



## NOTE DE CALCULS

# Construction d'un ponton lourd en lieu et place de la barge actuelle

Mission d'études et de maîtrise d'œuvre

## Note de tenue à la mer - Phase PRO

Indice A

Janvier 2016

Commune de PAIMBOEUF



**CLIENT**

RAISON SOCIALE	Ville de Paimboeuf
COORDONNÉES	Direction des Services Techniques Quai Eole 44560 PAIMBOEUF
INTERLOCUTEUR <i>(nom et coordonnées)</i>	Patrick LECONTE Tél. 02 40 27 76 59 services.techniques@paimboeuf.fr

**SCE**

COORDONNÉES	4 rue Viviani CS 26220 44262 Nantes Cedex 2
INTERLOCUTEUR	Monsieur Tom RENAUD Tel : 02 51 17 29 84 tom.renaud@sce.fr

**RAPPORT**

OPERATION	Construction d'un ponton « lourd » - Ville de Paimboeuf
TITRE	Note de tenue à la mer – Phase PRO
REFERENCE	150557-PRO-NC-004
NOMBRE DE PAGES	34
NOMBRE D'ANNEXES	2
OFFRE DE REFERENCE	72677
N°COMMANDE	Marché n°AOR-2014/001-PA-PI

**SIGNATAIRE**

INDICE	DATE	OBJET DE LA REVISION	REDACTEUR	VERIFICATEUR	APPROBATEUR
A	06/01/16	Version initiale	Jean BOUGIS	-	KGU

**Etude de la tenue à la mer d'un ponton  
d'accueil à Paimboeuf**

**Tenue à la mer du ponton**

**Rapport d'étude – Phase PRO**

**SCE Aménagement et environnement  
4 rue Viviani**

**C.S. 26 220 – 44262 Nantes Cedex 2**

**Tél. : +33.(0)2.51.17.29.84 – Fax. : +33.(0)2.51.17.29.99**

**Courriel : [www.sce.fr](http://www.sce.fr)**

<b>Dr Jean BOUGIS</b> <b>CONSULTANT SCIENTIFIQUE</b> 32-34 Chemin du Moulin 06650 OPIO Tél. 04.93.77.74.22 et 06.07.30.70.38 Fax. 04.93.77.74.25	Auteur Date Affaire Document Fichier	J. Bougis 19-12-15 C.15.740 RET.15.740.03.01 SCE_PontonPaimboeuf_RET15740.03.01.doc
<b>e-mail : <a href="mailto:jean.bougis@wanadoo.fr">jean.bougis@wanadoo.fr</a></b>	<b>Internet : <a href="http://sci-ingenierie.com">sci-ingenierie.com</a> – <a href="mailto:j.bougis@scs-ingenierie.com">j.bougis@scs-ingenierie.com</a></b>	

Classification	
Non Classifié	X
Diffusion Restreinte	
Confidentiel Défense	
Confidentiel Industrie	

Identification	
Numéro fournisseur	-
Numéro du Projet	C.15.740
Numéro du Document	RET.15.740.03.01
Numéro de la commande	-
Date de la commande	-

**Cabinet Conseil Jean Bougis, 32-34 Chemin du Moulin 06650 Opio – 04.93.77.74.22**

Etude de la tenue à la mer d'un ponton d'accueil à Paimboeuf  
Rapport d'étude – Phase PRO

Client :	SCE A & E		
Représenté par :	Directeur de projet	Chargé d'études	
Nom :	M. Tom Renaud	M. Kevin Gueguen	
Tél. :	+33.(0)2.51.17.29.84	+33.(0)2.51.17.81.62	
Fax :	+33.(0)2.51.17.29.99	+33.(0)2.51.17.29.99	
GSM :	+33.(0)6.84.38.34.07	+33.(0)6.	
Courriel :	<a href="mailto:tom.renaud@sce.fr">tom.renaud@sce.fr</a>	<a href="mailto:kevin.gueguen@sce.fr">kevin.gueguen@sce.fr</a>	

	Jean Bougis	Diffusion
Préparé par		SCE A&E : M. Tom Renaud M. Kevin Gueguen
Vérifié par		
Approuvé par		

Mises à jour			
Référence	Date	Nom	Objet
15.740.03.01	19-12-15	J. Bougis	Tenue à la mer des pontons en béton

## **Sommaire**

<b>1. Contexte de l'étude</b>	<b>5</b>
<b>2. Objet de l'étude</b>	<b>6</b>
2.1. Situation géographique	6
2.2. Projet d'aménagement	6
2.3. Consistance de l'étude	6
<b>3. Données environnementales</b>	<b>7</b>
3.1. Données bathymétriques	7
3.2. Données physico-chimiques	7
3.3. Niveau de référence	8
3.3.1. Nivellement topographique	8
3.3.2. Réduction des sondes du SHOM	8
3.3.3. Niveau moyen de la mer	8
3.3.4. Evolution du niveau moyen	8
3.4. Niveaux de projet	9
3.4.1. Marées astronomiques	9
3.4.2. Marées météorologiques	9
3.4.3. Niveaux de projet	10
3.5. Vent de projet	10
3.6. Courants de projet	10
3.7. Agitation de projet	11
3.7.1. Houles océaniques	11
3.7.2. Agitations levées sur la Loire	11
3.7.3. Relation entre les différentes hauteurs	12
3.8. Ondes de batillages de projet	12
<b>4. Modélisation de la panne d'accueil</b>	<b>13</b>
4.1. Repères et conventions	13
4.1.1. Repère général (repère hydrodynamique)	13
4.1.2. Repères locaux des pontons	13
4.1.3. Repères locaux des liaisons	14
4.1.4. Conventions	14
4.2. Hypothèses de calcul	14
4.3. Caractéristiques des pontons	15
4.4. Caractéristiques des pieux	17
4.5. Géométrie et topologie	17
4.6. Maillages	17
4.7. Choix des paramètres (profondeurs, périodes, incidences)	18
4.8. Rappels hydrostatiques	18
4.9. Amortissements complémentaires	19
4.10. Modélisation des ancrages et liaisons	21
4.11. Modes propres	23
4.12. Fonctions de transfert	24
4.12.1. Mouvements sur houle	24
4.12.2. Efforts de liaison alternatifs	24
4.12.3. Efforts de liaison de dérive	25
4.12.4. Efforts dans les sections des pontons	25
4.13. Réponses spectrales	25
4.13.1. Mouvements sur houle	26
4.13.2. Efforts de liaison	26
4.13.3. Efforts de liaison de dérive	26
4.13.4. Efforts dans les sections des pontons	27
<b>5. Appontement en béton</b>	<b>28</b>
5.1. Modes propres	28

5.2. Mouvements de plateforme	29
5.3. Efforts de liaison dans les pieux	31
5.4. Efforts dans les sections centrales des pontons	33
<b>6. Documentation</b>	<b>36</b>
6.1. Documents techniques généraux	36
6.2. Documents techniques particuliers	36
6.3. Documents de l'étude	36
6.4. Etudes antérieures	36

## 1. **Contexte de l'étude**

La Commune de Paimboeuf, agissant en qualité de Maître d'ouvrage, a lancé un appel d'offres restreint pour la maîtrise d'œuvre d'un ponton d'accueil pour les navires de plaisance, de pêche professionnelle, du grand port, de la marine nationale, des bateaux de transports de passagers.

La maîtrise d'œuvre a été confiée au bureau d'étude SCE qui a demandé au Cabinet Jean Bougis sa contribution en sous-traitance pour l'étude des aspects hydrodynamiques du ponton.

Cette étude, réalisée à la demande du bureau d'études SCE, concerne les calculs du comportement hydrodynamique du ponton et en particulier la tenue du ponton aux sollicitations hydrodynamiques en fonction du type d'ancrages retenu : modes propres, tenue dynamique à la houle et au batillage (mouvements efforts de liaison, efforts internes, etc.).

Et de manière générale apporter à SCE tout conseil relevant de ses compétences.

## 2. Objet de l'étude

### 2.1. Situation géographique

Paimboeuf est situé sur la rive Sud de l'embouchure de la Loire. L'appontement d'accueil des navires sera situé à la place d'un ponton léger actuel.



Figure 2.1 : Plan de situation du futur ponton (Google Earth)

L'agitation du plan d'eau est due :

- aux houles qui pénètrent dans la Loire,
- aux clapots levés sur les fetchs locaux,
- aux vagues d'étrave des navires.

### 2.2. Projet d'aménagement

Le projet d'aménagement consiste à créer un appontement composé de deux pontons de 25 m de long chacun, séparés d'un mètre, pour accueillir les navires de plaisance, de pêche professionnelle, du grand port, de la marine nationale, des bateaux de transports de passagers.

La durée de vie de l'ouvrage est de 50 ans.

### 2.3. Consistance de l'étude

Compte tenu que l'ouvrage sera exposé à des agitations résiduelles, il convient de le dimensionner et de dimensionner ses ancrages à la tenue à la mer et au batillage des navires qui fréquentent le port et passent devant son entrée.

La vérification du dimensionnement de l'appontement pour l'accostage et pour l'amarrage des navires sera réalisée par SCE.



### 3. Données environnementales

#### 3.1. Données bathymétriques

Les données bathymétriques (voir figure 3.1) sont celles de la carte n°7396 L du SHOM [P1].

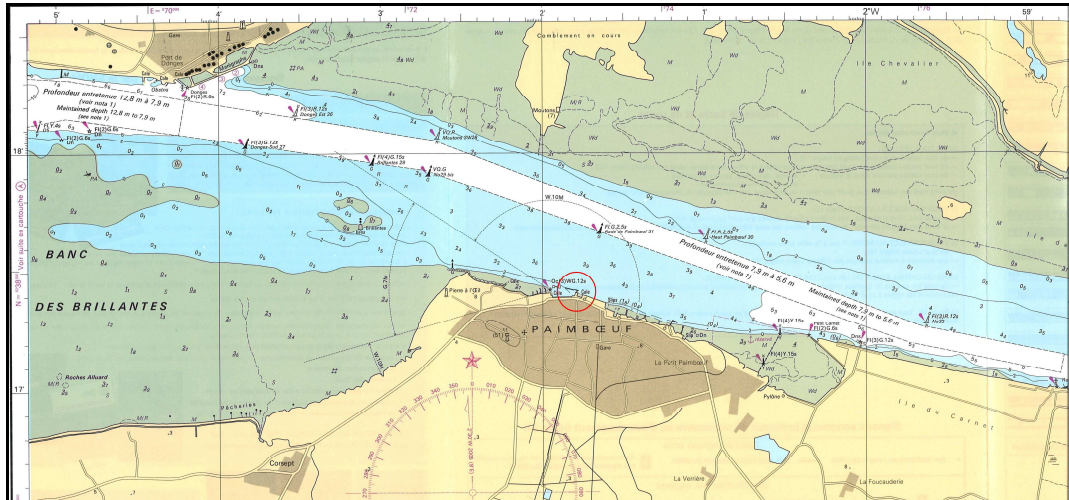


Figure 3.1 : Bathymétrie de la Loire devant Paimboeuf.

Le ponton sera installé dans une profondeur d'eau de 3.5 m CM à 4.0 m CM [E1].

#### 3.2. Données physico-chimiques

Le tableau 3.1 rassemble les valeurs moyennes des principales grandeurs physico-chimiques de l'eau de mer en surface devant l'estuaire de la Loire, pour chacune des saisons. Elles sont issues des données des Instructions Nautiques du SHOM [P2].

Saisons	Salinité (g/kg)	Température (°C)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
Février (hiver)	33.5 à 34.0	8.0 à 8.5	1026.0 à 1026.5
Mai (printemps)	32.5 à 33.0	13.0 à 13.5	1025.0 à 1025.5
Août (été)	34.0 à 34.5	17.5 à 18.0	1024.5 à 1025.0
Novembre (automne)	34.5 à 35.0	13.0 à 13.5	1026.0 à 1026.5

Tableau 3.1 : Données physico-chimiques des eaux de surface devant l'estuaire de la Loire pour les différentes saisons [P2].

Devant l'estuaire de la Loire, la masse volumique moyenne de l'eau de mer est égale à  $\rho_m=1026 \text{ kg/m}^3$ . Naturellement dans l'estuaire, le mélange d'eau de mer et d'eau douce, variable en fonction du débit de la Loire et de la marée, est nécessairement comprise entre la masse volumique de l'eau douce égale à  $\rho_d=1000 \text{ kg/m}^3$  et celle de l'eau de mer  $\rho_m=1026 \text{ kg/m}^3$ .

Comme les efforts sont proportionnels à la masse volumique, nous retiendrons pour le projet la masse volumique de l'eau de mer  $\rho_m=1026 \text{ kg/m}^3$ .

Avec une salinité de 33.5 à 35.0 g/kg et une température de 8.0 à 18.5°C, devant l'estuaire de la Loire, l'eau de mer a une viscosité cinématique de  $1.1 \cdot 10^{-6}$  à  $1.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Nous retiendrons donc la valeur moyenne de  $\nu = 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

### **3.3. Niveau de référence**

#### **3.3.1. Nivellement topographique**

Le référentiel fondamental des altitudes est le Nivellement Général de la France (IGN69).

#### **3.3.2. Réduction des sondes du SHOM**

L'estuaire de la Loire est situé dans la zone de marée n°11 dont le port principal est Saint-Nazaire [P3].

A Saint-Nazaire (47°16' N – 2°12' W), le zéro hydro graphique (réduction des cartes marines) est situé à 9.252 m au-dessous du repère fondamental NGF n°O.KS-69 scellé en 1975 à la base du phare du Vieux Môle et coté +6.092 m IGN 69 (2010). Le zéro hydrographique est donc situé à 3.160 m au-dessous du zéro IGN69 [P3].

#### **3.3.3. Niveau moyen de la mer**

A Saint-Nazaire, Le niveau moyen de la mer est égal à +3.57 m CM. A Donges, en face de Paimbœuf, le Niveau moyen de la mer est situé à la cote +3.58 m CM [P4].

#### **3.3.4. Evolution du niveau moyen**

Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) ou « International Panel on Climate Change » (IPCC), a estimé dans son rapport de 2007, que la surélévation du niveau des mers serait comprise entre 18 cm et 59 cm au cours du XXI<sup>e</sup> siècle (hors effet de rétroaction entre le cycle du carbone et le climat).

Il convient cependant de noter que les valeurs indiquées ci-dessus correspondent à des surélévations moyennes sur l'ensemble du globe et que le rapport ne fournit pas d'information sur la situation particulière de l'Océan Atlantique.

Dans leur étude, Church et al. (2006) évaluent l'élévation moyenne à  $1.5 \pm 0.5 \text{ mm/an}$  pendant la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle. A l'échelle de plusieurs décennies, l'étude par le LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géo-

physique et Océanographie Spatiale) du niveau moyen de la mer met en évidence des surélévations annuelles supérieures dans certaines zones du globe. D'après les cartes du LEGOS, on peut évaluer à 2.5 mm/an la surélévation dans la zone de Saint-Nazaire.

Il n'est donc pas insensé d'évaluer entre 5 et 10 cm la surélévation du niveau de la mer pendant les 35 prochaines années.

### 3.4. Niveaux de projet

#### 3.4.1. Marées astronomiques

Les marées astronomiques qui se manifestent sur les côtes de la Loire Atlantique sont semi diurnes, quasiment sinusoïdales, avec une très légère inégalité diurne d'une dizaine de centimètres.

Entre La Baule et le Pertuis d'Antioche, il existe, lors des plus faibles marées de mortes eaux, un phénomène de tenue du plein. Il s'agit d'une longue étale de pleine mer pendant laquelle le niveau de l'eau ne varie que très lentement [P5].

A Saint-Nazaire, la marée a une durée de 12 h 35 mn (montée 6 h 30 mn et baissée 6 h 05 mn) en mortes eaux moyennes et de 12 h 20 mn en vives eaux moyennes (montée 5 h 15 mn et baissée 7 h 05 mn).

Les marées astronomiques sont caractérisées par les cotes du tableau 3.2 :

Marée	Coefficient	Pleine mer (CM)	Basse mer (CM)	Marnage
<b>Saint-Nazaire</b>				
Marée astronomiques extrêmes	-	+6.59 m	-0.02 m	6.61 m
Vives eaux exceptionnelles	120	+6.45 m	+0.17 m	6.28 m
Vives eaux moyennes	95	+5.85 m	+0.85 m	5.00 m
Marées moyennes	70	+5.25 m	+1.52 m	3.73 m
Mortes eaux moyennes	45	+4.65 m	+2.20 m	2.45 m
Mortes eaux exceptionnelles	20	+4.05 m	+2.87 m	1.18 m
<b>Donges</b>				
Marée astronomiques extrêmes	-	+6.73 m	-0.31 m	7.04 m
Vives eaux exceptionnelles	120	+6.58 m	-0.07 m	6.65 m
Vives eaux moyennes	95	+5.95 m	+0.65 m	5.30 m
Marées moyennes	70	+5.33 m	+1.37 m	3.95m
Mortes eaux moyennes	45	+4.70 m	+2.10 m	2.60 m
Mortes eaux exceptionnelles	20	+4.08 m	+2.82 m	1.25 m

**Tableau 3.2** : Hauteur d'eau à Saint-Nazaire et à Donges pour différents coefficients de marées au dessus du zéro hydrographique.

#### 3.4.2. Marées météorologiques

Les marées météorologiques sont dues aux actions combinées des hautes et basses pressions (marée barométrique) et du vent qui « pousse » l'eau vers la côte (basculement du plan d'eau).

Les variations de la pression atmosphérique engendrent des variations sensibles du niveau de la mer. La pression atmosphérique normale étant de 101325 Pa (10.1 m d'eau de mer), une variation de  $\pm 1$  hPa induit variation de niveau de  $\mp 0.01$  m.

Les tempêtes de secteur Sud-Ouest à Ouest, associées à des basses pressions et des vents du large, font monter le niveau des eaux d'une surcote qui peut atteindre 1.0 m.

Au contraire, les tempêtes de secteur Nord-Est à Sud-Est peuvent entraîner un abaissement du niveau de la mer de 0.30 m à 0.50 m lorsqu'elles sont associées à de fortes pressions.

Durée de retour	m IGN 69					m CM				
	5	10	20	50	100	5	10	20	50	100
Niveau haut	+3.70	+3.78	+3.87	+3.97	+4.06	6.86	6.94	7.03	7.13	7.22
Niveau bas	-3.22	-3.26	-3.31	-3.36	-3.39	-0.06	-0.10	-0.15	-0.2	-0.23

**Tableau 3.3** : Niveaux extrêmes à Saint-Nazaire.

Le tableau 3.3 rassemble les niveaux extrêmes à Saint-Nazaire en fonction de l'adurée de retour [P6]<sup>1</sup>.

### 3.4.3. Niveaux de projet

Compte tenu de l'ensemble de ce qui précède, les niveaux d'eau de projet à considérer à Paimbœuf sont :

- Basse mer : -0.50 m CM,
- Niveau moyen : +3.50 m CM,
- Pleine mer : +7.50 m CM.

### 3.5. Vent de projet

Les efforts dus au vent ne sont pas pris en compte dans ce rapport. Il appartient à SCE de les prendre en compte pour le calcul de la tenue des pieux.

### 3.6. Courants de projet

Compte tenu que, à proximité du rivage, le courant est nécessairement parallèle au trait de côte, il sera nécessairement longitudinal à l'appontement d'accueil.

D'après ARTELIA [A2], à proximité de la rive la vitesse du courant est de l'ordre de 1.54 m.

<sup>1</sup> Note du SHOM : Ces valeurs sont fournies à titre indicatif et ne peuvent être considérées comme totalement fiables, vu les conditions d'implantation de ces marégraphes (zone fluviale donc indépendance des surcotes et de la marée non vérifiée, présence de dragage, etc.).

Les efforts dus au courant ne sont pas pris en compte dans ce rapport. Il appartient à SCE de les prendre en compte pour le calcul de la tenue des pieux.

### 3.7. Agitation de projet

#### 3.7.1. Houles océaniques

Le site est suffisamment loin de l'embouchure de la Loire pour être protégé des houles océaniques.

#### 3.7.2. Agitations levées sur la Loire

Le tableau 3.4 rassemble la synthèse des agitations extrêmes déterminées d'après :

- 1) ARTELIA [A2] ;
- 2) les formules de Breitschneider (73 et 77) et de Hasselmann (76) dans une profondeur d'eau de 15 m.

Durée (ans)	Débit Loire Q (m <sup>3</sup> /s)	Courant V (m/s)	Niveau d'eau N (m CM)	Fetch F (km)	Vent V (m/s)	Agitation	
						H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)
Agitation levée par le vent d'Ouest							
1 an	-	Sans	+3.60	6.0	21.0	1.20	4.2
10 ans	-	Sans	+3.60	6.0	25.6	1.50	4.5
100 ans	-	Sans	+3.60	6.0	27.0	1.60	4.6
100 ans	4000 (max du jusant)	1.54	+0.10 à +1.25	6.0	27.0	1.40	5.7
100 ans	191 (Au max du flot)	1.84	+1.95 à +2.40	6.0	27.0	1.65	4.6
Agitation levée par le vent d'Est							
1 an	-	Sans	+3.60		11.2	1.20	4.0
10 ans	-	Sans	+3.60		14.1	1.60	4.3
100 ans	-	Sans	+3.60		18.4	1.65	4.3

**Tableau 3.4 :** Agitations caractéristiques sur le site.

D'après le rapport ARTELIA, les conditions de calcul les plus pénalisantes sont les conditions sans courant au niveau d'eau +3.60 m.

Pour les structures flottantes, le dimensionnement dépend des couples hauteur – période. Ce n'est pas nécessairement la plus grande hauteur qui est dimensionnante dans la mesure où la période associée est grande. Dans ces conditions, il est nécessaire d'analyser les agitations enveloppes hauteur – période.

Pour un fetch  $F$  pas trop grand, une profondeur relative pas trop petite, et des vents pas trop forts, les hauteurs de clapots complètement formés sont sensiblement proportionnelles à la vitesse du vent, tandis que les périodes de pic évoluent sensiblement comme la racine carrée de la vitesse du vent :

$$H_s = A(F)V \quad T_p = B(F)\sqrt{V} = C(F)\sqrt{H_s} \quad (3.1)$$

Nous avons utilisé les tableaux des clapots annuel et décennal, résultats du rapport d'ARTELIA [A2], pour déterminer le coefficient  $C$  pour le fetch d'Ouest du site correspondant au tableau 3.4 :

$$\begin{aligned} T_p &= C(F)\sqrt{H_s} = 3.68\sqrt{H_s} \\ H_s &= 0.074 T_p^2 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Les clapots seront donc analysés pour les couples hauteur – période suivants :

- $T_p=2$  s –  $H_s=0.30$  m ;
- $T_p=3$  s –  $H_s=0.70$  m ;
- $T_p=4$  s –  $H_s=1.20$  m.

### 3.7.3. Relation entre les différentes hauteurs

Compte tenu de la profondeur de la Loire, les valeurs maximales des clapots levés par le vent suivent une loi de Rayleigh. D'où :

$$\begin{aligned} H_s &= H_{1/3} = H_{m0} \\ H_{1/10} &= 1.27 H_s \\ H_{\max} &= 2.0 H_s \end{aligned} \quad (3.3)$$

Ces agitations seront représentées par un spectre JONSWAP avec la fonction de directivité de Borgman.

### 3.8. Ondes de batillages de projet

Le tableau 3.5 rassemble les agitations de batillage déterminées par le Cabinet Jean Bougis [A3].

Durée	Débit Loire	Courant	Niveau d'eau	Agitation	
Batillage des navires					
			$N$ (m CM)	$H$ (m)	$T$ (s)
			> 3.4	0.40	2.0
			> 3.4	0.50	3.0
			> 3.4	0.60	4.0
			> 3.4	0.70	5.0
			> 3.4	0.80	≥ 6.0

Tableau 3.5 : Ondes de batillage caractéristiques sur le site.

## 4. Modélisation de la panne d'accueil

### 4.1. Repères et conventions

#### 4.1.1. Repère général (repère hydrodynamique)

Le repère général, ou repère hydrodynamique,  $(O, X, Y, Z)$  est le repère utilisé pour effectuer les calculs de mécanique des fluides avec le progiciel Diodore, puis les calculs de mécanique des solides avec le logiciel Poséidon.

C'est un repère orthonormé direct dont :

- L'origine  $O$  est située dans le plan de la surface libre, sur l'axe de la panne à l'extrémité Est du premier ponton.
- L'axe  $OX$  est l'axe horizontal longitudinal (orienté d'Est en Ouest).
- L'axe  $OY$  est l'axe horizontal transversal (orienté du Nord au Sud).
- L'axe  $OZ$  est vertical ascendant.

Les vecteurs de base, sont notés respectivement  $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{j}$  et  $\mathbf{k}$ .

#### 4.1.2. Repères locaux des pontons

Les données géométriques de chaque ponton  $p$ , sont définies dans un repère local  $(O_p, x_p, y_p, z_p)$  qui lui est propre (cf. figure 4.1).

Ce repère est lié au parallélépipède rectangle circonscrit au ponton dont l'origine  $O_p$  est située à l'intersection du dessous du ponton ( $z_{p\min}$ ) et de la verticale passant par l'arrête  $(x_{p\min}, y_{p\min})$  de ce parallélépipède.

Les données inertielles sont définies dans le repère barycentrique de chaque ponton, dont l'origine est située au centre de gravité  $G_p$  du ponton  $p$ . Ses axes sont colinéaires aux précédents.

Les vecteurs de base, sont notés respectivement  $\mathbf{i}_p$ ,  $\mathbf{j}_p$  et  $\mathbf{k}_p$ .

Le problème possède 6 degrés de liberté par ponton. Les mouvements oscillatoires du ponton  $p$  autour de sa position d'équilibre statique sont définis par :

- $\eta_{p1}$  cavalement : translation selon l'axe  $G_p x_p$ ,
- $\eta_{p2}$  embardée : translation selon l'axe  $G_p y_p$ ,
- $\eta_{p3}$  pilonnement : translation selon l'axe  $G_p z_p$ ,
- $\eta_{p4}$  roulis : rotation autour de l'axe  $G_p x_p$ ,
- $\eta_{p5}$  tangage : rotation autour de l'axe  $G_p y_p$ ,
- $\eta_{p6}$  lacet : rotation autour de l'axe  $G_p z_p$ .

Les rotations de chaque ponton sont exprimées autour de son centre de gravité. De même, les torseurs d'efforts subits par chaque ponton sont réduits en son centre de gravité.

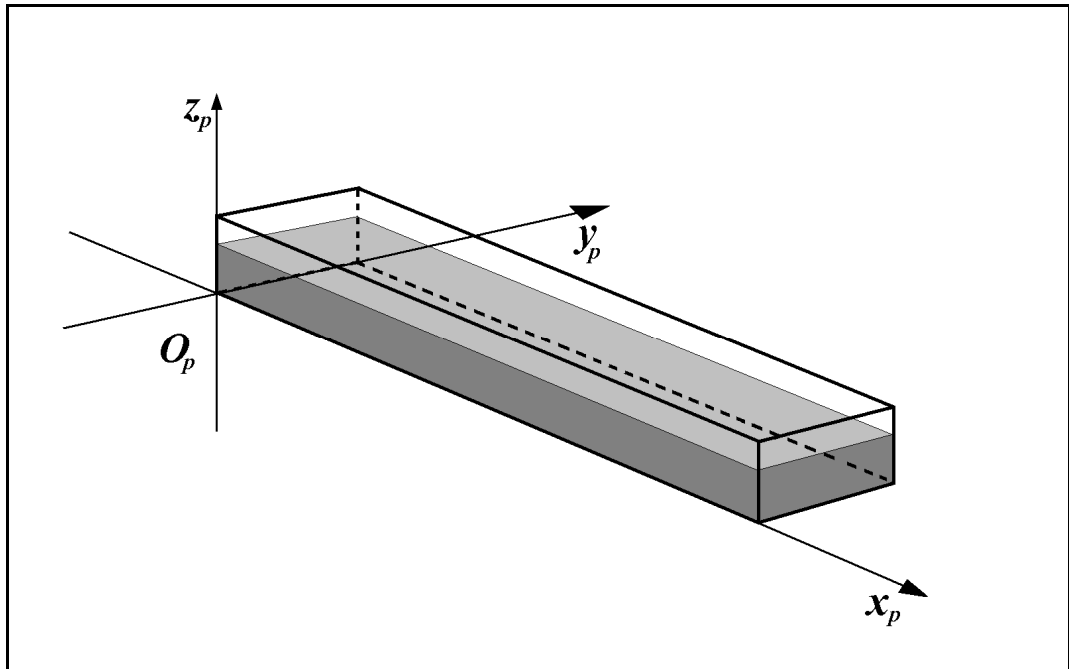


Figure 4.1 : Schéma du repère local de chaque ponton.

#### 4.1.3. Repères locaux des liaisons

Les liaisons sont supposées être ponctuelles. La position  $P_l(X_l, Y_l, Z_l)$  du point de liaison est définie dans le repère général.

Les caractéristiques de chaque liaison  $l$ , sont définies dans un repère local  $(P_l, x_l, y_l, z_l)$  qui lui est propre.

Ce repère est lié aux axes des systèmes de liaison dans lesquels le constructeur fournit ses données de raideur et de déformation (défenses, butées) ou à la logique de fonctionnement de la liaison (chaîne, aussière). L'origine  $P_l$  est située au point d'application de l'effort de liaison sur le(s) ponton(s).

#### 4.1.4. Conventions

Les dérivées temporelles premières sont désignées en ajoutant un point sur les variables. Les dérivées temporelles secondes sont désignées en ajoutant deux points sur les variables.

#### 4.2. Hypothèses de calcul

Les calculs relèvent de la théorie classique de la diffraction-radiation tridimensionnelle linéaire en mécanique multi structures.

Le fluide est supposé parfait en écoulements irrotationnels : le champ de vitesse dérive d'un potentiel.



Les équations de la mécanique des fluides sont linéarisées et les conditions aux limites sont appliquées sur la position moyenne des frontières. Cela suppose que la cambrure de la houle et les amplitudes des mouvements autour des positions moyennes des carènes des structures sont suffisamment faibles pour que seul le premier ordre soit pris en compte.

La pression est constante au dessus de la surface libre.

Le fond de l'eau est plan et horizontal.

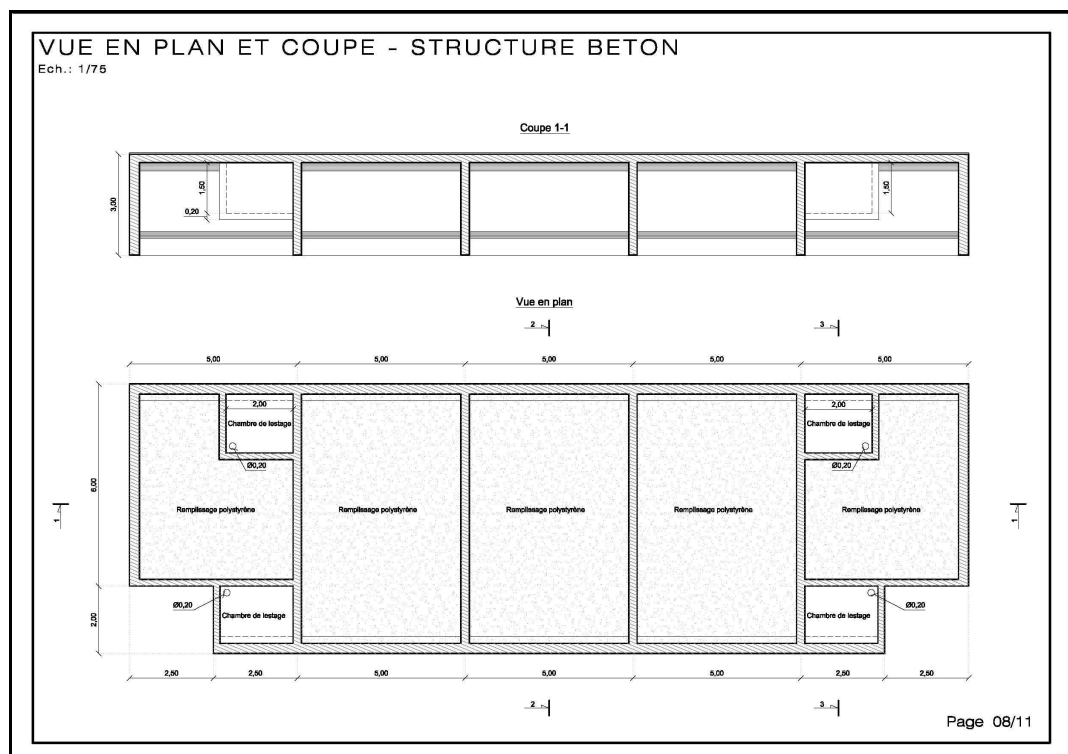
La houle incidente est la houle linéaire d'Airy (Stokes 1<sup>er</sup> ordre).

#### 4.3. Caractéristiques des pontons

La panne d'accueil a été définie par SCE. Elle est composée de deux pontons de 25.00 m de long indépendant et séparés par un espace d'un mètre (voir figures 4.2 et 4.3). Chaque ponton est fixé sur deux pieux. Elle est orientée parallèlement au rivage.

La panne est fixée sur les pieux par des colliers intégrés dans le platelage des pontons.

Les pieux sont distants d'un mètre des extrémités.



**Figure 4.2** : Schéma de principe des pontons en béton (Plans SCE [E1])

Les pontons sont supposés être dans leurs lignes, c'est à dire que le centre de gravité d'un ponton est supposé être au-dessus de son centre de poussée lorsqu'il est, au repos, horizontal à son tirant d'eau nominal.

La modélisation de chaque ponton est réalisée à partir de ses éléments géométriques et inertiels (dimensions, masse, inerties et position du centre de gravité).

Les caractéristiques de l'appontement sont rassemblées dans le tableau 4.1. Les valeurs en rouge correspondent à des données manquantes que nous avons évaluées d'après des ordres de grandeur habituels.

Désignation	S	Pontons Béton	U
Orientation de la panne : Angle (Nord, $Ox$ )		283.	°
Longueur de la panne	$L_p$	26.000	m
Nombre de pontons		2	-
Espacement entre pontons	$E$	1.000	m
Longueur à la flottaison	$L_f$	25.000	m
Largeur des pontons	$B_f$	8.000	m
Creux des pontons	$D$	3.000	m
Tirant d'eau	$T$	2.100	m
Franc bord	$F$	0.900	m
Surface de flottaison	$S_f$	190.000	m <sup>2</sup>
Centre de flottaison			
Longitudinale à partir de $x_{i\min}$ (LF)	$X_F$	25.000	m
Transversale à partir de $y_{\min}$ (BF)	$Y_F$	3.842	m
Inertie transversale de la surface de flottaison / $Fx_i$	$I_{fx}$	968.596	m <sup>4</sup>
Inertie longitudinale de la surface de flottaison / $Fy_i$	$I_{fy}$	9145.833	m <sup>4</sup>
Volume immergé	$W$	399.000	m <sup>3</sup>
Centre de carène			
Longitudinale à partir de $x_{i\min}$ (LC)	$X_C$	25.000	m
Transversale à partir de $y_{\min}$ (BC)	$Y_C$	3.842	m
Verticale au dessus du fond $z_{i\min}$ (KC)	$Z_C$	1.050	m
Masse	$M$	409.374	t
Centre de gravité			
Longitudinale à partir de $x_{i\min}$ (LG)	$X_G$	25.000	m
Transversale à partir de $y_{\min}$ (BG)	$Y_G$	3.842	m
Verticale au dessus du fond $z_{i\min}$ (KG)	$Z_G$	1.860	m
Inerties / $Gxx$	$I_{xx}$	3209.482	t.m <sup>2</sup>
Inerties / $Gyy$	$I_{yy}$	21517.720	t.m <sup>2</sup>
Inerties / $Gzz$	$I_{zz}$	23027.288	t.m <sup>2</sup>
Inerties / $Gyz$	$I_{yz}$	0.	t.m <sup>2</sup>
Inerties / $Gxz$	$I_{xz}$	0.	t.m <sup>2</sup>
Inerties / $Gxy$	$I_{xy}$	0.	t.m <sup>2</sup>
Rayons de girations / $Gxx$	$R_{xx}$	2.800	m
Rayons de girations / $Gyy$	$R_{yy}$	7.250	m
Rayons de girations / $Gzz$	$R_{zz}$	7.500	m
Inertie réduite $R_{xx}/B$ (usuellement 0.30 à 0.40)		0.350	-
Inertie réduite $R_{yy}/L$ (usuellement 0.25 à 0.35)		0.290	-
Inertie réduite $R_{zz}/L$ (usuellement 0.25 à 0.35)		0.300	-
Rayon métacentrique en roulis	$r_x$	2.428	m
Rayon métacentrique en tangage	$r_y$	22.922	m
Hauteur $Z_G - Z_C$	$a$	0.810	m
Hauteur métacentrique en roulis	$r_x - a$	1.618	m
Hauteur métacentrique en tangage	$r_y - a$	22.112	m

Tableau 4.1 : caractéristiques de l'appontement flottant

#### 4.4. Caractéristiques des pieux

Les pieux ont un diamètre de 1220 mm et une épaisseur de 25 mm. Leurs caractéristiques mécaniques, définies par SCE, sont données dans le tableau 4.2.

Pieu	P1	P2	P3	P4	Unité
Diamètre	1 220	1 220	1 220	1 220	mm
Epaisseur	25	25	25	25	mm
Cote d'arase	+10.000	+10.000	+10.000	+10.000	m CM
Cote de fiche	-12.000	-12.000	-12.000	-12.000	m CM
Substratum	-7.000	-7.000	-7.000	-8.000	m CM
Nuance	X70	X70	X70	X70	-
Limite élastique	485	485	485	485	MPa
Limite rupture	570	570	570	570	MPa
Défense cisaillement	sans	sans	sans	sans	-
<b>Marée haute</b>					
Niveau d'eau	+7.50	+7.50	+7.50	+7.50	m CM
Raideur	2 400.0	2 400.0	2 400.0	2 000.0	kN/m
Effort admissible	950	950	950	890	kN
Déplacement au collier	0.40	0.40	0.40	0.45	m
<b>Marée moyenne</b>					
Niveau d'eau	+3.50	+3.50	+3.50	+3.50	m CM
Raideur	5 700.0	5 700.0	5 700.0	4 875.0	kN/m
Effort admissible	1 300	1 300	1 300	1 200	kN
Déplacement au collier	0.23	0.23	0.23	0.25	m
<b>Marée basse</b>					
Niveau d'eau	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	m CM
Raideur	18 275.0	18 275.0	18 275.0	14 890.0	kN/m
Effort admissible	2 120	2 120	2 120	1 850	kN
Déplacement au collier	0.12	0.12	0.12	0.12	m

**Tableau 4.2 :** Raideurs des pieux en fonction du niveau.

Les axes des pieux sont situés à 1.00 m des bords des pontons et le point d'application est situé au milieu de l'épaisseur de la dalle supérieure ; soit dans le repère du ponton (voir figure 4.1) :

- $x=+ 1.00$  m et  $+ 24.00$  m,
- $y=+ 7.00$  m,
- $z=-2.875$  m.

#### 4.5. Géométrie et topologie

Aucune symétrie n'a été mise à profit pour effectuer les calculs.

#### 4.6. Maillages

Les maillages ont été réalisés pour permettre de représenter convenablement des périodes courtes. Les méthodes de singularités nécessitent au moins trois à quatre éléments par longueur d'onde (légèrement moins que pour les méthodes d'éléments finis).

Pour représenter convenablement les effets hydrodynamiques à des périodes de l'ordre 1.5 s, il est donc nécessaire d'avoir, en tridimensionnel,

des éléments dont la plus grande longueur est de l'ordre du mètre. En choisissant une dimension maximale de 1.00 m en horizontal et 0.20 m en vertical, la qualité de la modélisation est assurée pour les périodes supérieures à 1.5 s. A noter que les calculs pour la période 0 s sont effectués en résolvant le problème asymptotique (anti-double modèle) qui échappe à cette règle (absence de vagues).

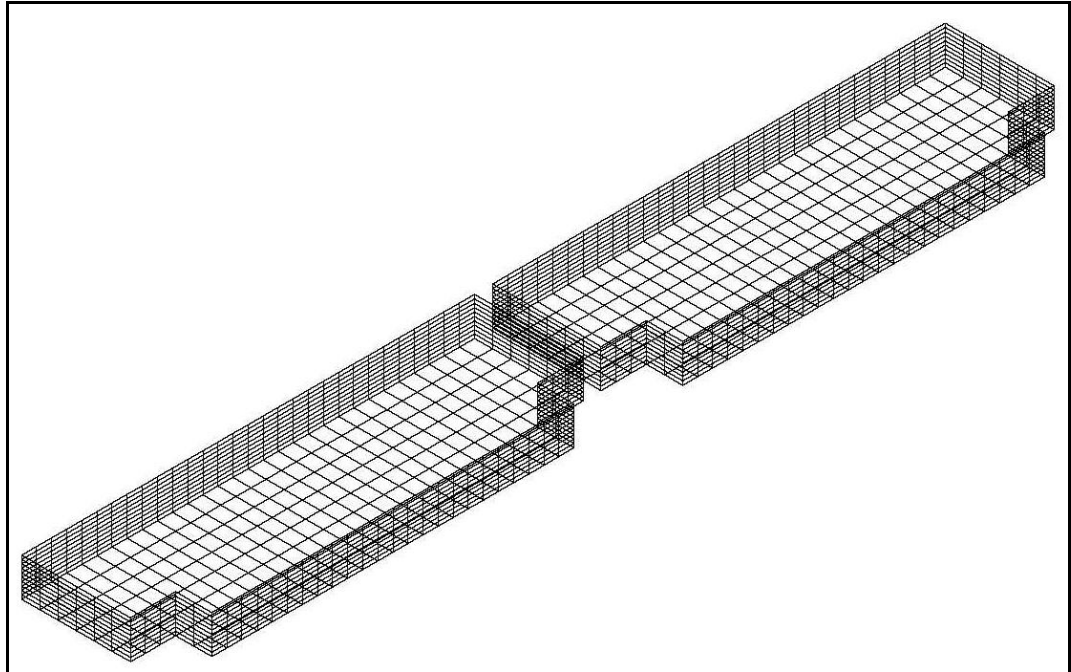


Figure 4.4 : Maillage de la panne de pontons en béton

#### 4.7. Choix des paramètres (profondeurs, périodes, incidences)

La profondeur moyenne des zones d'implantation des pontons est de l'ordre de 3.5 m CM. C'est elle qui a été retenue pour le calcul des profondeurs d'eau avec les niveaux d'eau définis au paragraphe 3.4.3.

Les périodes de calcul ont été choisies pour permettre d'obtenir une densité suffisante de points dans le spectre de houle (ondes courtes des clapots) et de suivre les particularités des termes hydrodynamiques pour des périodes inférieures à 6 s. Elles sont en secondes : 0., de 1.5, à 5.0 par pas de 0.25 s, de 5 à 10 par pas de 0.5 s.

Les incidences (angle  $\beta$  entre l'axe  $Ox$  et la direction de propagation de l'onde) retenues correspondent à un balayage du secteur d'incidence de l'apponement de (0 à 180°) avec un pas de 5°.

#### 4.8. Rappels hydrostatiques

Les efforts de rappel hydrostatique s'écrivent, au premier ordre, sous la forme :

$$[F] = -[H][\eta] \quad (4.4)$$

La matrice  $[H]$  s'exprime à partir du volume immergé  $W$ , de la surface de flottaison  $S_F$ , de la masse volumique  $\rho$  et de l'accélération de la gravité  $g$  :

$$[H] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho g S_F & \rho g \iint_{S_F} y dS & -\rho g \iint_{S_F} x dS & 0 \\ 0 & 0 & \rho g \iint_{S_F} y dS & \rho g \left[ \overline{W G Q_0} + \iint_{S_F} y^2 dS \right] & -\rho g \iint_{S_F} x y dS & 0 \\ 0 & 0 & -\rho g \iint_{S_F} x dS & -\rho g \iint_{S_F} x y dS & \rho g \left[ \overline{W G Q_0} + \iint_{S_F} x^2 dS \right] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

#### 4.9. Amortissements complémentaires

Les amortissements accessibles par la théorie du potentiel ne concernent que l'énergie qui est transmise au fluide sous forme ondulatoire et qui est ainsi emportée à l'infini (ou sur la côte) : c'est l'amortissement d'onde de gravité.

Dans la réalité, il existe trois autres sources d'amortissements :

- l'amortissement visqueux engendré par la consommation d'énergie sous forme de frottement fluide et donc de chaleur,
- l'amortissement tourbillonnaire dû à la création des tourbillons et des turbulences qui finissent par dégrader l'énergie en chaleur,
- les amortissements mécaniques structurels des ancrages (frottement et déformation des défenses).

Dans le cas général, les termes négligés sont très inférieurs aux termes d'amortissement d'onde de gravité. Toutefois, ce constat est tenu en échec dans le cas des grandes amplitudes du roulis (voire du tangage) des structures, et donc en particulier au voisinage de la période propre de roulis ou des modes couplés au roulis.

Ce phénomène est aggravé par le fait que l'amortissement d'onde de gravité en roulis passe par un minimum pour un rapport entre la largeur et le tirant d'eau de l'ordre de 3.4 à 4.0 et que ce rapport est ici égal à 3.8 pour le ponton béton et de 13.3 pour le ponton acier.

Ainsi, en absence d'amortissement visqueux, à la résonance les fonctions de transfert de roulis des pontons atteignent 120% m à 130% m pour les différents pontons. Il est donc fondamental de tenir compte des effets visqueux et tourbillonnaires en ajoutant des termes d'efforts d'amortissement complémentaires et de ramener ainsi les amplitudes de la fonction de transfert du roulis à des valeurs raisonnables.

A défaut de données expérimentales spécifiques, l'ordre de grandeur du moment d'amortissement est estimé à partir d'une formulation du type Morison, sous la forme suivante :

$$M_4 = -\frac{1}{2}\rho C_d \left( 2 \iint_S V_\theta |V_\theta| r dS \right) = -\frac{1}{2}\rho C_d L \dot{\eta}_4 |\dot{\eta}_4| 2 \int_0^R |r| r^2 dr = -\frac{1}{2}\rho C_d L \dot{\eta}_4 |\dot{\eta}_4| \frac{R^4}{2} \quad (4.6)$$

Expression dans laquelle :

- le coefficient  $C_d$  dépend de la forme du bouchain. Pour un angle droit, il est indépendant du nombre de Keulegan et Carpenter  $K_c$  et vaut de l'ordre de 3.2 [G1].
- $R$  est la distance du centre de gravité au bouchain de la carène qui s'exprime approximativement sous la forme :

$$R \approx \sqrt{\left(\frac{B}{2}\right)^2 + D^2} = \frac{B}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{2D}{B}\right)^2} \quad (4.7)$$

En introduisant cette relation dans (4.6), nous obtenons :

$$M_4 = -\frac{1}{2}\rho \left[ C_d \frac{1}{32} \left( 1 + \left(\frac{2D}{B}\right)^2 \right)^2 \right] LB^4 \dot{\eta}_4 |\dot{\eta}_4| = -\frac{1}{2}\rho C'_d LB^4 \dot{\eta}_4 |\dot{\eta}_4| \quad (4.8)$$

Avec :

$$C'_d = C_d \frac{1}{32} \left( 1 + \left(\frac{2D}{B}\right)^2 \right)^2 \approx 0.1 \left( 1 + \left(\frac{2D}{B}\right)^2 \right)^2 \quad (4.9)$$

Pour un rapport  $B/D$  compris entre 3.4 et 4.0, nous obtenons un coefficient  $C'_d$  compris entre 0.18 et 0.16. Nous retrouvons alors la formulation utilisée en offshore pour les barges de rapport  $B/D$  de 5 à 10 avec  $C'_d$  de l'ordre de 0.1 à 0.2 [G1].

En appliquant la linéarisation de Lorentz, qui conserve la moyenne temporelle du travail de l'effort d'amortissement il vient :

$$M_4 = -\frac{1}{2}\rho C'_d LB^4 \frac{8}{3\pi} |\dot{\eta}_{4\max}| \dot{\eta}_4 = -\frac{1}{2}\rho C'_d LB^4 \frac{8\omega}{3\pi} |\eta_{4\max}| \dot{\eta}_4 = -\rho C'_d LB^4 \frac{8}{3T} |\eta_{4\max}| \dot{\eta}_4 \quad (4.10)$$

Naturellement le processus est itératif pour trouver une valeur du mouvement maximum  $\eta_{4\max}$  qui corresponde à l'amortissement considéré.

A noter que ces valeurs, nettement plus élevées que l'amortissement d'onde de gravité ( $\sim 10^3$ ), conduisent à ramener les fonctions de transfert des pontons à des valeurs qui sont de 25% à 35% pour les différents pontons ; ce qui est plus réaliste, sans pour autant être optimiste.

Lorsque les amortissements des autres degrés de liberté le nécessitent, un raisonnement analogue à celui qui vient d'être tenu pour le roulis peut également être appliqué.

Le tableau 4.1 rassemble les formulations empiriques ainsi obtenues et les ordres de grandeur des amortissements pour des pontons de section

rectangulaire à bouchains vifs. L'utilisation de cette formulation conduit à des calculs itératifs des fonctions de transfert.

Mouvement	Amortissement	Coefficient $C_d$
Cavalement	$\frac{1}{2} \rho C_d B D \frac{8}{3T}  \eta_{1\max} $	0.6
Embardée	$\frac{1}{2} \rho C_d L D \frac{8}{3T}  \eta_{2\max} $	2.0
Pilonnement	$\frac{1}{2} \rho C_d L B \frac{8}{3T}  \eta_{3\max} $	2.4
Roulis	$\frac{1}{2} \rho C_d L \left( \sqrt{\left(\frac{B}{2}\right)^2 + D^2} \right)^4 \frac{8}{3T}  \eta_{4\max} $	3.2
Tangage	$\frac{1}{2} \rho C_d B \left( \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + D^2} \right)^4 \frac{8}{3T}  \eta_{5\max} $	2.0
Lacet	$\frac{1}{2} \rho C_d D \left( \sqrt{\left(\frac{B}{2}\right)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} \right)^4 \frac{8}{3T}  \eta_{6\max} $	2.0

Tableau 4.1 : Amortissements complémentaires pour les pontons.

#### 4.10. Modélisation des ancrages et liaisons

Les mouvements des pontons sur la houle étant de faibles amplitudes, les réactions des ancrages sur pieux et des liaisons entre les pontons peuvent être linéarisées autour de leur position moyenne.

Le ponton  $p$  subit de la part de la liaison pieu–collier  $l$  à laquelle il est attaché, un torseur d'efforts de rappel élastique réduit en son centre de gravité qui est donc modélisé à partir de la matrice raideur équivalente  $[K_p^{(l)}]$  du pieu lié au ponton  $p$  et du mouvement du ponton  $p$  autour de sa position moyenne :

$$[F_p^{(l)}] = -[K_p^{(l)}][\eta_p] \quad (4.11)$$

Cette matrice s'exprime à partir des raideurs unitaires du pieu  $l$  :

- raideur longitudinale :  $K_x^{(l)}$
- raideur transversale :  $K_y^{(l)}$

et des coordonnées  $(\Delta x_{pl}, \Delta y_{pl}, \Delta z_{pl})$  du vecteur  $G_p P_l$ , qui relie le centre de gravité du ponton au point de contact avec le pieu, supposé sur l'axe du pieu, sous la forme suivante :

$$[K_p^{(l)}] = \begin{bmatrix} +K_x^{(l)} & 0 & 0 & 0 & +K_x^{(l)}\Delta z_{pl} & -K_x^{(l)}\Delta y_{pl} \\ 0 & +K_y^{(l)} & 0 & -K_y^{(l)}\Delta z_{pl} & 0 & +K_y^{(l)}\Delta x_{pl} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_y^{(l)}\Delta z_{pl} & 0 & +K_y^{(l)}\Delta z_{pl}^2 & 0 & -K_y^{(l)}\Delta x_{pl}\Delta z_{pl} \\ +K_x^{(l)}\Delta z_{pl} & 0 & 0 & 0 & +K_x^{(l)}\Delta z_{pl}^2 & -K_x^{(l)}\Delta y_{pl}\Delta z_{pl} \\ -K_x^{(l)}\Delta y_{pl} & +K_y^{(l)}\Delta x_{pl} & 0 & -K_y^{(l)}\Delta x_{pl}\Delta z_{pl} & -K_x^{(l)}\Delta y_{pl}\Delta z_{pl} & +K_x^{(l)}\Delta y_{pl}^2 + K_y^{(l)}\Delta x_{pl}^2 \end{bmatrix}$$

(4.12)

Chacun des pontons  $p$  et  $q$  subit de la part de la liaison  $l$ , qui les relie entre eux, un torseur d'efforts de rappel élastique réduit en son centre de gravité qui est donc modélisé à partir de la matrice raideur équivalente  $[K^{(lpq)}]$  de la liaison entre les pontons  $p$  et  $q$  et des mouvements des pontons  $p$  et  $q$  autour de leurs positions moyennes respectives :

$$\begin{bmatrix} F_p^{(l)} \\ F_q^{(l)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{pp}^{(l)} & K_{pq}^{(l)} \\ K_{qp}^{(l)} & K_{qq}^{(l)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_p \\ \eta_q \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Cette matrice  $[K]$  s'exprime à partir des raideurs unitaires des liaisons :

- raideur de translation longitudinale :  $K_x^{(l)}$
- raideur de translation transversale :  $K_y^{(l)}$
- raideur de translation verticale :  $K_z^{(l)}$
- raideur de rotation longitudinale :  $K_x'^{(l)}$
- raideur de rotation transversale :  $K_y'^{(l)}$
- raideur de rotation verticale :  $K_z'^{(l)}$

et des coordonnées  $(\Delta x_{pl}, \Delta y_{pl}, \Delta z_{pl})$  et  $(\Delta x_{ql}, \Delta y_{ql}, \Delta z_{ql})$  des vecteurs  $G_p P_l$  et  $G_q P_l$  qui relie le centre de gravité de chacun des pontons au point de liaison par les formules (4.14).

$$[K_{pp}^{(l)}] = \begin{bmatrix} K_x^{(l)} & 0 & 0 & 0 & K_x^{(l)} \Delta z_{pl} & -K_x^{(l)} \Delta y_{pl} \\ 0 & K_y^{(l)} & 0 & -K_y^{(l)} \Delta z_{pl} & 0 & K_y^{(l)} \Delta x_{pl} \\ 0 & 0 & K_z^{(l)} & K_z^{(l)} \Delta y_{pl} & -K_z^{(l)} \Delta x_{pl} & 0 \\ 0 & -K_y^{(l)} \Delta z_{pl} & K_z^{(l)} \Delta y_{pl} & K_x'^{(l)} + K_y^{(l)} \Delta z_{pl}^2 + K_z^{(l)} \Delta y_{pl}^2 & -K_z^{(l)} \Delta x_{pl} \Delta y_{pl} & -K_y^{(l)} \Delta x_{pl} \Delta z_{pl} \\ K_x^{(l)} \Delta z_{pl} & 0 & -K_z^{(l)} \Delta x_{pl} & -K_z^{(l)} \Delta x_{pl} \Delta y_{pl} & K_y'^{(l)} + K_x^{(l)} \Delta z_{pl}^2 + K_z^{(l)} \Delta x_{pl}^2 & -K_x^{(l)} \Delta y_{pl} \Delta z_{pl} \\ -K_x^{(l)} \Delta y_{pl} & +K_y^{(l)} \Delta x_{pl} & 0 & -K_y^{(l)} \Delta x_{pl} \Delta z_{pl} & -K_x^{(l)} \Delta y_{pl} \Delta z_{pl} & K_z'^{(l)} + K_x^{(l)} \Delta y_{pl}^2 + K_y^{(l)} \Delta x_{pl}^2 \end{bmatrix} \quad (4.14.1)$$

$$[K_{qq}^{(l)}] = \begin{bmatrix} K_x^{(l)} & 0 & 0 & 0 & K_x^{(l)} \Delta z_{ql} & -K_x^{(l)} \Delta y_{ql} \\ 0 & K_y^{(l)} & 0 & -K_y^{(l)} \Delta z_{ql} & 0 & K_y^{(l)} \Delta x_{ql} \\ 0 & 0 & K_z^{(l)} & K_z^{(l)} \Delta y_{ql} & -K_z^{(l)} \Delta x_{ql} & 0 \\ 0 & -K_y^{(l)} \Delta z_{ql} & K_z^{(l)} \Delta y_{ql} & K_x'^{(l)} + K_y^{(l)} \Delta z_{ql}^2 + K_z^{(l)} \Delta y_{ql}^2 & -K_z^{(l)} \Delta x_{ql} \Delta y_{ql} & -K_y^{(l)} \Delta x_{ql} \Delta z_{ql} \\ K_x^{(l)} \Delta z_{ql} & 0 & -K_z^{(l)} \Delta x_{ql} & -K_z^{(l)} \Delta x_{ql} \Delta y_{ql} & K_y'^{(l)} + K_x^{(l)} \Delta z_{ql}^2 + K_z^{(l)} \Delta x_{ql}^2 & -K_x^{(l)} \Delta y_{ql} \Delta z_{ql} \\ -K_x^{(l)} \Delta y_{ql} & +K_y^{(l)} \Delta x_{ql} & 0 & -K_y^{(l)} \Delta x_{ql} \Delta z_{ql} & -K_x^{(l)} \Delta y_{ql} \Delta z_{ql} & K_z'^{(l)} + K_x^{(l)} \Delta y_{ql}^2 + K_y^{(l)} \Delta x_{ql}^2 \end{bmatrix}$$



(4.14.2)

$$\begin{bmatrix}
 [K_{pq}^{(i)}] = & & & & & & \\
 -K_x^{(i)} & 0 & 0 & 0 & -K_x^{(i)}\Delta z_{ql} & K_x^{(i)}\Delta y_{ql} & \\
 0 & -K_y^{(i)} & 0 & K_y^{(i)}\Delta z_{ql} & 0 & -K_y^{(i)}\Delta x_{ql} & \\
 0 & 0 & -K_z^{(i)} & -K_z^{(i)}\Delta y_{ql} & K_z^{(i)}\Delta x_{ql} & 0 & \\
 0 & K_y^{(i)}\Delta z_{pl} & -K_z^{(i)}\Delta y_{pl} & -K_x^{(i)} - K_y^{(i)}\Delta z_{ql}\Delta z_{pl} & K_z^{(i)}\Delta x_{ql}\Delta y_{pl} & K_y^{(i)}\Delta x_{ql}\Delta z_{pl} & \\
 -K_x^{(i)}\Delta z_{pl} & 0 & K_z^{(i)}\Delta x_{pl} & K_z^{(i)}\Delta x_{pl}\Delta y_{ql} & -K_y^{(i)} - K_x^{(i)}\Delta z_{ql}\Delta z_{pl} & K_x^{(i)}\Delta y_{ql}\Delta z_{pl} & \\
 K_x^{(i)}\Delta y_{pl} & -K_y^{(i)}\Delta x_{pl} & 0 & K_y^{(i)}\Delta x_{pl}\Delta z_{ql} & -K_x^{(i)}\Delta y_{pl}\Delta z_{ql} & -K_z^{(i)} - K_x^{(i)}\Delta y_{ql}\Delta y_{pl} & \\
 & & & & & -K_y^{(i)}\Delta x_{ql}\Delta x_{pl} & 
 \end{bmatrix}$$

(4.14.3)

Et, comme la matrice globale est symétrique :

$$[K_{pq}^{(i)}] = [K_{qp}^{(i)}]^t \quad (4.14.4)$$

Ces matrices élémentaires sont ensuite assemblées pour former la matrice raideur de l'ensemble de la panne liée à ses pieux.

Une fois obtenus les mouvements de plateforme, les déplacements aux droites des différentes liaisons puis les efforts de réactions des liaisons peuvent être calculés simplement.

#### 4.11. Modes propres

Pour des pontons sans liaisons ni ancrages, les seuls couplages entre eux sont d'origine hydrodynamique : masses d'eau ajoutées et amortissements d'onde de gravité. Seule les premières influencent réellement les périodes et vecteurs propres, les secondes n'influencent que l'amplitude de la réponse aux voisinages des modes propres.

En absence de raideur de liaison dans le plan horizontal, le cavalement, l'embarquée et le lacet de chaque ponton présentent des périodes propres infinies. L'introduction des liaisons entre les pontons de la panne couple essentiellement les composantes horizontales des déplacements qui résultent des mouvements de cavalement, d'embarquée, de roulis et de lacet. Elle se traduit par des relations entre les déplacements de cavalement, d'embarquée et de lacet respectifs des pontons ; et donc par la suppression de trois modes infinis par liaison à trois degrés de liberté entre pontons. Il ne reste donc que trois périodes propres infinies correspondant aux déplacements horizontaux de l'ensemble de la panne. L'introduction de l'ensemble des amarres et ancrages supprime tous les modes libres et toutes les périodes propres sont finies.

Dans un premier temps, il est intéressant de déterminer les périodes propres uniquement avec les termes diagonaux des matrices. Cela per-

met d'observer l'importance des couplages et des glissements de périodes propres et leurs dédoublements dus aux mouvements multiples. Les modes propres étant supposés découplés, les vecteurs propres correspondent, selon chacun des modes résonants, à des mouvements canoniques dans le repère  $G_{xyz}$ .

Le calcul des modes propres, à partir des matrices complètes tenant compte des couplages de toutes natures (hydrostatiques, hydrodynamiques, inertielles, raideurs) est ensuite réalisé au moyen de l'algorithme du QZ qui permet d'obtenir les modes propres d'un système libre ou entravé pouvant posséder des valeurs propres nulles ou infinies. Les vecteurs propres sont calculés ensuite par l'algorithme du QU de Householder. Ils permettent d'associer les mouvements propres des pontons aux périodes précédemment calculées. La valeur unitaire est automatiquement attribuée au degré de liberté le plus singulier (la plus petite norme).

#### **4.12. Fonctions de transfert**

Les fonctions de transfert sont calculées à partir d'un ensemble de points de calculs hydrodynamiques (périodes et incidences calculées).

Les fonctions de transfert sont obtenues pour une amplitude unitaire de la houle incidente (deux mètres crête à creux).

Ce sont ces fonctions de transfert qui permettent d'obtenir, ensuite, les résultats correspondant aux divers spectres de houle incidente.

##### **4.12.1. Mouvements sur houle**

Les mouvements de plateforme des pontons (six degrés de liberté par ponton de la panne) sont calculés en résolvant l'équation de Newton pour une houle d'amplitude unitaire (deux mètres crête à creux), pour chaque période et chaque incidence.

##### **4.12.2. Efforts de liaison alternatifs**

Une houle sinusoïdale engendre un torseur d'efforts de liaison alternatifs avec les systèmes d'ancrage dont le premier ordre est sinusoïdal à la même période.

Ces efforts sont proportionnels à la hauteur de la houle (aux non linéarités d'ancrage ou d'amortissement près) et dépendent naturellement de la période et de l'incidence de la houle. Ils sont calculables à partir de la solution du problème de diffraction-radiation au premier ordre.

La décomposition des efforts de liaison sur les liaisons et ancrages est obtenue en écrivant que ces efforts sont le produit du déplacement au niveau de chaque liaison élastique par la raideur de la liaison considérée.

#### 4.12.3. Efforts de liaison de dérive

En plus des efforts alternatifs, une houle sinusoïdale engendre un torseur d'efforts indépendant du temps.

Ces efforts de dérive sur houle sont proportionnels au carré de la hauteur de la houle et dépendent naturellement de la période et de l'incidence de la houle. Ces efforts s'ajoutent à ceux engendrés par le vent et par le courant. Ils sont également calculables à partir de la solution du problème de diffraction-radiation au premier ordre.

La décomposition des efforts de dérive sur les lignes d'ancrage est obtenue en écrivant que ces efforts sont repris par la somme des raideurs des liaisons et des raideurs hydrostatiques des pontons.

#### 4.12.4. Efforts dans les sections des pontons

Une houle sinusoïdale engendre un torseur d'efforts alternatifs dans les sections des pontons dont le premier ordre est sinusoïdal à la même période.

Ces efforts sont proportionnels à la hauteur de la houle et dépendent naturellement de la période de la houle incidente. Ils sont calculables à partir de la solution du problème de diffraction-radiation au premier ordre.

Les torseurs d'efforts sont calculés dans la section centrale de chacun des pontons de la panne. Ils sont obtenus en écrivant l'équilibre dynamique entre les deux moitiés de chaque ponton. Ils sont réduits le long d'une ligne arbitraire, qui n'est pas nécessairement la fibre neutre, à définir par le bureau d'étude des structures.

Ces efforts correspondent aux concepts habituels en résistance des matériaux (RdM) relatifs à la poutre ponton :

- $F_x$  : Traction compression,
- $F_y$  : Effort tranchant horizontal,
- $F_z$  : Effort tranchant vertical,
- $M_x$  : Moment de torsion,
- $M_y$  : Moment de flexion horizontal,
- $M_z$  : Moment de flexion vertical.

#### 4.13. Réponses spectrales

Une fois déterminées les fonctions de transfert, les différents états de mer sont modélisés par des spectres multidirectionnels dépendant de la pulsation  $\omega$  et de l'écart angulaire  $\vartheta$  par rapport à la direction de propagation principale  $\beta$ .

$$\Phi_{\eta\eta}(\omega, \vartheta) = \phi_{\eta\eta}(\omega)M(\vartheta) \quad (4.15)$$

Où  $\phi_{\eta\eta}(\omega)$  représente le spectre de houle monodirectionnelle JONSWAP défini en termes de hauteur significative  $H_s$  et de période de pic du spectre  $T_p$ , de facteur de forme  $\gamma$  par :

$$\phi_{\eta\eta}(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(-\frac{5}{4} \frac{\omega_p^4}{\omega^4}\right) \exp\left(-\frac{(\omega-\omega_p)^2}{2\sigma^2\omega_p^2}\right) \quad (4.16)$$

et  $M(\vartheta)$  la fonction de directivité de la houle de Borgman définie par :

$$M(\vartheta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma(s+1)}{\Gamma(s+1/2)} \cos^{2s}(\beta - \vartheta) \text{ pour } |\beta - \vartheta| < \frac{\pi}{2} \quad (4.17)$$

$$M(\vartheta) = 0 \quad \text{pour } |\beta - \vartheta| > \frac{\pi}{2}$$

Dans le cas présent, le paramètre de forme  $\gamma$  est égal à 1.0 et le paramètre d'ouverture  $s$  est égal à 10 (valeur généralement admis et recommandé pour les mers du vent).

Le paramètre  $A$  est initialisé à la valeur habituelle du spectre de Bretschneider (4.18) puis corrigé par itérations jusqu'à ce que le moment d'ordre zéro  $m_0$  du spectre soit égal à  $H_s^2/16$ .

$$A = \frac{5\pi^4 H_s^2}{T_p^4} = \frac{487.05 H_s^2}{T_p^4} \quad (4.18)$$

Les valeurs maximales, crête à creux, peuvent être extrapolées sur une durée donnée au moyen de la loi de Rayleigh. Statistiquement, pendant une durée correspondant à une tempête de 3 h, les valeurs maximales ne dépasseront pas les valeurs significatives multipliées par un coefficient de l'ordre de 2.0, un peu moins (1.7 à 1.8) lorsqu'il y a une saturation par le déferlement. Dans le cas présent nous retiendrons la valeur de 2.

#### 4.13.1. Mouvements sur houle

Les hauteurs significatives et les périodes de pic sont données en terme de valeurs significatives crête à creux ( $4\sqrt{m_0}$ ).

#### 4.13.2. Efforts de liaison

Les résultats sont donnés en terme de modules significatifs (demi crête à creux ( $2\sqrt{m_0}$ )).

#### 4.13.3. Efforts de liaison de dérive

Les résultats sont des efforts moyens dans le temps. Ils sont proportionnels au carré de l'amplitude de la houle.

#### 4.13.4. Efforts dans les sections des pontons

Les résultats sont donnés en terme de modules significatifs (demi crête à creux ( $2\sqrt{m_0}$ )).

## 5. Appontement en béton

### 5.1. Modes propres

Les périodes propres des pontons sont rassemblées dans le tableau 5.1 en fonction du niveau d'eau. Les lignes « système découplé » indiquent les périodes propres calculées avec le système diagonal et les mouvements correspondants (Cavalement, Embardée, Pilonnement, Roulis, Tangage et Lacet). Les lignes « système couplé » indiquent les périodes propres et les vecteurs propres calculés avec le système complet ; ce sont les vraies périodes propres du système.

Marée haute + 7.50 m CM												
Système découplé												
T (s)	1.219	1.271	1.853	1.884	1.922	1.955	3.927	4.049	4.277	4.295	4.461	4.480
Modes	L 1	L 2	C 1	E1	C 2	E 2	R 1	R 2	T 1	T 2	P 2	P 1
Système couplé												
T (s)	1.190	1.239	1.793	1.876	1.928	2.015	4.315	4.355	4.397	4.486	5.512	5.692
C 1	<b>1.000</b>		<b>1.000</b>	0.052	<b>1.000</b>	0.174	0.186	-0.075	-0.251	0.350		<b>1.000</b>
E 1												
P 1							<b>1.000</b>	<b>1.000</b>	0.896	<b>1.000</b>		
R 1			-0.111									0.803
T 1							-0.153	0.058	0.201	-0.289		
L 1	-0.462											
C 2	0.079	<b>1.000</b>		-0.282	-0.164	<b>1.000</b>	-0.162	-0.078	0.215	0.383		
E 2		0.317		<b>1.000</b>		0.188					<b>1.000</b>	
P 2							0.997	-0.989	<b>1.000</b>	-0.960	0.052	
R 2				-0.108							0.841	
T 2							0.140	0.060	-0.180	-0.317		
L 2		-0.469										

Tableau 5.1.1 : Modes propres des pontons à marée haute.

Mi marée +3.50 m CM												
Système découplé												
T (s)	0.799	0.829	1.212	1.257	1.257	1.302	3.113	3.219	4.158	4.184	4.411	4.382
Modes	L 1	L 2	C 1	C 2	E 1	E 2	R 1	R 2	T 1	T 2	P 2	P 1
Système couplé												
T (s)	0.779	0.807	1.198	1.252	1.281	1.334	4.325	4.404	4.425	4.563	5.497	5.637
C 1	<b>1.000</b>		<b>1.000</b>		<b>1.000</b>		0.323	0.057	-0.122	0.371		<b>1.000</b>
E 1												
P 1							<b>1.000</b>	-0.958	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>		0.058
R 1			-0.105									0.911
T 1							-0.293	-0.051	0.109	-0.341		
L 1	-0.449											
C 2	0.074	<b>1.000</b>		-0.287		<b>1.000</b>	-0.308	0.061	0.113	0.385		
E 2		0.254		<b>1.000</b>		0.240					<b>1.000</b>	
P 2							0.960	<b>1.000</b>	0.983	-0.991	0.068	
R 2				-0.097							0.928	
T 2							0.284	-0.055	-0.103	-0.354		
L 2		-0.453										

Tableau 5.1.2 : Modes propres des pontons à mi-marée.

Marée basse : -0.50 m CM												
Système découplé												
T (s)	0.452	0.474	0.683	0.716	0.721	0.756	2.180	2.316	4.902	4.909	6.162	6.171
Modes	L 1	L 2	C 1	C 2	E 1	E 2	R 1	R 2	T 1	T 2	P 2	P 1
Système couplé												
T (s)	0.440	0.461	0.697	0.725	0.734	0.771	5.487	5.890	5.948	5.982	6.238	6.331
C 1	<b>1.000</b>			<b>1.000</b>	0.216	-0.085	1.396			-0.296	-0.065	0.102
E 1			<b>1.000</b>				0.293	-0.318	<b>1.000</b>	0.630	0.179	0.140
P 1							<b>1.000</b>	0.239	-0.750	<b>1.000</b>	0.884	<b>1.000</b>
R 1			-0.079				0.282	-0.308	0.969	0.611	0.173	0.136
T 1							-1.365			0.289	0.064	-0.100
L 1	-0.432											
C 2	0.058	<b>1.000</b>		0.173	-0.613	<b>1.000</b>	-1.334			-0.302	0.060	0.107
E 2		0.299		-0.127	<b>1.000</b>	0.543	0.461	<b>1.000</b>	0.370	-0.383	0.187	-0.133
P 2							0.915	-0.641	-0.128	-1.098	<b>1.000</b>	-0.982
R 2					-0.067		0.445	0.971	0.359	-0.373	0.182	-0.130
T 2							1.310			0.294	-0.060	-0.106
L 2		-0.437										

**Tableau 5.1.3** : Modes propres des pontons à marée basse.

Les six premières périodes propres sont inférieures à 2.0 s. Elles sont gouvernées par les raideurs d'ancrage, si bien que leurs valeurs augmentent avec la profondeur lorsque la raideur des pieux diminue.

Les six autres périodes sont supérieures à 4.3 s. Elles sont gouvernées par les raideurs hydrostatiques, c'est-à-dire par les caractéristiques géométriques des pontons. L'accroissement du tirant d'eau est le principal paramètre qui permettrait d'augmenter ces périodes. Elles augmentent lorsque la profondeur diminue, sous l'effet du rapprochement du fond qui augmente les masses d'eau ajoutées.

## 5.2. Mouvements de plateforme

Les hauteurs significatives et les périodes significatives sont données dans les tableaux 5.2. Les résultats sont donnés en terme de valeurs significatives crête à creux ( $4\sqrt{m_0}$ ). Elles correspondent à la valeur maximale de chaque état de mer, toutes incidences confondues ; les valeurs d'une même ligne ne sont donc pas nécessairement concomitantes pour une même incidence.

Les valeurs maximales crêtes à creux sur houle peuvent être extrapolées sur une durée donnée au moyen de la loi de Rayleigh. Statistiquement, pendant une durée correspondant à une tempête de 3 heures, les valeurs maximales ne dépasseront pas les valeurs significatives multipliées par un coefficient égal à 2.0.

Lorsque le niveau descend, la raideur des pieux augmente et les déplacements horizontaux tendent à diminuer (cavalement, embardée et lacet). Toutefois, l'embardée passe par un maximum à mi-marée, sous l'effet du couplage avec le roulis.

Hs (m)	Tp (s)	$\beta$ (°)	Cavalement (m)	Embardée (m)	Pilonnement (m)	Roulis (°)	Tangage (°)	Lacet (°)
Ponton BC1 – Marée haute								
0.30	2.00	0 à 180	0.039	0.045	0.005	0.324	0.033	0.089
0.70	3.00	0 à 180	0.082	0.111	0.152	1.060	1.213	0.223
1.20	4.00	0 à 30	0.175	0.057	0.334	1.771	6.364	0.266
1.60	4.30	0 à 30	0.243	0.090	0.554	3.262	9.748	0.352
1.65	4.30	0 à 30	0.251	0.092	0.571	3.364	10.053	0.363
1.20	4.20	150 à 180	0.131	0.074	0.371	2.161	6.028	0.313
1.50	4.50	150 à 180	0.172	0.107	0.564	3.622	8.569	0.399
1.60	4.60	150 à 180	0.185	0.119	0.635	4.182	9.438	0.426
Dép. significatif enveloppe			0.251	0.119	0.635	4.182	10.053	0.426
Dép. maximal enveloppe			0.502	0.238	1.270	8.364	20.106	0.852
Ponton BC2 – Marée haute								
0.30	2.00	0 à 180	0.061	0.044	0.005	0.306	0.044	0.131
0.70	3.00	0 à 180	0.117	0.124	0.152	1.079	1.184	0.281
1.20	4.00	0 à 30	0.130	0.076	0.322	1.923	5.344	0.370
1.60	4.30	0 à 30	0.183	0.118	0.540	3.584	8.478	0.508
1.65	4.30	0 à 30	0.189	0.122	0.557	3.696	8.743	0.524
1.20	4.20	150 à 180	0.196	0.073	0.389	2.455	6.757	0.323
1.50	4.50	150 à 180	0.244	0.102	0.582	3.871	9.416	0.393
1.60	4.60	150 à 180	0.259	0.112	0.653	4.388	10.317	0.415
Dép. significatif enveloppe			0.259	0.124	0.653	4.388	10.317	0.524
Dép. maximal enveloppe			0.518	0.248	1.306	8.776	20.634	1.048

Tableau 5.2.1 : Enveloppes des mouvements des pontons à marée haute

Hs (m)	Tp (s)	$\beta$ (°)	Cavalement (m)	Embardée (m)	Pilonnement (m)	Roulis (°)	Tangage (°)	Lacet (°)
Ponton BC1 – Mi-marée								
0.30	2.00	0 à 180	0.005	0.008	0.005	0.096	0.029	0.020
0.70	3.00	0 à 180	0.029	0.033	0.157	0.396	1.253	0.067
1.20	4.00	0 à 30	0.124	0.044	0.304	2.088	6.408	0.089
1.60	4.30	0 à 30	0.188	0.078	0.508	3.930	9.842	0.124
1.65	4.30	0 à 30	0.194	0.081	0.524	4.052	10.149	0.128
1.20	4.20	150 à 180	0.112	0.059	0.343	2.787	6.018	0.116
1.50	4.50	150 à 180	0.158	0.094	0.522	4.667	8.673	0.151
1.60	4.60	150 à 180	0.173	0.107	0.589	5.385	9.597	0.163
Dép. significatif enveloppe			0.194	0.107	0.589	5.385	10.149	0.163
Dép. maximal enveloppe			0.388	0.214	1.178	10.77	20.298	0.326
Ponton BC2 – Mi-marée								
0.30	2.00	0 à 180	0.006	0.010	0.005	0.103	0.029	0.024
0.70	3.00	0 à 180	0.029	0.038	0.156	0.440	1.223	0.074
1.20	4.00	0 à 30	0.100	0.051	0.296	2.394	5.258	0.126
1.60	4.30	0 à 30	0.156	0.089	0.499	4.447	8.455	0.177
1.65	4.30	0 à 30	0.161	0.092	0.514	4.586	8.719	0.183
1.20	4.20	150 à 180	0.132	0.056	0.357	2.822	6.786	0.101
1.50	4.50	150 à 180	0.181	0.086	0.538	4.566	9.503	0.132
1.60	4.60	150 à 180	0.197	0.097	0.605	5.217	10.440	0.142
Dép. significatif enveloppe			0.197	0.097	0.605	5.217	10.440	0.183
Dép. maximal enveloppe			0.394	0.194	1.210	10.434	20.88	0.366

Tableau 5.2.2 : Enveloppes des mouvements des pontons à mi-marée



Hs (m)	Tp (s)	$\beta$ (°)	Cavalement (m)	Embardée (m)	Pilonnement (m)	Roulis (°)	Tangage (°)	Lacet (°)
Ponton BC1 – Marée basse								
0.30	2.00	0 à 180	0.001	0.002	0.005	0.029	0.030	0.005
0.70	3.00	0 à 180	0.014	0.024	0.090	0.865	0.704	0.020
1.20	4.00	0 à 30	0.066	0.040	0.126	2.187	3.556	0.028
1.60	4.30	0 à 30	0.117	0.074	0.235	4.075	6.406	0.039
1.65	4.30	0 à 30	0.121	0.076	0.242	4.202	6.606	0.040
1.20	4.20	150 à 180	0.061	0.052	0.151	2.784	3.440	0.036
1.50	4.50	150 à 180	0.100	0.093	0.261	5.092	5.472	0.049
1.60	4.60	150 à 180	0.116	0.110	0.306	6.036	6.385	0.054
Dép. significatif enveloppe			0.121	0.110	0.306	6.036	6.606	0.054
Dép. maximal enveloppe			0.242	0.22	0.612	12.072	13.212	0.108
Ponton BC2 – Marée basse								
0.30	2.00	0 à 180	0.001	0.003	0.005	0.030	0.030	0.006
0.70	3.00	0 à 180	0.014	0.026	0.090	0.901	0.689	0.022
1.20	4.00	0 à 30	0.050	0.038	0.119	2.034	2.788	0.038
1.60	4.30	0 à 30	0.087	0.077	0.228	4.193	4.774	0.057
1.65	4.30	0 à 30	0.090	0.080	0.236	4.324	4.923	0.058
1.20	4.20	150 à 180	0.078	0.050	0.159	2.767	4.237	0.032
1.50	4.50	150 à 180	0.124	0.082	0.270	4.512	6.811	0.042
1.60	4.60	150 à 180	0.141	0.094	0.315	5.234	7.799	0.046
Dép. significatif enveloppe			0.141	0.094	0.315	5.234	7.799	0.058
Dép. maximal enveloppe			0.282	0.188	0.630	10.468	15.598	0.116

**Tableau 5.2.3** : Enveloppes des mouvements des pontons à marée basse

Le mouvement significatif de roulis peut atteindre  $\pm 3.0^\circ$  avec une valeur maximale à  $\pm 6.0^\circ$ . Il conviendra donc de vérifier que ce mouvement est supportable sans que le ponton vienne en contact avec les pieux.

Le mouvement significatif de tangage peut atteindre  $\pm 5.2^\circ$  avec une valeur maximale à  $\pm 10.4^\circ$ . Il conviendra donc de vérifier que ce mouvement est supportable sans que les pieux ne subissent des efforts de rapprochement insupportables.

### 5.3. Efforts de liaison dans les pieux

Les valeurs significatives des efforts de liaison dans les pieux et les périodes significatives sont données dans les tableaux 5.3. Les résultats sont donnés en terme de module des valeurs significatives ( $2\sqrt{m_0}$ ). Elles correspondent à la valeur maximale de chaque état de mer, toutes incidences confondues ; les valeurs d'une même ligne ne sont donc pas nécessairement concomitantes pour une même incidence.

Les valeurs maximales sur houle peuvent être extrapolées sur une durée donnée au moyen de la loi de Rayleigh. Statistiquement, pendant une durée correspondant à une tempête de 3 heures, les valeurs maximales ne dépasseront pas les valeurs significatives multipliées par un coefficient égal à 2.0 (valeur maximale enveloppe).

Hs	Tp	$\beta$	PX1		PX2		PX3		PX4	
			Fx (kN)	Fy (kN)	Fx (kN)	Fy (kN)	Fx (kN)	Fy (kN)	Fx (kN)	Fy (kN)
(m)	(s)	(°)								
Marée haute										
0.30	2.00	0 à 180	41.3	63.5	41.3	63.6	66.2	56.9	55.2	57.7
0.70	3.00	0 à 180	82.5	162.9	82.5	159.7	122.7	157.2	102.2	169.0
1.20	4.00	0 à 30	118.8	73.4	118.8	109.7	88.4	93.9	73.7	125.7
1.60	4.30	0 à 30	148.9	107.4	148.9	151.7	111.1	134.4	92.6	179.1
1.65	4.30	0 à 30	153.5	110.7	153.5	156.5	114.6	138.6	95.5	184.7
1.20	4.20	150 à 180	71.5	120.0	71.5	102.3	147.0	119.6	122.5	87.9
1.50	4.50	150 à 180	86.9	159.5	86.9	136.2	170.3	154.5	141.9	113.6
1.60	4.60	150 à 180	92.2	172.9	92.2	147.5	177.5	166.4	147.9	122.2
Effort significatif enveloppe			153.5	172.9	153.5	159.7	177.5	166.4	147.9	184.7
Effort maximal enveloppe			307.0	345.8	307.0	319.4	355.0	332.8	295.8	369.4
Effort de dérive enveloppe			21.3	10.3	21.3	11.1	21.5	10.6	17.9	9.7
Batillage										
0.40	2.0	45 à 135	166.3	162.0	166.3	157.8	276.2	178.5	230.1	159.4
0.50	3.0	45 à 135	65.9	146.9	65.9	135.9	81.0	135.7	67.5	156.6
0.60	4.0	45 à 135	58.1	178.1	58.1	174.9	61.6	179.9	51.3	189.1
0.70	5.0	45 à 135	38.7	206.3	38.7	207.4	49.0	211.4	40.8	216.5
0.80	6.0	45 à 135	58.3	180.3	58.3	182.9	68.0	182.7	56.7	184.6
0.80	7.0	45 à 135	60.9	144.0	60.9	146.8	69.2	152.7	57.7	152.4
0.80	8.0	45 à 135	57.5	125.8	57.5	128.6	64.5	132.7	53.8	131.6
0.80	9.0	45 à 135	53.1	111.0	53.1	113.6	59.2	116.5	49.3	115.1
0.80	10.0	45 à 135	49.3	99.8	49.3	102.1	54.6	104.3	45.5	102.8
Effort maximal de batillage			166.3	206.3	166.3	207.4	276.2	211.4	230.1	216.5

**Tableau 5.3.1** : Enveloppes des efforts alternatifs dans les pieux des pontons à marée haute

Hs	Tp	$\beta$	PX1		PX2		PX3		PX4	
			Fx (kN)	Fy (kN)	Fx (kN)	Fy (kN)	Fx (kN)	Fy (kN)	Fx (kN)	Fy (kN)
(m)	(s)	(°)								
Marée haute										
0.30	2.00	0 à 180	13.2	30.4	13.2	30.6	16.4	31.8	14.0	34.5
0.70	3.00	0 à 180	43.7	111.9	43.7	108.7	49.0	109.9	41.9	116.2
1.20	4.00	0 à 30	77.8	64.3	77.8	82.6	55.5	80.8	47.5	94.4
1.60	4.30	0 à 30	100.4	96.8	100.4	118.8	73.7	118.5	63.1	137.2
1.65	4.30	0 à 30	103.6	99.9	103.6	122.5	76.1	122.2	65.0	141.5
1.20	4.20	150 à 180	50.4	98.6	50.4	89.4	82.6	87.7	70.6	68.1
1.50	4.50	150 à 180	63.1	132.9	63.1	121.8	99.5	117.4	85.1	92.5
1.60	4.60	150 à 180	67.6	144.6	67.6	132.8	104.9	127.8	89.7	100.8
Effort significatif enveloppe			103.6	144.6	103.6	132.8	104.9	127.8	89.7	141.5
Effort maximal enveloppe			207.2	289.2	207.2	265.6	209.8	255.6	179.4	283.0
Effort de dérive enveloppe			23.6	11.4	23.6	12.0	23.9	11.3	20.5	10.6
Batillage										
0.40	2.0	45 à 135	28.7	62.5	28.7	65.6	32.6	68.0	27.9	67.0
0.50	3.0	45 à 135	45.8	110.3	45.8	100.7	50.6	101.6	43.3	113.4
0.60	4.0	45 à 135	47.8	154.5	47.8	152.9	46.1	154.1	39.4	157.1
0.70	5.0	45 à 135	27.8	193.0	27.8	193.3	31.8	184.3	27.2	186.1
0.80	6.0	45 à 135	50.2	175.4	50.2	176.2	57.2	170.8	48.9	171.3
0.80	7.0	45 à 135	58.8	147.9	58.8	149.8	65.5	153.9	56.0	153.1
0.80	8.0	45 à 135	60.6	136.2	60.6	138.6	66.8	142.4	57.2	140.7
0.80	9.0	45 à 135	59.0	125.4	59.0	127.9	64.6	130.7	55.3	128.6
0.80	10.0	45 à 135	56.2	115.9	56.2	118.5	61.4	120.7	52.5	118.4
Effort maximal de batillage			60.6	193.0	60.6	193.3	66.8	184.3	57.2	186.1

**Tableau 5.3.2** : Enveloppes des efforts alternatifs dans les pieux des pontons à mi-marée

Hs	Tp	$\beta$	PX1		PX2		PX3		PX4	
			Fx (kN)	Fy (kN)	Fx (kN)	Fy (kN)	Fx (kN)	Fy (kN)	Fx (kN)	Fy (kN)
(m)	(s)	(°)								
Marée haute										
0.30	2.00	0 à 180	8.0	22.8	8.0	22.9	8.9	23.0	7.3	23.3
0.70	3.00	0 à 180	37.0	103.2	37.0	99.9	41.1	100.0	33.5	104.0
1.20	4.00	0 à 30	79.8	48.8	79.8	75.8	62.0	69.3	50.5	81.1
1.60	4.30	0 à 30	105.9	74.6	105.9	107.7	83.6	105.6	68.1	118.7
1.65	4.30	0 à 30	109.2	76.9	109.2	111.1	86.2	108.9	70.2	122.4
1.20	4.20	150 à 180	56.4	86.9	56.4	76.8	88.0	79.2	71.7	52.3
1.50	4.50	150 à 180	70.3	118.9	70.3	109.0	107.8	104.4	87.8	73.1
1.60	4.60	150 à 180	74.7	130.3	74.7	120.8	113.8	113.4	92.7	80.6
Effort significatif enveloppe			109.2	130.3	109.2	120.8	113.8	113.4	92.7	122.4
Effort maximal enveloppe			218.4	260.6	218.4	241.6	227.6	226.8	185.4	244.8
Effort de dérive enveloppe			29.9	16.7	29.9	16.1	32.5	16.4	26.5	15.5
Batillage										
0.40	2.0	45 à 135	20.5	48.5	20.5	50.3	22.9	50.6	18.7	49.7
0.50	3.0	45 à 135	48.1	106.4	48.1	97.4	53.9	97.5	43.9	107.2
0.60	4.0	45 à 135	45.5	157.7	45.5	145.9	47.8	144.1	38.9	156.3
0.70	5.0	45 à 135	44.0	196.2	44.0	196.8	44.5	183.5	36.3	183.2
0.80	6.0	45 à 135	29.4	212.7	29.4	211.3	34.6	190.9	28.2	192.3
0.80	7.0	45 à 135	48.5	192.8	48.5	193.2	55.5	188.9	45.2	186.2
0.80	8.0	45 à 135	66.5	184.6	66.5	188.9	75.9	191.5	61.8	187.5
0.80	9.0	45 à 135	73.3	190.4	73.3	187.6	83.2	190.2	67.8	196.4
0.80	10.0	45 à 135	75.0	192.7	75.0	189.5	84.7	193.1	69.0	198.8
Effort maximal de batillage			75.0	212.7	75.0	211.3	84.7	190.9	69.0	198.8

**Tableau 5.3.3** : Enveloppes des efforts alternatifs dans les pieux des pontons à marée basse

Les efforts de houle dans les pieux atteignent :

- 486 kN à marée haute, pour un maximum admissible de 610 kN.
- 356 kN à mi marée, pour un maximum admissible de 780 kN.
- 340 kN à marée basse, pour un maximum admissible de 1110 kN.

Les efforts maximaux pour le batillage atteignent :

- 330 kN à marée haute<sup>2</sup>, pour un maximum admissible de 610 kN.
- 195 kN à mi marée, pour un maximum admissible de 780 kN.
- 215 kN à marée basse, pour un maximum admissible de 1110 kN.

Il convient d'ajouter à ces efforts ceux dus au vent et du courant. Il convient également de prendre en compte les éventuels navires amarrés.

#### 5.4. Efforts dans les sections centrales des pontons

Les valeurs significatives des efforts dans les sections centrales des pontons et les périodes significatives sont données dans les tableaux 5.4. Les résultats sont donnés en terme de module des valeurs significatives ( $2\sqrt{m_0}$ ). Elles correspondent à la valeur maximale de chaque état de mer, toutes incidences confondues ; les valeurs d'une même ligne ne sont donc pas nécessairement concomitantes pour une même incidence.

<sup>2</sup> Il semble toutefois que la valeur de Fx=276 kN soit surévaluée et due à une résonance ; ce qui explique qu'elle ne se produit que pour un seul niveau d'eau.

Les valeurs maximales sur houle peuvent être extrapolées sur une durée donnée au moyen de la loi de Rayleigh. Statistiquement, pendant une durée correspondant à une tempête de 3 heures, les valeurs maximales ne dépasseront pas les valeurs significatives multipliées par un coefficient égal à 2.0 (valeur maximale enveloppe).

Hs (m)	Tp (s)	$\beta$ (°)	Cavalement (kN)	Embarquée (kN)	Pilonnement (kN)	Roulis (kN.m)	Tangage (kN.m)	Lacet (kN.m)
Ponton BC1 – Marée haute								
0.30	2.0	0 à 180	7.1	10.7	4.9	20.6	9.3	342.7
0.70	3.0	0 à 180	34.1	36.5	11.5	46.0	96.6	888.2
1.20	4.0	0 à 30	78.2	61.5	31.6	76.2	310.9	500.3
1.60	4.3	0 à 30	109.1	81.5	45.7	102.1	453.6	742.1
1.65	4.3	0 à 30	112.5	84.0	47.2	105.3	467.7	765.2
1.20	4.2	150 à 180	59.6	53.5	24.3	60.5	258.4	600.1
1.50	4.5	150 à 180	81.1	66.2	32.3	78.1	362.8	820.8
1.60	4.6	150 à 180	88.6	70.1	34.8	84.1	399.8	895.3
Effort significatif enveloppe			112.5	84.0	47.2	105.3	467.7	895.3
Effort maximal enveloppe			224.9	168.1	94.3	210.6	935.5	1790.6
Ponton BC2 – Marée haute								
0.30	2.0	0 à 180	9.1	15.9	6.1	27.9	23.9	298.4
0.70	3.0	0 à 180	38.4	41.5	17.0	57.2	109.0	886.9
1.20	4.0	0 à 30	53.2	54.2	44.8	61.6	404.2	552.5
1.60	4.3	0 à 30	80.4	72.1	69.4	83.8	662.0	829.4
1.65	4.3	0 à 30	82.9	74.4	71.5	86.4	682.7	855.3
1.20	4.2	150 à 180	87.0	63.3	64.9	88.3	568.3	550.3
1.50	4.5	150 à 180	111.9	77.0	88.6	105.7	845.7	741.3
1.60	4.6	150 à 180	120.1	81.2	96.6	110.9	947.0	805.8
Effort significatif enveloppe			120.1	81.2	96.6	110.9	947.0	886.9
Effort maximal enveloppe			240.2	162.4	193.3	221.7	1893.9	1773.8

**Tableau 5.4.1** : Enveloppes des efforts alternatifs dans les sections centrales des pontons à marée haute

Hs (m)	Tp (s)	$\beta$ (°)	Cavalement (kN)	Embarquée (kN)	Pilonnement (kN)	Roulis (kN.m)	Tangage (kN.m)	Lacet (kN.m)
Ponton BC1 – Mi-marée								
0.30	2.0	0 à 180	6.9	6.5	1.3	6.6	9.4	167.0
0.70	3.0	0 à 180	32.8	32.0	8.3	31.3	99.3	622.1
1.20	4.0	0 à 30	78.4	57.0	29.6	71.7	352.8	458.6
1.60	4.3	0 à 30	110.4	76.8	43.9	101.2	517.0	682.7
1.65	4.3	0 à 30	113.8	79.2	45.3	104.3	533.2	704.0
1.20	4.2	150 à 180	60.3	52.1	23.9	66.6	296.2	546.0
1.50	4.5	150 à 180	83.5	65.3	32.3	89.2	419.3	748.8
1.60	4.6	150 à 180	91.7	69.5	35.1	96.9	463.2	817.7
Effort significatif enveloppe			113.8	79.2	45.3	104.3	533.2	817.7
Effort maximal enveloppe			227.6	158.5	90.6	208.7	1066.4	1635.5
Ponton BC2 – Mi-marée								
0.30	2.0	0 à 180	7.8	6.6	1.5	7.4	9.5	180.8
0.70	3.0	0 à 180	34.7	31.7	8.3	30.8	101.6	637.1
1.20	4.0	0 à 30	54.8	51.2	23.0	61.8	275.5	485.9
1.60	4.3	0 à 30	83.6	69.5	34.6	90.1	427.6	727.3
1.65	4.3	0 à 30	86.2	71.6	35.7	92.9	441.0	750.1
1.20	4.2	150 à 180	85.5	56.6	32.0	71.9	383.3	480.6
1.50	4.5	150 à 180	111.5	70.5	43.0	94.1	518.2	649.9
1.60	4.6	150 à 180	120.2	74.8	46.5	101.7	564.8	707.4
Effort significatif enveloppe			120.2	74.8	46.5	101.7	564.8	750.1
Effort maximal enveloppe			240.5	149.7	93.0	203.3	1129.6	1500.1

**Tableau 5.4.2** : Enveloppes des efforts alternatifs dans les sections centrales des pontons à mi-marée

Hs (m)	Tp (s)	$\beta$ (°)	Cavalement (kN)	Embardée (kN)	Pilonnement (kN)	Roulis (kN.m)	Tangage (kN.m)	Lacet (kN.m)
<b>Ponton BC1 – Marée basse</b>								
0.30	2.0	0 à 180	6.8	6.7	1.7	6.5	19.0	129.0
0.70	3.0	0 à 180	33.5	32.1	12.6	53.1	177.8	578.7
1.20	4.0	0 à 30	77.1	57.7	35.0	111.7	510.2	367.8
1.60	4.3	0 à 30	111.4	81.8	50.1	166.2	781.0	567.5
1.65	4.3	0 à 30	114.9	84.4	51.7	171.4	805.4	585.2
1.20	4.2	150 à 180	52.7	57.2	27.2	118.3	409.4	449.8
1.50	4.5	150 à 180	72.0	75.5	36.6	165.1	558.9	646.0
1.60	4.6	150 à 180	79.5	81.7	40.1	181.6	612.7	716.7
Effort significatif enveloppe			114.9	84.4	51.7	181.6	805.4	716.7
Effort maximal enveloppe			229.7	168.8	103.4	363.2	1610.8	1433.4
<b>Ponton BC2 – Marée basse</b>								
0.30	2.0	0 à 180	7.5	6.7	1.7	6.4	19.3	130.6
0.70	3.0	0 à 180	35.3	32.0	12.8	51.2	176.0	582.8
1.20	4.0	0 à 30	45.5	54.3	27.0	107.0	391.2	383.5
1.60	4.3	0 à 30	67.2	77.6	38.5	162.5	561.0	594.9
1.65	4.3	0 à 30	69.3	80.0	39.7	167.6	578.6	613.5
1.20	4.2	150 à 180	85.6	59.7	37.6	117.8	571.1	396.5
1.50	4.5	150 à 180	114.4	78.1	50.7	160.1	794.1	552.4
1.60	4.6	150 à 180	124.4	84.1	55.5	174.5	870.5	607.3
Effort significatif enveloppe			124.4	84.1	55.5	174.5	870.5	613.5
Effort maximal enveloppe			248.7	168.3	111.0	349.1	1741.0	1227.0

**Tableau 5.4.3** : Enveloppes des efforts alternatifs dans les sections centrales des pontons à marée basse

## **6. Documentation**

### **6.1. Documents techniques généraux**

[G1] Molin B. (2002) *Hydrodynamique des structures offshore*, Paris : Technip.

### **6.2. Documents techniques particuliers**

[P1] SHOM (2009) *Cours de la Loire*, Carte n°7396 L, Echelles diverses.

[P2] SHOM (1996) *Instructions Nautiques*, Tome C2.3 De Belle Île à la frontière espagnole.

[P3] SHOM (2014) *Annuaire des marées*, Tome 1 Ports de France.

[P4] SHOM (2014) *Références Altimétriques Maritimes, Ports de France métropolitaine et d'outre-mer*, Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée.

[P5] SHOM (1993) *Courants de Marée du SHOM 559, De Saint-Nazaire à Royan*.

[P6] SHOM / CETMEF (2012) *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique)*.

### **6.3. Documents de l'étude**

[E1] SCE (2015) *Construction d'un ponton lourd en lieu et place de la barge actuelle – dossier de plans – n°150557 – 11 plans*.

### **6.4. Etudes antérieures**

[A1] ARTELIA E&E (12/2012) *Mise en place de pontons flottants à Paimboeuf – Diagnostic*, Rapport n°8 71 3329.

[A2] ARTELIA E&E (24/01/2013) *Port à Sec – AVP*, Rapport n°8 71 3329 – 02.

[A3] Bougis J. (11/2012) *Etude pour la création d'un ponton d'accueil des navires de plaisance pour les Portes de l'Atlantique à Paimboeuf. I – Analyse du batillage des navires*, Rapport n°RET.12.646.02.



**sce**

Aménagement  
& environnement

[www.sce.fr](http://www.sce.fr)

**GROUPE KERAN**