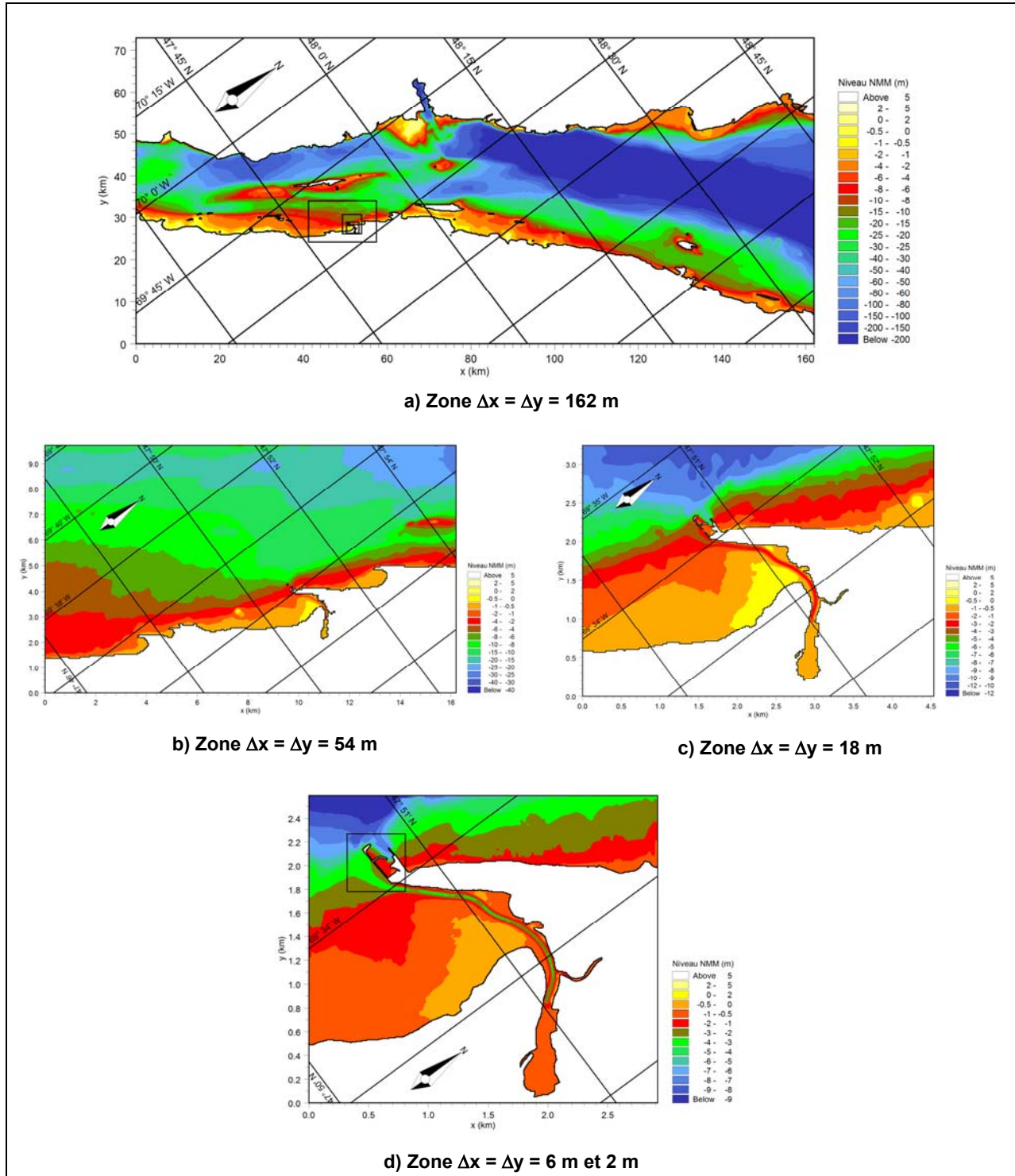


Figure 5 – Bathymétries numériques utilisées dans MIKE 21

La figure 6 illustre les courbes de marée de morte-eau et de vive-eau obtenues aux limites amont et aval du modèle. Il est à noter que les heures données en abscisse de ces graphiques sont arbitraires, les signaux illustrés couvrant deux cycles identiques de marée débutant à 00:00.

De façon générale, le débit de la rivière du Loup a également été négligé pour l'analyse comparative des scénarios d'aménagement. Des simulations additionnelles ont toutefois été effectuées pour certaines variantes, en combinant une crue 1 :10 ans à une marée de vive-eau, en vue de prédire les courants de jusant maximums obtenus le long de l'ancien quai commercial.

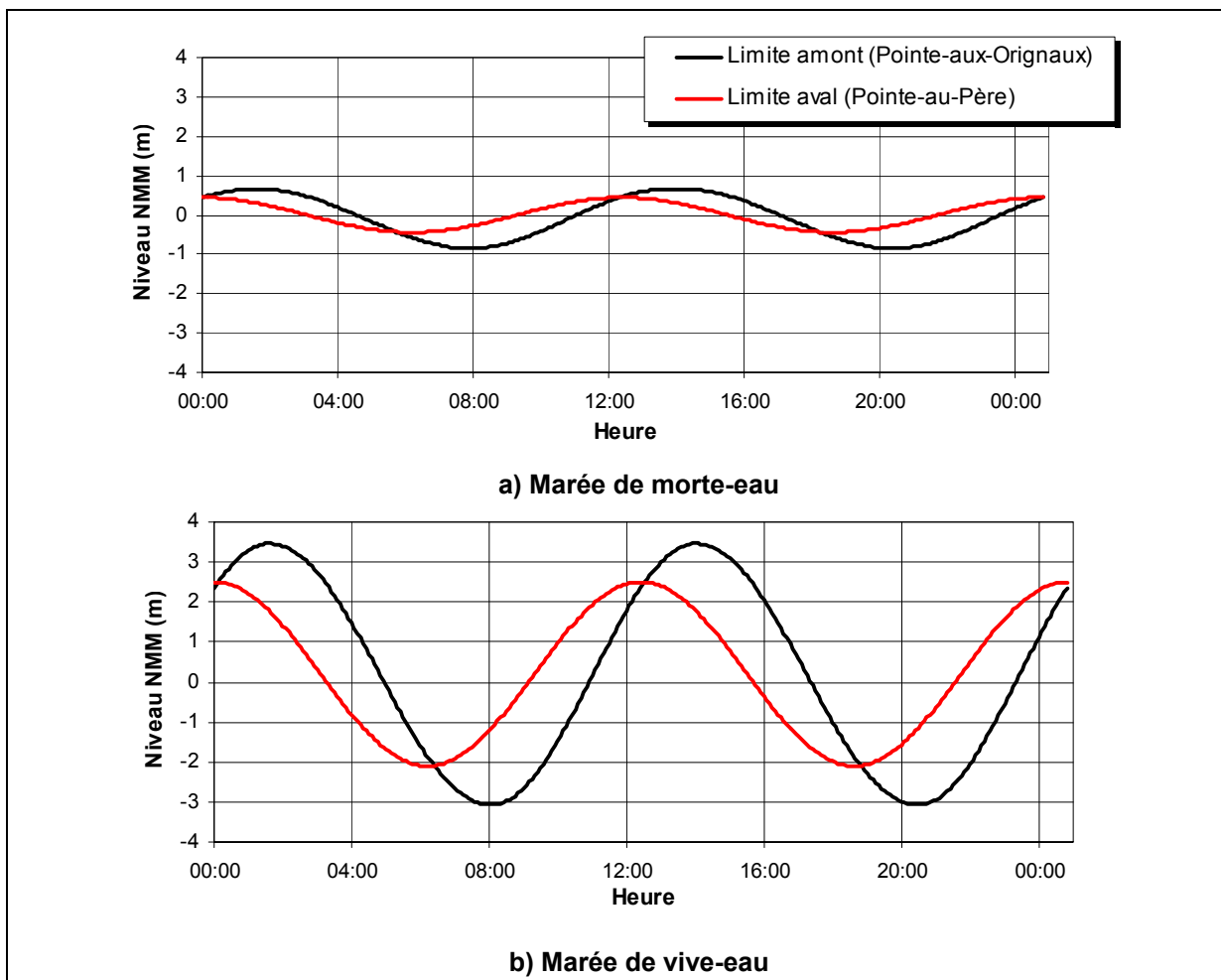


Figure 6 – Conditions de marée aux limites du modèle d'ensemble

### **3.1.5 Paramètres de modélisation**

#### **3.1.5.1. Rugosité des fonds**

Toutes les simulations ont été réalisées avec un coefficient de Manning de 0,025, constant dans l'ensemble des secteurs modélisés.

#### **3.1.5.2. Viscosité turbulente**

Les flux de quantité de mouvement dus à la turbulence, à l'intégration verticale des équations de base (modèle bidimensionnel) et aux fluctuations se produisant à des échelles inférieures aux cellules des maillages sont pris en compte dans MIKE 21 par un paramètre de viscosité turbulente.

En pratique, la variation de ce paramètre induit notamment dans les écoulements une plus ou moins grande tendance à former des zones de décollement et des courants de retour. Sur la base des observations du site et de l'expérience acquise dans des études antérieures en milieu estuarien, la viscosité turbulente a été fixée à 0,5 m<sup>2</sup>/s dans l'ensemble du modèle numérique.

### **3.2 Validation du modèle numérique**

Le modèle numérique utilisé dans la présente étude a fait l'objet de plusieurs exercices de validation dans le cadre d'études passées dans le secteur de Rivière-du-Loup (réf. [3] et [4]). Ces validations, basées sur la comparaison des résultats du modèle numérique avec des relevés de niveaux et de courants effectués sur le terrain, ayant donné des résultats satisfaisants, il n'apparaissait pas nécessaire de tester à nouveau la validité du modèle.

## 4.0 VARIANTES D'AMÉNAGEMENT

### 4.1 Critères de conception

Au terme de l'étude portant sur le réaménagement du quai du traversier (réf. [3]), la STQ a finalement opté pour la reconstruction des aménagements actuels, avec un léger allongement du quai du traversier. Les problèmes d'envasement qui affectent la marina et les aires d'approche du traversier seront donc toujours présents suite aux travaux projetés par la STQ.

Les variantes d'aménagement proposées dans le cadre de la présente étude visent essentiellement à pratiquer des ouvertures dans l'ancien quai commercial en vue de favoriser l'apparition dans le bassin de la marina de courants permettant de réduire la sédimentation.

L'optimisation s'est d'abord penchée sur le nombre et la taille des ouvertures requises pour étendre au maximum la zone d'influence des courants dans le bassin. Cette optimisation est délicate à cause des objectifs contradictoires qui gouvernent la conception des ouvertures :

- La quantité d'eau et la vitesse des courants circulant dans la marina doivent être suffisantes pour empêcher les sédiments fins de s'y déposer et de se consolider sur place;
- Le bassin de la marina doit être accueillant pour les pontons qui y sont installés et les petites embarcations qui la fréquentent. Les vitesses des courants et l'agitation due aux vagues suite aux ouvertures pratiquées dans les ouvrages portuaires ne doivent donc pas être trop importantes.
- Tout en empêchant les sédiments fins de se déposer dans la marina, il faut également éviter que les sédiments grossiers transportés par la rivière du Loup y pénètrent et s'y déposent. Cet aspect est particulièrement important dans le contexte de la progradation du delta de la rivière du Loup, mis en lumière par l'INRS-ETE lors de l'étude de la coentreprise TLH (réf. [3]).

- Le scénario d'aménagement optimal pour la marina ne doit pas s'avérer nuisible aux opérations de la STQ.

## 4.2 Aménagement futur de base

Afin de mieux évaluer l'efficacité des différentes variantes d'aménagement, les conditions futures de base, sans aucune ouverture dans les ouvrages portuaires existants, ont d'abord été modélisées. Par rapport aux conditions actuelles, cette variante comprend les modifications que la STQ compte apporter à ses installations, soit l'allongement du quai du traversier de 15 m, et la reconstruction de l'extrémité de l'ancien quai commercial (figure 7).

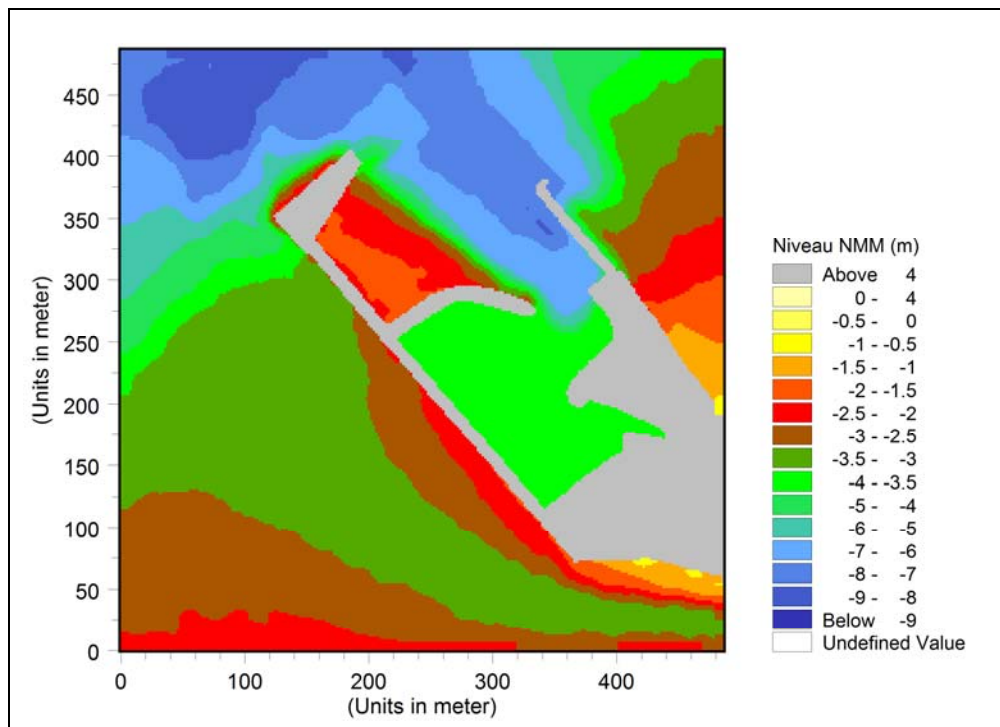


Figure 7 – Aménagement futur de base

Il est également pris pour acquis qu'un dragage de la marina sera effectué en parallèle aux travaux. Pour toutes les variantes futures d'aménagement, incluant les conditions de base,

les fonds de la marina sont dragués à une cote de -1 m par rapport au zéro marégraphique (ou -3,6 m NMM).

#### 4.3 Scénario a

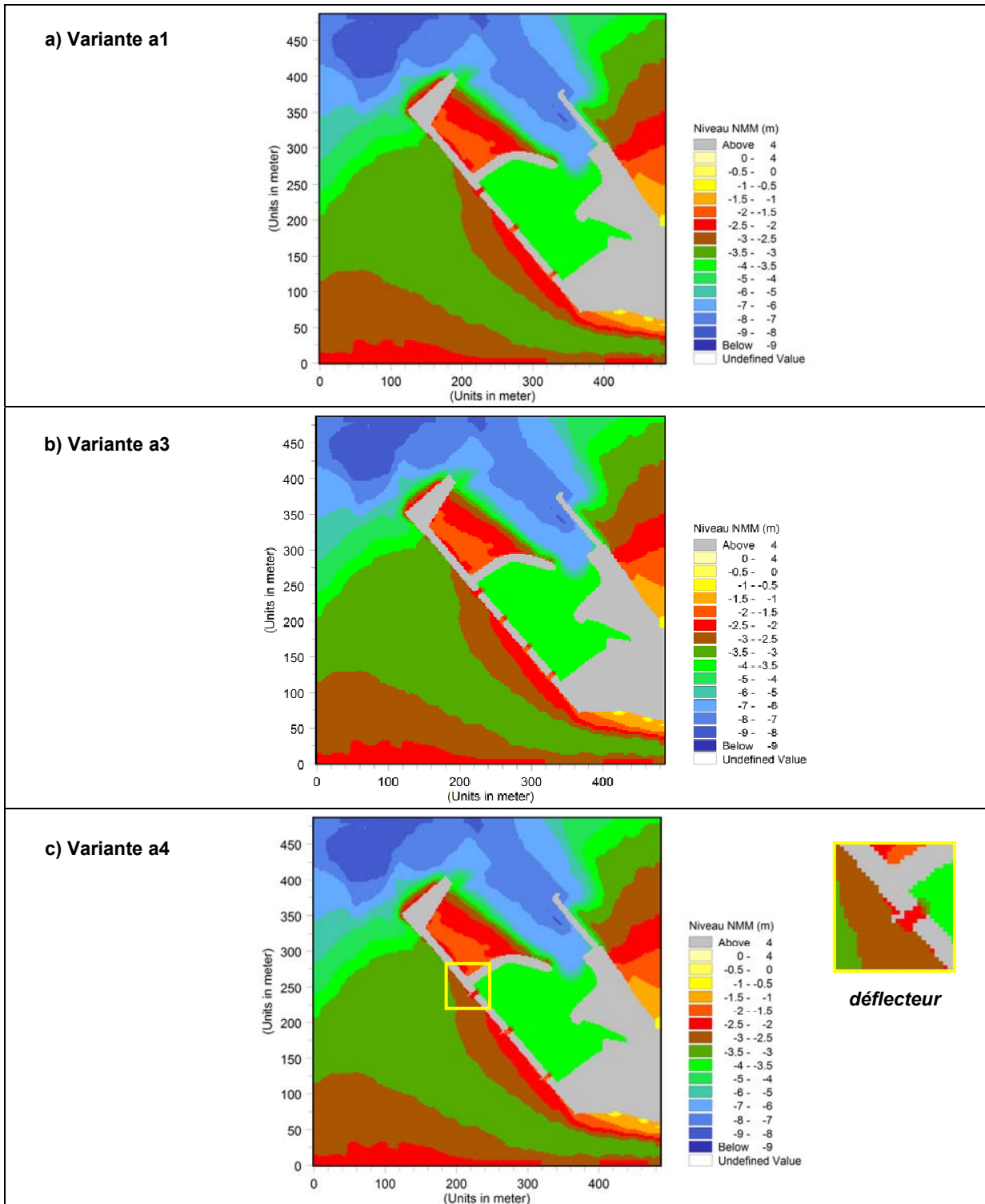
La famille de variantes « a » consiste à pratiquer des ouvertures d'une largeur de sept mètres dans l'ancien quai commercial (figure 8). Afin d'éviter l'introduction dans le bassin de la marina de sédiments grossiers issus de la rivière du Loup, ces ouvertures comportent un seuil plus élevé que le radier du chenal fluvial longeant le quai.

Trois principaux scénarios d'aménagement ont été modélisés <sup>(2)</sup>:

1. Variante a1 : cette variante présente trois ouvertures dans l'ancien quai commercial. Les seuils de ces ouvertures sont à des cotes de +0,6, +0,8 et +1,0 m (ZC), le seuil le plus profond étant situé vers le large.
2. Variante a3 : cette variante s'inscrit dans la continuité de la variante a1. Elle comporte toutefois une ouverture additionnelle dans l'ancien quai commercial, dont le seuil est à une cote de +0,9 m (ZC).
3. Variante a4 : cette variante présente les mêmes ouvertures que celles de la variante a1. Des déflecteurs sont toutefois ajoutés à l'entrée de chacune des ouvertures dans le but d'augmenter le débit entrant dans le bassin de la marina.

---

<sup>(2)</sup> Par souci de cohérence, on a conservé dans le présent rapport les noms des variantes d'optimisation utilisés en cours d'étude, lors de nos échanges avec le client. Il n'y a ainsi pas de variante a2.



**Figure 8 – Variantes d’aménagement de type « a »**

#### 4.4 Scénario b

La famille de variante « b » comporte un chenal dans la partie est du bassin de la marina. Le chenal est large de douze mètres et présente des murs verticaux à son extrémité est, et des pentes en enrochements dans sa partie ouest. Les murs verticaux correspondent aux encaissements de bois du vieux quai. La cote du radier du chenal est fixée à +1,3 m (ZC), une cote plus élevée que la bathymétrie avoisinante afin d'empêcher l'intrusion des sédiments grossiers en provenance de la rivière. Trois principaux scénarios d'aménagement ont été modélisés :

1. Variante b1 : cette variante comporte uniquement le chenal excavé dans la portion est des quais de la marina.
2. Variante b2 : cette variante présente le même chenal que la variante b1, mais elle ajoute une ouverture dans le brise-lames de la marina.
3. Variante b3 : cette variante est conforme à la variante b1, avec un déflecteur à la sortie du chenal pour mieux étaler les courants dans le bassin de la marina.

Les variantes d'aménagement « b » sont illustrées à la figure 9.



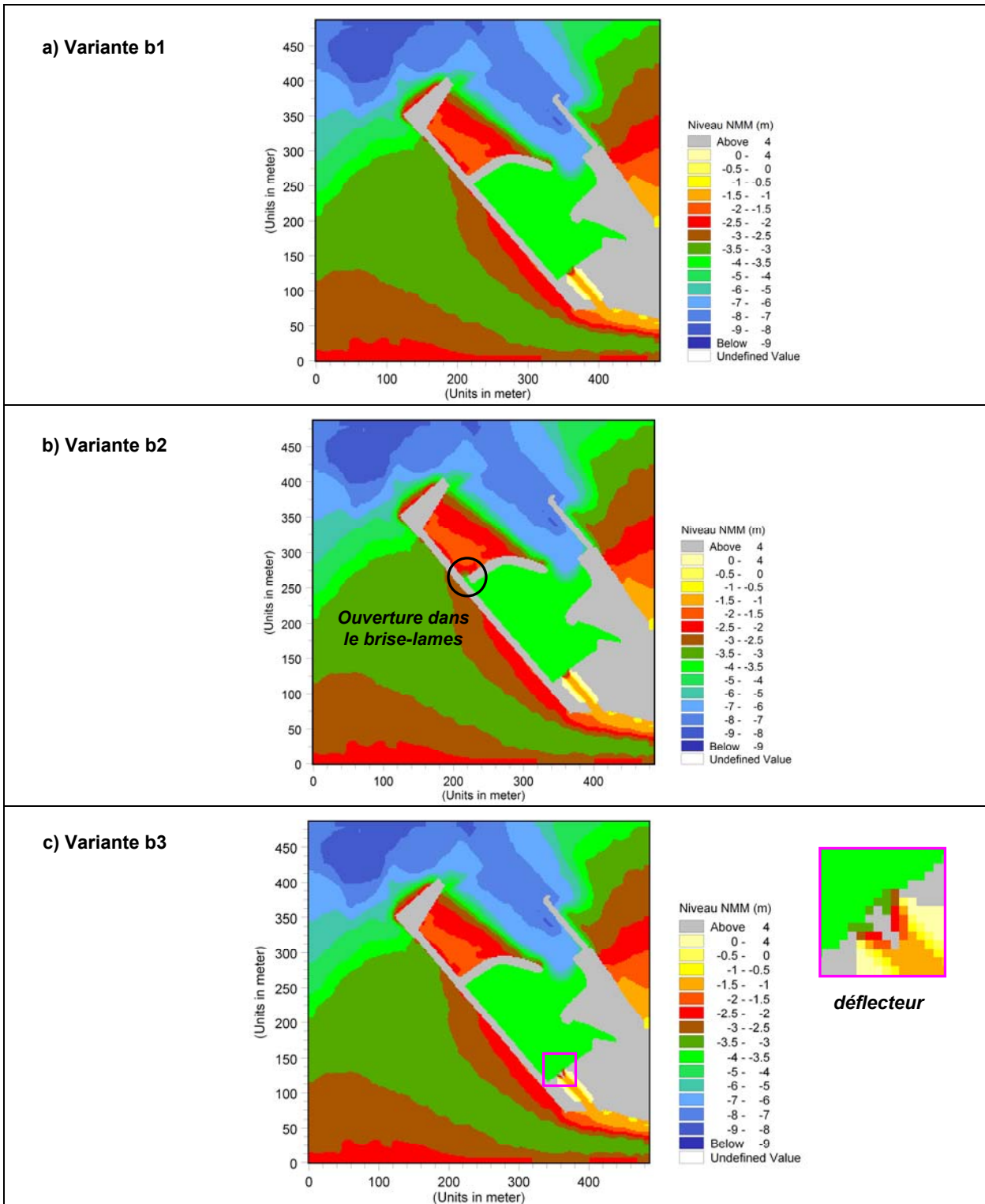


Figure 9 – Variantes d'aménagement de type « b »

## 5.0 RÉSULTATS DE MODÉLISATION

Les champs des courants ont été établis en conditions de marée de morte-eau et de vive-eau, pour les conditions futures de base et les six scénarios d'aménagement décrits au chapitre précédent. Les résultats de simulation sont présentés sous quatre formes :

- i. Les figures 10 et 11 donnent pour les conditions de base et les six options considérées les champs des courants à un instant donné, pour des conditions de morte-eau et de vive-eau.
- ii. Les figures A1 à A16 de l'annexe A donnent pour les conditions de base et les six options considérées les champs des courants obtenus à divers instants du cycle de marée, pour des conditions de morte-eau et de vive-eau.
- iii. Le cédérom annexé au présent rapport comporte l'ensemble des cartes couleurs de l'annexe A et des figures 10 et 11, de même que des animations vidéo (format .avi) illustrant l'évolution des courants pour l'ensemble d'un cycle de marée.
- iv. Les figures 15 et 16 présentent, sous forme de graphique, l'évolution de la vitesse moyenne d'écoulement dans le bassin de la marina pour les scénarios d'aménagement les plus intéressants.

### 5.1 Comparaison générale des scénarios d'aménagement

Le régime des courants dans le secteur à l'étude est essentiellement lié au cycle des marées. Les figures 10 et 11 présentent donc les résultats de modélisation obtenus avec un débit nul dans la rivière du Loup. L'influence du débit de la rivière sur les champs des vitesses dans la marina est évaluée à la section 5.3.1.

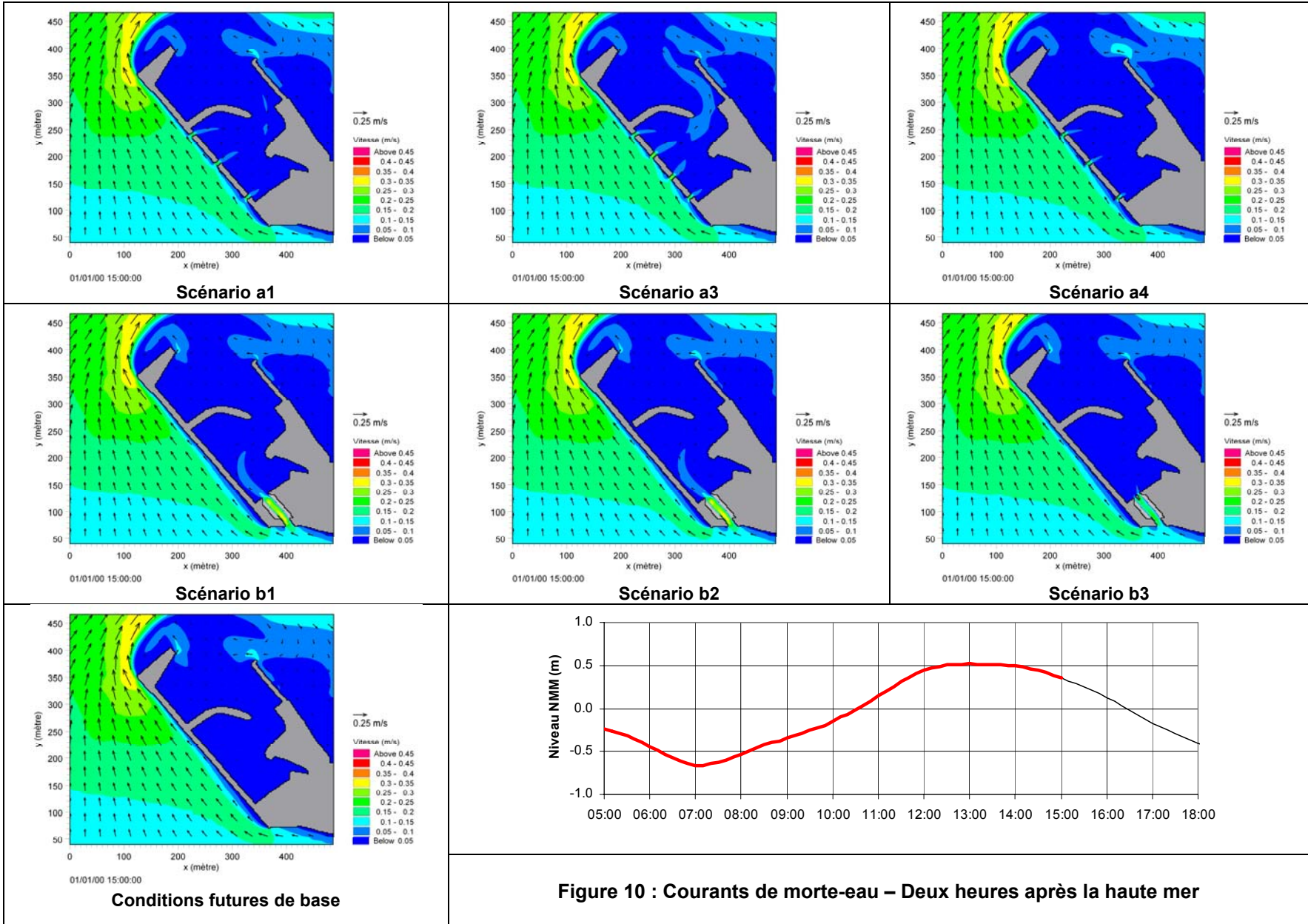
La comparaison des champs des vitesses en morte-eau et en vive-eau illustrés aux figures 10 et 11 fait d'abord ressortir les points généraux suivants :

- Par rapport aux conditions de base, qui ne présentent aucune ouverture dans les ouvrages de la marina, les six scénarios d'aménagement mènent tous à une augmentation de la vitesse des courants dans la marina.
- Pour tous les scénarios d'aménagement, les vitesses en morte-eau dans le bassin de la marina (figure 10) sont considérablement réduites par rapport aux conditions de vive-eau (figure 11). En morte-eau, à l'exception de la sortie immédiate du chenal des variantes b1 et b2, les vitesses maximales dans le bassin ne dépassent pas 0,1 m/s.
- Les variantes de type « b » permettent d'obtenir des vitesses plus importantes dans le bassin de la marina (maxima de l'ordre de 0,6 m/s, figure 11g), mais qui sont très localisées. En comparaison, les courants induits par les variantes de type « a » sont moins importants (maxima de l'ordre de 0,3 m/s, figure 11g) mais agissent sur une plus grande étendue.

## 5.2 Variantes d'aménagement « a »

Les figures 10 et 11 montrent clairement que c'est la variante a3 qui donne les meilleurs résultats pour la famille de variantes « a ». L'ajout d'ouvertures dans l'ancien quai commercial s'avère une manière efficace d'induire des vitesses dans le bassin de la marina. Un nombre d'ouvertures supérieur à quatre permettrait certainement d'augmenter davantage la circulation dans le bassin de la marina, mais la modélisation s'est arrêtée à ce nombre, le coût des travaux étant ici le facteur limitatif.

La variante a4, qui propose des déflecteurs à l'entrée des ouvertures de la variante a1, a été mise au point dans le but d'augmenter le débit entrant dans le bassin de la marina et offrir une protection face aux vagues en provenance de l'ouest. Les résultats présentés aux figures 10 et 11 montrent toutefois que les déflecteurs tendent à dévier, plutôt qu'à intercepter, la veine principale de l'écoulement qui longe l'ancien quai commercial. Par rapport aux résultats de la variante a1, la variante a4 donne lieu à des vitesses légèrement réduites et moins bien réparties dans la marina.



**Figure 10 : Courants de morte-eau – Deux heures après la haute mer**



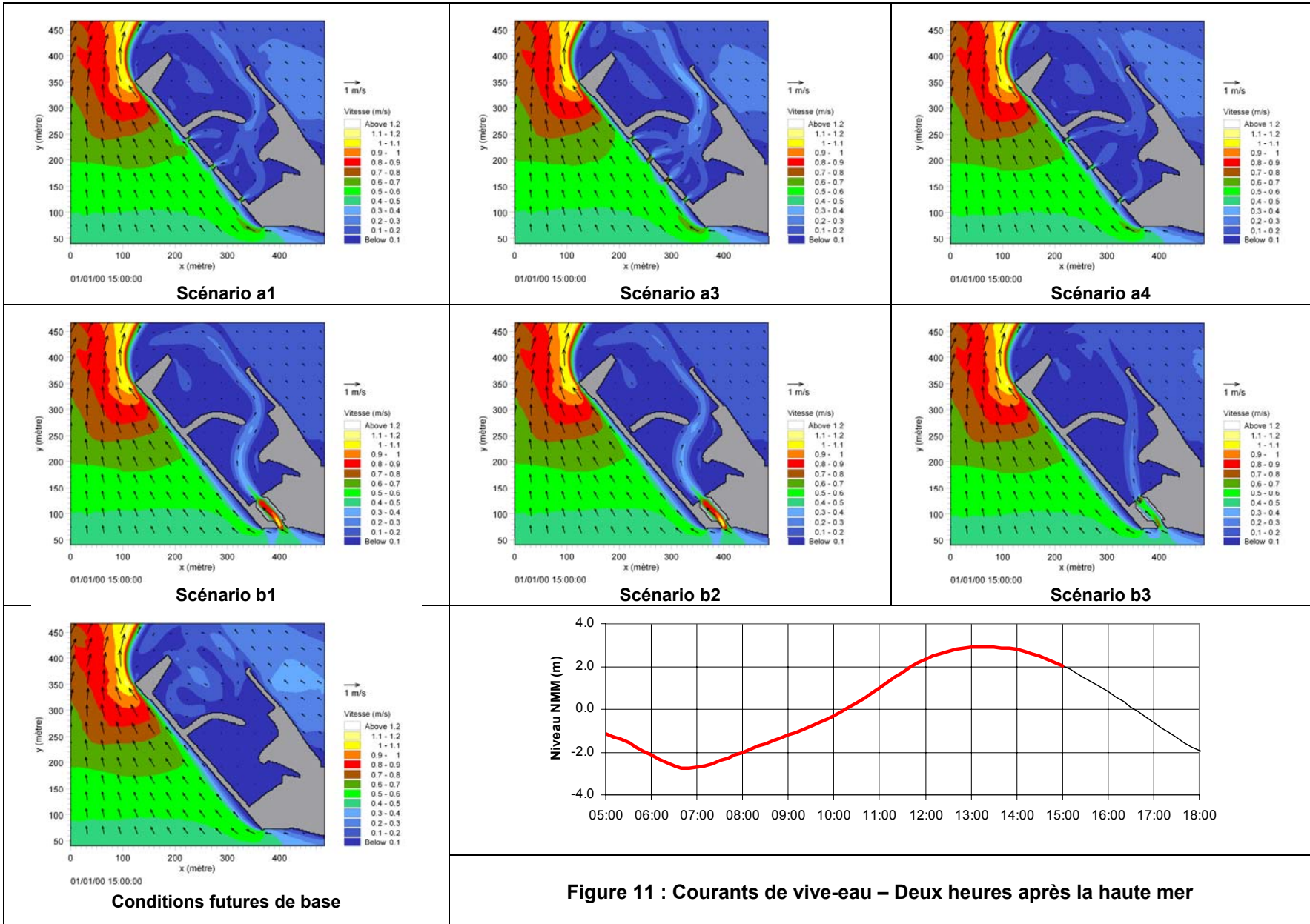


Figure 11 : Courants de vive-eau – Deux heures après la haute mer

Le principal désavantage associé aux variantes de type « a » se situe au niveau de la protection contre l'agitation par vents de secteurs ouest et sud-ouest. Les dispositifs de protection contre les vagues pouvant être ajoutés aux variantes de type « a » sont discutés au chapitre 6.

### **5.3 Variantes d'aménagement « b »**

La variante b1 permet d'introduire des vitesses significatives dans le bassin de la marina. La distribution spatiale des courants, en forme de « jet », est toutefois moins intéressante lorsque le potentiel de sédimentation est considéré pour l'ensemble du bassin. Les conditions de navigation pourraient également s'avérer problématiques.

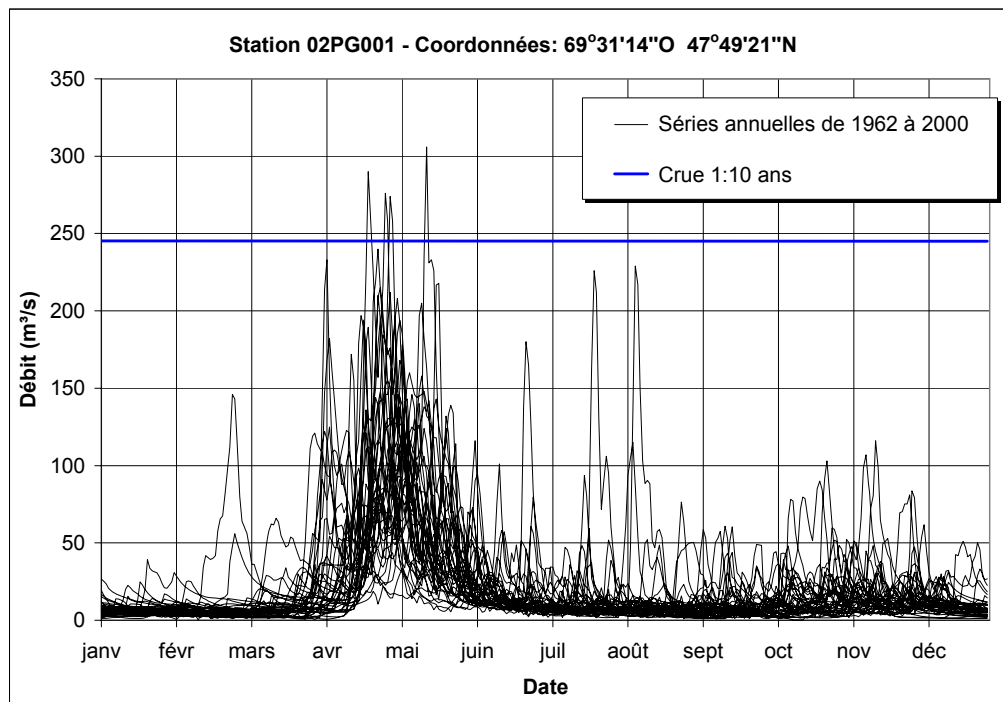
La comparaison des résultats obtenus pour les variantes b1 et b2 montre que les champs des vitesses sont pratiquement identiques pour ces deux variantes. L'ouverture pratiquée dans le brise-lames de la variante b2 ne semble avoir pratiquement aucune influence sur la circulation de l'eau dans le bassin de la marina. Afin d'obtenir un certain effet, il faudrait élargir significativement cette ouverture, ce qui laisserait pénétrer plus directement l'agitation due aux vagues. Devant ces résultats, la variante b2 a été abandonnée.

La variante b3 a été mise au point afin de diminuer l'effet de jet obtenu en présence de la variante b1 et ainsi mieux étaler les courants dans le bassin de la marina. La modélisation d'un épi déflecteur à la sortie du chenal de la variante b1 n'a toutefois pas donné les résultats escomptés. L'épi déflecteur modélisé forme une trop grande obstruction à la sortie du chenal, ce qui crée une dissipation des vitesses. Dans l'ensemble du bassin, les vitesses se trouvent à être réduites par rapport au scénario sans déflecteur (variante b1). Des simulations additionnelles, en présence de déflecteurs de plus petites dimensions, ont été envisagées, puis mises de côté. En effet, une analyse plus complète de la variante b3 a montré qu'elle serait probablement trop coûteuse, car les piliers déflecteurs devraient être conçus pour résister à l'action des glaces, la corrosion, l'érosion, etc. Les déflecteurs causeraient également un certain empiètement dans le bassin de la marina. Tout comme pour la variante b2, la variante b3 a été abandonnée en cours d'étude.

### 5.3.1 Influence de la rivière du Loup

Au terme des simulations, c'est donc la variante b1 qui s'avère être la plus intéressante parmi les variantes de type « b ». Afin de vérifier le risque d'introduction de sédiments grossiers et de vitesses trop importantes dans le bassin de la marina lors du passage de la crue de la rivière du Loup, des simulations additionnelles ont été effectuées avec la crue 1:10 ans de la rivière.

La figure 12 présente les séries annuelles de débits enregistrés entre 1962 et 2000 à la station 02PG001 de la rivière du Loup, située 1,4 km en aval du pont de la route 185. D'après ces données, la crue 1:10 ans de la rivière du Loup est d'environ 245 m<sup>3</sup>/s.



**Figure 12 – Données de débit et crue 1 :10 ans de la rivière du Loup**

La figure 13 compare les champs des vitesses obtenus en présence de la variante b1, avec un débit nul et un débit de 245 m<sup>3</sup>/s en provenance de la rivière. Malgré les fortes vitesses obtenues dans le lit de la rivière du Loup, les vitesses dans l'ensemble du bassin demeurent similaires.

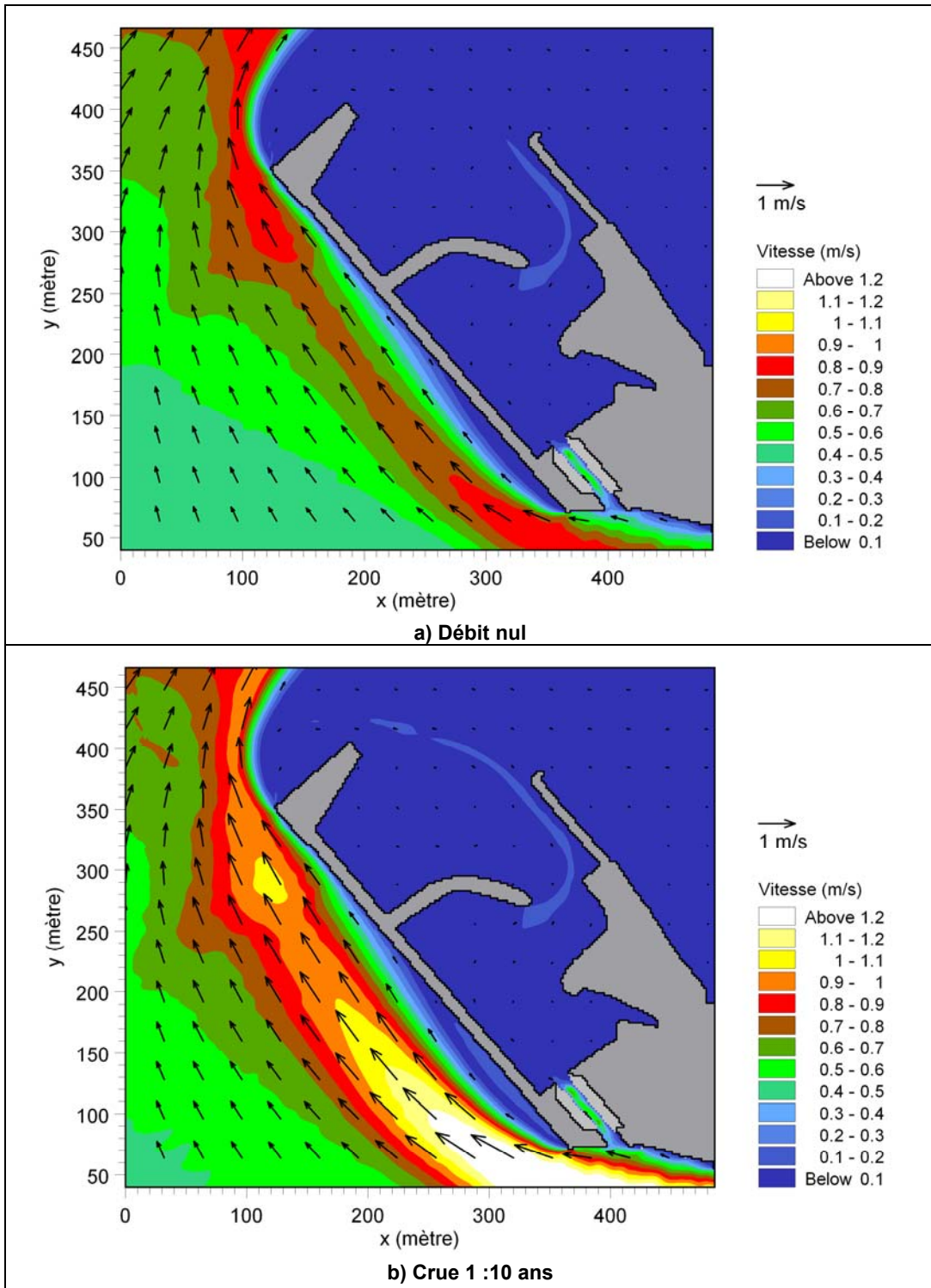


Figure 13 – Courants de jusant de la variante b1, deux heures avant la basse mer



Les données bathymétriques récentes relevées par les Entreprises Normand Juneau indiquent que le lit de la rivière à l'approche de la marina est à une cote de -3 m (NMM) tandis que l'entrée du chenal de la variante b1 est dans une zone comprise entre -1,5 et -1 m (NMM) (figure 14). Cette morphologie des fonds et l'orientation de la rivière font en sorte que le chenal de la variante b1 demeure en retrait de l'écoulement de la rivière du Loup.

#### **5.4 Variante recommandée**

La première analyse présentée à la section précédente, basée sur la comparaison des champs des courants obtenus dans le bassin de la marina pour les différents scénarios d'aménagement, a permis d'éliminer certaines variantes et d'identifier celles présentant un meilleur potentiel. Afin de pouvoir sélectionner une variante finale, les résultats des variantes identifiées comme étant les plus prometteuses ont été analysés de façon plus détaillée.

Les figures 15 et 16 montrent l'évolution de la vitesse moyenne dans le bassin de la marina pour les variantes a1, a3, et b1, ainsi que pour les conditions futures de base (sans ouvertures), au cours d'un cycle de marée de morte-eau (figure 15) et de vive-eau (figure 16). Les valeurs de vitesses en soi sont faibles, car il s'agit de vitesses moyennées dans l'ensemble du bassin de la marina. Elles ne devraient pas être appliquées, par exemple, au calcul de la sédimentation des sédiments en suspension. Elles permettent néanmoins de comparer les variantes entre elles et de mieux évaluer la répartition temporelle des courants.

Les courbes des figures 15 et 16 confirment d'abord les résultats mis en évidence par les champs des courants des figures 10 et 11 : par rapport à un aménagement sans ouverture, toutes les variantes considérées permettent d'induire des vitesses plus élevées dans le bassin de la marina. Dans le contexte actuel d'envasement, cette augmentation des vitesses ne peut être qu'avantageuse.

Il est intéressant de constater que les ouvertures dans l'ancien quai commercial ont un impact positif aussi bien en marée de morte-eau qu'en marée de vive-eau. Les vitesses maximales sont plus fortes en vive-eau, mais la baisse du niveau d'eau en dessous des seuils des ouvertures provoque une stagnation des courants à marée basse (entre 5h00 et 9h00). En marée de morte-eau, les vitesses maximales sont réduites, mais le gain de

vitesses par rapport aux conditions sans ouvertures se produit sur l'ensemble du cycle de marée.

Tant en morte-eau qu'en vive-eau, les résultats des figures 15 et 16 montrent que c'est la variante a3 qui permet d'obtenir, en moyenne, les vitesses les plus élevées dans la marina, et ce pendant la période la plus longue. Viennent ensuite dans l'ordre les variantes a1, puis b1. La variante a3 est donc considérée comme étant la variante optimale.

La comparaison des vitesses obtenues pour la variante a3 et les conditions sans ouvertures montre que les vitesses minimales futures (variante a3 en morte-eau, figure 15) sont approximativement du même ordre que les vitesses maximales du scénario d'aménagement actuel (variante sans ouvertures en vive-eau, figure 16). Les ouvertures dans l'ancien quai commercial ne permettront donc pas d'éliminer complètement la sédimentation actuellement observé dans le bassin de la marina, et ce seront essentiellement les vitesses de vive-eau qui permettront le plus de réduire le taux de sédimentation.

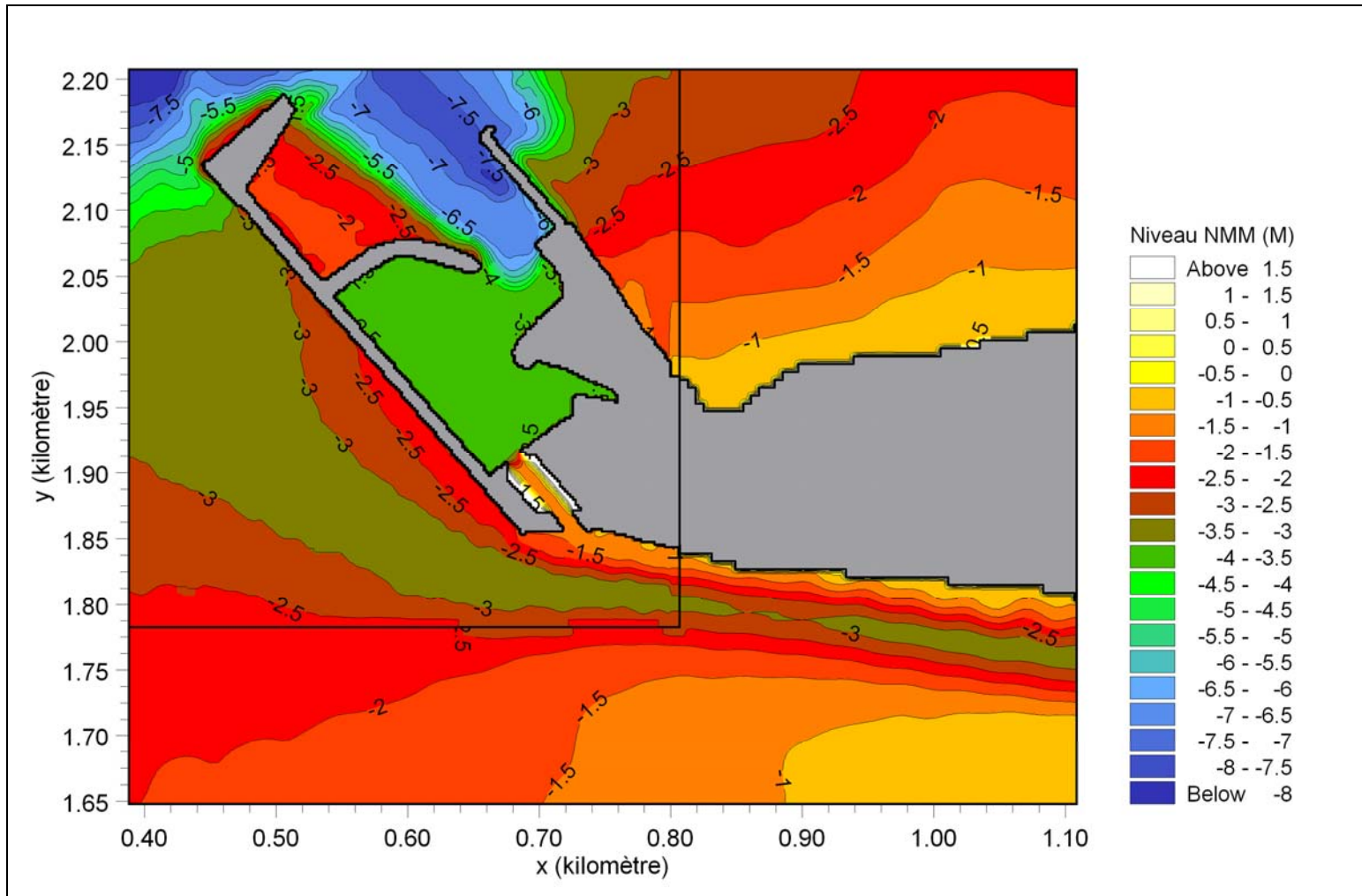
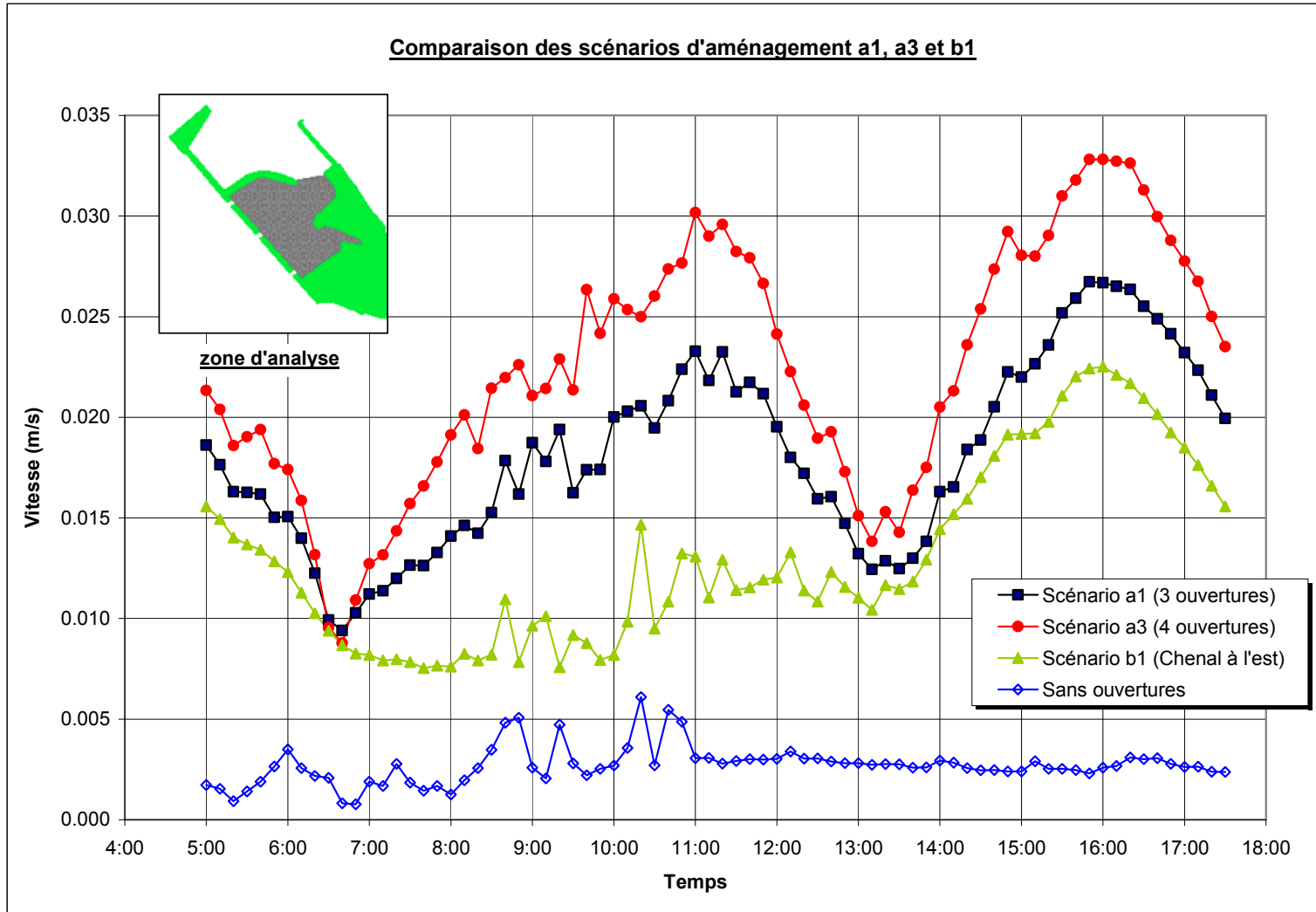


Figure 14 – Bathymétrie des fonds à l'approche de la marina



**Figure 15 – Vitesse moyenne dans la marina au cours d'un cycle de marée de morte-eau**

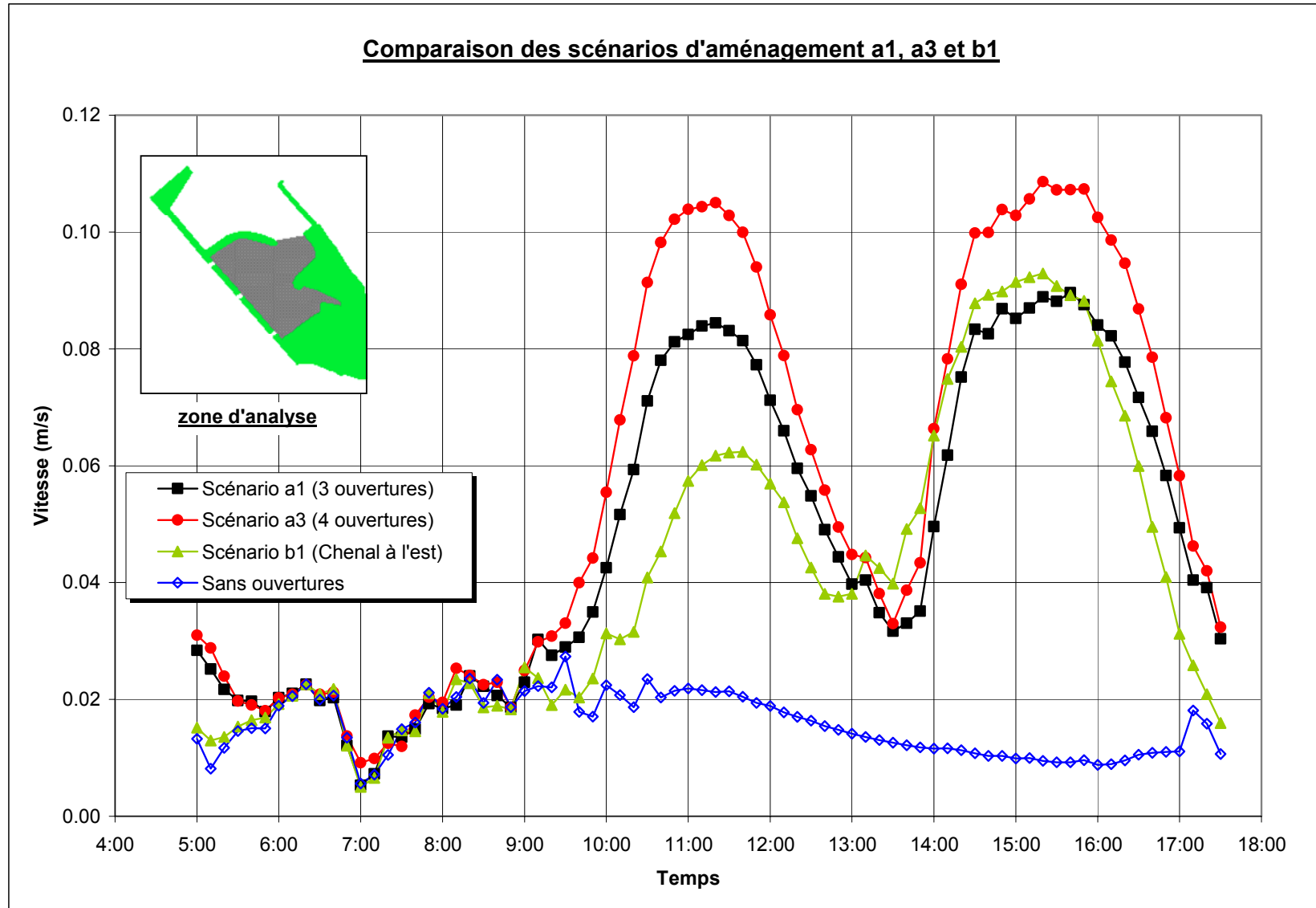


Figure 16 – Vitesse moyenne dans la marina au cours d'un cycle de marée de vive-eau

## **6.0 VARIANTE FINALE**

L'analyse des résultats de modélisation numérique a démontré que l'implantation de quatre ouvertures dans l'ancien quai commercial (variante a3) représentait le scénario d'aménagement optimal en vue de réduire les problèmes d'envasement dans le bassin de la marina. Advenant des coûts de réalisation trop élevés, la variante a1, à trois ouvertures, serait alors recommandée.

### **6.1 Protection contre l'agitation des vagues**

Tel que mentionné précédemment, la mise en place d'ouvertures dans l'ancien quai commercial rend plus vulnérable le havre de la marina à l'agitation causée par les vagues en provenance des secteurs ouest et sud-ouest. Afin de permettre aux variantes de type « a » d'offrir une meilleure protection contre les vagues, la conception des passes dans l'ancien quai commercial inclut des murs en chicane aux deux extrémités des passes, et un écran de surface (figures 17 et 18).

A priori, l'utilisation seule de murs en chicane pour briser les vagues dans les ouvertures de l'ancien quai commercial aurait pu fonctionner. La réduction de la section effective d'entrée et les pertes de charge induites par le virage imposé à l'écoulement auraient toutefois causé une diminution de l'efficacité des ouvertures. Pour compenser, des ouvertures plus larges auraient alors été requises. Il apparaît donc préférable de n'utiliser que des murs en chicane de courte longueur, et de les combiner avec un écran de surface (ou poutre externe) permettant d'écrêter les vagues obtenues à marée haute.

### **6.2 Évaluation des coûts de réalisation**

L'évaluation sommaire des coûts de construction des passes dans l'ancien quai commercial a été réalisée par les Consultants Ropars. Cette évaluation suppose que les travaux de réaménagement de la marina sont coordonnés avec ceux prévus par la STQ (en cas contraire, des coûts additionnels seront à prévoir), et intègre les dispositifs de protection contre les vagues.

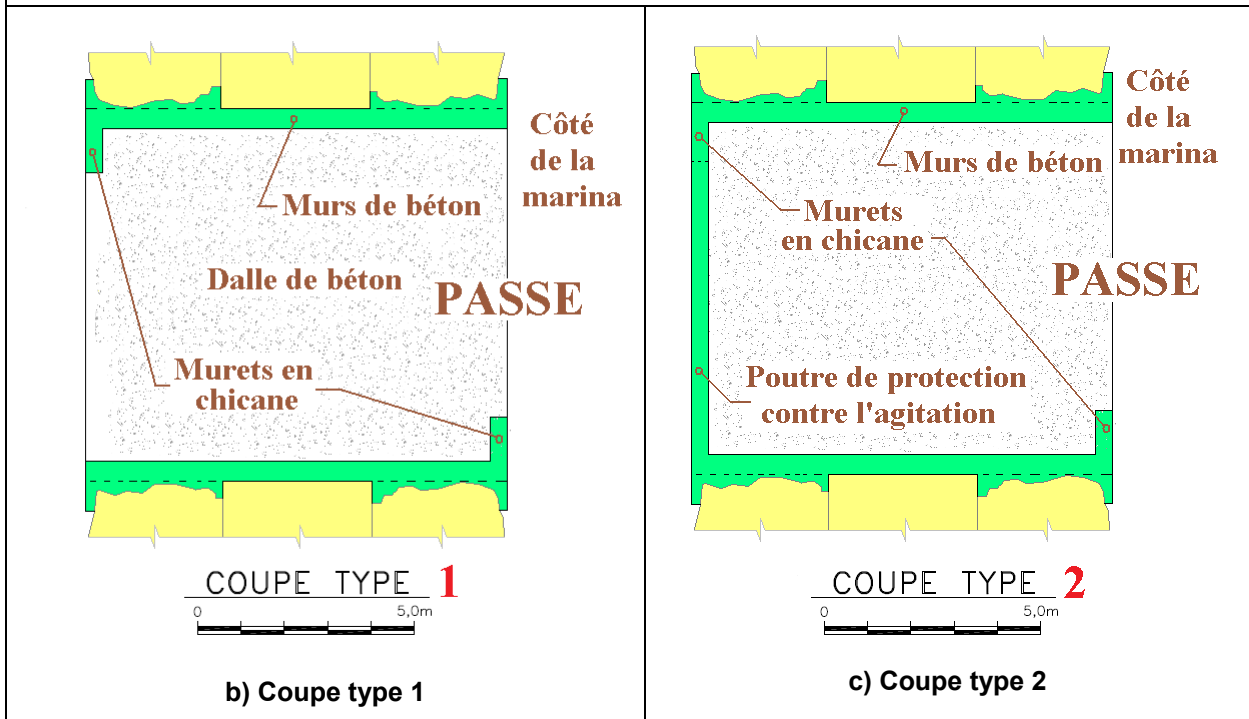
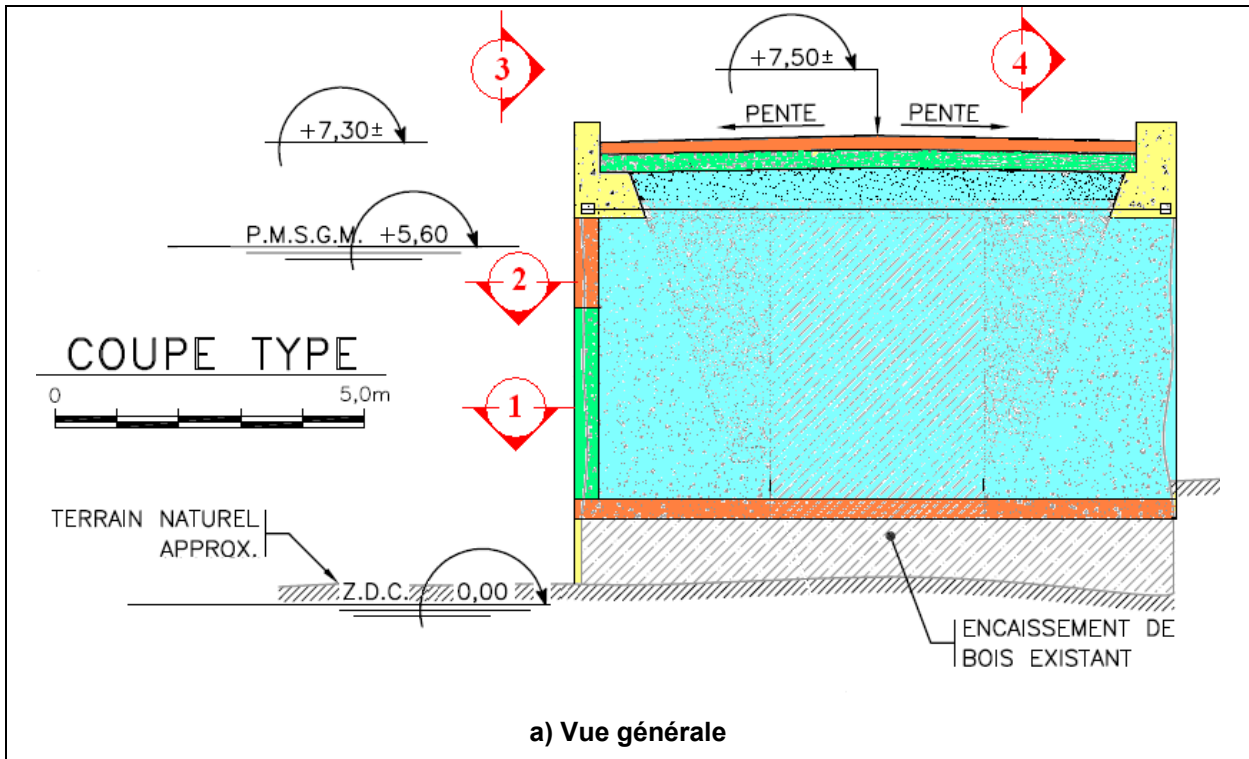


Figure 17 – Vues en coupe des passes de la variante a3

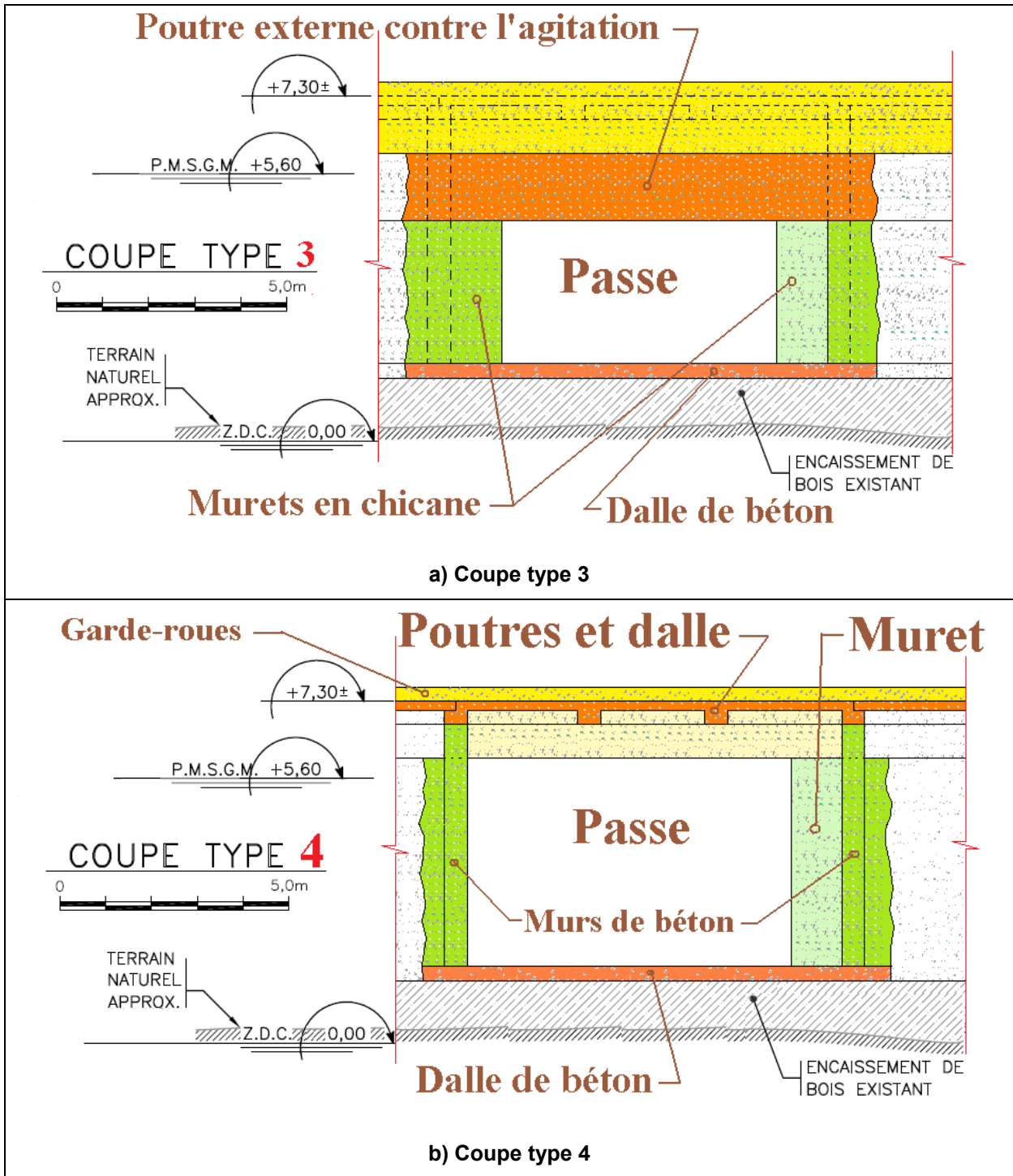


Figure 18 – Vues en élévation des passes de la variante a3



Les figures 17 et 18 illustrent les vues en coupe et en élévation des passes proposées dans l'ancien quai commercial, et le tableau 3 détaille l'évaluation préliminaire des quantités et des coûts de construction du projet.

Le coût de réalisation d'une passe, incluant l'organisation de chantier et diverses contingences et imprévus, est évalué à 320 000 \$. Pour la variante d'aménagement a3, qui possède quatre ouvertures, le coût de construction des passes est donc de 1 300 000 \$. L'ingénierie, la surveillance, le laboratoire et autres frais sont estimés à 150 000\$. Le coût total du projet est donc d'environ 1 500 000 \$.

**Tableau 3 : Évaluation préliminaire des coûts de construction**

Poste	Description	Unité	Prix unitaire	Quantité	Coût (\$)
<b>Démolition</b>	Démolition de béton	m <sup>3</sup>	35	260	9 100
	Démolition d'encaissement de bois	m <sup>3</sup>	50	10	500
	Excavation	m <sup>3</sup>	10	490	4 900
<b>Béton armé</b>	Dalle de fond	m <sup>3</sup>	800	50	40 000
	Béton de remplissage	m <sup>3</sup>	700	30	21 000
	Murs et murets	m <sup>3</sup>	1 200	42	50 400
	Poutre de protection contre l'agitation	m <sup>3</sup>	1 500	12	18 000
	Poutres latérales	m <sup>3</sup>	1 400	24	33 600
	Poutres et dalles de roulement	m <sup>3</sup>	1 500	39	58 500
<b>Remplissage</b>		m <sup>3</sup>	20	80	1 600
<b>Organisation de chantier (12%)</b>		-	28 600	1	28 600
<b>Contingence et imprévus (20%)</b>		-	53 300	1	53 300
<b>Coût total de construction d'une (1) passe</b>					<b>320 000</b>

### 6.3 Dragages d'entretien

Les dragages futurs d'entretien font partie inhérente de l'évaluation des coûts de la variante proposée. Dans le contexte d'une reconstruction complète de l'ancien quai commercial, les

coûts de construction des passes auraient été intégrés dans le coût total du projet, et n'auraient représenté qu'un coût additionnel marginal. Dans le contexte actuel, où seules des réparations mineures de l'ancien quai commercial sont prévues par la STQ, l'implantation de la variante a3 représente des coûts importants.

La rentabilité du projet dépend donc de la réduction des besoins futurs en dragages d'entretien. Or, cette composante du projet est très difficile à évaluer. Même si l'aménagement proposé permet de réduire la fréquence et/ou le volume des dragages de la marina, il est certain que les besoins futurs en dragages d'entretien ne pourront être complètement éliminés. La marina est située dans un milieu estuarien, soumis à des cycles de marée. Aux étales, c'est l'ensemble du bassin de la marina qui se retrouve dans une zone de vitesses nulles. Même lorsque des vitesses plus importantes sont induites par les ouvertures dans le quai, certaines portions du bassin en retrait de l'écoulement sont soumises à des vitesses pratiquement nulles tout au long du cycle de marée.

L'augmentation de la circulation d'eau dans le bassin de la marina causée par les ouvertures dans l'ancien quai commercial représente toutefois une piste d'amélioration très intéressante, non seulement pour la marina mais également pour la STQ. En effet, l'augmentation des vitesses dans une zone où les courants de marée sont pratiquement nuls en conditions actuelles ne peut être qu'avantageuse vis-à-vis des risques d'envasement. Les résultats de simulation hydrodynamique montrent clairement une augmentation tangible des courants le long du quai du traversier (voir annexe A). De plus, les courants maximums se produisent au jusant (effet de chasse des sédiments fins potentiellement en provenance de la marina), alors que les courants au flot sont moins élevés et limitent les risques de réentraînement vers la zone d'accostage.

Mentionnons également que les vitesses générées dans les ouvertures du quai ne sont pas suffisantes pour attirer vers le bassin les sédiments grossiers charriés en crue dans l'embouchure de la rivière du Loup. Ces matériaux grossiers doivent de toute façon se concentrer dans le lit principal de la rivière, qui est relativement éloigné du quai (voir figure 14).

### 6.3.1 Modélisation hydrosédimentologique

L'augmentation des vitesses dans le bassin de la marina grâce aux ouvertures pratiquées dans l'ancien quai commercial permettra sans contredit d'y réduire la sédimentation des particules fines en suspension. Chiffrer cette réduction sur la base des résultats de modélisation hydrodynamique est toutefois impossible.

Dans le but de pouvoir estimer le potentiel de réduction de l'envasement de l'aménagement proposé, des simulations exploratoires du transport des argiles en suspension dans le secteur de la marina ont été effectuées à l'aide du module sédimentaire de MIKE 21. Pour un cycle de marée de morte-eau et de vive-eau, des simulations ont été effectuées pour les conditions futures de base (sans ouvertures) et la variante finale retenue (variante a3) en conservant les mêmes paramètres de modélisation dans les deux cas. Les résultats sont donc analysés sur une base comparative, en exprimant les résultats de la variante a3 par rapport à ceux obtenus sans aucun réaménagement.

Une évaluation plus précise, en termes de volumes de dragage, dépasse le cadre de cette étude et serait extrêmement difficile à déterminer par modélisation dans le secteur à l'étude. En effet, même si le modèle numérique intègre les formulations de transport sédimentaire les plus récentes, il n'en demeure pas moins que les paramètres de modélisation sont difficiles à définir, et que les formulations n'offrent pas suffisamment de précision pour représenter adéquatement tous les phénomènes associés au transport, la déposition et la consolidation des argiles.

Les figures 19 et 20 comparent les patrons de déposition obtenus pour les conditions futures de base et la variante d'aménagement a3, au terme d'un cycle de marée de morte-eau et de vive-eau. Les résultats sont exprimés en épaisseur relative, par rapport à l'épaisseur moyenne obtenue dans le bassin de la marina pour le scénario sans ouvertures (en bleu, selon la légende de couleur). Les zones en rouge sont des secteurs d'accumulation supérieure à la moyenne dans le havre de la marina, et les zones en vert représentent des secteurs d'accumulation moindre.

La comparaison des résultats, tant en morte-eau qu'en vive-eau, montrent que les ouvertures dans l'ancien quai commercial permettent de réduire la sédimentation dans le bassin de la

marina, ainsi qu'au poste à quai du traversier. Conformément à l'analyse des vitesses présentée à la section 5.4, une réduction plus importante de l'envasement est obtenue en vive-eau. En moyenne, en considérant les conditions de morte-eau et de vive-eau, une réduction d'environ 14% est obtenue dans le bassin de la marina, et une réduction de 10 % est obtenue le long du quai du traversier de la STQ (tableau 4).

À noter que cette réduction vise principalement les volumes de dragage, et non leur fréquence, car certaines portions du bassin situées en retrait des zones de vitesses plus élevées devront être draguées à la même fréquence que s'il n'y avait aucune modification des installations existantes.

En guise d'analyse de sensibilité, les simulations ont été reprises en augmentant la vitesse de chute des argiles par un facteur de 5. Les résultats obtenus ont donné des taux de sédimentation similaires à ceux présentés au tableau 4.

**Tableau 4 : Réduction de l'envasement procurée par la variante a3**

Zone d'analyse	Pourcentage de réduction (%)		
	Morte-eau	Vive-eau	Moyenne
Bassin de la marina	13,8	15,0	<b>14,4</b>
Quai de la STQ	5,3	14,9	<b>10,1</b>

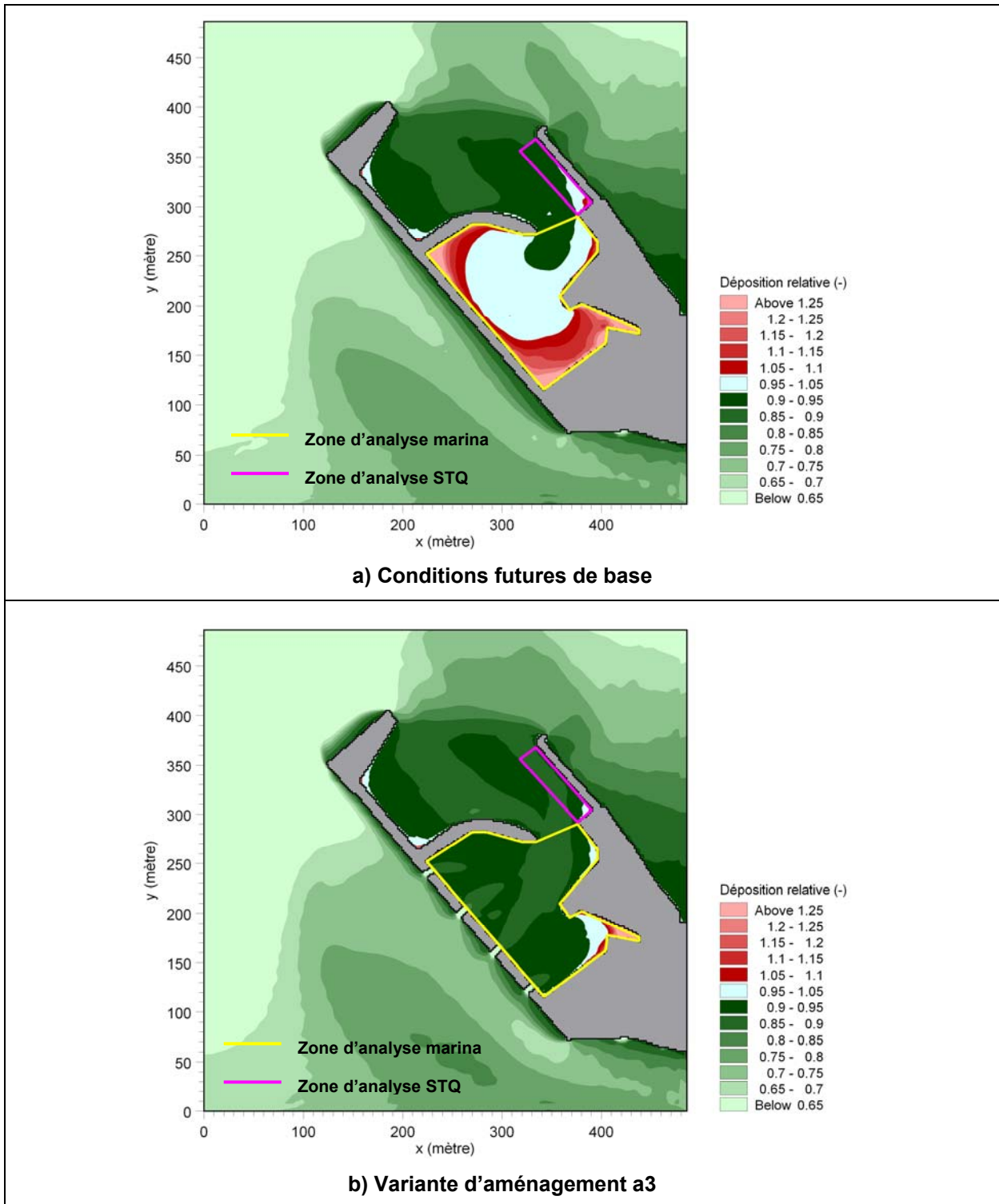


Figure 19 – Patrons de déposition en morte-eau

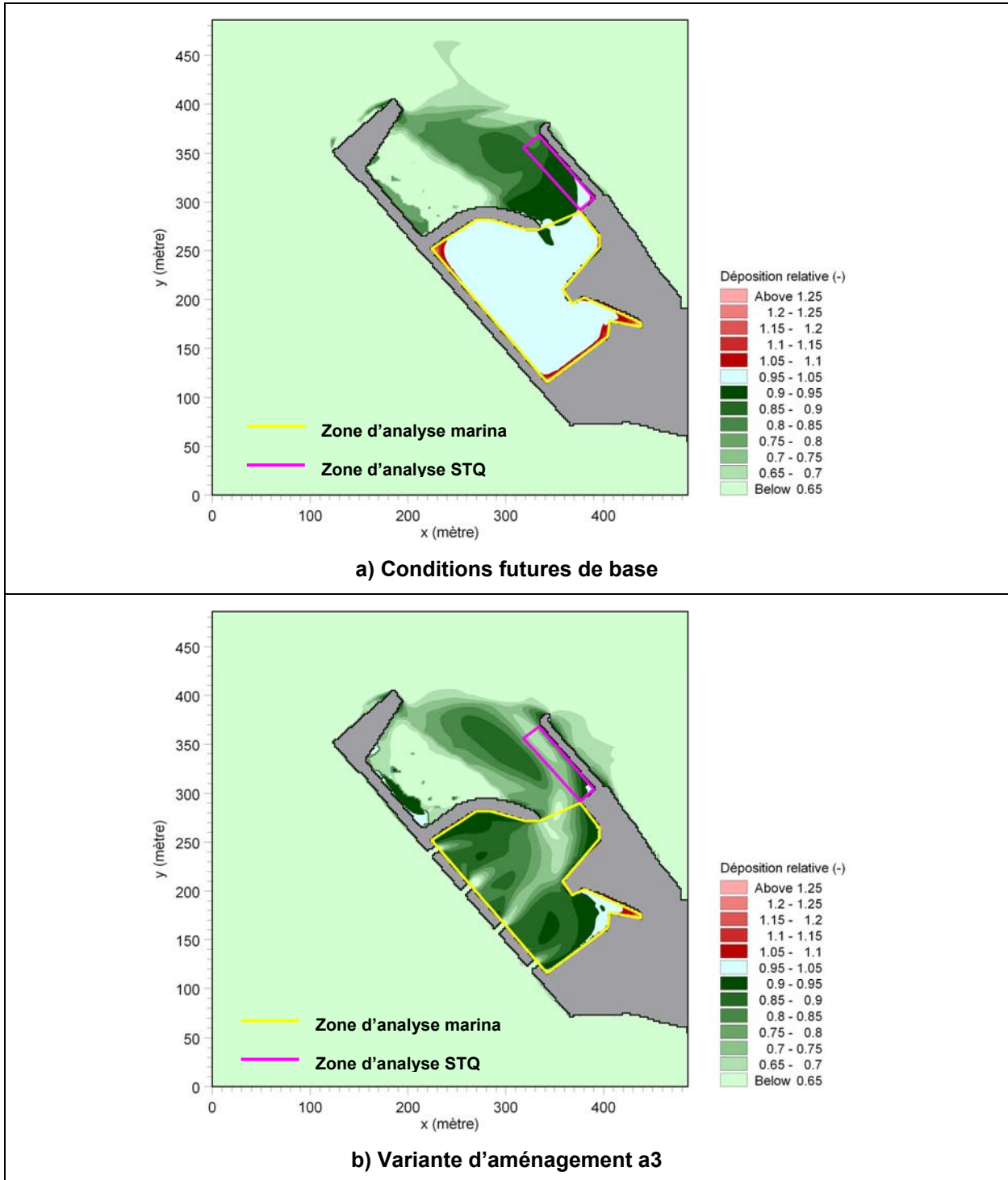


Figure 20 – Patrons de déposition en vive-eau

## 7.0 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La Corporation du Carrefour maritime de Rivière-du-Loup étudie actuellement la possibilité de modifier les ouvrages portuaires existants de la marina de Rivière-du-Loup afin d'y réduire les problèmes d'envasement. Dans le cadre de ce projet, le Groupe-Conseil LaSalle (GCL) a été chargé de simuler les conditions hydrodynamiques de la zone à l'étude pour différents scénarios de réaménagement.

La modélisation numérique bidimensionnelle des niveaux d'eau et des courants de marée a été réalisée à l'aide du logiciel commercial MIKE 21. Le modèle global, qui couvre un bief de 160 km allant de Pointe-aux-Orignaux à Pointe-au-Père, représente la bathymétrie du Saint-Laurent à l'aide de cellules carrées de 162 m. La résolution de la bathymétrie est ensuite graduellement augmentée à l'approche de Rivière-du-Loup, jusqu'à une résolution de 2 m pour reproduire avec détails les installations portuaires de la marina.

Les courants de marée sont induits au modèle numérique par l'imposition aux limites amont et aval du modèle global des niveaux d'eau donnés par les tables de marée du Service hydrographique du Canada. Pour l'ensemble des scénarios d'aménagement considérés, des conditions de morte-eau et de vive-eau ont été simulées. Le débit fluvial de la rivière du Loup a généralement été négligé, mais des simulations supplémentaires ont été effectuées pour en vérifier l'influence sur les vitesses obtenues dans le bassin de la marina.

Au total, six scénarios d'aménagement, divisés en deux principales catégories de variantes, ont été étudiés. Les variantes de type « a » proposent de pratiquer des ouvertures dans l'ancien quai commercial, tandis que les variantes de type « b » consistent en l'excavation d'un chenal dans la portion est des quais de la marina. Afin de mesurer l'efficacité des différentes variantes d'aménagement, les conditions futures de base, sans aucune ouverture dans les quais, ont également été modélisées.

Le choix de la variante optimale s'est appuyé sur la répartition spatiale et temporelle des courants induits dans le bassin de la marina. Au vu de ces critères, c'est la variante a3, avec quatre ouvertures dans l'ancien quai commercial, qui a été retenue.

L'évaluation sommaire des coûts de réalisation associés à la variante a3 a été réalisée par les Consultants Ropars. Pour quatre ouvertures dans l'ancien quai commercial, le coût total des travaux est évalué à environ 1,5 M\$, en supposant une coordination des travaux avec ceux prévus par la Société des traversiers du Québec (STQ).

Outre les coûts de construction, la faisabilité du projet dépend également des besoins futurs en dragages d'entretien. Bien que les résultats de modélisation hydrodynamiques aient montré une augmentation tangible des vitesses d'écoulement dans le bassin de la marina grâce aux ouvertures pratiquées dans l'ancien quai commercial, il est certain que les besoins futurs en dragages d'entretien ne pourront être complètement éliminés. La marina est située dans un milieu estuarien, soumis à des cycles de marée. Aux étales, c'est l'ensemble du bassin de la marina qui se retrouve dans une zone de vitesses nulles. Même lorsque des vitesses plus importantes sont induites par les ouvertures dans le quai, certaines portions du bassin en retrait de l'écoulement sont soumises à des vitesses pratiquement nulles tout au long du cycle de marée.

Afin d'estimer de manière plus précise la réduction de l'envasement créée par la variante d'aménagement recommandée, les conditions hydrosédimentologiques du secteur à l'étude ont été modélisées. L'analyse comparative des résultats obtenus avec et sans ouvertures dans l'ancien quai commercial a montré que l'implantation de la variante d'aménagement a3 permettrait une réduction moyenne de 14% de la sédimentation dans le bassin de la marina. À noter que cette réduction vise principalement les volumes de dragage, et non leur fréquence, car certaines portions du bassin situées en retrait des zones de vitesses plus élevées devront être draguées à la même fréquence que s'il n'y avait aucune modification des installations existantes.

Finalement, les résultats de modélisation indiquent que le scénario de réaménagement de la marina n'entraîne pas d'impacts négatifs sur les installations de la STQ. Au contraire, les champs des courants obtenus en présence de la variante a3 montrent clairement une augmentation tangible des courants de jusant le long du quai du traversier, ce qui devrait contribuer à y diminuer l'envasement.

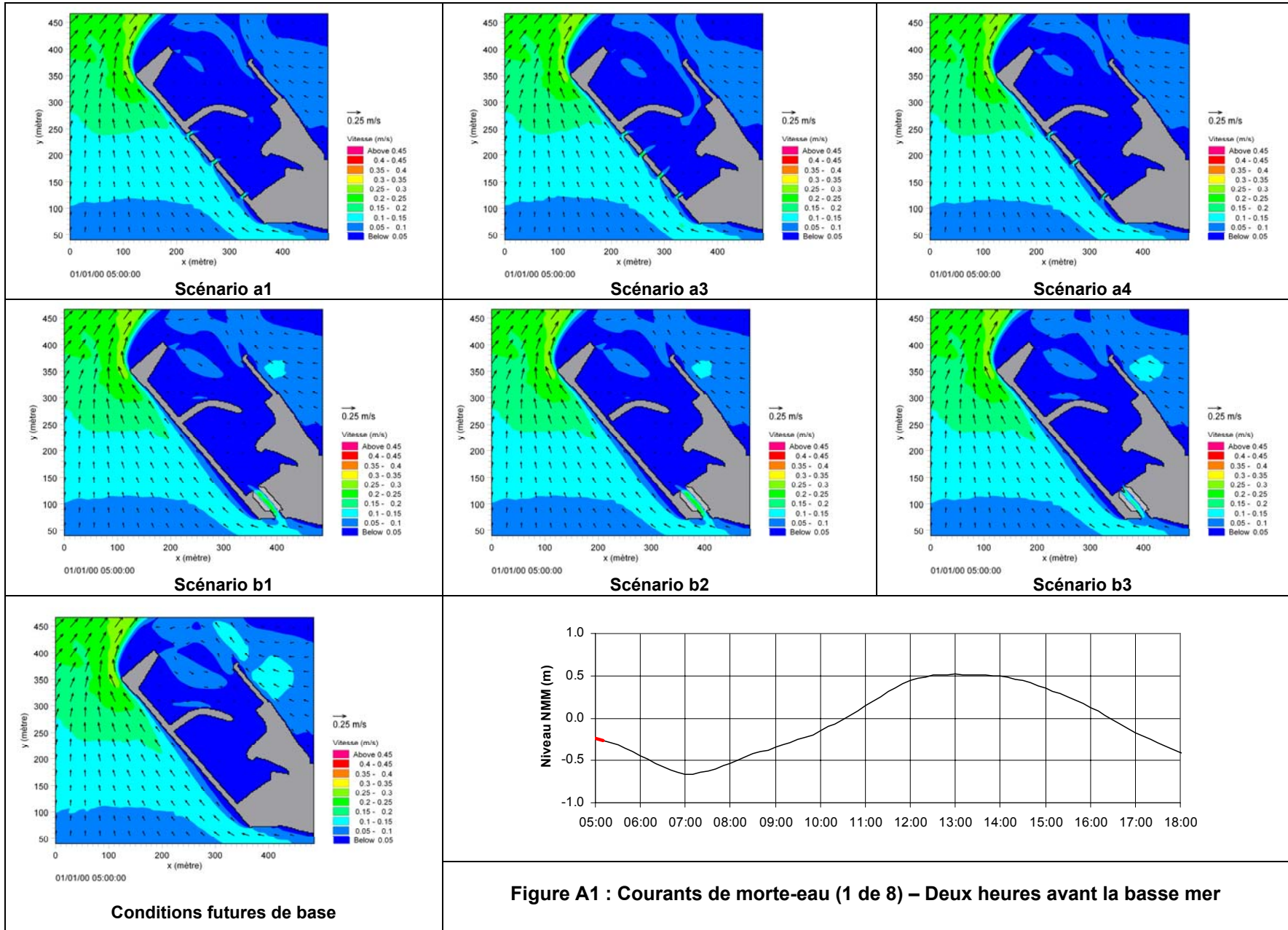


## RÉFÉRENCES

- [1] LONG, B. (2003). *Reconstruction du quai du traversier de Rivière-du-Loup – Caractérisation des conditions sédimentologiques et hydrodynamiques – Campagnes de mesures de l'automne 2001 et du printemps 2002*. Rapport préparé pour la coentreprise TecSult-LaSalle-Hamelin pour le compte de la Société des traversiers du Québec.
  
- [2] LORRAIN, S. (1992). *Stratigraphie et dynamique sédimentaire de la plate-forme infralittorale de Rivière-du-Loup – Estuaire du Saint-Laurent*. Mémoire de maîtrise MSc. (Océanographie), Université McGill, 160 pages.
  
- [3] VILLENEUVE, M. (2004). *Reconstruction du quai de Rivière-du-Loup – Modélisation numérique des conditions hydrodynamiques*. Rapport GCL-1541 préparé pour la coentreprise TecSult-LaSalle-Hamelin pour le compte de la Société des traversiers du Québec, mai 2004.
  
- [4] DENAULT, C. ET VILLENEUVE, M. (2008). *Reconstruction du quai de Rivière-du-Loup – Étude sur le dragage d'entretien et les modes de dispersion des sédiments dragués*. Rapport GCL R-1660 préparé pour SNC-Lavalin pour le compte de la Société des traversiers du Québec, février 2008.

**- ANNEXE A -**

Champs des courants des scénarios d'aménagement à différents instants du cycle de marée, pour des conditions de morte-eau et de vive-eau



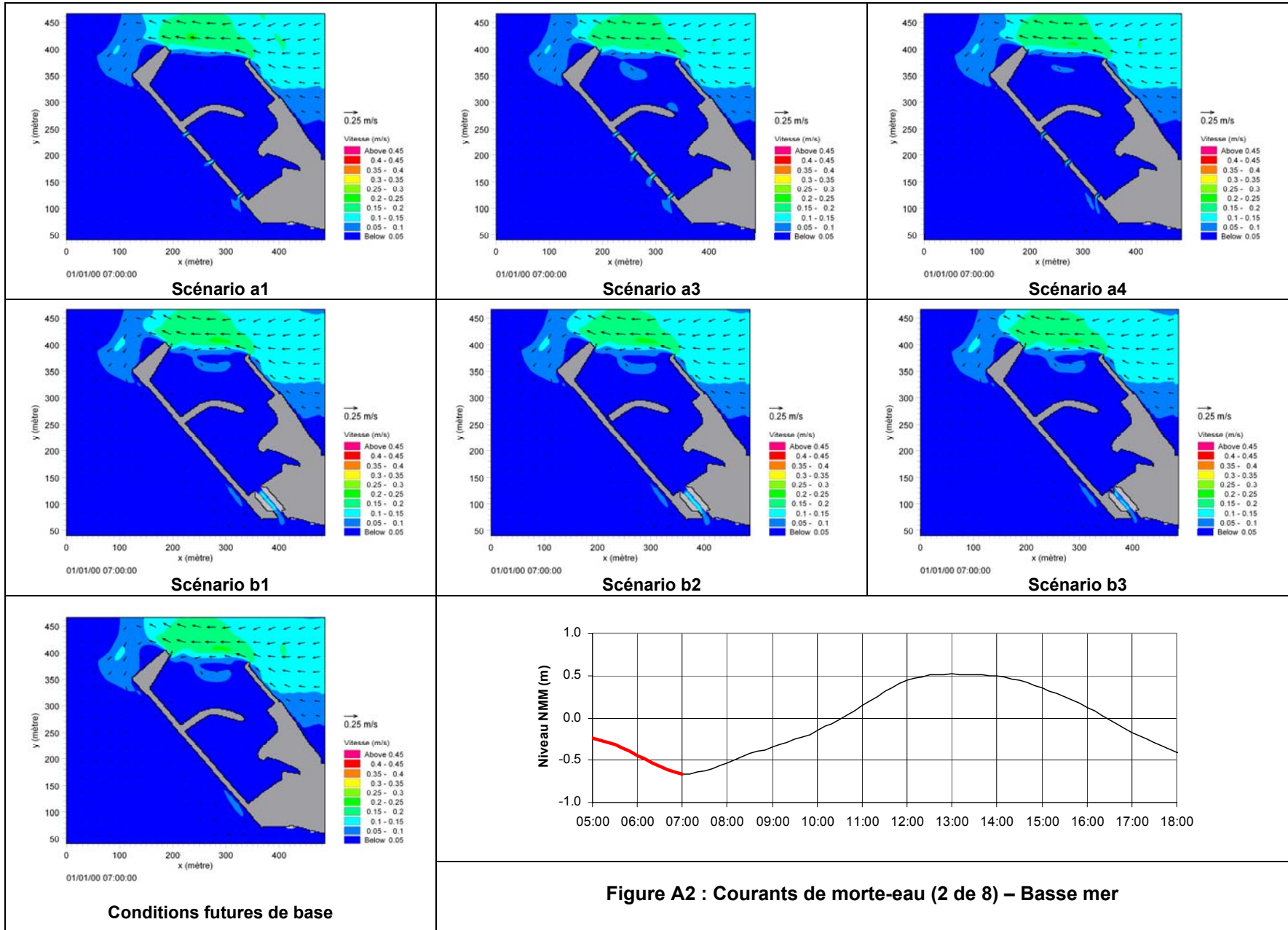


Figure A2 : Courants de morte-eau (2 de 8) – Basse mer



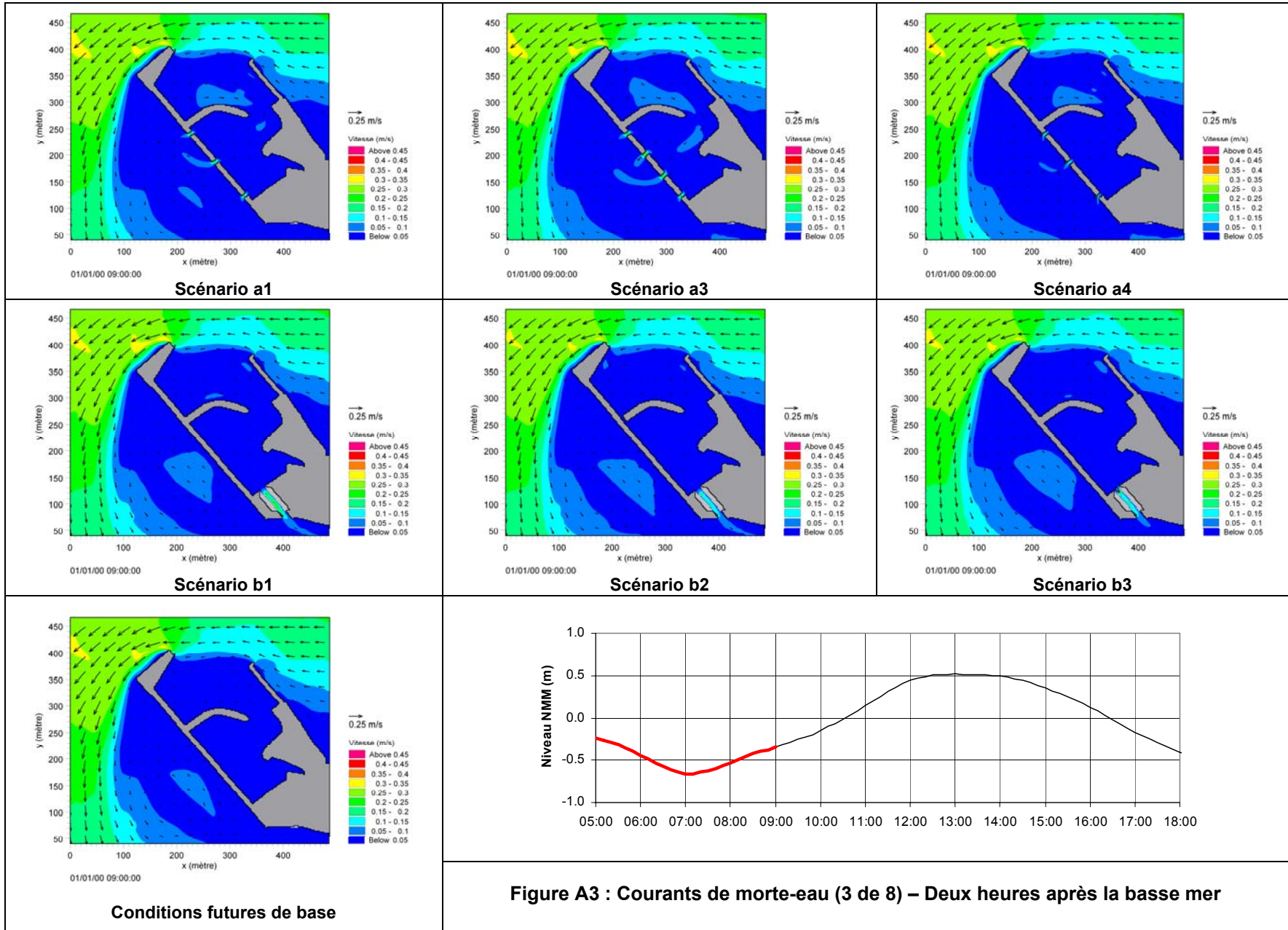


Figure A3 : Courants de morte-eau (3 de 8) – Deux heures après la basse mer

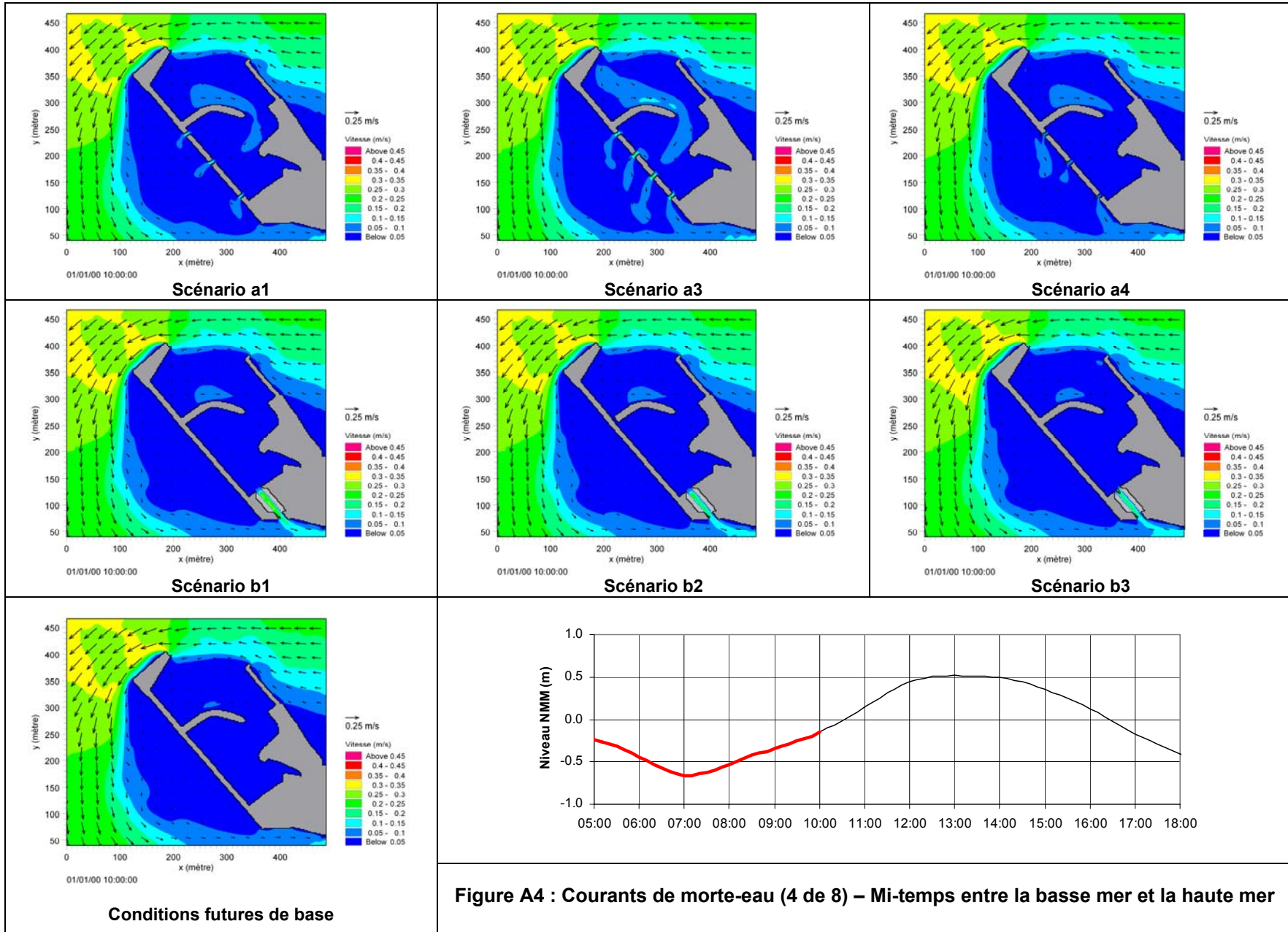


Figure A4 : Courants de morte-eau (4 de 8) – Mi-temps entre la basse mer et la haute mer



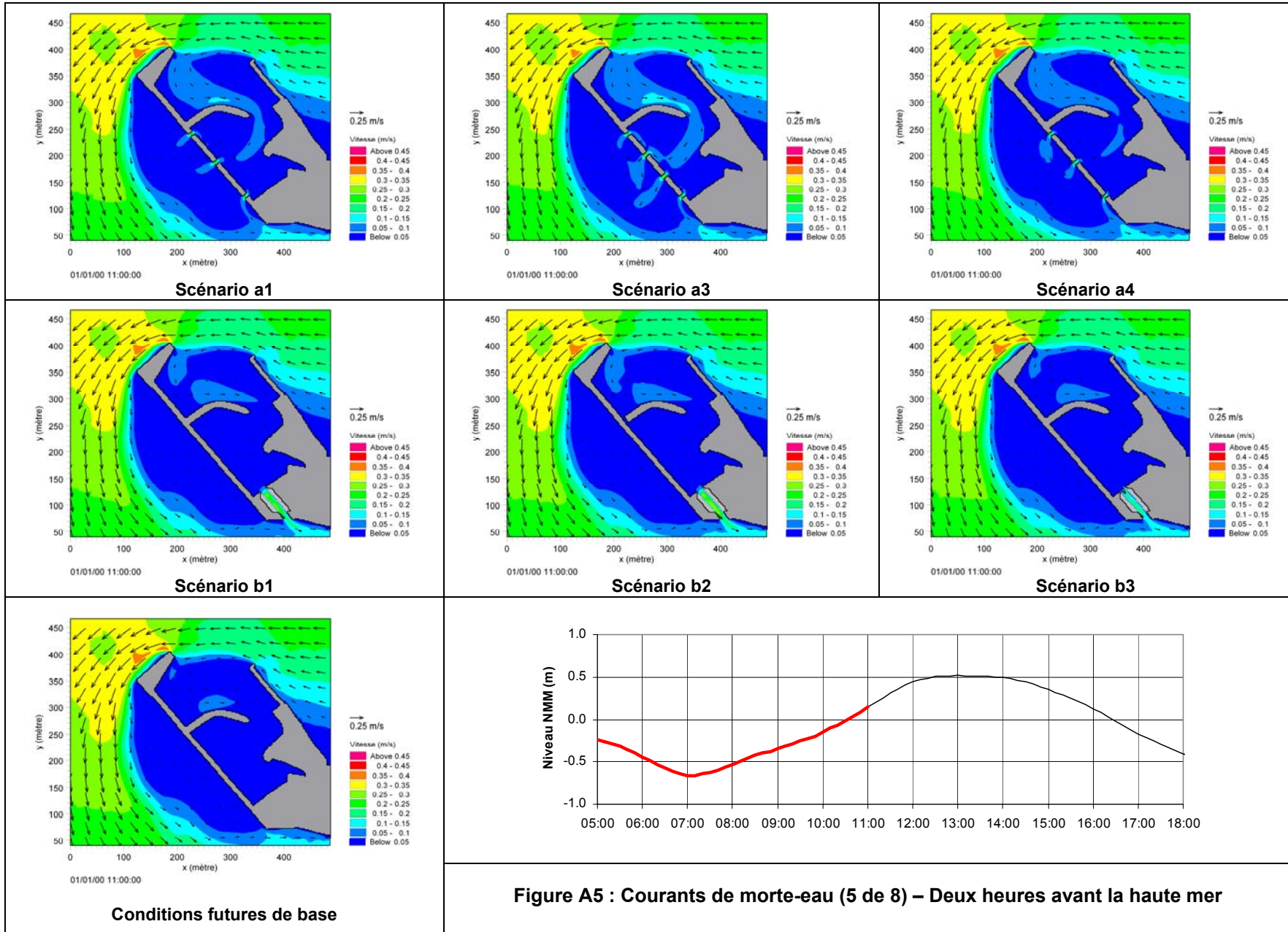
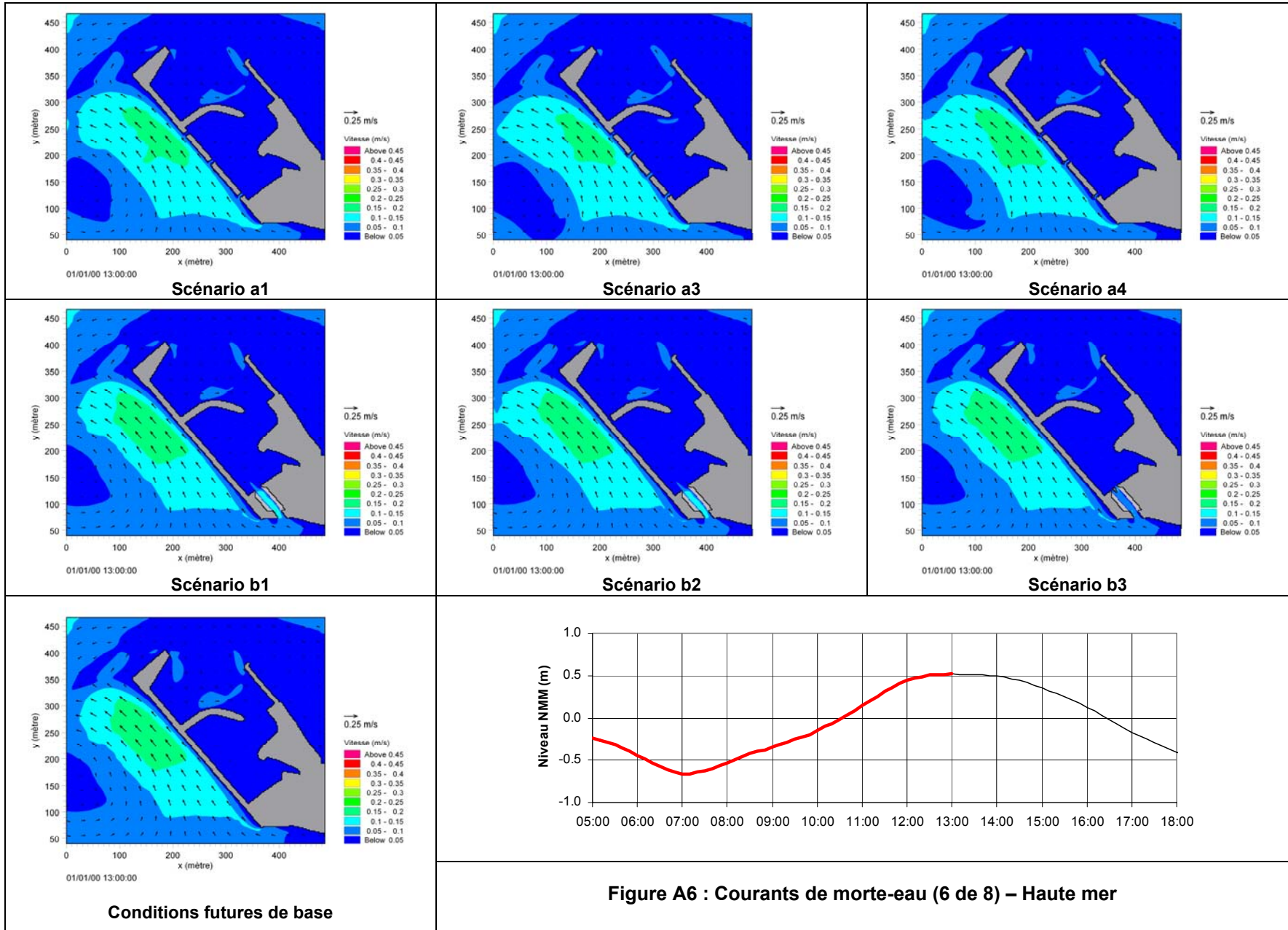


Figure A5 : Courants de morte-eau (5 de 8) – Deux heures avant la haute mer





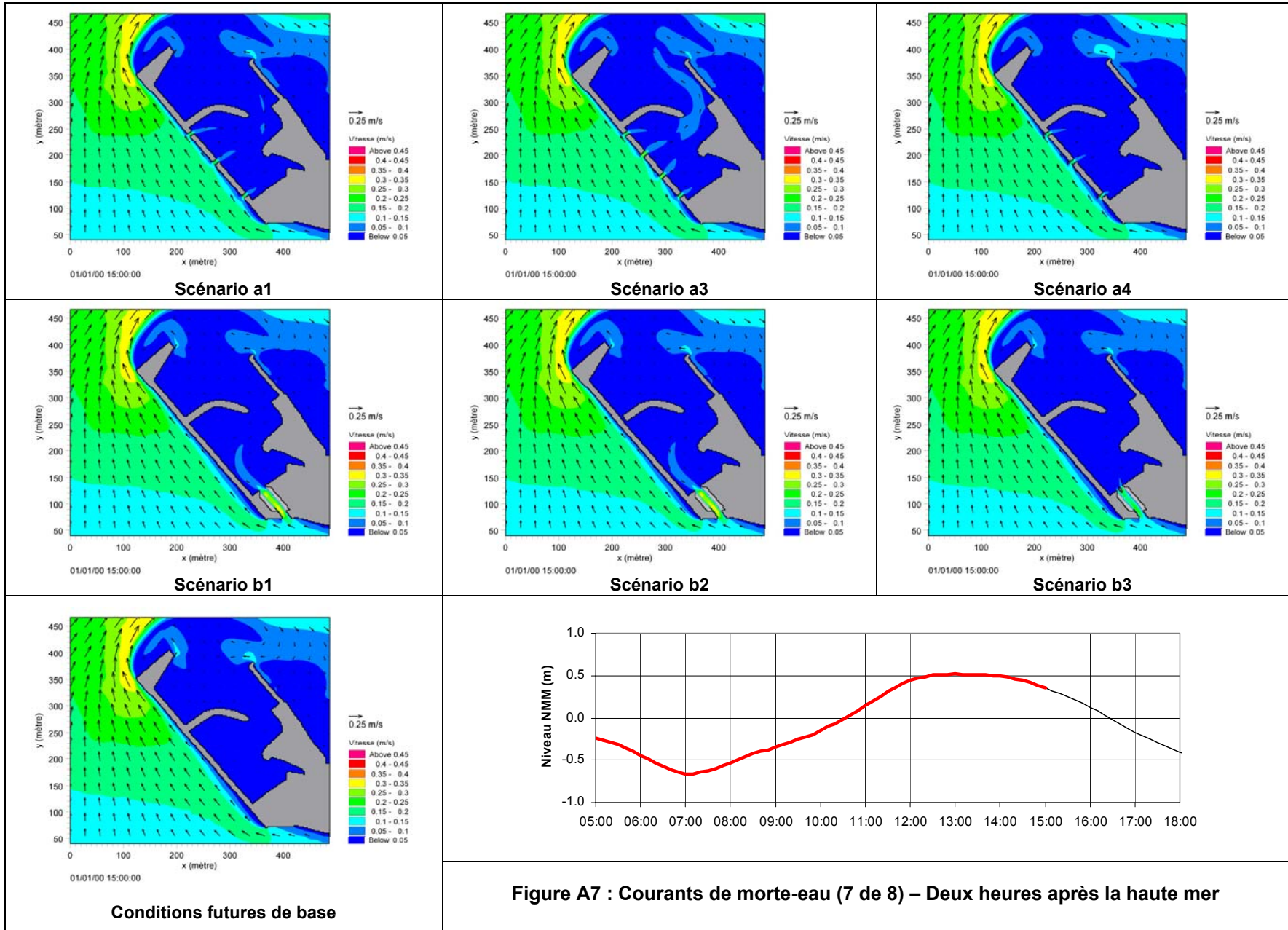


Figure A7 : Courants de morte-eau (7 de 8) – Deux heures après la haute mer

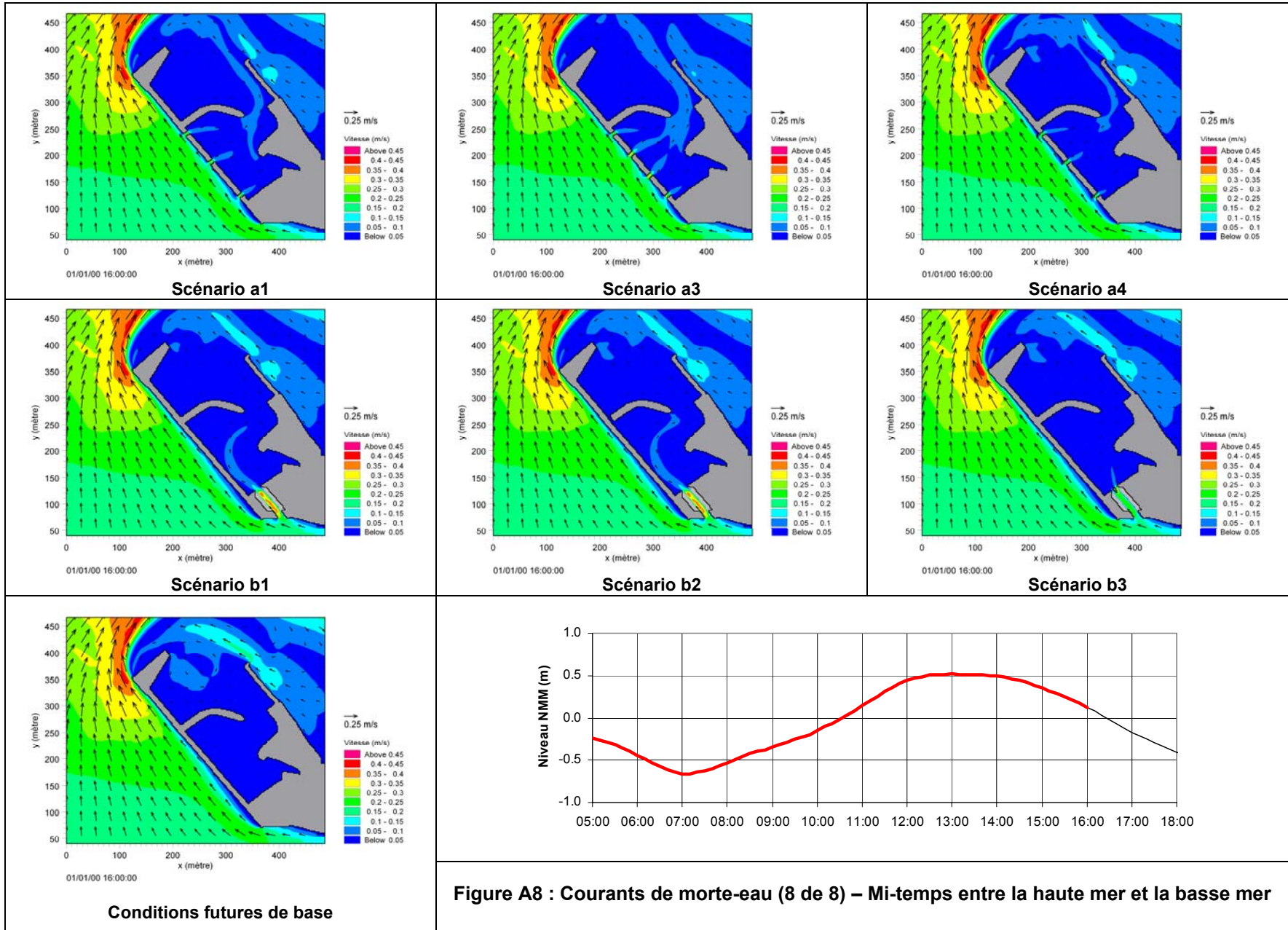
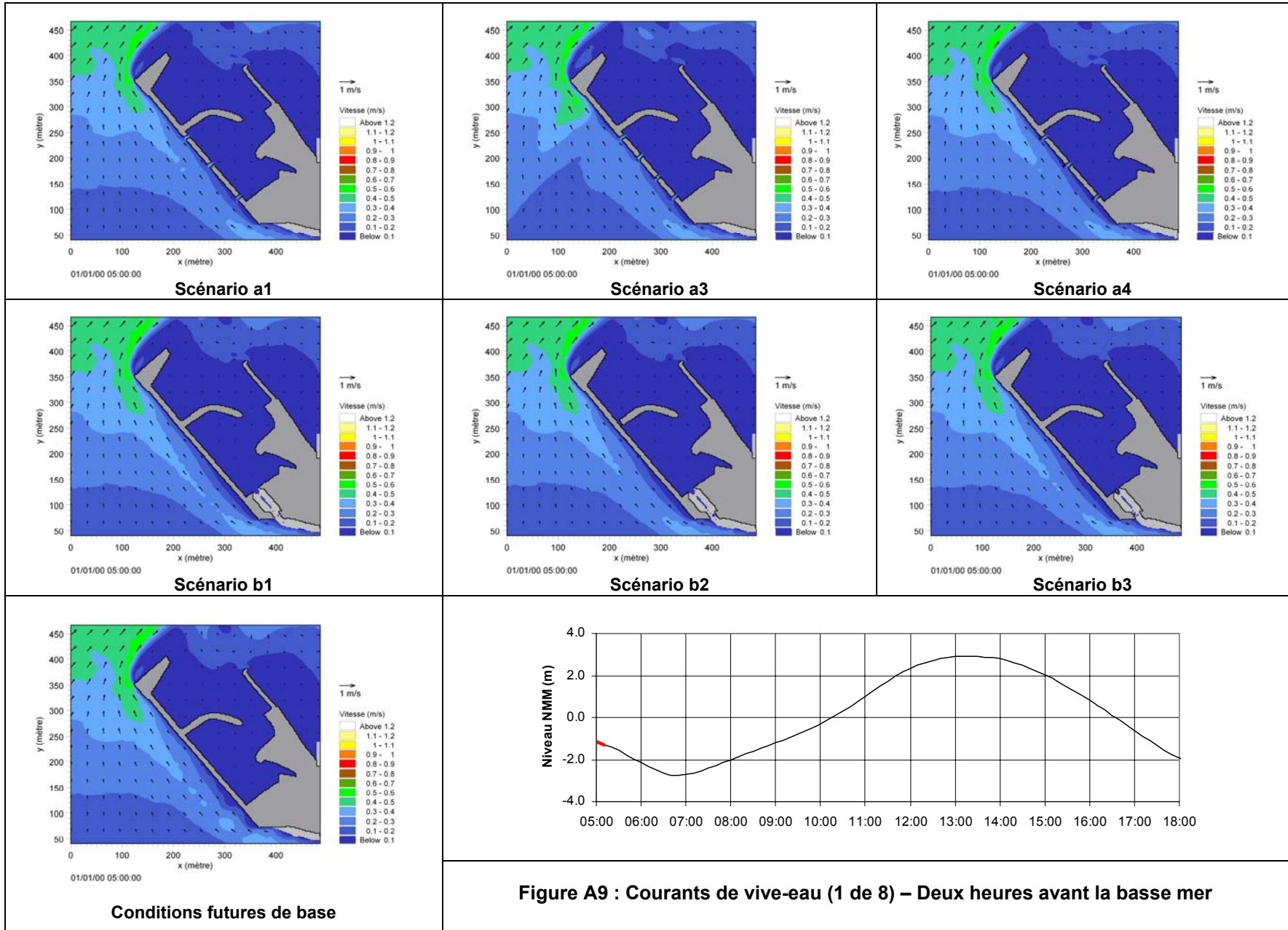
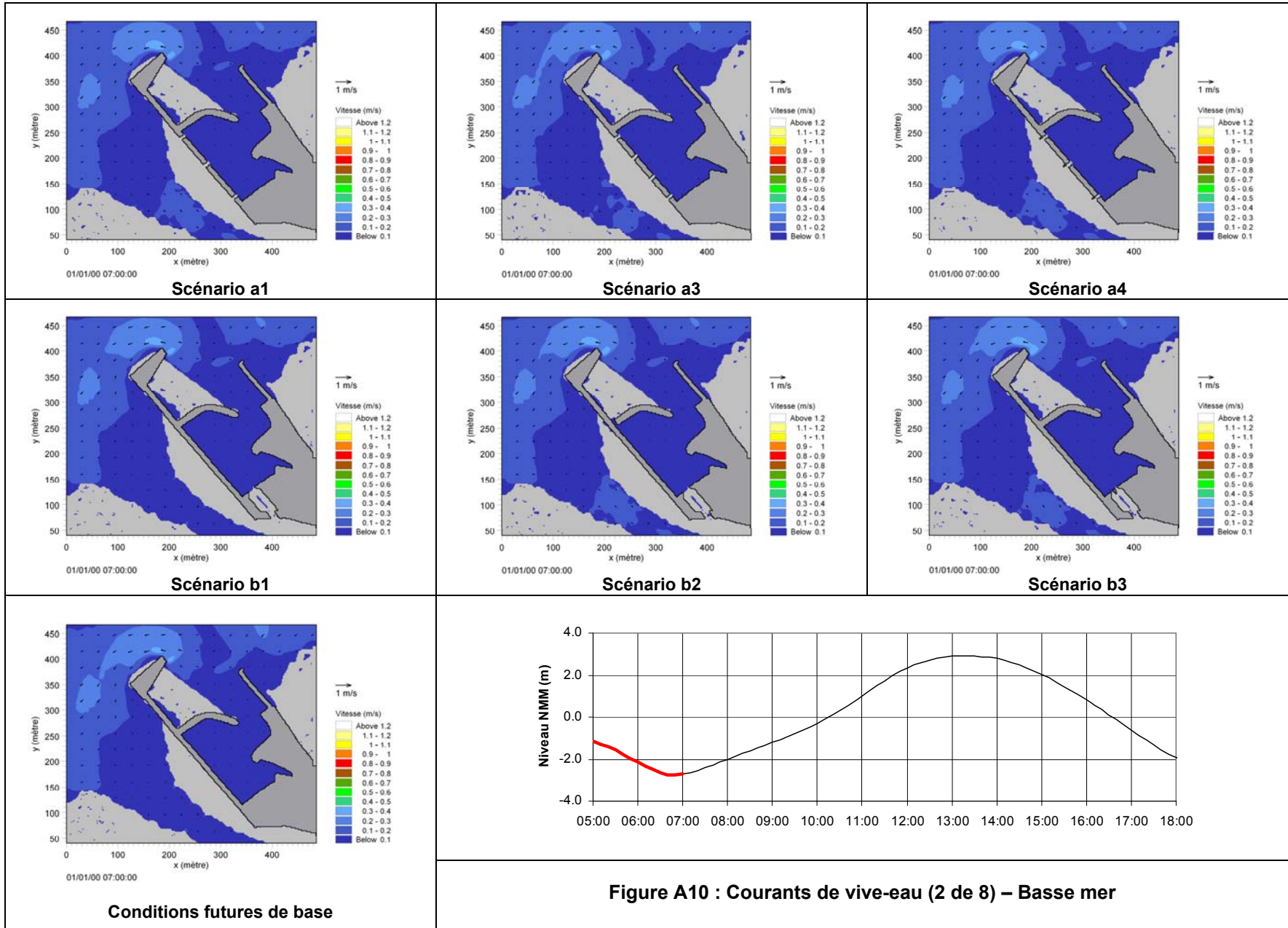


Figure A8 : Courants de morte-eau (8 de 8) – Mi-temps entre la haute mer et la basse mer







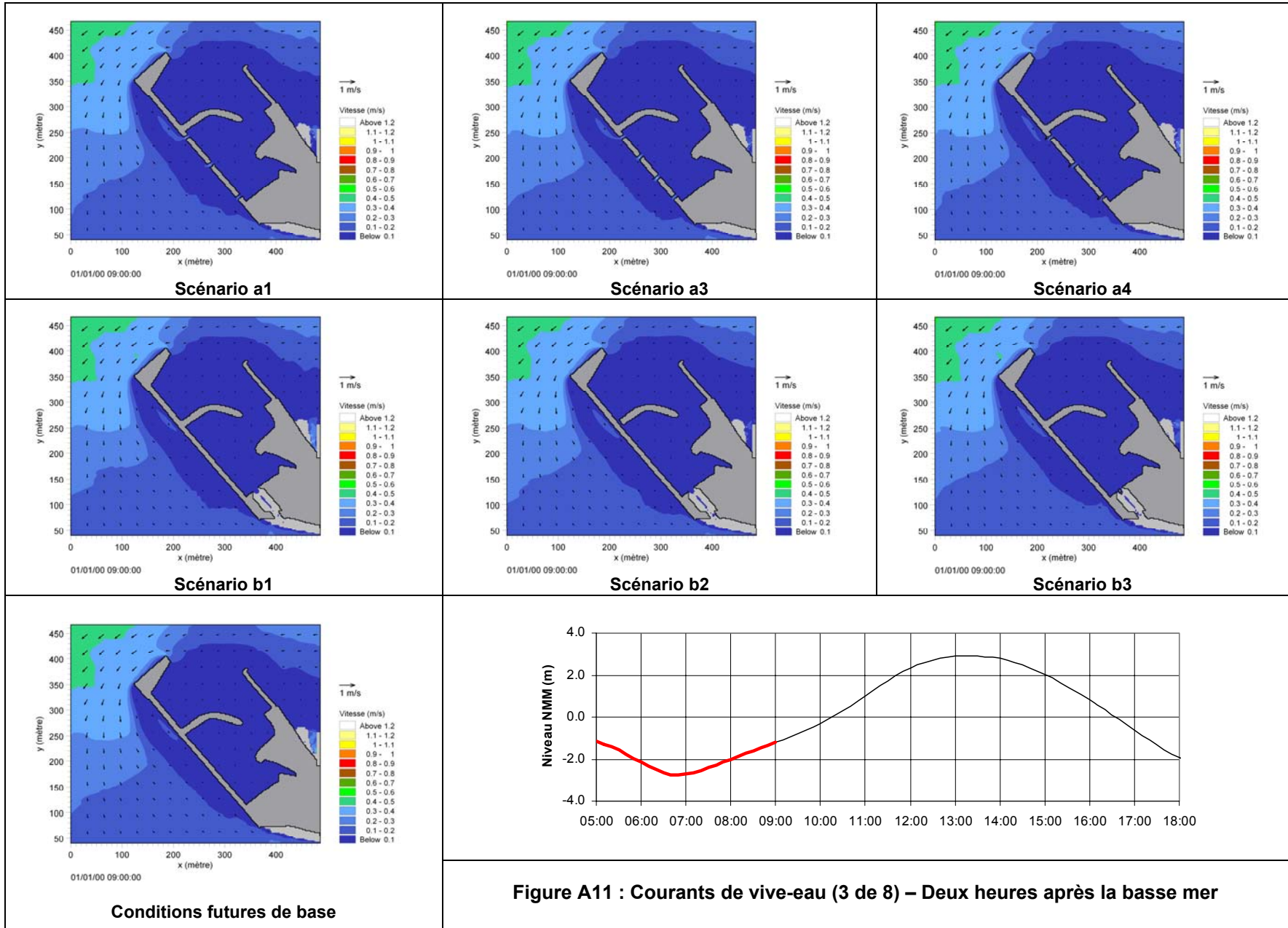


Figure A11 : Courants de vive-eau (3 de 8) – Deux heures après la basse mer



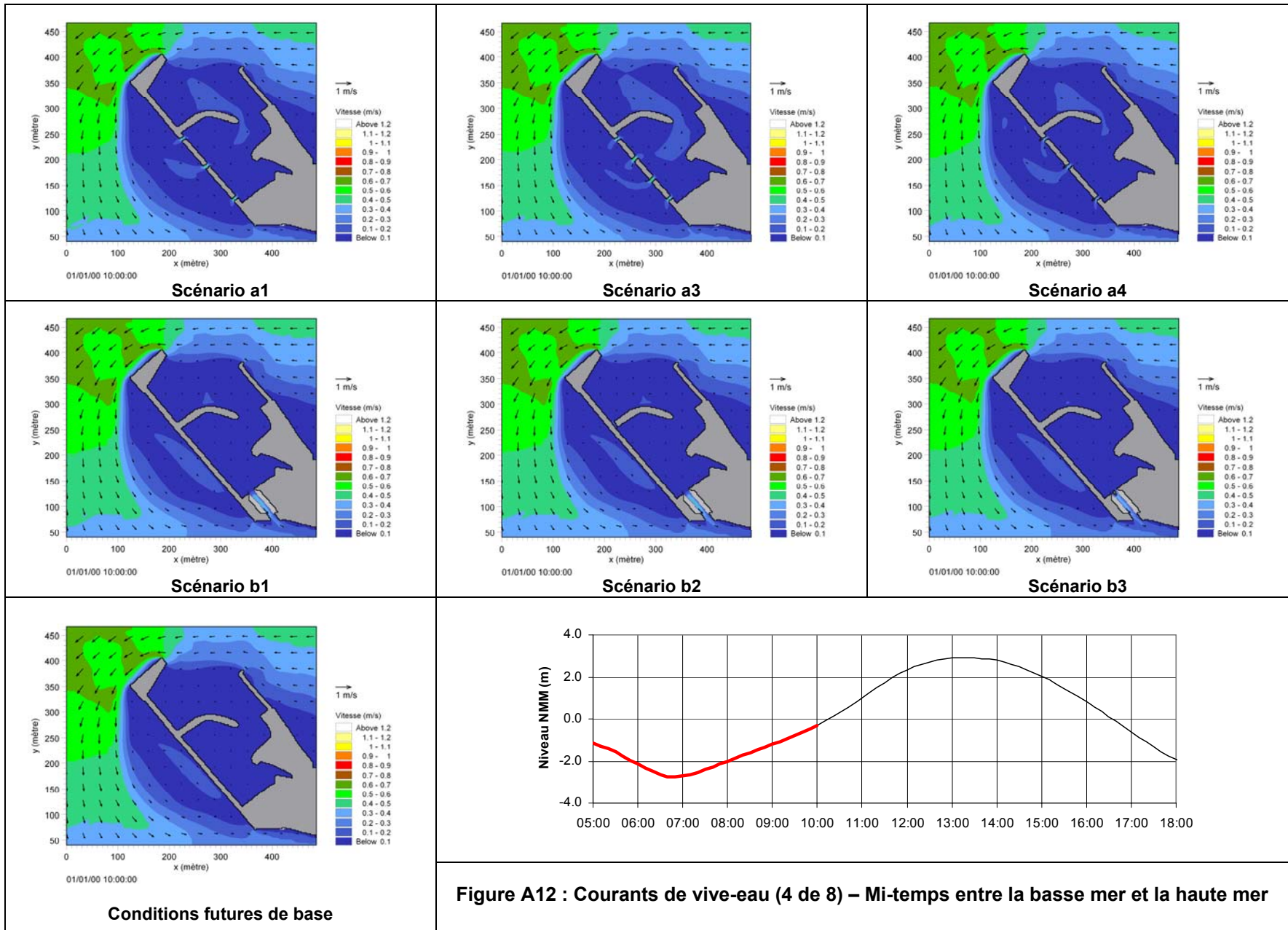


Figure A12 : Courants de vive-eau (4 de 8) – Mi-temps entre la basse mer et la haute mer

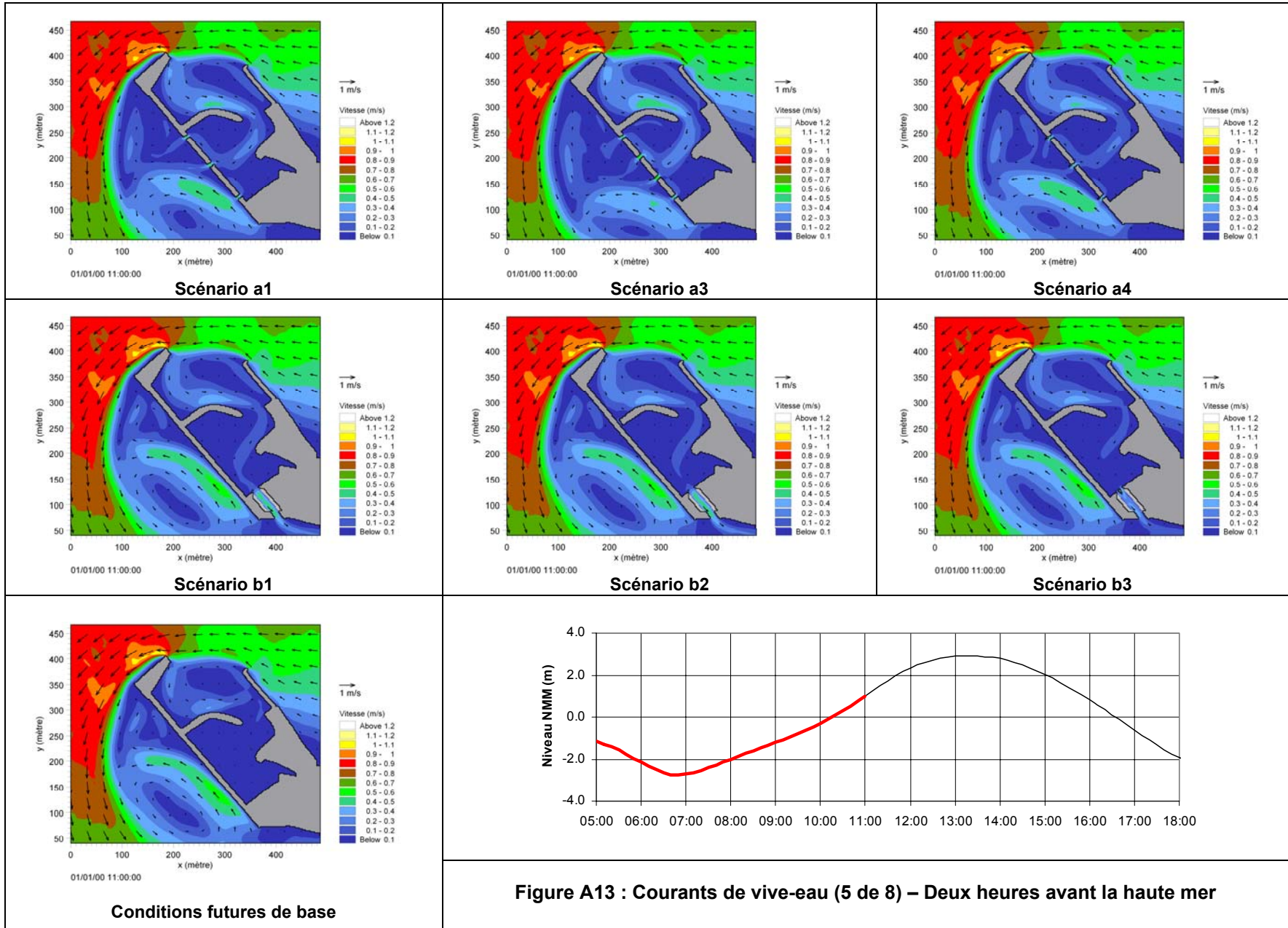


Figure A13 : Courants de vive-eau (5 de 8) – Deux heures avant la haute mer



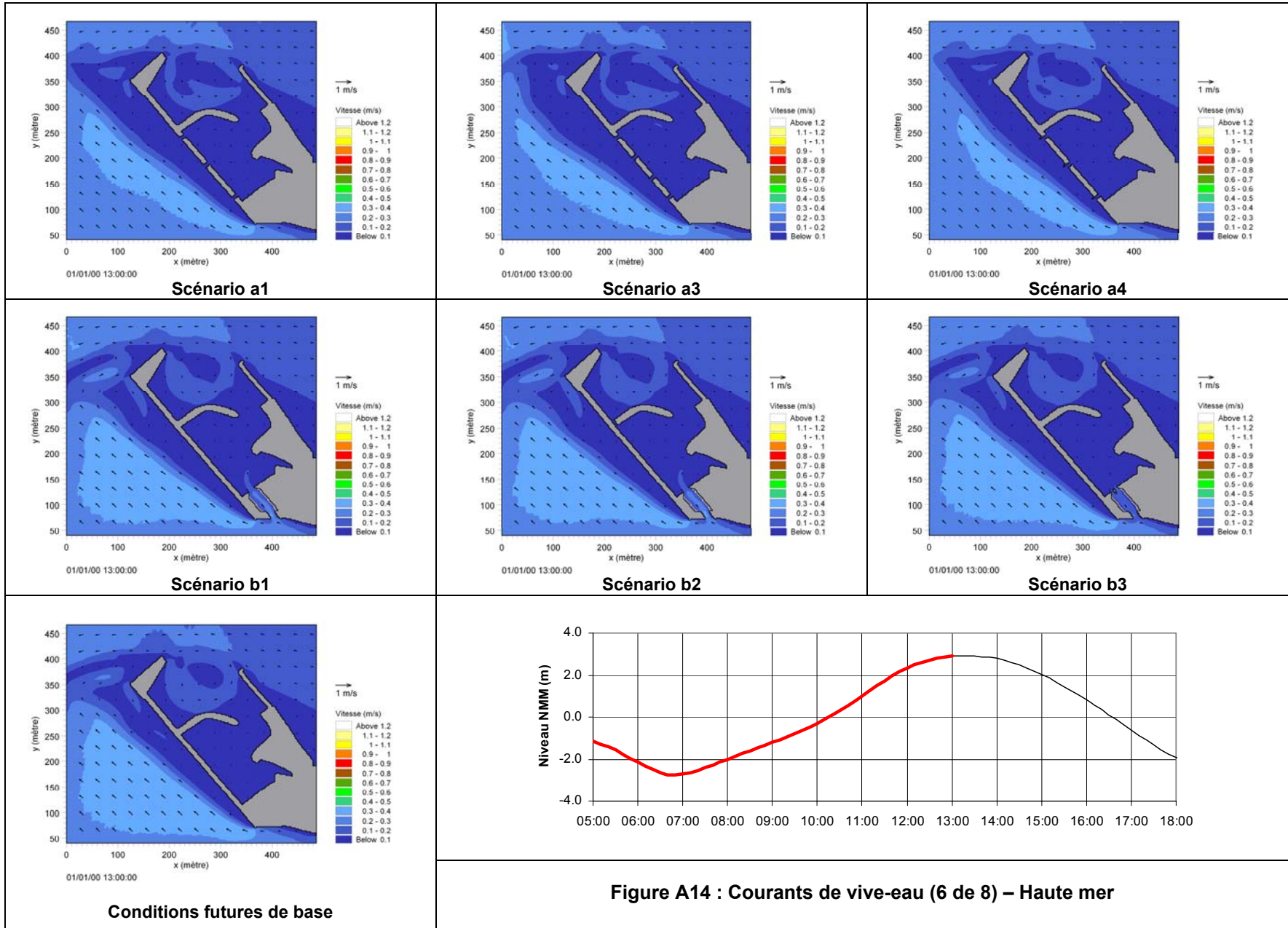


Figure A14 : Courants de vive-eau (6 de 8) – Haute mer



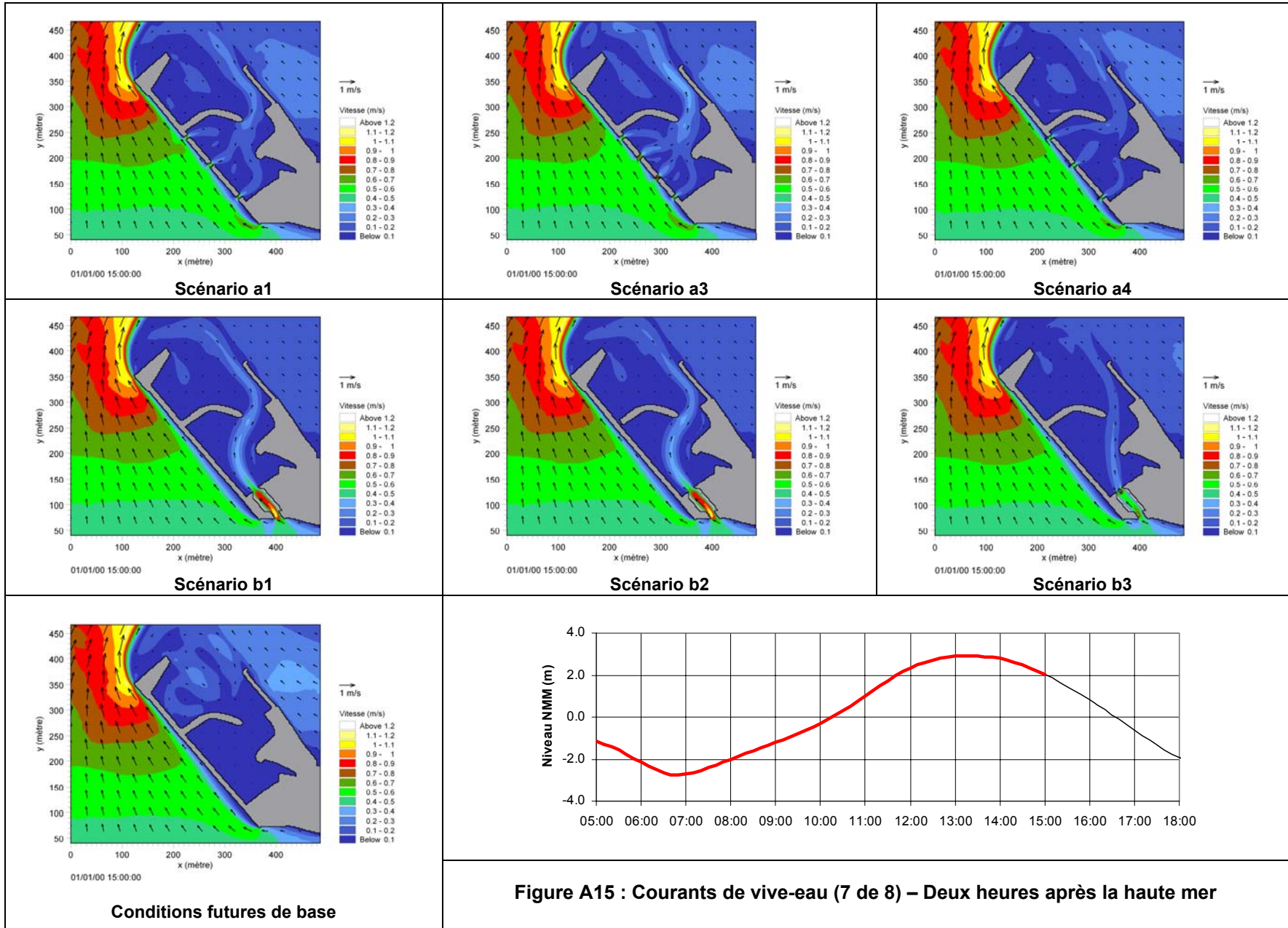


Figure A15 : Courants de vive-eau (7 de 8) – Deux heures après la haute mer

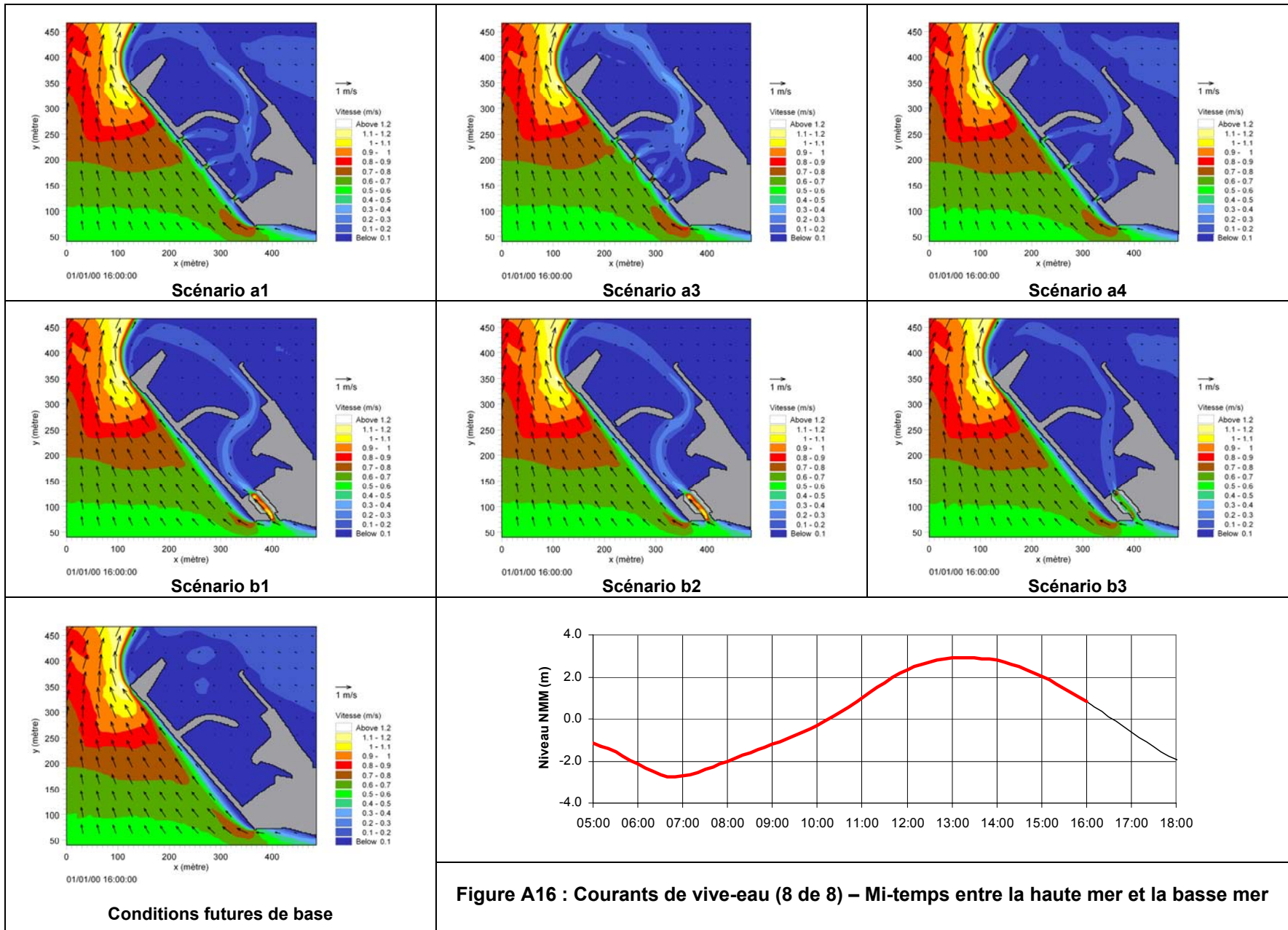


Figure A16 : Courants de vive-eau (8 de 8) – Mi-temps entre la haute mer et la basse mer