

Commune de Saint-Cyr-sur-Mer

Remplacement de l'émissaire en mer de la
station d'épuration de la pointe Grenier

RAPPORT PROJET

Affaire : CORCSCSM 42-2018

Référence du document : PRO-RAP-001-0

Octobre 2019

Octobre 2019

Rapport PRO

Edition du document

	Nom	Date
Rédigé par	Florence TRAMONI	10/10/2019
Vérifié par	Etienne SAVIGNY	24/10/2019
Validé par	Stephan LENORMAND	29/10/2019

Versions et modifications

Version	Date	Description	Modifications
0	29/10/2019	Rapport PROJET	Version initiale

SOMMAIRE

1	Contexte et objet de la mission.....	6
1.1	Émissaire de la pointe Grenier.....	7
1.2	Objet de la mission en phase PRO.....	8
1.3	Objet du rapport.....	8
2	Analyse des données environnementales.....	9
2.1	Bathymétrie.....	9
2.2	La houle et le vent.....	10
2.2.1	Analyse statistique des données de houle.....	10
2.2.2	Analyse statistique des données de vent.....	12
2.3	Estimation des houles extrêmes et des vents associés.....	14
2.3.1	Sélection des événements de tempête.....	14
2.3.2	Calcul des ajustements statistiques.....	14
2.4	Estimation des vents extrêmes de secteur Nord-Ouest (régime de Mistral).....	17
2.5	Niveau d'eau.....	18
3	Modélisation de la propagation de la houle du large vers le site d'étude.....	21
3.1	Mise en place du modèle.....	21
3.2	Choix des conditions de simulation.....	24
3.3	Résultats de la modélisation.....	25
4	Vérification de la stabilité externe de la conduite.....	27
4.1	Conduite existante.....	27
4.2	Vérification de la stabilité externe de la conduite existante.....	29
4.2.1	Évolution de la hauteur de houle le long de la conduite.....	29
4.2.2	Vérification de la stabilité externe de la conduite.....	30
5	Définition du dispositif stabilisateur.....	39
5.1	Descriptif.....	39
5.2	Hypothèses.....	39
5.3	Calcul du nombre de points d'ancrage et répartition.....	40
6	Protection cathodique de la conduite.....	41
6.1	Etat des règles de l'art.....	41
6.1.1	Etat des normes.....	41
6.1.2	Principes généraux de la protection cathodique.....	41
6.2	Dimensionnement de la protection Galvanique.....	42
7	Description des travaux.....	45
8	Plans techniques des travaux préconisés.....	47
8.1	Réparation du sarcophage béton (travaux type 1).....	47

8.2	Réparation de la conduite PVC (travaux de type 2)	49
8.3	Renforcement du système stabilisateur de la conduite : mise en place d'ancres à vis et ancres à spirale (travaux de type 3)	50
8.4	Remplacement d'une partie de la conduite : extrémité du pipe (travaux de type 4)	50
9	Estimation du coût des travaux	52
10	Planning de réalisation des travaux	52
11	Références	53
12	Annexe	54

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1	: Localisation de la station et position de l'émissaire	6
Figure 3	: Localisation des points de données issues du modèle MWM (DHI),	10
Figure 4	: Secteur d'action du vent local pouvant soulever dans la baie de la Ciotat un clapot significatif au niveau de la conduite.	17
Figure 4	: Présentation des trois domaines de calculs mis en œuvre pour les simulations de propagation de la houle du large	22
Figure 5	: Bathymétrie interpolée des modélisations numériques SWAN	23
Figure 6	: Évolution de la hauteur significative de la houle le long le long de l'émissaire pour des houles de PR 10 ans, 20 ans et 50 ans de direction de provenance au large N215° et un niveau d'eau +0.9m NGF	25
Figure 7	: Évolution de la hauteur significative du clapot soulevé par un vent de PR 50 ans N290°, le long le long de l'émissaire	25
Figure 8	: Ancre à vis à 1 ou 2 plateaux (à gauche) et ancre à spirale (à droite) - source : ANCREST	39
Figure 9	: Extrait annexe B de la norme NF EN 13 174	43
Figure 10	: Extrait de la norme DNV-RP-B401	44
Figure 11	: Vue en plan des différentes zones d'intervention	47
Figure 12	: Profil en long et coupe type des travaux de type 1 : réfection du sarcophage béton	48
Figure 13	: Coupe type des travaux de type 2 : réparation de la conduite PVC (faisant apparaître la mise en place du système stabilisateur par ancrage (travaux de type 3)	49
Figure 14	: Coupe type des travaux de type 3 : renforcement de la stabilité externe de la conduite ...	50
Figure 15	: Coupe type des travaux de type 4 : remplacement d'une partie de la conduite – extrémité du pipe (faisant apparaître la mise en place du système stabilisateur par ancrage (travaux de type 3)	50

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1	: Coordonnées des points de données MWM	10
Tableau 2	: Histogramme de répartition de hauteurs significatives de la houle par direction de provenance/ Fréquence annuelle des hauteurs Hs de la houle/ Rose de provenance de la houle au large de Saint-Cyr-sur-Mer (points coordonnées POINT 5 - Longitude =5°48,833' E / Latitude =42°55,422' N et POINT 6 - Longitude =5°7,929' E / Latitude =43°11,357' N – issue de l'analyse des données de houle provenant du modèle MWM développé par DHI – Historique de données allant de 1979 à 2017 (38 année)	11
Tableau 3	: Histogramme de répartition de vitesse du vent par direction de provenance/ Fréquence annuelle de vitesse du vent/ Rose de provenance du vent au large au large de Saint-Cyr-sur-Mer (points coordonnées POINT 5 - Longitude =5°48,833' E / Latitude =42°55,422' N et POINT 6 - Longitude =5°7,929' E / Latitude =43°11,357' N – issue de l'analyse des données de houle provenant du modèle MWM développé par DHI – Historique de données allant 1979 à 2017 (38 année)	13

Tableau 4 : Tableau des caractéristiques des houles de projet au large de Saint Cyr-sur-Mer (points coordonnées POINT 5 - Longitude =5°48,833' E / Latitude =42°55,422' N et POINT 6 - Longitude =5°7,929' E / Latitude =43°11,357' N – issue de l'analyse des données de houle provenant du modèle MWM développé par DHI – Historique de données allant 1979 à 2017 (38 années).....	15
Tableau 5 : Caractéristiques des houles de projet au large de Saint Cyr-sur-Mer retenues par la société Corinthe Ingénierie	16
Tableau 6 : Vitesses du vent associées aux houles de projet retenues pour chaque secteur de provenance de la houle.	16
Tableau 7 : Vitesse des vents extrêmes de secteur N290°-N320° (points coordonnées POINT 5 - Longitude =5°48,833' E / Latitude =42°55,422' N	17
Tableau 8 : Niveaux d'eau de projet (en m CM) issus de l'étude des mesures des marégraphes de Marseille et Toulon entre 1998 et 2018 (Référentiel altimétrique : zéro hydrographique ou « Carte Marine »)	19
Tableau 9 : Niveaux d'eau de projet (en m NGF pour Marseille, Toulon et Saint Cyr sur Mer	20
Tableau 10 : Présentation des différents domaines imbriqués mis en œuvre pour l'étude de propagation de la houle	21
Tableau 11 : Présentation des différentes conditions de houle/vent simulées dans le modèle de propagation SWAN	24
Tableau 12 : Présentation des éléments dont on dispose sur le lestage existant de la conduite	27
Tableau 13 : Présentation des éléments dont on dispose sur le lestage existant de la conduite	28
Tableau 14 : Caractéristiques Hs/Tp de la houle le long de la conduite – Houle PR 10 ans / 20 ans / 50ans – N215° - Niveau d'eau +0.90m NGF.....	29
Tableau 15 : Vitesses et accélérations orbitales de la houle, projetées suivant l'axe normal à la conduite.	32
Tableau 16 : Coefficients hydrodynamiques retenus pour les calculs de stabilité pour une conduite non lestée	33
Tableau 17 : Coefficients de frottement et de sécurité retenus.....	33
Tableau 18 : caractéristiques de la conduites existantes.....	34
Tableau 19 : Caractéristiques du lestage retenu sur la conduite existante : hypothèses de calculs	35
Tableau 20 : Efforts hydrodynamiques s'exerçant sur la conduite	36
Tableau 21 : Vérification de la stabilité de la conduite : excédent ou déficit stabilisateur observé sur la section de conduite.	37
Tableau 22 : Récapitulatif sur la stabilité de la conduite existante	38
Tableau 23 : Efforts déstabilisateur à reprendre par le lestage complémentaire (N/ml) selon la PR de houle retenue.....	38
Tableau 24 : Valeurs typiques des densités de curant de conception pour la protection de l'acier nu en eau de mer	43

1 CONTEXTE ET OBJET DE LA MISSION

La commune de Saint Cyr sur Mer dispose d'une station d'épuration de 35 000 équivalents habitants. Cette dernière est située à la pointe Grenier.

Les eaux traitées sont rejetées à -48 m de profondeur à près de 1 km de la côte.

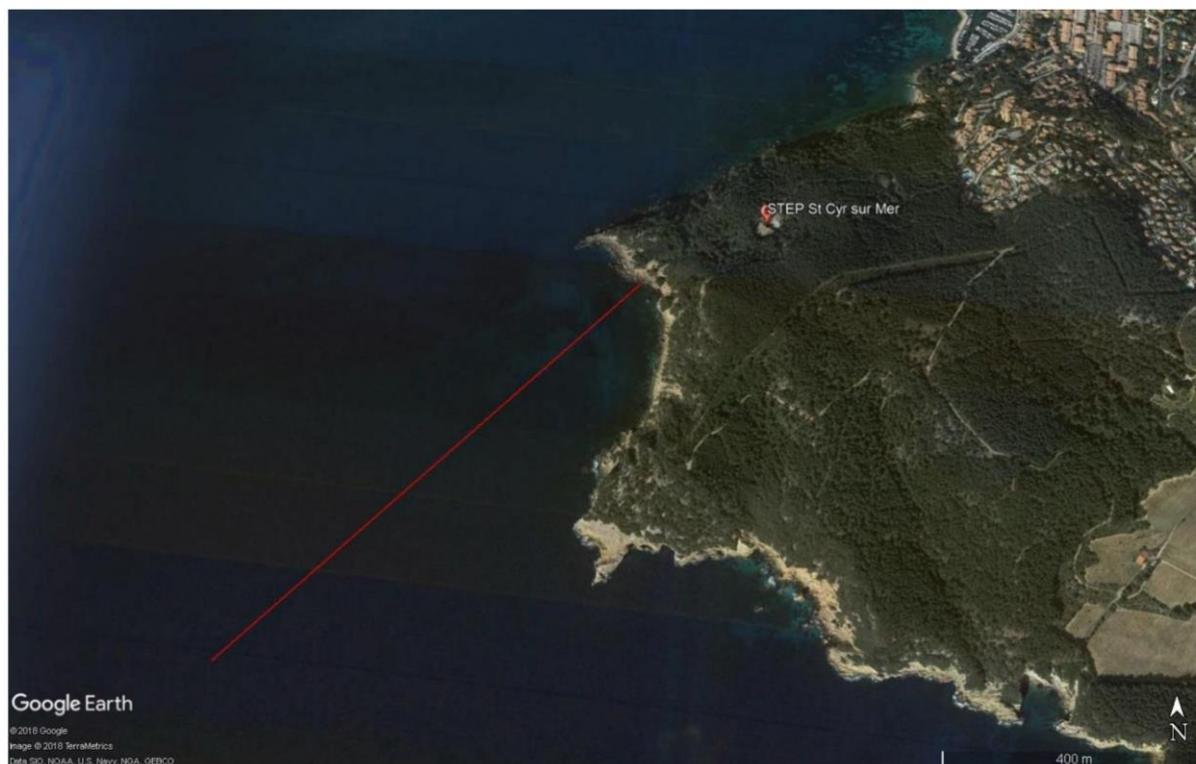


Figure 1 : Localisation de la station et position de l'émissaire

Cet émissaire a fait l'objet de différents diagnostics dont une inspection en 2005 et une seconde en 2014. Entre les deux inspections, il a été noté une dégradation de l'émissaire.

En 2005, la société COPLAN Environnement Conseil avait noté que la conduite était en bon état à l'exception du diffuseur qui s'était détaché.

En 2014, la société SEAWORKS a repéré diverses zones de casse et de fuites le long de l'émissaire ainsi qu'une dégradation de la protection béton.

Suite à ce diagnostic, la Commune a décidé le remplacement de la conduite et a missionné pour cela un assistant maître d'ouvrage : la société EARTHCASE.

Suite à un premier diagnostic et une faisabilité, il a été décidé de lancer un appel d'offre pour une mission de maîtrise d'œuvre confiée au bureau d'études CORINTHE Ingénierie.

1.1 ÉMISSAIRE DE LA POINTE GRENIER

- Diamètre : DN 250
- Point de rejet (d'origine) : -48 m
- Diffuseur : Diffuseur existant détruit
- Lestage : Noyé dans le béton puis posée sur un berceau et enfin lestée par des plots et des anneaux en béton selon la zone

Le diagnostic réalisé en 2019 par la société Corinthe Ingénierie [1] a permis de soulever les points suivants, confirmés par les investigations :

- Le rejet actuel ne présente pas de problème au regard l'arrêté du 21 juillet 2015, modifié par l'arrêté du 24 août 2017,
- Le champ d'herbier recouvrant quasiment 70 % du linéaire de conduite est de très bonne qualité et en progression,
- L'émissaire actuel semble présenter trois faiblesses majeures :
 - En zone 1 (partie d'émissaire située entre 0 et -12m, conduite en acier) : dégradation du sarcophage béton.
 - En zone 2 (partie d'émissaire située entre -12m et -13m, conduite en PVC) : rupture de la conduite.
 - En zone 3 (partie d'émissaire situé entre -13m et -48m, conduite en PVC) : rupture de l'extrémité de la conduite.
- L'incohérence de l'implantation actuelle de l'émissaire,

Le remplacement complet de la conduite impliquerait, de par la présence d'un champ d'herbier de posidonie dense et de grande qualité [2], que le Maître d'ouvrage initie un dossier de destruction d'espèces protégées.

Par ailleurs, il faut tenir compte du fait que le relevé du cheminement de la conduite existante implique que la mise en œuvre de la nouvelle conduite préalablement au retrait de l'existant pourrait entraîner leur croisement, ce qui entraînera les contraintes suivantes :

- des difficultés de dépose de la conduite existante,
- l'apparition d'un point haut au droit du ou des croisements entre nouvelle et ancienne conduite.

Ces différents constats et les conséquences du remplacement du pipe ont conduit à proposer une modification du programme des travaux comme suit :

- **Désordre en zone 2** : Réparation de la conduite.
Pour réparer ce désordre, de gros moyens ne sont pas nécessaires. Nous estimons le temps des travaux à 3 jours avec une équipe de scaphandriers et un bateau équipé d'un bras. Les rejets devront être stoppés pendant les travaux mais pourront continuer la nuit.
- **Désordre en zone 1** : Réfection du sarcophage béton.
Pour réparer ce désordre, des moyens plus conséquents seront nécessaires. Dans l'idéal un petit ponton permettant de fabriquer du béton sur site serait l'outil adéquat. La durée des travaux avec une équipe de scaphandriers pour réaliser coffrage et coulage serait de deux semaines avec une météo clémente. Il ne sera pas nécessaire de stopper les rejets pendant ces travaux.
- **Désordre en zone 3, à l'extrémité du pipe** : Remplacement d'une partie de la conduite avec la mise en place d'une tête d'extrémité évitant son remplissage et enfoncement.
- Renforcement de la **protection cathodique** (Si nécessaire)

- **Ajouter du lestage** (Ancres à vis ou plots béton) suivant le calcul de stabilité

Cette modification du programme étant soumise à la confirmation par le Maître d'Ouvrage que le diamètre de la conduite n'a pas à évoluer au regard des critères de rejet dictés par l'arrêté du 21 juillet 2015, modifié par l'arrêté du 24 août 2017.

Par ailleurs, on rappellera qu'il sera nécessaire également de **faire un relevé précis des nacres** afin de s'assurer que l'implantation du pipe ne les impactera pas.

1.2 OBJET DE LA MISSION EN PHASE PRO

Dans le cadre de la réparation de la conduite existante la mission en phase PRO consiste en :

Au stade de la mission PRO la mission se caractérisera comme suit :

- La réalisation d'une propagation de la houle du large
- La définition des efforts sur la conduite
- L'étude de stabilité de la conduite
- L'estimation du poids de lestage complémentaire à réaliser pour stabiliser la conduite
- La définition du lestage complémentaire
- La définition de la protection cathodique supplémentaire de la conduite acier
- La description des travaux :
 - La réparation du sarcophage béton,
 - La réparation de la zone de fuites observée,
 - Les travaux au niveau de l'exutoire,
 - La mise en œuvre du lestage complémentaire.
- La réalisation du plan technique des travaux
- Le phasage des travaux
- La planification de l'opération
- L'estimation du coût des travaux
- L'état des contraintes technique et règlementaires
- L'approche du type de consultation des entreprises

1.3 OBJET DU RAPPORT

Le présent rapport présente l'avancement réalisé sur la phase PRO de la mission à savoir :

- L'analyse des conditions environnementales
- La modélisation de la propagation de la houle du large vers le site d'étude
- La définition des efforts sur la conduite
- L'étude de stabilité de la conduite
- L'estimation du poids de lestage complémentaire à réaliser pour stabiliser la conduite
- La définition de la protection cathodique supplémentaire de la conduite acier
- La description des travaux :
 - La réparation du sarcophage béton,
 - La réparation de la zone de fuites observée,
 - Les travaux au niveau de l'exutoire,
 - La mise en œuvre du lestage complémentaire.
- La réalisation du plan technique des travaux
- L'estimation du coût des travaux

2 ANALYSE DES DONNEES ENVIRONNEMENTALES

2.1 BATHYMETRIE

La commune de Saint Cyr sur mer se situe entre La Ciotat et Bandol. Dans cette zone, le fond marin présente les caractéristiques suivantes :

- Le pré-continent est largement développé au Sud du cap de l'Aigle et de la baie de la Ciotat : l'isobathe 200 m se trouve reportée à 9 milles nautiques (m.n.) du littoral, et les fonds à 1000 m, à environ 12 m.n.
- Au Sud de Bandol, la largeur du pré-continent demeure encore égale à 4,5 m.n.

Cette vaste surface sous-marine, légèrement inclinée et irrégulière, accidentée de contre-pentes (banc des Broquets, à -70 m), constitue une partie du banc des Blauquières.

Les données topo-bathymétriques exploitées dans l'étude sont issues des bases de données disponibles en ligne et de données transmises par le Maître d'Ouvrage :

- Au large : les données SHOM numériques
- Zone littorale : les données litto 3D numériques
- Rivage dans la zones d'étude: relevé de SEMANTIC réalisé en 2019 (levé du 26/04/2019 – plan du 05/07/2019 – REF B/19/068/FB).

Le système géodésique utilisé dans cette étude est le RGF93, associé au système de projection Lambert 93. Les profondeurs et altitudes sont exprimées en « mètres NGF » relativement au référentiel IGN 69.

2.2 LA HOULE ET LE VENT

La société Corinthe Ingénierie a fait l'acquisition de données métocéan issues d'un modèle global vent-houle mis en œuvre par la société DHI qui commercialise sa base de données sur l'ensemble du bassin méditerranéen en tout point d'une grille de résolution très fine, allant jusqu'à 0.03° (environ 3 km) à proximité des côtes et en faibles profondeurs.

Le modèle Mediterranean Wind and Wave Model (MWM), est basé sur le logiciel MIKE 21 SW qui fait partie de la troisième génération de modèles vent-vagues spectraux, et reconstitue la totalité des conditions de houles spectrales de janvier 1979 à août 2017 sur l'ensemble du bassin méditerranéen afin de fournir une base de données couvrant 38 années au pas de temps horaire en tout point de sa grille.

2.2.1 Analyse statistique des données de houle

La zone d'étude est exposée aux houles provenant du secteur Sud-Sud-Est au secteur Ouest.

Nous disposons d'un historique de données de houle en deux points situés au large à l'Ouest et au Sud de la zone d'étude :

Point DHI 5	Longitude =5°48,833' E / Latitude =42°55,422' N
Point DHI 6	Longitude =5°7,929' E / Latitude =43°11,357' N

Tableau 1 : Coordonnées des points de données MWM



Figure 2 : Localisation des points de données issues du modèle MWM (DHI),

L'analyse statistique des données aux deux points MWM (point 5 et point 6) est présentée ci-dessous sous forme de rose de provenance, d'histogrammes et de corrélogrammes des caractéristiques de la houle.

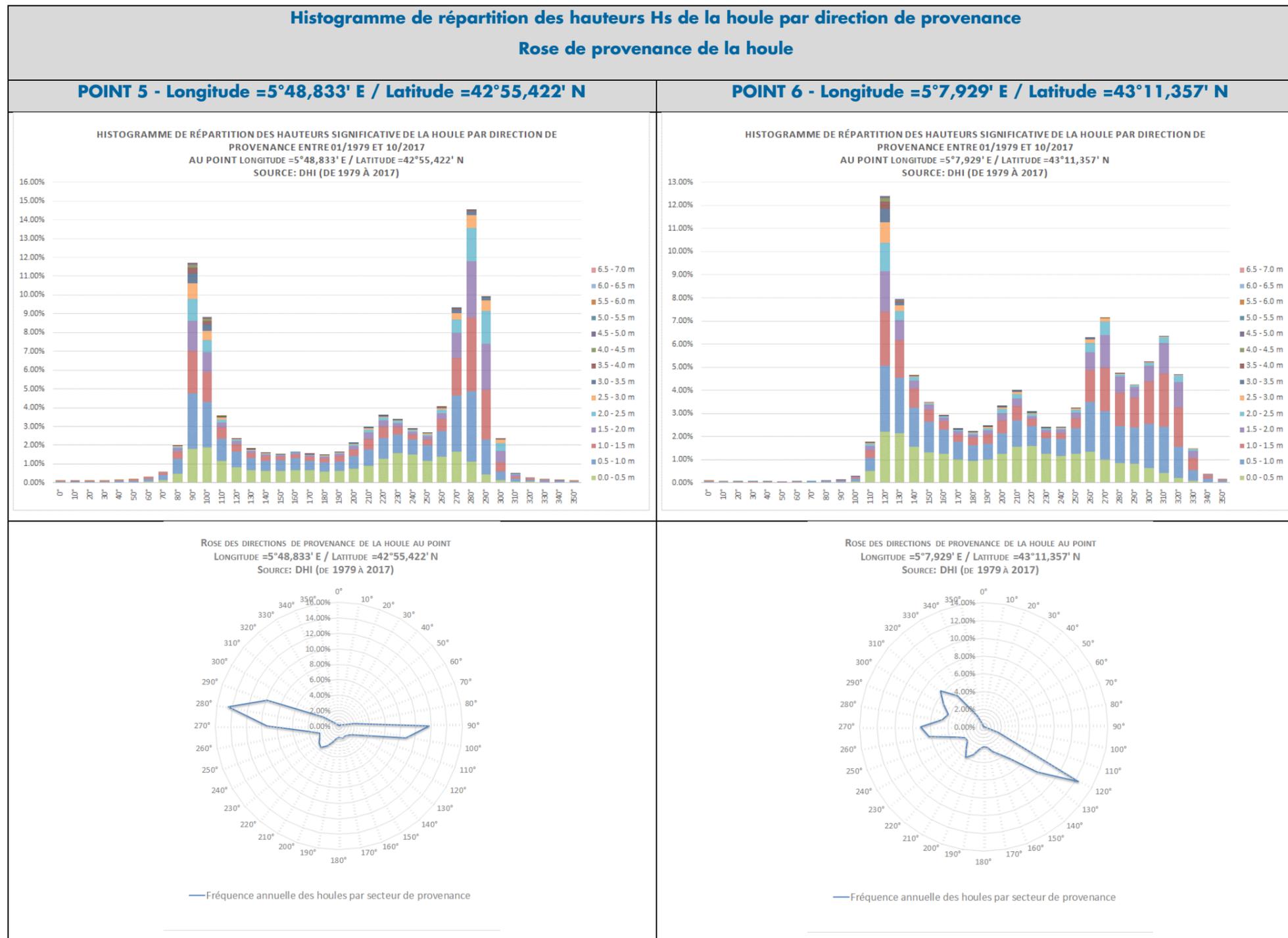


Tableau 2 : Histogramme de répartition de hauteurs significatives de la houle par direction de provenance/ Fréquence annuelle des hauteurs Hs de la houle/ Rose de provenance de la houle au large de Saint Cyr-sur-Mer (points coordonnées POINT 5 - Longitude =5°48,833' E / Latitude =42°55,422' N et POINT 6 - Longitude =5°7,929' E / Latitude =43°11,357' N – issue de l'analyse des données de houle provenant du modèle MWM développé par DHI – Historique de données allant de 1979 à 2017 (38 année)

La rose de direction de provenance des houles au point 5 met en évidence deux secteurs prédominants à l'Est et à l'Ouest pour les deux points. Les vents fréquents et intenses de secteur de provenance Est à Ouest engendrent des hauteurs de houle plus fortes.

La rose de direction de provenance des houles au point 6 montre une prédominance des houles provenant du secteur Sud-Est.

L'orientation et le découpage de la côte au niveau de la baie de Saint-Cyr-sur-Mer implique une exposition du site d'étude aux houles provenant du secteur Sud-Sud-Est à Ouest-Nord-Ouest, moins fréquentes et moins intenses.

2.2.2 Analyse statistique des données de vent

L'analyse statistique du vent au large a également été réalisée aux points MWM 5 et 6. Il s'agit des vitesses de vent à 10 m d'altitude moyennées sur 10 minutes.

Cette analyse a permis d'établir pour chacun des deux points le tableau de corrélation d'où sont tirés la rose des directions de provenance du vent et l'histogramme de ses caractéristiques, présentés ci-dessous.

Le littoral Varois peut être balayé par un vent de secteur Ouest fréquemment alimenté par le régime de Mistral (vent de secteur Nord à Nord-Ouest au large de Marseille tournant à l'Ouest voire au Sud-Ouest au large des côtes orientales varoises) et un vent dominant de secteur Est (régime d'entrées maritimes).

Ces deux régimes de vent accompagnent généralement une houle de même secteur qu'ils ont eux-mêmes générée (houle d'Est généralement accompagnée d'un vent de secteur Nord-Est à Est par exemple).

La houle de Sud, par contre, prend naissance dans le détroit de Gibraltar et se développe au large du Maroc et de l'Algérie avant de remonter le bassin Méditerranéen occidental : lorsqu'elle atteint les littoraux varois et azuréens, cette houle peut localement être accompagnée d'un vent d'Est à Nord-Est différent de celui qui la génère au large, voire d'aucun vent du tout.

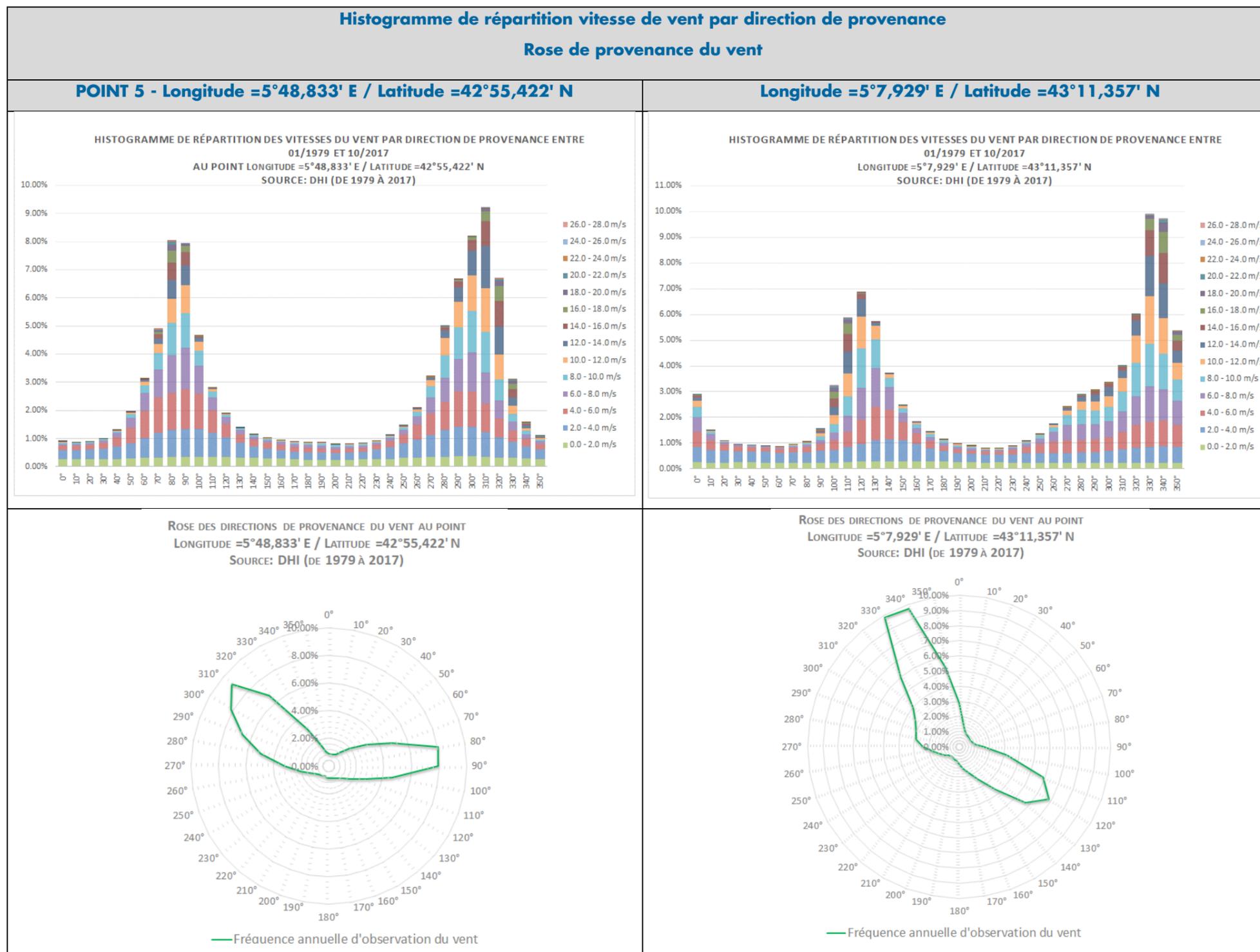


Tableau 3 : Histogramme de répartition de vitesse du vent par direction de provenance/ Fréquence annuelle de vitesse du vent/ Rose de provenance du vent au large au large de Saint Cyr-sur-Mer (points coordonnées POINT 5 - Longitude =5°48,833' E / Latitude =42°55,422' N et POINT 6 - Longitude =5°7,929' E / Latitude =43°11,357' N – issue de l'analyse des données de houle provenant du modèle MWM développé par DHI – Historique de données allant 1979 à 2017 (38 année)

2.3 ESTIMATION DES HOULES EXTREMES ET DES VENTS ASSOCIES

La méthode seuil (ou méthode « POT » pour *Peaks Over Threshold*) d'extrapolation statistique a été mise en œuvre pour établir les houles de projet.

2.3.1 Sélection des événements de tempête

Un événement de tempête est défini au pic de son intensité par une hauteur significative de houle $H_{1/3}$ supérieure à un seuil (ST). Un unique événement de tempête s'étalant sur plusieurs heures comprend parfois plusieurs pics dont seule la valeur maximale sera prise en compte.

La valeur attribuée au seuil ST permet de sélectionner un nombre limité d'événements (allant de 2 à 10 par an en moyenne sur la durée couverte par l'historique de données) constituant un échantillon statistique représentatif des événements de tempêtes.

Un contrôle de l'échantillon obtenu sur chaque secteur est systématiquement réalisé afin de ne pas considérer un même événement de tempête sur deux secteurs voisins séparés par une direction de provenance de la houle autour de laquelle oscille l'évènement en question.

Enfin, lorsque les résultats des tests de corrélation ne sont pas assez convenables (coefficient de corrélation trop faible), le seuil ST est augmenté ou diminué afin d'ajuster le nombre d'événements sélectionnés (taille de l'échantillon) et d'améliorer la fiabilité des valeurs extrêmes obtenues.

2.3.2 Calcul des ajustements statistiques

Le nombre total d'événements de tempête constituant l'échantillon étudié doit être supérieur ou égal à 20. En-dessous, l'échantillon n'est pas assez important pour ajuster une loi statistique avec suffisamment de fiabilité.

Le nombre de lois qu'il est possible d'appliquer pour un ajustement des extrêmes est important, il convient donc de faire un choix. Deux lois d'ajustement sont couramment utilisées :

La loi de Gumbel : $\text{Prob}(H_s < x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-B}{A}\right)\right)$

La loi de Weibull : $\text{Prob}(H_s < x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k\right)$ en faisant varier son paramètre k

Les coefficients A et B des lois d'extrapolation sont déterminés en appliquant une régression linéaire sur les données de tempête.

Les valeurs extrêmes retenues sont issues de la sélection finale entre la loi de Weibull et la loi de Gumbel pour lesquelles les écarts entre l'échantillon et la courbe d'extrapolation sont minimums au sens des moindres carrés. Un contrôle visuel de la représentation graphique des différentes lois d'ajustement est également réalisé afin de valider leur allure par rapport à l'alignement des données brutes.

Le tableau suivant présente, pour chaque secteur d'exposition d'intervalle 40° ou 50° au large de St Cyr-sur-Mer et chaque période de retour (PR) associée, la hauteur significative H_s de la houle de projet retenue. Figure également la représentation graphique de la loi d'ajustement retenue (courbe d'extrapolation).

**Hauteur significative des houles de projet retenues au large de
Saint-Cyr-sur-Mer (points 5 et 6 MWM DHI)**

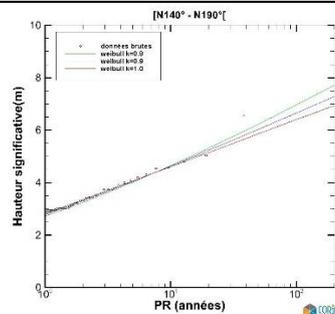
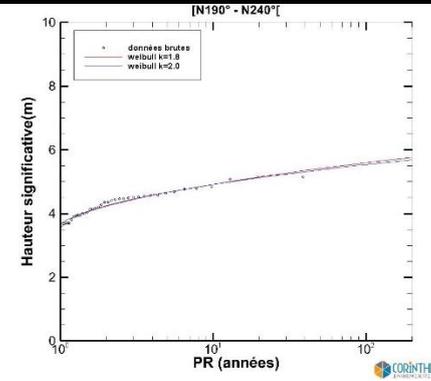
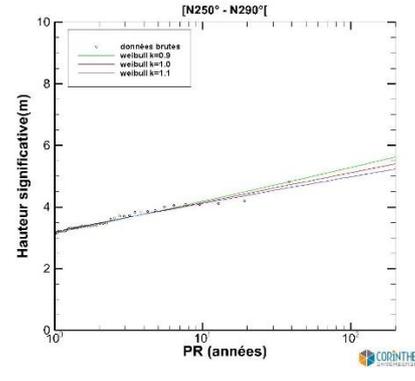
Secteur	Hauteur significative de la houle au large suivant son occurrence		Graphique d'extrapolation
[N140° - N190°] (Point 5 MWM)	PR 1 an	Hs=2.8m	 <p>Paramètre Weibull retenu k=1.0</p>
	PR 10 ans	Hs=4.6m	
	PR 20 ans	Hs=5.1m	
	PR 50 ans	Hs=5.9m	
	PR 100 ans	Hs=6.4m	
[N190° - N240°] (Point 5 MWM)	PR 1 an	Hs=3.7m	 <p>Paramètre Weibull retenu k=1.8</p>
	PR 10 ans	Hs=4.9m	
	PR 20 ans	Hs=5.1m	
	PR 50 ans	Hs=5.4m	
	PR 100 ans	Hs=5.6m	
[N250° - N290°] (Point 6 MWM)	PR 1 an	Hs=3.2m	 <p>Paramètre Weibull retenu k=1.0</p>
	PR 10 ans	Hs=4.1m	
	PR 20 ans	Hs=4.4m	
	PR 50 ans	Hs=4.8m	
	PR 100 ans	Hs=5.1m	

Tableau 4 : Tableau des caractéristiques des houles de projet au large de Saint-Cyr-sur-Mer (points coordonnés POINT 5 - Longitude =5°48,833' E / Latitude =42°55,422' N et POINT 6 - Longitude =5°7,929' E / Latitude =43°11,357' N – issue de l'analyse des données de houle provenant du modèle MWM développé par DHI – Historique de données allant 1979 à 2017 (38 années)

Dans le tableau ci-dessous sont reportées les caractéristiques des houles de projet (Hauteur significative Hs, Période Pic Tp) au large de Saint-Cyr-sur-Mer retenues dans le cadre de cette étude.

Caractéristiques des houles de projet retenues au large de Saint Cyr-sur-Mer					
Période de retour	1 an	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
[N140° - N190°]	Hs=2.8 m Tp= 7 à 8s	Hs=4.6 m Tp= 9s	Hs=5.1 m Tp= 10s	Hs=5.9 m Tp= 11s	Hs=6.4 m Tp= 11 à 12s
[N190° - N240°]	Hs=3.7 m Tp= 8s	Hs=4.9 m Tp= 9s	Hs=5.1 m Tp= 10s	Hs=5.4 m Tp= 10.5s	Hs=5.6 m Tp= 11s
[N250° - N290°]	Hs=3.2 m Tp= 7s	Hs=4.1 m Tp= 8s	Hs=4.4 m Tp= 9s	Hs=4.8 m Tp= 9.5s	Hs=5.1 m Tp= 9.5s

Tableau 5 : Caractéristiques des houles de projet au large de Saint Cyr-sur-Mer retenues par la société Corinthe Ingénierie

Dans le tableau ci-dessous sont reportées les vitesses du vent à associer à chaque houle de projet retenue pour être intégrés ensemble au modèle de propagation dans le cadre de l'étude de stabilité. Ces vitesses de vent sont appliquées uniformément sur l'ensemble de la grille du modèle de propagation.

Vitesses du vents associées aux houles de projet retenues au large de Saint Cyr-sur-Mer					
Période de Retour de la houle Secteur de provenance de la houle du large	1 an	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
[N140° - N190°]	9 m/s	12 m/s	13 m/s	14 m/s	16 m/s
[N190° - N240°]	12 m/s	14 m/s	15 m/s	16 m/s	17 m/s
[N250° - N290°]	14 m/s	17 m/s	18 m/s	22 m/s	23 m/s

Tableau 6 : Vitesses du vent associées aux houles de projet retenues pour chaque secteur de provenance de la houle.

2.4 ESTIMATION DES VENTS EXTREMES DE SECTEUR NORD-OUEST (REGIME DE MISTRAL)

L'émissaire se situant au niveau de la Pointe Grenier, il est intéressant de vérifier l'intensité des clapots soulevés par les vents locaux agissant dans la baie de la Ciotat (*fetch* ≈ 6 km jusqu'à la zone d'étude) sur un secteur de provenance allant de N290° à N320° environ.



Figure 3 : Secteur d'action du vent local pouvant soulever dans la baie de la Ciotat un clapot significatif au niveau de la conduite.

En l'absence de données de vent locales, les vitesses de vent issues du point 5 ont été considérées.

La même méthode seuil (ou méthode « POT » pour *Peaks Over Threshold*) d'extrapolation statistique utilisée précédemment a été mise en œuvre pour établir les vents de projet de secteur Nord-Ouest (Mistral).

Les résultats de cette analyse sont présentés ci-dessous :

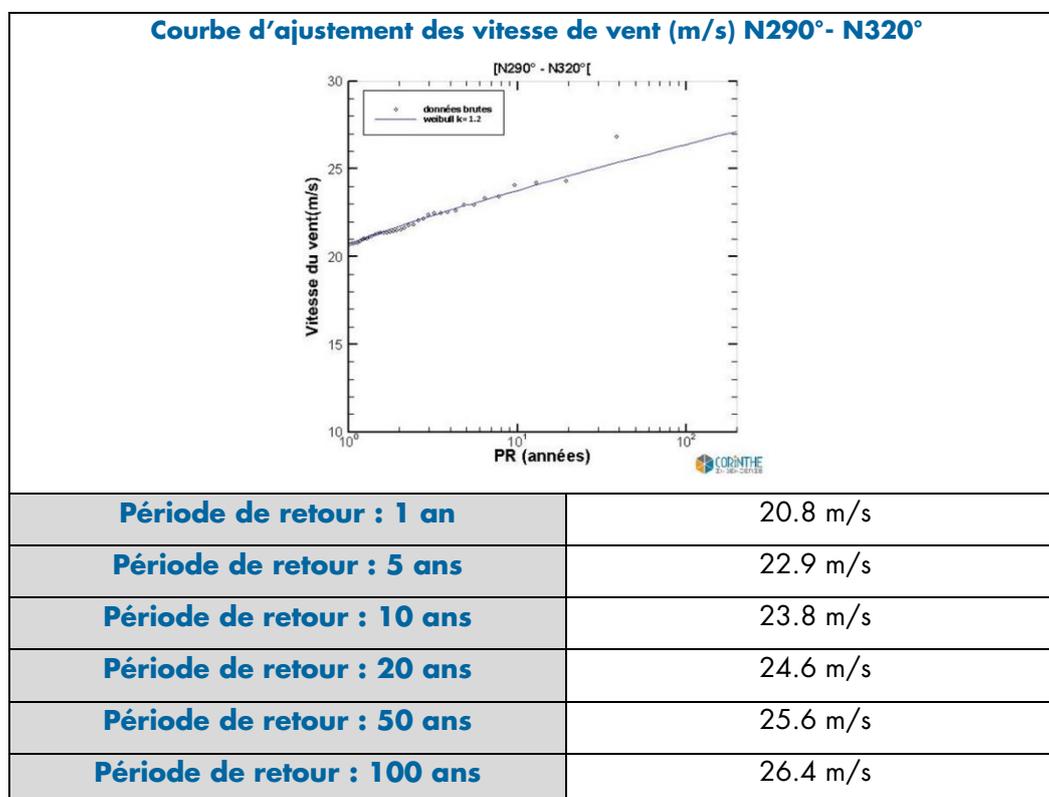


Tableau 7 : Vitesse des vents extrêmes de secteur N290°-N320° (points coordonnées POINT 5 - Longitude =5°48,833' E / Latitude =42°55,422' N)

2.5 NIVEAU D'EAU

En Méditerranée, le niveau de la mer varie selon la contribution de la marée astronomique de faible amplitude (quelques dizaines de centimètres au plus), de la marée barométrique pouvant engendrer des variations de quelques dizaines de centimètres également au passage d'une dépression sur la mer, et des surcotes de tempête (*storm surge*) entraînant les variations les plus significatives pouvant aller jusqu'au mètre. Par ailleurs, le niveau général des mers devrait évoluer significativement dans les prochaines décennies selon les conclusions des travaux du GIEC : une élévation globale significative du niveau moyen de la mer est attendue en raison du réchauffement climatique, avec des variations régionales spécifiques.

Les marégraphes les plus proches du site d'étude disposant d'un historique de mesure du niveau d'eau sont celui de Marseille et celui de Toulon.

Les références altimétriques maritimes du SHOM (RAM 2017) indiquent que :

- Au niveau du port de Marseille le zéro des cartes marines (ou 0 CM) est situé 0.329 m sous le zéro NGF
- Au niveau de Toulon le zéro des cartes marines (ou 0 CM) est situé 0.253 m sous le zéro NGF

Le site du SHOM, met à disposition en accès libre des historiques de mesures horaires du niveau d'eau sur plusieurs années.

Les marégraphes de Toulon et de Marseille fournissent des historiques de mesures du niveau d'eau sur des périodes étendues. Nous avons pu récupérer les données disponibles entre 1998 et 2018.

Entre 1998 et 2018, les marégraphes Marseille et de Toulon fournissent près de 158 000 données horaires enregistrées.

La méthode seuil (ou méthode « POT » pour *Peaks Over Threshold*) d'extrapolation statistique a été mise en œuvre pour établir les niveaux d'eau de projet.

Les valeurs extrêmes retenues sont tirées de la loi de Weibull ou de la loi de Gumbel la mieux ajustée pour laquelle les écarts entre l'échantillon et la courbe d'extrapolation sont minimums au sens des moindres carrés. Un contrôle visuel de la représentation graphique des différentes lois d'ajustement est également réalisé afin de valider leur allure par rapport à l'alignement des données brutes.

Les résultats de cette analyse sont présentés ci-dessous :

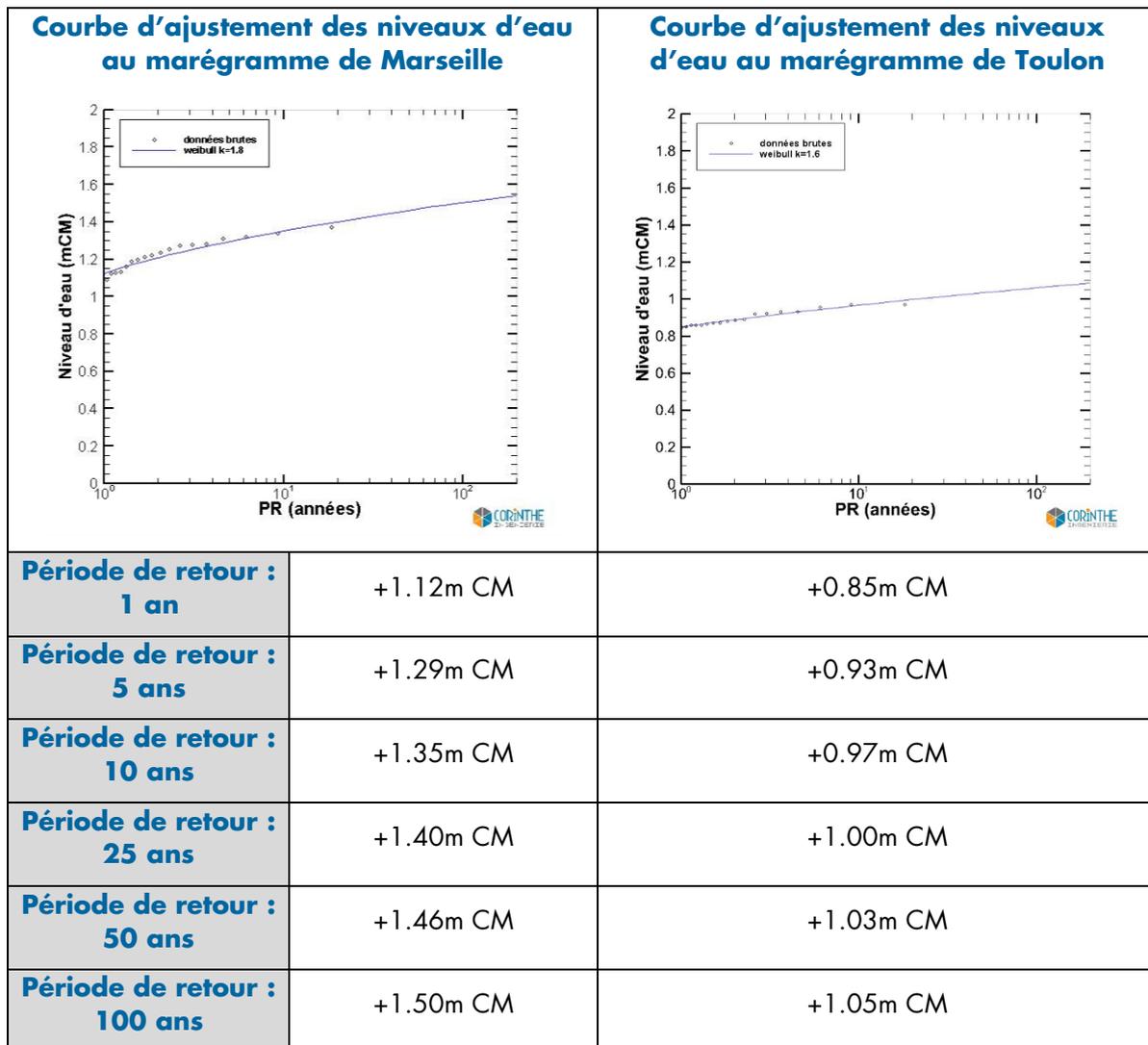


Tableau 8 : Niveaux d'eau de projet (en m CM) issus de l'étude des mesures des marégraphes de Marseille et Toulon entre 1998 et 2018 (Référentiel altimétrique : zéro hydrographique ou « Carte Marine »)

La commune de Saint Cyr sur Mer ne dispose pas de marégraphe permettant d'estimer les niveaux d'eau exactement sur la zone d'étude.

Dans le cadre de l'étude, les niveaux d'eau de projet retenus seront une moyenne entre les niveaux d'eau extrapolés à partir des données issues des marégraphes de Marseille et de Toulon soit :

	Marseille	Toulon	Moyenne (Saint Cyr sur Mer)
Période de retour : 1 an	+0.79m NGF	+0.60m NGF	+0.70m NGF
Période de retour : 5 ans	+0.96m NGF	+0.68m NGF	+0.82m NGF
Période de retour : 10 ans	+1.02m NGF	+0.72m NGF	+0.87m NGF
Période de retour : 25 ans	+1.07m NGF	+0.75m NGF	+0.91m NGF
Période de retour : 50 ans	+1.13m NGF	+0.78m NGF	+0.96m NGF
Période de retour : 100 ans	+1.17m NGF	+0.80m NGF	+0.99m NGF

Tableau 9 : Niveaux d'eau de projet (en m NGF pour Marseille, Toulon et Saint Cyr sur Mer)

Les cotes altimétriques présentées dans la suite de cette étude se rapportent au zéro du nivellement général de la France ou 0.0 m NGF (référentiel altimétrique IGN69).

3 MODELISATION DE LA PROPAGATION DE LA HOULE DU LARGE VERS LE SITE D'ETUDE

3.1 MISE EN PLACE DU MODELE

La propagation de la houle du large vers le site d'étude a été réalisée à l'aide du modèle SWAN (Simulating WAVes Nearshore).

C'est un modèle dit de « troisième génération » permettant d'obtenir une estimation réaliste des paramètres des vagues en zone côtière, dans les lacs et les estuaires pour un vent, une bathymétrie et des conditions de courants donnés. Le modèle SWAN est basé sur l'équation de conservation de la densité spectro-angulaire d'action des vagues, de façon complètement spectrale (dans toutes les directions et les fréquences).

SWAN calcule l'évolution de vagues aléatoires et irrégulières dans les régions côtières par eau profonde, intermédiaire et en eau peu profonde sous l'effet de courants ambiants.

Le modèle SWAN rend compte de la propagation (réfraction et diffraction) due au courant et à la profondeur d'eau, et représente les processus de génération des vagues par le vent, la dissipation due au moutonnement, au frottement sur le fond, au déferlement bathymétrique et aux interactions non-linéaires entre les vagues (triplets et quadruplets de fréquences) de façon explicite par des formulations de l'état de l'art.

Pour réaliser cette étude, trois modèles imbriqués ont été réalisés. Les domaines sont présentés ci-dessous :

Présentation des domaines imbriqués réalisés pour l'étude de propagation de la houle extrême du large vers la zone d'étude			
Domaines	Domaine 1 (Le plus large)	Domaine 2 (Intermédiaire)	Domaine 3* (En approche de la zone d'étude)
Longueur du modèle d'Est en Ouest	53 700m	22 600 m	9 000 m
Longueur du modèle du Nord au Sud	33 000 m	15 600 m	6 400 m
Taille de la maille	100x100m	50x50 m	20x20 m

Tableau 10 : Présentation des différents domaines imbriqués mis en œuvre pour l'étude de propagation de la houle

Ci-dessous sont présentés les trois domaines de calculs :

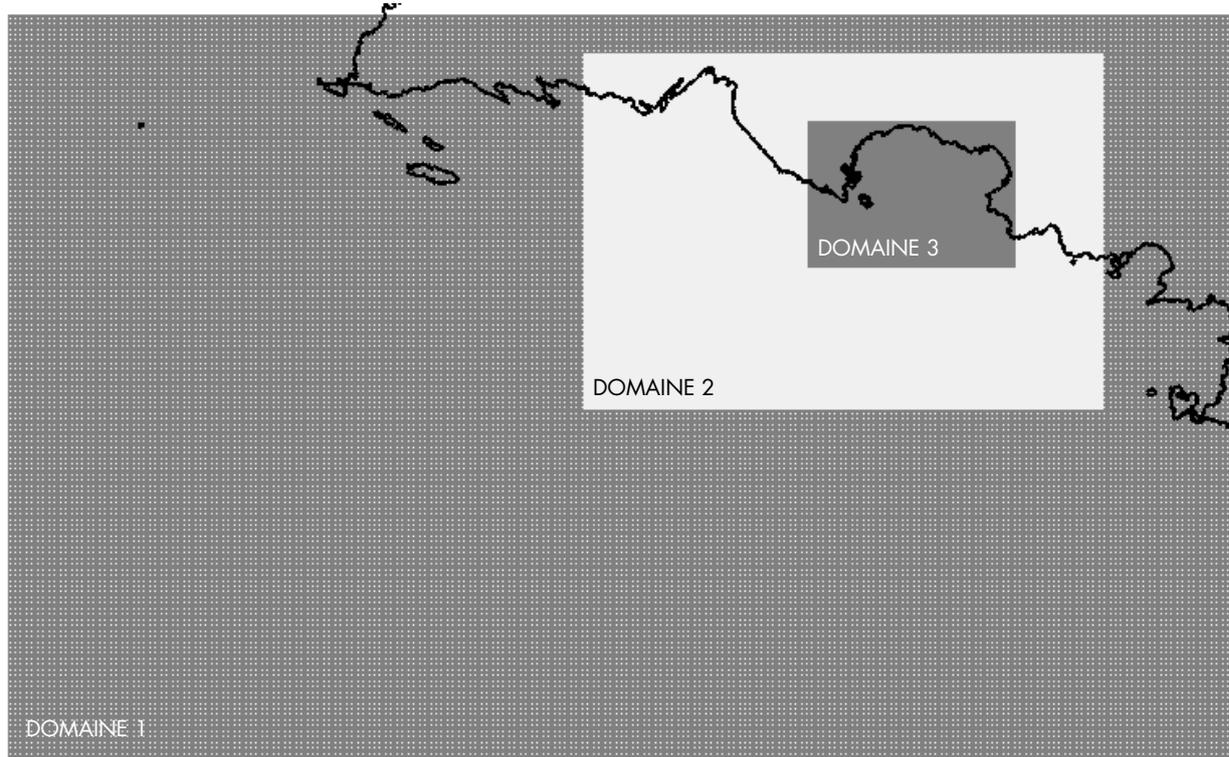


Figure 4 : Présentation des trois domaines de calculs mis en œuvre pour les simulations de propagation de la houle du large

La conduite se situe dans l'emprise du domaine 3 (le plus fin).

La bathymétrie locale numérisée intégrée dans le modèle est issue des sources transmises par le Maître d'Ouvrage. Les données bathymétriques au large et dans la zone littorale sont issues de bases de données disponibles en ligne. L'ensemble des données ont été assemblées afin de constituer une bathymétrie globale couvrant l'ensemble du domaine de calcul.

Le système géodésique utilisé dans cette étude est le RGF93, associé au système de projection Lambert 93. Les profondeurs et altitudes sont exprimées relativement à l'IGN 69 (m NGF)

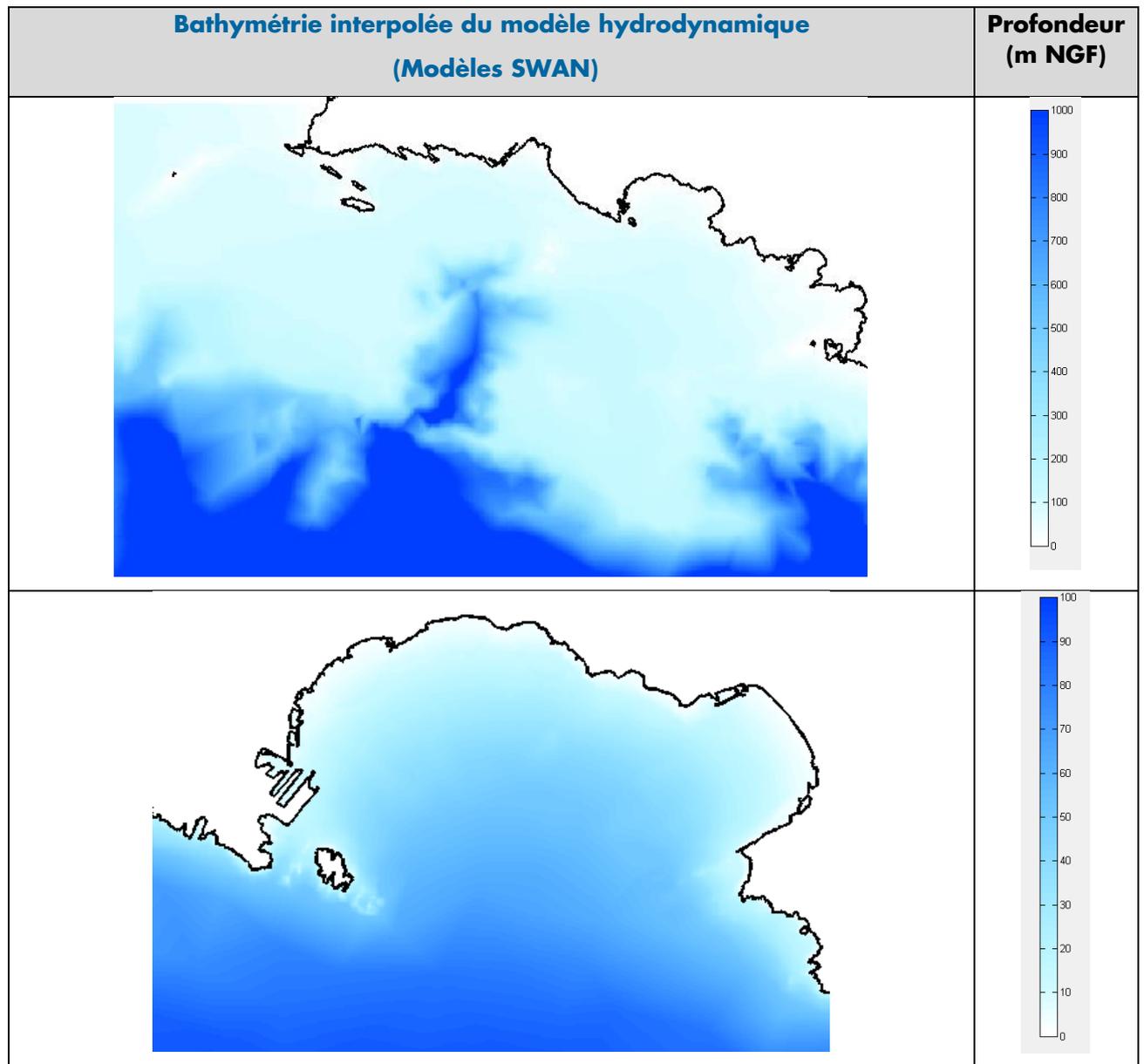


Figure 5 : Bathymétrie interpolée des modélisations numériques SWAN

3.2 CHOIX DES CONDITIONS DE SIMULATION

La stabilité de la conduite existante est difficilement vérifiable : nous ne disposons pas des informations suffisantes sur son lestage actuel.

Si le type de lestage présent sur la conduite existante est connu selon les zones, nous ne disposons pas de tous les éléments nécessaires à sa vérification pour stabiliser le pipe (dimensions géométriques des lests, nombre total d'éléments et répartition sur la conduite, linéaire de conduite partiellement ou entièrement ensouillée comme constaté sur certaines photographies).

Dans le cadre de l'étude, plusieurs hypothèses ont été prises par défaut afin de produire des calculs estimatifs qui sont détaillés plus loin dans ce rapport.

A ce stade, la propagation de la houle du large a été réalisée pour les houles de périodes de retour 10 ans, 20 ans et 50 ans de secteur Sud-Ouest (secteur de provenance le plus dimensionnant vis-à-vis des efforts hydrodynamiques que la houle est capable d'exercer sur la conduite)

Soient les conditions de houle/vent/niveaux d'eau suivantes :

Caractéristiques des houles de projet simulées				
		Période de retour		
	Direction de propagation	10 ans	20 ans	50 ans
Secteur de propagation de la houle retenue, la plus directe et préjudiciable [N190° - N240°]	N215°	Hs=4.9 m Tp= 9s Vitesse du vent= 14 m/s Niveau d'eau= +0.9m NGF	Hs=5.1 m Tp= 10s Vitesse du vent= 15 m/s Niveau d'eau= +0.9m NGF	Hs=5.4 m Tp= 10.5s Vitesse du vent= 16 m/s Niveau d'eau= +0.9m NGF
Direction d'action du vent retenu et générant un clapot le plus direct et préjudiciable N290°	N290°	<i>Non simulé</i>	<i>Non simulé</i>	Vitesse du vent= 25.6 m/s

Tableau 11 : Présentation des différentes conditions de houle/vent simulées dans le modèle de propagation SWAN

Un clapot soulevé dans la baie de la Ciotat par un vent de PR 50 ans de direction de provenance N290° a également été modélisé afin de vérifier que la houle du large restait dimensionnante par rapport à un tel clapot local.

3.3 RESULTATS DE LA MODELISATION

En annexe sont présentées les planches de résultats de propagation de la houle du large vers le site d'étude.

Le graphique ci-dessous présente le profil de la hauteur significative de la houle Hs le long de l'émissaire depuis la zone d'atterrage jusqu'à son extrémité vers la profondeur -48m.

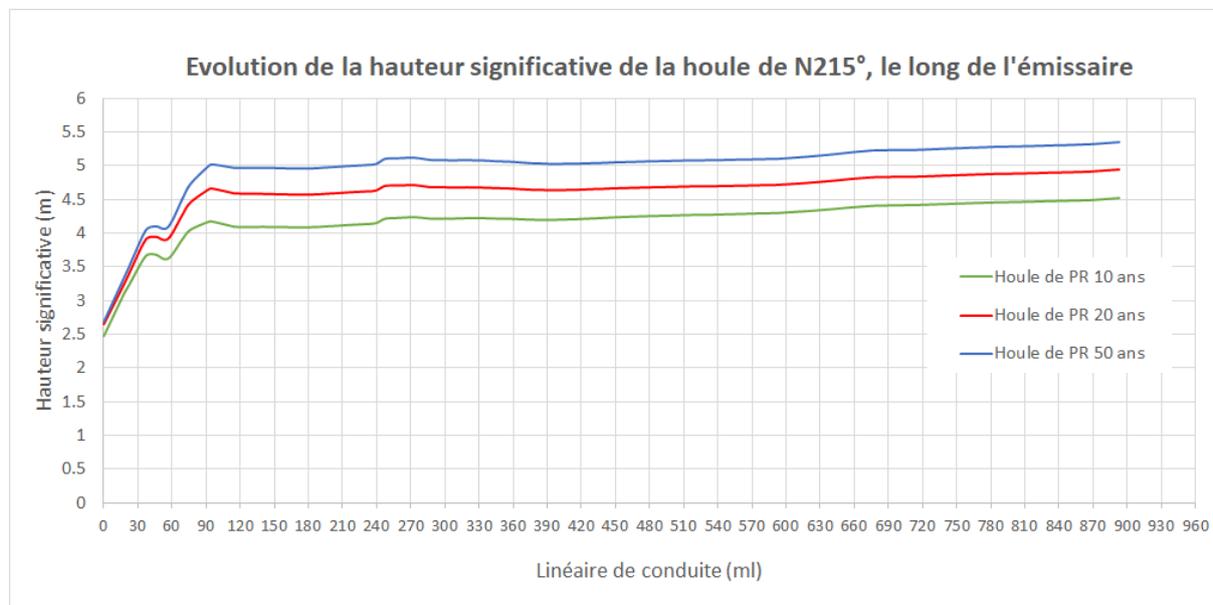


Figure 6 : Évolution de la hauteur significative de la houle le long de l'émissaire pour des houles de PR 10 ans, 20 ans et 50 ans de direction de provenance au large N215° et un niveau d'eau +0.9m NGF

Le graphique ci-dessous présente le profil de la hauteur significative du clapot soulevé par un vent de PR 50 ans de N290°, le long de l'émissaire depuis la zone d'atterrage jusqu'à son extrémité vers la profondeur -48m.

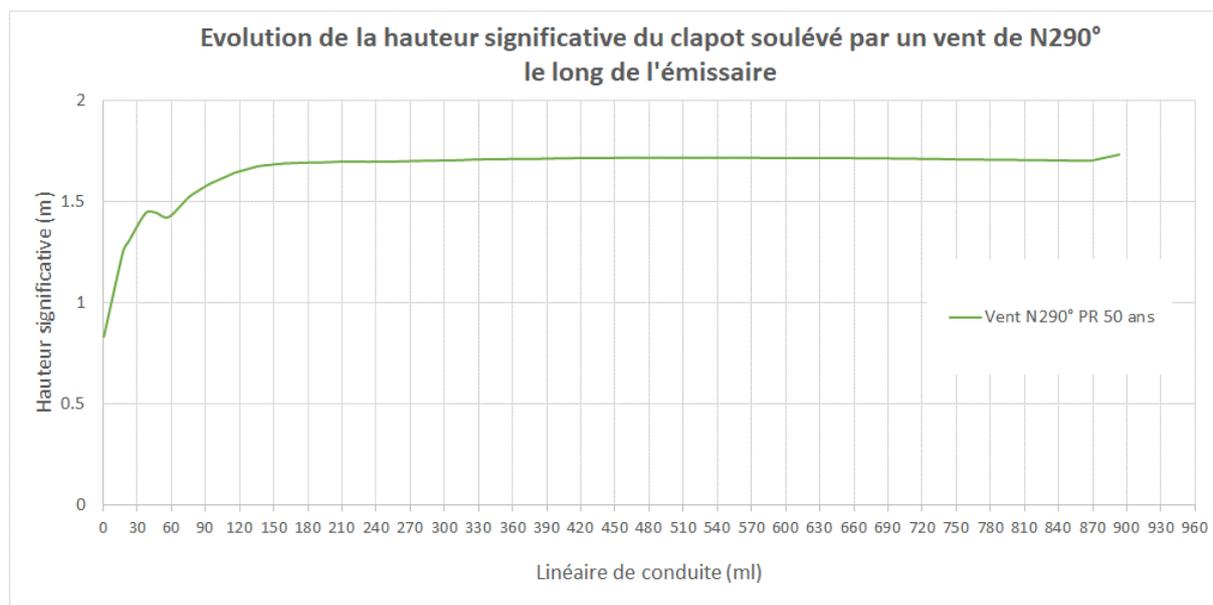


Figure 7 : Évolution de la hauteur significative du clapot soulevé par un vent de PR 50 ans N290°, le long de l'émissaire

On observe sur ces graphiques que, quelle que soit sa période de retour (10, 20 ou 50 ans), la houle provenant du secteur [N190° - N240°] (direction de provenance considérée : N215°), arrive sur la conduite avec une intensité plus importante que le clapot soulevé par un vent de PR 50 ans de direction de provenance N290°.

Par ailleurs, on complétera cette analyse en indiquant que pour les trois périodes de retour de houle de projet, l'incidence de la houle le long de la conduite est comprise entre 0° (la houle arrive dans l'axe de la conduite) et 20° (la houle arrive avec un angle de 20° par rapport à l'axe de la conduite). Pour les calculs, on considérera de manière conservatrice que la houle arrive sur la conduite avec un angle d'incidence de 45°. On notera que cette hypothèse de calcul est plus dimensionnante qu'un clapot local soulevé par un vent de PR 50 ans considéré avec une incidence perpendiculaire à la conduite.

Le calcul des efforts hydrodynamiques qui s'exercent sur la conduite sera réalisé pour la houle en provenance du large selon la direction N215°.

4 VERIFICATION DE LA STABILITE EXTERNE DE LA CONDUITE

4.1 CONDUITE EXISTANTE

La stabilité de la conduite existante est difficilement vérifiable : nous ne disposons pas des informations suffisantes sur son lestage actuel.

Si le type de lestage présent sur la conduite existante est connu selon les zones, nous ne disposons pas de tous les éléments nécessaires à sa vérification pour stabiliser le pipe (dimensions géométriques des lests, nombre total d'éléments et répartition sur la conduite, linéaire de conduite partiellement ou entièrement ensouillée comme constaté sur certaines photographies).

Ci-dessous sont reportées les informations dont on dispose :

<u>Entre 0 et -12m</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Conduite en acier • Entre 0 et -8m, la conduite est protégée par un sarcophage en béton • Entre -8m et -11m, la conduite est posée sur un berceau en béton • Entre -11m et -12m la conduite repose sur le fond et est lestée par des lests bétons pyramidaux
<u>Entre -12 et -13m</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Conduite en PVC avec rupture de celle-ci vers -12m
<u>Entre -13 et -48m</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Conduite en PVC • Conduite partiellement ensouillée en le substratum sur plusieurs mètres • Conduite cerclée par de l'herbier de posidonie • Entre -13m et -26m, la conduite est lestée par des buse béton $\Phi 400$ • Entre -26m et -48m, la conduite est lestée par des plots béton reliés par des demi-colliers acier

Tableau 12 : Présentation des éléments dont on dispose sur le lestage existant de la conduite

Dans le cadre de l'étude, plusieurs hypothèses ont donc dû être prises par défaut afin de produire des calculs estimatifs.

Ci-dessous sont reportées les informations manquantes pour la vérification de la stabilité existante de la conduite et les hypothèses considérées pour vérifier la stabilité de la conduite face à des conditions de projet de PR 10 ans, 20 ans et 50 ans (secteur de provenance Sud-Ouest) :

<u>Entre 0 et -12m</u> Conduite acier	Entre 0 et -8m, la conduite est protégée par un sarcophage en béton. Nous considérons donc que la conduite protégée n'est pas soumise directement aux efforts de houle. Ce tronçon sera considéré comme stable.
	Entre -8m et -11m, sur environ 35m, la conduite est posée sur un berceau béton Nous considérons que cette portion de conduite est sans lestage additionnel. Sur cette section la conduite étant posée dans un berceau, celle-ci ne pourra pas se déplacer latéralement. Seulement la stabilité au soulèvement de la conduite sera vérifiée.
	Entre -11m et -12m : la conduite est lestée par des lests béton pyramidaux dont on ne connaît ni les dimensions géométriques, ni la répartition le long de la conduite. En l'absence d'information, nous indiquerons les efforts qui s'exercent sur la conduite et le poids complémentaire à apporter

	pour stabiliser la conduite face à des conditions de projet de PR10 ans, 20 ans et 50 ans.
<u>Entre -12 et -13m</u> Conduite PVC	<p>Sur environ 60ml, le système de lestage n'est pas présenté.</p> <p>Nous pourrions partir de l'hypothèse que le système de lestage est similaire au précédent, soit un lestage béton pyramidale (dimensions et répartition inconnues).</p> <p>En l'absence d'information, nous indiquerons les efforts qui s'exercent sur la conduite et le poids complémentaire à apporter pour stabiliser la conduite face à des conditions de projet de PR10 ans, 20 ans et 50 ans.</p>
<u>Entre -13 et -48m</u> Conduite PVC	<p><u>Entre -13m et -25m sur environ 330ml.</u></p> <p>À partir de -13m, la conduite est lestée par une buse béton Ø400. Les rapports n'indiquent pas si le lestage est continu. Certaines photographies semblent montrer qu'il le serait.</p> <p>Ce type de lestage est supposé présent entre -13m et -25m, profondeur à partir de laquelle les rapports diagnostics indiquent un autre dispositif stabilisateur.</p> <p>Enfin, certaines photographies semblent montrer une conduite partiellement ensouillée sur un linéaire non précisé.</p> <p>Des hypothèses de dimensions et de longueur d'ensouillage devraient être retenues.</p> <p>En l'absence d'informations complémentaires, les calculs seront effectués avec les hypothèses suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - La conduite est lestée en continue par une buse béton - La conduite n'est pas ensouillée
	<p><u>Entre -25m et -48m sur environ 400ml.</u></p> <p>A partir de -25m, la conduite repose sur des plots béton reliés par des demi-colliers acier. La dimension des plots et leur répartition sur la conduite sont inconnues.</p> <p>Des hypothèses concernant les dimensions et la répartition de ce type de lestage devraient être retenues.</p> <p>En l'absence d'information, nous indiquerons les efforts qui s'exercent sur la conduite et le poids complémentaire à apporter pour stabiliser la conduite face à des conditions de projet de PR10 ans, 20 ans et 50 ans.</p>

Tableau 13 : Présentation des éléments dont on dispose sur le lestage existant de la conduite

4.2 VERIFICATION DE LA STABILITE EXTERNE DA LA CONDUITE EXISTANTE

4.2.1 Évolution de la hauteur de houle le long de la conduite

Dans le tableau ci-dessous sont reportées, pour les houles de N215° de période de retour 10 ans, 20 ans et 50 ans et un niveau d'eau de +0.90m NGF, les caractéristiques de la houle (Hs, Tp) le long de l'émissaire.

Il s'agit des données d'entrée qui seront prises en compte dans les calculs de vérification de la stabilité externe de la conduite.

Le découpage de la conduite en sections correspond aux différents types de lestage observés lors des inspections sous-marines réalisée sur la conduite.

PM en ml	Longueur section (m)	Hauteur d'eau (y compris niveau d'eau à +0.9m NGF)	Hauteur significative de la houle maximum sur section Hs (m)			Période pic de la houle Tp (s)		
			10 ans	20 ans	50 ans	10 ans	20 ans	50 ans
0		2.80	2.48	2.64	2.68	9.00	10.00	10.50
56	56	6.00	3.63	3.92	4.09	9.00	10.00	10.50
85	85	8.00	4.06	4.46	4.72	9.00	10.00	10.50
115	30	11.00	4.10	4.60	4.97	9.00	10.00	10.50
116	1	12.00	4.10	4.60	4.97	9.00	10.00	10.50
174	58	13.00	4.10	4.58	4.96	9.00	10.00	10.50
214	40	13.40	4.13	4.61	4.99	9.00	10.00	10.50
254	40	13.90	4.23	4.72	5.11	9.00	10.00	10.50
300	46	15.10	4.23	4.69	5.08	9.00	10.00	10.50
340	40	16.80	4.23	4.68	5.07	9.00	10.00	10.50
375	35	17.70	4.21	4.65	5.04	9.00	10.00	10.50
415	40	20.20	4.22	4.65	5.03	9.00	10.00	10.50
450	35	22.80	4.25	4.67	5.05	9.00	10.00	10.50
490	40	25.20	4.27	4.69	5.07	9.00	10.00	10.50
516	26	26.40	4.28	4.70	5.08	9.00	10.00	10.50
556	40	28.50	4.29	4.71	5.09	9.00	10.00	10.50
596	40	30.80	4.32	4.73	5.11	9.00	10.00	10.50
636	40	33.80	4.36	4.78	5.16	9.00	10.00	10.50
676	40	36.80	4.42	4.84	5.23	9.00	10.00	10.50
716	40	38.60	4.43	4.84	5.23	9.00	10.00	10.50
756	40	40.70	4.45	4.84	5.23	9.00	10.00	10.50
800	44	42.50	4.47	4.84	5.23	9.00	10.00	10.50
850	50	45.00	4.49	4.84	5.23	9.00	10.00	10.50
900	50	48.00	4.55	4.97	5.37	9.00	10.00	10.50

Tableau 14 : Caractéristiques Hs/Tp de la houle le long de la conduite – Houle PR 10 ans / 20 ans/ 50ans – N215° - Niveau d'eau +0.90m NGF.

Le tableau ci-dessous présente le code couleur utilisé précédemment :

Entre à et -8m	Conduite en acier protégée par un sarcophage en béton
Entre -8m et -11 m	Conduite acier posée sur berceau béton
Entre -11 m et -12m	Conduite acier posée sur le fond et lestée par pyramides en béton
Entre -12m et -13m	Conduite PVC posée sur le fond et lestée par pyramides en béton
Entre -13m et -26m	Conduite PVC lestée par buse béton. Conduite partiellement à totalement ensouillée
Entre -26m et -48m	Conduite PVC posée sur des plots béton et maintenue par des demi-colliers acier.

Comme mentionné précédemment, on considérera de manière conservative que la houle arrive sur la conduite avec un angle d'incidence de 45°.

4.2.2 Vérification de la stabilité externe de la conduite

La vérification de la stabilité externe de la conduite permet de préciser le poids minimum à respecter afin d'assurer sa stabilité pour les conditions hydrodynamiques de projet et selon la nature du fond. Le poids minimum à respecter est comparé au poids apparent de l'émissaire : si celui-ci est inférieur, la conduite nécessite alors l'ajout d'un lestage stabilisateur permettant d'atteindre le poids minimum.

La stabilité a été vérifiée à partir de la somme des forces s'appliquant sur l'émissaire. Les forces hydrodynamiques sont calculées à partir des équations de Morison.

$$\text{Effort vertical : } F_V = F_L = \frac{1}{2} C_L D \rho_e u(t)^2$$

Effort horizontal :

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_e C_D D u(t)^2$$

$$F_M = \rho_e C_M \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{du(t)}{dt} \right)$$

$$F_{HR} = \sqrt{F_D^2 + F_M^2}$$

Avec :

ρ_e : masse volumique de l'eau de mer (1026kg/m³)

D : diamètre de la conduite

C_D : coefficient de trainée

C_M : coefficient d'inertie

C_L : coefficient de portance

$u(t)$ = vitesse orbitale d'écoulement horizontale perpendiculaire à l'émissaire (m/s)

$du(t)/dt$: accélération orbitale perpendiculaire à l'émissaire (m/s²)

Les coefficients hydrodynamiques varient en fonction de la distance de la conduite par rapport au fond marin, du nombre de Keulegan & Carpenter et/ou du nombre de Reynolds.

Nombre de Keulegan & Carpenter : $KC = \frac{U_{max} T_p}{D}$

Nombre de Reynolds : $R_e = \frac{U_{max} D}{\nu}$

Avec :

U_{max} : vitesse orbitale maximale de la houle perpendiculaire à l'axe de la conduite

T_p : période pic de la houle (T_p)

D : diamètre de la conduite (D)

ν : viscosité cinématique de l'eau de mer ($\nu \sim 10^{-6}$ m²/s)

De manière conservatrice les calculs ont été réalisés pour une conduite lisse posée sur le fond.

La stabilité externe stricte de la conduite au glissement est vérifiée si :

$$P_{app} > R$$

$$R = F_v + \frac{F_{HR} * C_x}{\mu}$$

Avec

P_{app} : poids apparent de la conduite

R : résultante de l'ensemble des forces hydrodynamiques projetée suivant l'axe normal à la conduite

F_v : effort vertical

F_{HR} : effort horizontal

C_x : coefficient de sécurité pris égale à 1.1

μ : coefficient de frottement sur le fond pris égale à 0.2 (conduite circulaire posée sur fond sableux)

4.2.2.1 Calcul de la vitesse et de l'accélération orbitale de la houle

Les courants de houle ont été estimés à partir des vitesses orbitales de la houle. Les vitesses orbitales de la houle, projetées sur la normale à l'émissaire sont obtenues à partir de l'équation suivante :

$$U = \vec{U} \cdot \vec{n} = \frac{\pi H_s c h \left(\frac{2\pi}{L} (h - z_0) \right)}{T_p s h \left(\frac{2\pi}{L} h \right)} \sin \theta$$

Avec :

- U : vitesse orbitale de la houle projetée
- L : longueur d'onde de la houle à la profondeur minimale sur la section
- T_p : période pic de la houle
- h : hauteur d'eau ($h > 0$)
- Z_0 = profondeur de calcul (dans notre cas, au niveau du fond marin)
- θ : angle d'incidence de la houle par rapport à l'émissaire
- Hypothèse de calcul : calculs réalisés au H_s

Sur chaque tronçon de conduite considéré, les calculs de la vitesse et de l'accélération orbitale de la houle sont effectués à la profondeur la plus faible et pour la hauteur H_s de houle la plus élevé.

Les valeurs des vitesses et accélérations orbitales obtenues sont reportées dans le tableau suivant :

PM en ml	Longueur section (m)	Vitesse orbitale projetée suivant l'axe normal à la conduite (m/s)			Accélération orbitale projetée suivant l'axe normal à la conduite (m/s ²)		
		10 ans	20 ans	50 ans	10 ans	20 ans	50 ans
0		1.57	1.68	1.72	1.09	1.06	1.03
56	56	2.29	2.49	2.61	1.60	1.57	1.56
80	80	1.65	1.85	1.98	1.15	1.16	1.18
115	35	1.39	1.60	1.75	0.97	1.01	1.05
116	1	1.12	1.31	1.43	0.78	0.82	0.86
174	58	1.05	1.23	1.35	0.73	0.77	0.81
214	40	0.99	1.17	1.29	0.69	0.73	0.77
254	40	0.99	1.17	1.29	0.69	0.73	0.77
300	46	0.96	1.13	1.25	0.67	0.71	0.75
340	40	0.90	1.06	1.18	0.63	0.67	0.70
375	35	0.82	0.97	1.08	0.57	0.61	0.65
415	40	0.78	0.93	1.03	0.54	0.58	0.62
450	35	0.69	0.84	0.93	0.48	0.52	0.56
490	40	0.61	0.75	0.84	0.43	0.47	0.51
516	26	0.55	0.68	0.77	0.38	0.43	0.46
556	40	0.52	0.65	0.74	0.36	0.41	0.44
596	40	0.47	0.60	0.69	0.33	0.38	0.41
636	40	0.43	0.56	0.64	0.30	0.35	0.38
676	40	0.38	0.50	0.58	0.26	0.32	0.35
716	40	0.33	0.41	0.45	0.23	0.26	0.27
756	40	0.31	0.39	0.42	0.21	0.24	0.25
800	44	0.28	0.36	0.39	0.19	0.23	0.24
850	50	0.26	0.34	0.37	0.18	0.21	0.22
900	50	0.23	0.34	0.41	0.16	0.21	0.24

Tableau 15 : Vitesses et accélérations orbitales de la houle, projetées suivant l'axe normal à la conduite.

4.2.2.2 Coefficients hydrodynamiques appliqués sur la conduite

Coefficient de trainée :

Selon, SRAPKAYA & RAJABI 1979 [3], lorsque le nombre de Reynolds vérifie $0.5 \cdot 10^5 < Re < 3.6 \cdot 10^5$ et le nombre de Keulegan & Carpenter $10 \leq Kc \leq 60$, le coefficient de trainée est compris entre 1.0 et 1.5 pour une conduite lisse.

Coefficient de portance :

Dans la théorie des fluides parfaits, lorsque la conduite est posée sur le fond, l'écoulement doit contourner le cylindre, induisant une portance répulsive. Le coefficient de portance dans le cas d'un $0 \leq Kc \leq 60$, est compris entre 4.0 et 4.6 pour une conduite lisse.

Néanmoins, d'après le guide pratique sur les ouvrages en mer [4], on s'est rendu compte qu'adopter des valeurs de cet ordre en écoulement mixte (houle+courant) conduit à surestimer les efforts hydrodynamiques et par la suite à surdimensionner les revêtements de conduite pour les alourdir. Aussi trouve-t-on dans certaines procédures recommandées pour le calcul de stabilité des conduites un coefficient hydrodynamique plus faible $C_L=0.9$ par exemple.

Par ailleurs d'après l'ouvrage de référence [4], les calculs de stabilité mettent en jeu plusieurs paramètres : conditions de houle, longueur de la conduite sur laquelle les efforts de houle sont en phase (problème lié à son caractère tridimensionnel) qui permettent de compenser les éventuelles erreurs commises dans l'estimation des efforts.

Dans l'étude de stabilité de la conduite seule, un coefficient $C_L=0.9$ a donc été retenu.

Coefficient d'inertie :

La même observation est faite sur le coefficient de masse ajouté, néanmoins en l'absence d'exemple pris sur ce coefficient dans le cadre de dimensionnement de structure pipeline en mer, la valeur considérée sera celle de la théorie des potentiels soit $C_M=3.29$ qui reste conservative.

Dans le tableau ci-dessous sont reportés les coefficients hydrodynamiques retenus dans le cadre de l'étude de la stabilité de l'émissaire posé sur le fond.

C_D	C_M	C_L
1.5	3.29	0.9

Tableau 16 : Coefficients hydrodynamiques retenus pour les calculs de stabilité pour une conduite non lestée

La section de conduite posée sur le berceau béton, entre -8m et -11m peut être considérée enfoncée du tiers de son diamètre dans le berceau. Lorsqu'une conduite de diamètre D est partiellement ensouillée d'une profondeur d, les coefficients hydrodynamiques peuvent être, selon les travaux de Jacobsen et al, approximés comme suit (rapport entre le nouveau coefficient et le coefficient initial pourvu de l'indice 0) :

$$C_L/C_{L0} = 1.0 + 1.0 \left(\frac{d}{D}\right) \quad \text{Pour } 0.0 \leq d/D \leq 0.1$$

$$C_L/C_{L0} = 1.1 - 1.0 \left(\frac{d}{D}\right) \quad \text{Pour } 0.1 \leq d/D \leq 1.0$$

Sur cette section où l'on regarde la stabilité de la conduite au soulèvement, le coefficient hydrodynamique de portance sera pris égale à 0.69.

4.2.2.3 Coefficients de frottement et de sécurité appliqués

Le tableau ci-dessous rassemble les coefficients de frottement et de sécurité retenu dans le cadre de l'étude.

Type de sol	Coefficient de frottement associé	Coefficient de sécurité C_x
Conduite circulaire posée sur un fond sableux	0.3*	1.1

Tableau 17 : Coefficients de frottement et de sécurité retenus.

*Un coefficient de 0.3 est retenu de manière conservative sans prise en compte de la présence d'herbier par exemple.

4.2.2.4 Vérification de la stabilité de la conduite existante

Dans le tableau suivant sont reportés les caractéristiques retenues de la conduite existante :

Entre à et -8m	Conduite en acier protégée par un sarcophage en béton
Entre -8m et -11 m	<p>Conduite acier posé sur berceau béton. Diamètre extérieure de la conduite $\Phi=250\text{mm}$ Épaisseur de la conduite : 6mm Masse volumique du matériaux acier : 7 800 kg/m³ Pourcentage d'air dans la conduite 5% Masse volumique de l'air : 1 kg/m³ Conduite remplie à 95% d'eau douce. Masse volumique de l'eau douce : 1 000 kg/m³ Masse volumique de l'eau de mer : 1 026 kg/m³</p> <p>Poids apparent de la conduite immergée remplie d'eau : 272.4 N/ml</p>
Entre -11m et -12m	<p>Conduite acier posée sur le fond et lestée par lest béton pyramidale.</p> <p>Poids apparent de la conduite immergée remplie d'eau : 272.4 N/ml</p>
Entre -12m et -13m	<p>Conduite PVC posée sur le fond et lestée par lests béton pyramidales. Diamètre extérieure de la conduite $\Phi=250\text{mm}$ Épaisseur de la conduite : 10mm Masse volumique du matériaux PVC : 1 450 kg/m³ Pourcentage d'air dans la conduite 5% Masse volumique de l'air : 1 kg/m³ Conduite remplie à 95% d'eau douce. Masse volumique de l'eau douce : 1 000 kg/m³ Masse volumique de l'eau de mer : 1 026 kg/m³</p> <p>Poids apparent de la conduite immergée remplie d'eau : 0.4 N/ml</p>
Entre -13m et -26m	<p>Conduite PVC lestée par buse béton. Conduite partiellement à totalement ensouillée</p> <p>Poids apparent de la conduite immergée remplie d'eau : 0.4 N/ml</p>
Entre -26m et -48m	<p>Conduite PVC posée sur des plots béton reliés par des demi-colliers acier.</p> <p>Poids apparent de la conduite immergée remplie d'eau : 0.4 N/ml</p>

Tableau 18 : caractéristiques de la conduites existantes

Dans le tableau suivant sont reportées les caractéristiques du lestage existant de la conduite retenues :

Entre à et -8m Sarcophage en béton	Conduite non soumise à la houle.
Entre -8m et -11m Conduite acier posé sur berceau béton	Pas de lestage existant considéré dans les calculs.
Entre -11m et -12m Conduite acier posée sur le fond	Pas de lestage existant considéré dans les calculs (informations manquantes)
Entre -12m et -13m Conduite PVC posée sur le fond	Pas de lestage existant considéré dans les calculs (informations manquantes)
Entre -13m et -26m Conduite PVC considérée non ensouillée.	Lestage continu par une buse béton. Diamètre extérieur de la conduite $\Phi=400\text{mm}$ Épaisseur de la conduite : 70mm Masse volumique du matériaux béton : 2 200 kg/m ³
Entre -26m et -48m Conduite PVC posée sur des plots béton reliés par des demi-colliers acier.	Pas de lestage existant considéré dans les calculs (trop d'informations manquantes)

Tableau 19 : Caractéristiques du lestage retenu sur la conduite existante : hypothèses de calculs

Dans les tableaux ci-dessous sont reportés :

- Le bilan des efforts hydrodynamiques s'exerçant sur la conduite pour les périodes de retour PR de houle 10 ans/ 20 ans/ 50ans secteur Sud-Ouest : tableau 20
- L'excédent ou le déficit stabilisateur sur la section de conduite considérée : tableau 21

PM en ml	Longueur section (m)	Diamètre de conduite considérée (m)	Application trainée (m)	Application inertie (m2)	Application portance (m)	Force de trainée (N/ml)			Force d'inertie (N/ml)			Force horizontale (N/ml)			Force de portance (N/ml)			Projection des forces hydrodynamiques selon la normale à la conduite (prise en compte d'un frottement)			
						Houle PR 10 ans	Houle PR 20 ans	Houle PR 50 ans	Houle PR 10 ans	Houle PR 20 ans	Houle PR 50 ans	Houle PR 10 ans	Houle PR 20 ans	Houle PR 50 ans	Houle PR 10 ans	Houle PR 20 ans	Houle PR 50 ans	Houle PR 10 ans	Houle PR 20 ans	Houle PR 50 ans	
0																					
56	56					Conduite protégée par le sarcophage béton															
85	29																				
115	30	0.25	0.25	0.05	0.25	372	495	592	161	167	174	406	523	617	171	228	272	Non calculé			
116	1	0.25	0.25	0.05	0.25	240	328	396	129	136	142	273	355	420	144	197	237	1 643	2 148	2 549	
174	58	0.25	0.25	0.05	0.25	210	289	351	121	128	134	243	316	376	126	173	211	1 462	1 910	2 278	
214	40	0.40	0.40	0.13	0.40	303	418	511	294	311	327	422	521	606	182	251	306	2 500	3 118	3 641	
254	40	0.40	0.40	0.13	0.40	303	419	513	294	311	328	422	522	608	182	251	308	2 506	3 121	3 654	
300	46	0.40	0.40	0.13	0.40	285	393	482	285	301	318	403	495	577	171	236	289	2 388	2 957	3 462	
340	40	0.40	0.40	0.13	0.40	249	345	425	266	282	298	364	446	519	149	207	255	2 153	2 660	3 112	
375	35	0.40	0.40	0.13	0.40	205	289	358	242	258	274	317	388	451	123	174	215	1 867	2 308	2 696	
415	40	0.40	0.40	0.13	0.40	187	266	329	231	248	263	297	363	421	112	160	198	1 748	2 158	2 515	
450	35	0.40	0.40	0.13	0.40	147	215	269	205	223	237	252	309	358	88	129	161	1 477	1 830	2 132	
490	40	0.40	0.40	0.13	0.40	116	174	220	181	200	214	215	265	307	69	104	132	1 253	1 562	1 821	
516	26	0.40	0.40	0.13	0.40	92	143	184	162	182	196	187	232	269	55	86	110	1 083	1 360	1 588	
556	40	0.25	0.25	0.05	0.25	52	82	105	60	68	73	79	106	128	31	49	63	468	634	769	
596	40	0.25	0.25	0.05	0.25	43	70	91	55	63	68	70	94	114	26	42	55	410	559	681	
636	40	0.25	0.25	0.05	0.25	36	60	79	50	58	64	61	83	101	21	36	47	358	495	605	
676	40	0.25	0.25	0.05	0.25	28	49	66	44	52	58	52	72	87	17	29	39	302	423	520	
716	40	0.25	0.25	0.05	0.25	21	33	38	38	43	44	44	54	58	13	20	23	253	316	345	
756	40	0.25	0.25	0.05	0.25	18	29	34	35	40	42	40	50	54	11	17	21	229	290	318	
800	44	0.25	0.25	0.05	0.25	15	25	30	32	37	39	36	45	49	9	15	18	204	262	288	
850	50	0.25	0.25	0.05	0.25	13	22	27	30	35	37	32	41	46	8	13	16	186	241	267	
873	23	0.25	0.25	0.05	0.25	10	22	32	27	35	41	29	42	52	6	13	19	164	243	304	

Tableau 20 : Efforts hydrodynamiques s'exerçant sur la conduite

PM en ml	Longueur section (m)	Hauteur d'eau (y compris niveau d'eau à +0.9m NGF)	Poids apparent conduite remplie d'eau	Poids apparent du lestage	Poids apparent conduite + lestage	Projection des forces hydrodynamiques selon la normale à la conduite (prise en compte d'un frottement) (N/ml)			Déficit et excédant stabilisateur de la conduite (N/ml)		
						Houle PR 10 ans	Houle PR 20 ans	Houle PR 50 ans	Houle PR 10 ans	Houle PR 20 ans	Houle PR 50 ans
0											
56	56								Conduite protégée par le sarcophage béton		
85	29										
115	30	11	272.4	0.0	272.4	-171	-228	-272	101	45	0
116	1	12	272.4	0.0	272.4	1 643	2 148	2 549	-1 371	-1 876	-2 276
174	58	13	0.4	0.0	0.4	1 462	1 910	2 278	-1 461	-1 910	-2 278
214	40	13.4	0.4	835.8	836.2	2 500	3 118	3 641	-1 664	-2 282	-2 805
254	40	13.9	0.4	835.8	836.2	2 506	3 121	3 654	-1 669	-2 285	-2 817
300	46	15.1	0.4	835.8	836.2	2 388	2 957	3 462	-1 551	-2 121	-2 626
340	40	16.8	0.4	835.8	836.2	2 153	2 660	3 112	-1 317	-1 824	-2 276
375	35	17.7	0.4	835.8	836.2	1 867	2 308	2 696	-1 031	-1 472	-1 860
415	40	20.2	0.4	835.8	836.2	1 748	2 158	2 515	-912	-1 322	-1 679
450	35	22.8	0.4	835.8	836.2	1 477	1 830	2 132	-641	-994	-1 295
490	40	25.2	0.4	835.8	836.2	1 253	1 562	1 821	-416	-726	-985
516	26	26.4	0.4	835.8	836.2	1 083	1 360	1 588	-247	-524	-752
556	40	28.5	0.4	0.0	0.4	468	634	769	-468	-633	-769
596	40	30.8	0.4	0.0	0.4	410	559	681	-409	-559	-680
636	40	33.8	0.4	0.0	0.4	358	495	605	-358	-494	-604
676	40	36.8	0.4	0.0	0.4	302	423	520	-301	-423	-520
716	40	38.6	0.4	0.0	0.4	253	316	345	-252	-315	-344
756	40	40.7	0.4	0.0	0.4	229	290	318	-229	-289	-317
800	44	42.5	0.4	0.0	0.4	204	262	288	-204	-261	-288
850	50	45	0.4	0.0	0.4	186	241	267	-185	-240	-266
873	23	48	0.4	0.0	0.4	164	243	304	-164	-243	-304

Tableau 21 : Vérification de la stabilité de la conduite : excédent ou déficit stabilisateur observé sur la section de conduite.

Sur la base des caractéristiques de houle obtenues le long de la conduite pour des houles de PR 10 ans/ 20ans / 50 ans et selon les hypothèses de calculs retenues, on observe que la conduite existante ne serait pas stabilisée pour les houles de PR 10ans/20 ans/50 ans de secteur Sud-Ouest (N215°) à partir de la profondeur -1.1 m (en sortie de sarcophage) et nécessite donc un lestage stabilisateur additionnel :

PM en ml	Longueur section (m)	Hauteur d'eau (y compris niveau d'eau à +0.9m NGF)	La conduite existante est-elle stabilisée?		
			Houle PR 10 ans	Houle PR 20 ans	Houle PR 50 ans
0	0				
56	56		Conduite protégée par le sarcophage béton		
85	29				
115	30	11	OUI	OUI	OUI
116	1	12	NON	NON	NON
174	58	13	NON	NON	NON
214	40	13.4	NON	NON	NON
254	40	13.9	NON	NON	NON
300	46	15.1	NON	NON	NON
340	40	16.8	NON	NON	NON
375	35	17.7	NON	NON	NON
415	40	20.2	NON	NON	NON
450	35	22.8	NON	NON	NON
490	40	25.2	NON	NON	NON
516	26	26.4	NON	NON	NON
556	40	28.5	NON	NON	NON
596	40	30.8	NON	NON	NON
636	40	33.8	NON	NON	NON
676	40	36.8	NON	NON	NON
716	40	38.6	NON	NON	NON
756	40	40.7	NON	NON	NON
800	44	42.5	NON	NON	NON
850	50	45	NON	NON	NON
Exutoire	23	48	NON	NON	NON

Tableau 22 : Récapitulatif sur la stabilité de la conduite existante

Dans le tableau ci-dessous est reporté le poids de lestage complémentaire à réaliser pour stabiliser la conduite pour les houles de PR 10 ans/ 20 ans/ 50 ans.

Période de retour de la houle	Effort déstabilisateur à reprendre par le lestage complémentaire (N/ml)		
	10 ans	20 ans	50 ans
Entre 0 et -8m	0	0	0
Entre -8m et -11m	0	0	0
Entre -11m et -12m	1 371	1 876	2 276
Entre -12m et -13m	1 461	1 910	2 278
Entre -13m et -15m	1 664	2 282	2 805
Entre -15m et -20m	1 551	2 121	2 626
Entre -20m et -26m	912	1 322	1 679
Entre -26m et -30m	247	524	752
Entre -30m et -34m	409	559	680
Entre -34m et -40m	358	494	604
Entre -40m et -48m	229	289	317

Tableau 23 : Efforts déstabilisateur à reprendre par le lestage complémentaire (N/ml) selon la PR de houle retenue.

5 DEFINITION DU DISPOSITIF STABILISATEUR

5.1 DESCRIPTIF

Afin d'assurer la stabilité de la conduite existante, il est proposé d'ajouter un dispositif stabilisateur compensant le déficit de lestage par ancrage en plusieurs points répartis sur l'ensemble du linéaire.

Un point d'ancrage est constitué d'une bride (demi-collier ou collier complet) maintenant la conduite par l'intermédiaire de 2 ancres à vis fichées de part et d'autre dans le fond marin.

La nature des ancres varie selon la nature du fond :

- Ancres à vis à 1 ou 2 plateaux (type Ellipse I ou II) sur fond exclusivement sableux ;
- Ancres à spirale (type Harmony) sur fond sableux recouvert d'herbiers protégés (posidonies).

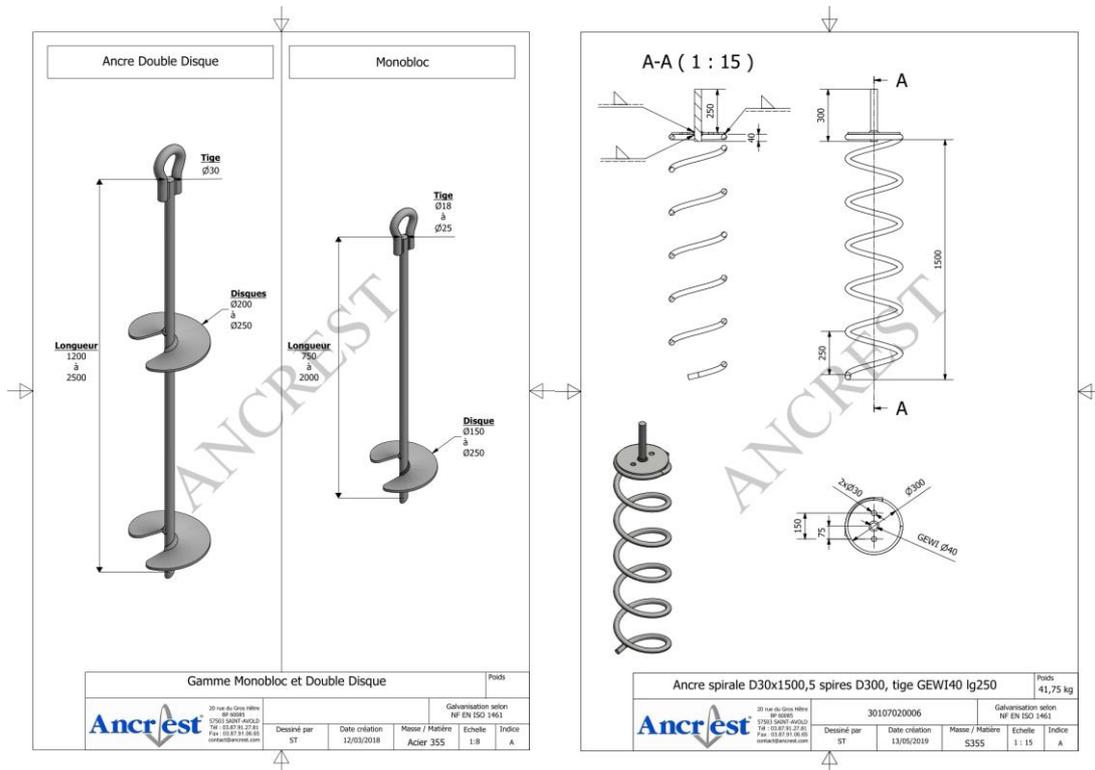


Figure 8 : Ancre à vis à 1 ou 2 plateaux (à gauche) et ancre à spirale (à droite) - source : ANCREST

Le linéaire de conduite étant divisé en segments de longueur variable aux caractéristiques spécifiques (nature de l'existant, profondeur d'implantation, efforts hydrodynamiques associés aux conditions dimensionnantes de projet...), le nombre et la répartition des points d'ancrage sur chaque segment sont déterminés en fonction des efforts hydrodynamiques verticaux et horizontaux qui lui sont associés.

5.2 HYPOTHESES

Les conditions dimensionnantes retenues sont de période de retour (PR) 50 ans.

Dans un fond sableux, la capacité de résistance à la traction d'une ancre à vis (1 ou 2 disques) ou d'une ancre à spirale est donnée de l'ordre de 1 tonne, soit 10 kN environ (tenue minimum à l'arrachement).

En prenant un coefficient de sécurité de 3 justifié par une capacité mécanique du sol variable et par l'incertitude sur la valeur de service exacte à considérer pour la tenue minimum, on admet donc

raisonnablement que chaque point d'ancrage (constitué de 2 ancrés) présente une capacité maximale de reprise de l'effort vertical de $2 \times 10 / 3 = 6.7$ kN.

On considère que la tige des ancrés est en acier S355 de limite élastique $Re = 355$ MPa et que son diamètre minimum est $\varnothing 25$ mm.

5.3 CALCUL DU NOMBRE DE POINTS D'ANCRAGE ET REPARTITION

PM (fin de segment)	Longueur segment (m)	Fx (N/ml)	Fz (N/ml)	Nature du fond	Fx total sur le segment (kN)	Fz total sur le segment (kN)	Rapport Fz/capacité de reprise	Nombre de points d'ancrage	Nombre d'ancres à 1 ou 2 plateaux	Nombre d'ancres à spirale	Distance entre 2 ancrages (m)	Effort horizontal repris par ancre (kN)	
56	56	Conduite dans sarcophage béton											
85	85	Conduite dans sarcophage béton											
115	30	Conduite sur berceau béton											
116	1	420	237	sable	0.4	0.2	0.04	1	2	-	NA	0.2	
174	58	376	211	Alternance posidonie et sable	21.8	12.2	1.83	2	-	4	29	5.5	
214	40	606	306		24.3	12.3	1.84	2	-	4	20	6.1	
254	40	608	308		24.3	12.3	1.85	2	-	4	20	6.1	
300	46	577	289		26.5	13.3	1.99	2	-	4	23	6.6	
340	40	519	255		20.8	10.2	1.53	2	-	4	20	5.2	
375	35	451	215		15.8	7.5	1.13	2	-	4	18	3.9	
415	40	421	198		16.9	7.9	1.19	2	-	4	20	4.2	
450	35	358	161	posidonie	12.5	5.6	0.85	1	-	2	35	6.3	
490	40	307	132		12.3	5.3	0.79	1	-	2	40	6.1	
516	26	269	110		7.0	2.9	0.43	1	-	2	26	3.5	
556	40	128	63		5.1	2.5	0.38	1	-	2	40	2.6	
596	40	114	55		4.6	2.2	0.33	1	-	2	40	2.3	
636	40	101	47		4.1	1.9	0.28	1	-	2	40	2.0	
676	40	87	39		3.5	1.6	0.24	1	2	-	40	1.7	
716	40	58	23	sable	2.3	0.9	0.14	1	2	-	40	1.2	
756	40	54	21		2.2	0.8	0.12	1	2	-	40	1.1	
800	44	49	18		2.2	0.8	0.12	1	2	-	44	1.1	
850	50	46	16		2.3	0.8	0.12	1	2	-	50	1.1	
900	50	52	19		2.6	1.0	0.14	1	2	-	50	1.3	
									27	14	40	29	6.6
									(total)	(total)	(total)	(dist. moy.)	(cisaillement max)

Vérification au cisaillement

Limite élastique acier S355	Re =	355 MPa
Résistance au cisaillement	Reg = 0.75 x Re =	266 MPa
Diamètre tige ancre	Ø =	0.025 m
Section tige ancre	S =	0.0005 m ²
Résistance d'une tige d'ancre au cisaillement	τ max =	131 kN
Cisaillement max à reprendre	τ =	6.6 kN

La résistance au cisaillement est vérifiée avec un coef de sécurité de **20**

Commentaire

Au total sur l'ensemble du linéaire (hors berceau et sarcophage béton), 27 points d'ancrages seront donc nécessaires vis-à-vis de la stabilité aux conditions dimensionnantes de PR 50 ans, auxquels il faudra ajouter :

- 2 points d'ancrages en amont et en aval de la réparation (voir travaux type 2)
- 1 point d'ancrage en amont du nouvel exutoire (voir travaux de type 4).

Il y aura donc en tout et pour tout 30 points d'ancrage (60 ancrés).

6 PROTECTION CATHODIQUE DE LA CONDUITE

L'inspection de la conduite réalisée en 2019 [1], fait apparaître sur la partie conduite en acier des anodes sacrificielles qui travaillent très peu ou bien pas du tout.

La longueur approximative de conduite acier non protégée par le sarcophage béton est de l'ordre de 30 à 32m.

6.1 ETAT DES REGLES DE L'ART

6.1.1 Etat des normes

A ce jour, ci-dessous les principales normes en vigueur qui concernent la protection cathodique dans le cadre d'une structure en acier dans un environnement marin :

- NF EN ISO 9223 Mars 2012 : *Corrosivité des atmosphères : Classification, détermination et estimation*
- NF EN 12473 Mars 2014 : *Principe généraux de la protection cathodique en eau de mer*
- NF EN 12495 Mai 2000 : *Protection cathodique des structures en acier fixes en mer*
- NF EN 12496 Août 2013 : *Anodes galvaniques pour la protection cathodique dans l'eau de mer et les boues salines*
- NF EN 13173 Avril 2001 : *Protection cathodique des structures en acier flottant en mer*
- NF EN ISO 13174 Mai 2013 : *Protection cathodique des installations portuaires*
- DNV-RP-B401 Octobre 2010: *Cathodic Protection Design*

Il convient également de citer l'Eurocode 3 : *Calcul des structures en acier* (norme NF EN 1993-1-6) et en particulier, il convient de s'intéresser aux chapitres suivants :

- NF EN 1993-5 Août 2007 : *Calcul des structures en acier : Partie 5 : Pieux et palplanches*
- NF EN 1993-1-4 Février 2007 : *Calcul des structures en acier Partie 1-4 : Règles générales – Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables*
- NF EN 1993-1-10 Décembre 2005 : *Calcul des structures en acier Partie 1-10 : Choix des qualités d'acier*

6.1.2 Principes généraux de la protection cathodique

Conformément à la définition de la norme NF EN 12473, la protection cathodique correspond à l'abaissement du potentiel de corrosion par application d'un courant.

En principe, la protection cathodique peut être utilisée dans un large nombre de cas où un métal est immergé dans une solution aqueuse d'un électrolyte qui peut aller d'une eau relativement pure, de l'eau saumâtre ou de l'eau de mer à des sols et même des solutions acides.

Il convient de souligner qu'il s'agit d'une méthode électrochimique et que la structure à protéger ainsi que l'anode utilisée pour la protection doivent être en contact métallique et électrolytique.

Les formes de corrosion qui peuvent être maîtrisées par la protection cathodique incluent toutes les formes de corrosion générale, de piqûration, de corrosion sélective, de corrosion cavernueuse, de fissuration favorisée par l'environnement, de corrosion cavitation et de corrosion bactérienne.

On distingue deux grands types de protection cathodiques :

- les systèmes par anodes galvaniques dans lesquels le courant de protection provient d'un métal dont le potentiel de corrosion est plus électronégatif que celui de la pièce à protéger (c'est-à-dire les alliages d'aluminium, de zinc ou de magnésium pour l'acier, et le fer pour le cuivre et les alliages de cuivre) ;
- les systèmes à courant imposé où le courant continu (généralement produit à partir de courant alternatif par un transformateur redresseur) est utilisé en association avec des anodes relativement inertes comme le graphite, de fines couches de platine ou d'oxydes métalliques mixtes activés, déposés sur des métaux, tels que le titane ou le niobium, des alliages de plomb, le ferro-silicium, etc. ; dans certains cas, une anode consommable, constituée de ferraille ou d'acier, est utilisée.

La protection cathodique choisie correspond à une protection par anode sacrificielle ou protection galvanique.

6.2 DIMENSIONNEMENT DE LA PROTECTION GALVANIQUE

Conformément à la norme NF EN 13 174 et dans des conditions traditionnelles, la conception d'une protection galvanique doit être réalisée pour assurer une mise au potentielle des structures acier plus électronégative que - 0.80 V.

Pour cela, il convient de vérifier les éléments suivants :

- La densité du courant initiale doit être suffisante pour obtenir la polarisation initiale de l'ouvrage
- La densité de courant de maintien doit permettre de maintenir le niveau de polarisation de l'ouvrage
- La densité de courant finale permette une éventuelle repolarisation de l'ouvrage suite à une tempête sévère ou à des opérations de nettoyage.

La densité de courant de maintien est utilisé pour calculer la masse minimale du matériau des anodes galvaniques nécessaire pour assurer la protection cathodique pendant toute la durée de vie prévue de l'ouvrage.

Les valeurs de la densité de courant initiale ou finale déterminent le débit de courant maximal du système de protection cathodique et donc le nombre et la forme des anodes..

Hypothèses de calcul retenues

Conformément aux normes DNV RPB 401 et NF EN 13174, les hypothèses suivantes sont retenues pour les notes de calcul de justification de la protection galvanique.

Conformément à l'article 5.2 de la norme NF EN 13174, le critère adopté pour la protection cathodique de l'acier dans l'eau de mer aérée correspond à un potentiel polarisé plus négativement que -0,80V mesuré par rapport à l'électrode de référence Argent/Chlorure d'Argent/eau de mer.

- Potentiel minimum de **-0,80 V** par rapport à l'électrode de référence Ag/AgCl / eau de mer

En ce qui concerne les valeurs de densité de courant à retenir, elles sont basées sur le tableau A.1 de la norme NF EN 13174 :

Tableau A.1 — Valeurs typiques des densités de courant de conception pour la protection de l'acier nu en eau de mer

Situation	Densités du courant (mA/m ²)					
	Valeur initiale		Valeur de maintenance		Valeur de repolarisation	
	dans les eaux peu aérées	dans les eaux bien aérées	dans les eaux peu aérées	dans les eaux bien aérées	dans les eaux peu aérées	dans les eaux bien aérées
Conditions avec vitesse de marée inférieure à 0,5 m/s	80 à 100	120 à 150	50 à 65	65 à 80	60 à 80	80 à 100
Conditions avec vitesse de marée supérieure à 0,5 m/s	120 à 150	170 à 200	60 à 80	80 à 100	80 à 100	100 à 130
Conditions avec corrosion de type ALWC ou MIC constatée	170 à 200		60 à 100		80 à 130	

Tableau 24 : Valeurs typiques des densités de courant de conception pour la protection de l'acier nu en eau de mer

On retient la valeur la plus pénalisante des tableaux ci avant.

En ce qui concerne la résistivité de l'eau de mer, nous retenons la valeur du paragraphe B.3 de la norme :

- La mer méditerranée est une mer chaude, nous retenons donc une résistivité de **0,25 Ω.m**
-

Les valeurs typiques de résistivité suivantes sont données à titre indicatif:

— eau de mer froide:	0,30 Ω·m à 0,35 Ω·m	(30 Ω·cm à 35 Ω·cm)
— eau de mer chaude:	0,15 Ω·m à 0,25 Ω·m	(15 Ω·cm à 25 Ω·cm)
— boues marines:	0,70 Ω·m à 1,70 Ω·m	(70 Ω·cm à 170 Ω·cm)
— eau douce de rivière:	3,00 Ω·m à 30,00 Ω·m	(300 Ω·cm à 3 000 Ω·cm)

Figure 9 : Extrait annexe B de la norme NF EN 13 174

En ce qui concerne la durée de vie de la protection, nous retiendrons la valeur **de 15 ans**.

En ce qui concerne la valeur de la consommation massique pratique de l'anode pour les anodes en aluminium, il convient de noter que les valeurs diffèrent fortement entre la norme DNV-RP-B401 et les valeurs indiquées par les fournisseurs°:

- DNV : 2000 A.h/kg
- Fournisseurs : 2300 à 2700 A.h/kg

Ces valeurs conduisent à une différence importante sur la quantité d'aluminium à mettre en œuvre.

La norme DNV-RP-B401 met d'ailleurs en garde sur des valeurs trop élevées de la valeur de consommation massique de l'anode dans son paragraphe 6.5.2.

6.5.2 The design values for electrochemical capacity, ε (Ah/kg), in Table 10-6 of Annex A shall be used for design unless otherwise specified by Owner. The data are applicable for ambient temperature seawater (i.e. up to 30°C as a yearly mean value).

Guidance note:

It is DNV's strong recommendation that the inherent conservatism of using the default values in Table 10-6 shall be utilised for design, also if an anode manufacturer claims that his product is capable to achieve a higher performance. Data on anode electrochemical efficiency from short-term laboratory examinations of galvanic anode materials will typically result in values close to the theoretical limit (e.g. $\geq 2,500$ Ah/kg for Al-Zn-In material). This is due to the relatively high anodic current densities that are utilized for testing. Such data shall not replace the recommended design values for electrochemical capacity. Even long term testing according to Annex C will tend to result in slightly non-conservative values as the testing time is still relatively short and the anodic current density relatively high compared to the working conditions for real anodes. When using anode manufacturer's testing data for design, it should further be ensured that the composition of alloying and impurity elements of the material tested and the casting conditions are representative for normal, and preferably also "worst case" production (see 12.2.2 of Annex C).

---e-n-d---of---G-u-i-d-a-n-c-e---n-o-t-e---

Figure 10 : Extrait de la norme DNV-RP-B401

Dans le dimensionnement mené, nous effectuerons donc un calcul pour la **valeur préconisée par la norme DNV** soit **2 000 A.h/kg**.

Enfin, nous avons retenu le principe d'anodes déportés et retenons également le facteur d'utilisation de **0,9**.

Sur la base des hypothèses décrites ci-avant, nous avons réalisé le dimensionnement d'une protection cathodique nécessaire pour la conduite acier (hors sarcophage).

Diamètre extérieur de la conduite 250mm

Surface de conduite en eau : $2 \times 23.56 \text{ m}^2$

Masse totale théorique d'anode : 276 kg

Type d'anode: Anode BAC 385 HAL

Nombre d'anodes : 10 u

Masse réelle d'anode (protection de la conduite acier) : 300 kg

Pour le collier inox de raccordement au niveau de la zone de transition, une anode sacrificielle pour collier inox devra être mise en place.

7 DESCRIPTION DES TRAVAUX

Les travaux seront réalisés dans le cadre d'un marché accord-cadre mono-attributaire à émission de bons de commande intégrant l'entretien et des réparations ultérieures éventuelles du pipe.

Les travaux généraux comprennent :

- Les installations générales de chantier et leur fonctionnement durant toute la durée des travaux,
- La location de la zone d'installations de chantier, de stockage et de chargement ainsi que son entretien et sa remise en état après travaux,
- La signalisation temporaire de chantier,
- Les dispositifs de sécurité, des voies publiques et privées et le maintien de la circulation sur les voiries existantes,
- L'établissement des études d'exécution (notes de calculs et plans) et de tout mémoire technique (PAQ, PPSPS, ...) relatif aux méthodes et aux produits utilisés pour l'exécution de la réfection de l'ouvrage,
- Les plongées de reconnaissances préalables aux travaux,
- La réalisation d'un constat d'huissier avant et après travaux,
- L'amenée et repli du matériel,
- Pose d'un filet anti-MES,
- La fourniture, le transport et la mise en œuvre de tous les matériaux nécessaires à la réalisation des travaux ;
- Le transport terrestre et nautique ;
- La réfection du sarcophage béton y compris tout dispositif ou disposition provisoire nécessaire à la bonne réalisation des travaux (zone 1 : travaux de type 1) :
 - Amenée et repli du matériel ;
 - Les plongées de reconnaissances préalables aux travaux ;
 - Dégagement du sarcophage existant ;
 - Nettoyage complet de la structure béton existante (repiquage ; enlèvement des concrétions et algues...) afin de favoriser l'accroche du béton ; (épaisseur minimum 10 cm) ;
 - Récupération et évacuation de l'ensemble des gravats de démolition en décharge contrôlée ;
 - Réalisation de scellement HA8 minimum sur l'intégralité du sarcophage ;
 - Mise en place d'un ferrailage au pourcentage minimum (fil minium HA8mm) et treillis soudé ;
 - Passivation des aciers ;
 - Enrobage complet à l'aide d'un hydro-béton (hydrofuge) coffré (épaisseur 20cm). Coffrage type coquille béton armé préfabriquée ;
 - La fourniture et la pose d'anodes sacrificielles (masse 300kg).
- La réparation de la conduite y compris tout dispositif ou disposition provisoire nécessaire à la bonne réalisation des travaux (zone 2 : travaux de type 2) :
 - Amenée et repli du matériel ;
 - Les plongées de reconnaissances préalables aux travaux ;
 - Le dégagement périphérique des 2 extrémités de canalisation à la main;
 - La découpe des deux extrémités de la section de conduite (linéaire d'environ 2.0m) à l'aide de plongeurs hyperbares ;
 - Le grattage et le nettoyage des deux extrémités de conduite ;
 - La fourniture et la mise en place d'un élément de canalisation $\Phi 250\text{mm}$ d'environ 2.0ml avec la mise en place de deux manchons type Gibault pour conduite PVC de diamètre adapté ;

- Le serrage des manchons ;
 - La fourniture et la mise en place d'un système ancrage complémentaire en amont de la zone réparée (voir travaux de type 3) ;
 - La mise en place de la protection cathodique pour cavaliers aciers ;
 - Le resserrage du collier inox existant dans la zone de transition conduite acier/PVC.
- Le remplacement d'une partie de la conduite à l'extrémité de la conduite (vers -45m) y compris tout dispositif ou disposition provisoire nécessaire à la bonne réalisation des travaux (zone 3 : travaux de type 4) :
 - Amenée et repli du matériel ;
 - Les plongées de reconnaissances préalables aux travaux ;
 - Le dégagement périphérique de l'extrémité de la canalisation seine ;
 - La découpe soignée de l'extrémité de la conduite à l'aide de plongeurs hyperbares ;
 - La préparation de l'assise de pose du nouvel élément de conduite (pour la mise à niveau de la nouvelle conduite par rapport à l'existante) ;
 - La fourniture et la mise en œuvre d'un élément de conduite $\Phi 250\text{mm}$ d'environ 1.5m lesté avec d'un dalot béton armé préfabriqué ;
 - La fourniture et la mise en place d'un manchon type Gibault pour conduite PVC de diamètre adapté ;
 - Le serrage du manchon ;
 - La fourniture et la mise en place d'un système ancrage complémentaire en amont de la zone réparée (voir travaux de type 3) ;
 - La mise en place de la protection cathodique pour cavaliers aciers.
 - La mise en place du lestage complémentaire par ancrages adapté au substratum (sable et herbier de Posidonies) type « ancre à vis et à spirale » y compris tout dispositif ou disposition provisoire nécessaire à la bonne réalisation des travaux (zone 2 et 3 : travaux de type 3) :
 - Amenée et repli du matériel ;
 - Les plongées de reconnaissances préalables aux travaux qui permettant autres autre de vérifier la nature du substratum dans les différentes zones d'ancrage ;
 - La réalisation des ancrages d'essais (ancre à sable et herbier) : vérification de la capacité à l'arrachement ;
 - La fourniture et la mise en œuvre des ancres à sable et à herbier y compris collier de raccordement an acier.
 - La fourniture, la mise en œuvre et le raccordement de la protection cathodique pour cavaliers acier.

La signalisation temporaire maritime, si nécessaire, est également à la charge du Titulaire après accord des services concernés.

8 PLANS TECHNIQUES DES TRAVAUX PRECONISES

Les images suivantes présentant les travaux préconisés sont extraites du plan technique : COR-042-18-PRO-PLAN-03-0

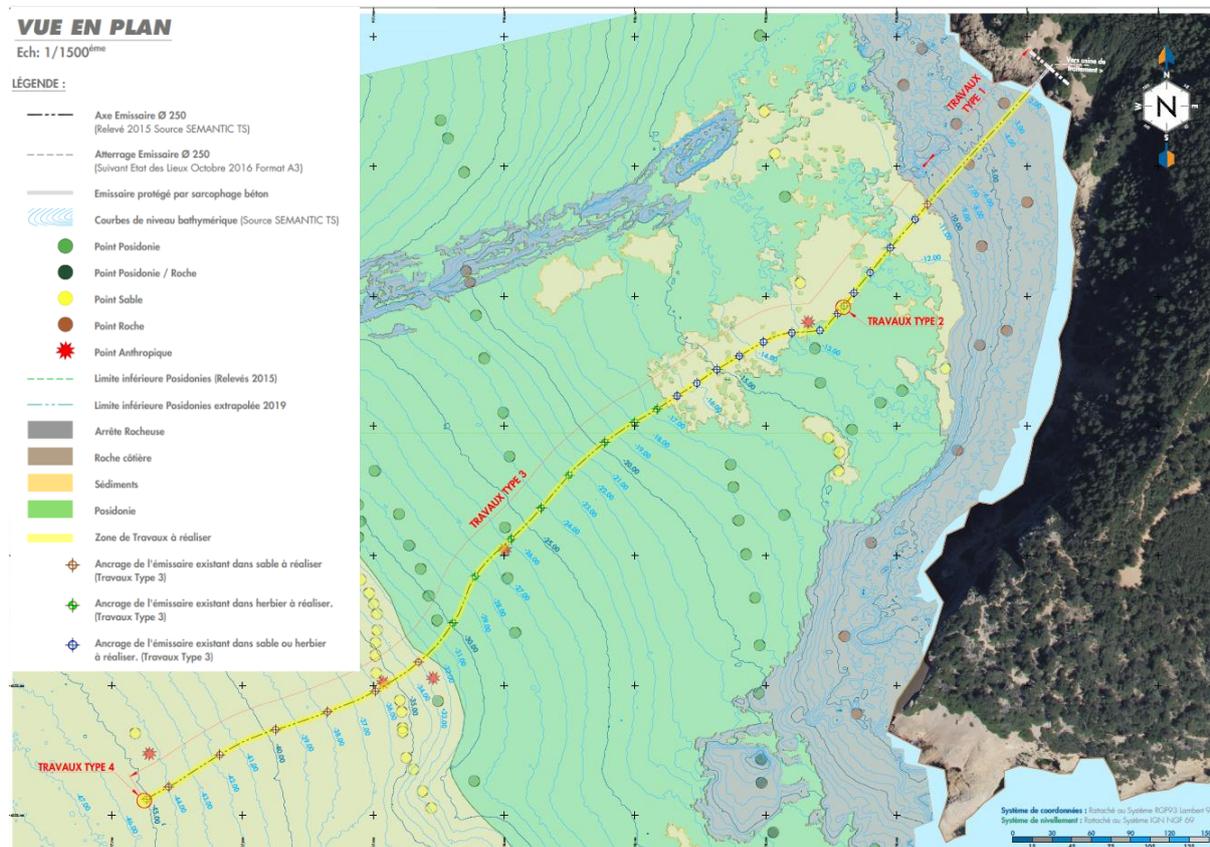
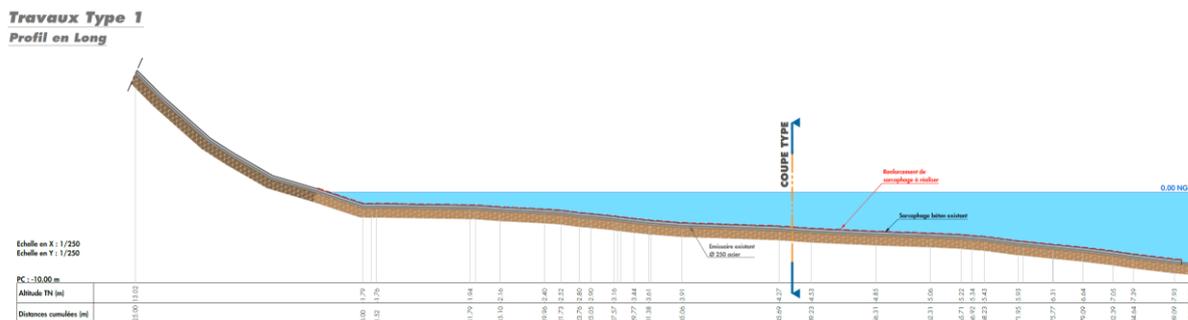


Figure 11 : Vue en plan des différentes zones d'intervention

8.1 REPARATION DU SARCOPHAGE BETON (TRAVAUX TYPE 1)



Travaux Type 1

Coupe Type

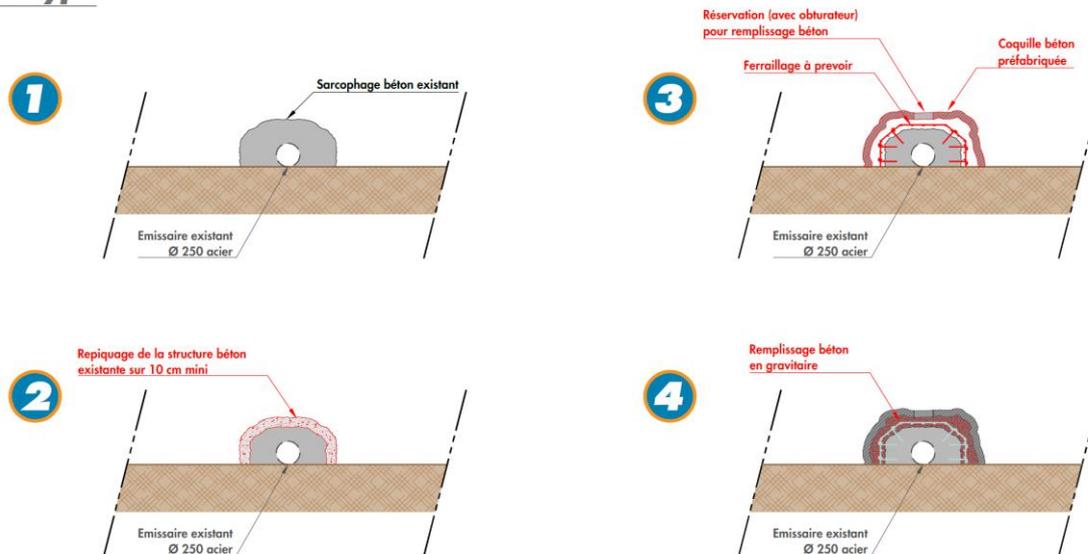


Figure 12 : Profil en long et coupe type des travaux de type 1 : réfection du sarcophage béton

Moyens matériels nécessaire à la réalisation des travaux :

Si travaux par voie maritime uniquement :

- Support maritime équipé de pieux, points d'ancrage et bras hydrauliques
- Une barge pour le transport et la mise en place :
 - des pièces coquilles béton préfabriquées équipées de réservations de remplissage des vides avec obturation.
 - des éléments pour la réalisation de béton hydrofuge en surface : agrégats/ciment/adjuvant (prise hydro béton) /eau douce.
- Plongeurs hyperbares
- Un perforateur hydraulique pour la réalisation des scellements
- Un compresseur hydraulique et à air

Si travaux par voie maritime et terrestre :

- Une barge pour le transport et la mise en place des pièces coquilles béton préfabriquées équipées de réservations de remplissage des vides avec obturation.
- Un support maritime pour les plongeurs hyperbares
- Une pompe à béton avec tuyaux de refoulement
- Un perforateur hydraulique pour la réalisation des scellements
- Un compresseur hydraulique et à air

Les moyens seront laissés à l'appréciation du Titulaire.

8.2 REPARATION DE LA CONDUITE PVC (TRAVAUX DE TYPE 2)

Travaux Type 2

Coupe Type

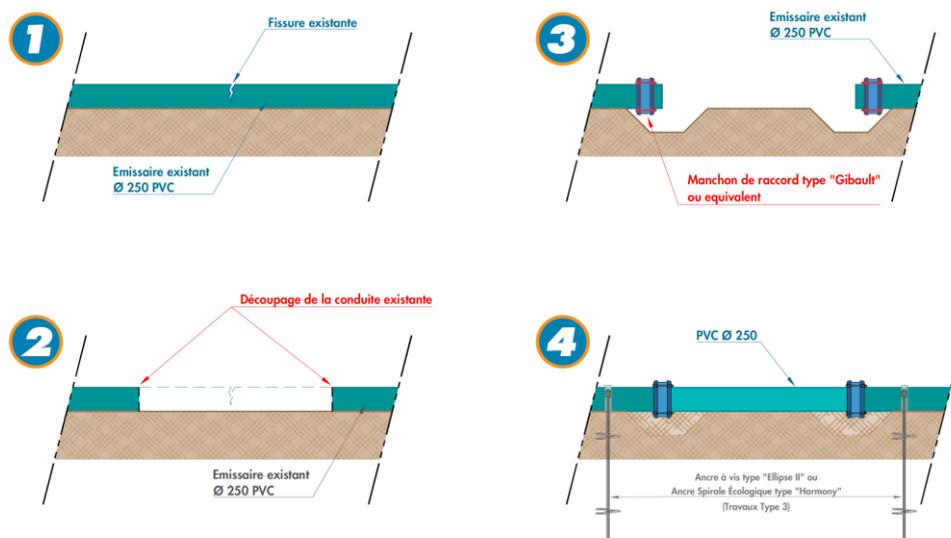


Figure 13 : Coupe type des travaux de type 2 : réparation de la conduite PVC (faisant apparaître la mise en place du système stabilisateur par ancrage (travaux de type 3))

Moyens matériels nécessaire à la réalisation des travaux :

- Un support maritime équipé d'un bras de levage
- Plongeurs hyperbares
- Matériel de découpe hydraulique
- Marteau piqueur à main
- Une tarière hydraulique pour mise en place des ancrs de lestage.
- Clefs hydrauliques
- Tout le matériel de fixation et d'amarrage
- ...

Les moyens seront laissés à l'appréciation du Titulaire.

8.3 RENFORCEMENT DU SYSTEME STABILISATEUR DE LA CONDUITE : MISE EN PLACE D'ANCRES A VIS ET ANCRES A SPIRALE (TRAVAUX DE TYPE 3)

Travaux Type 3 **Coupe Type**

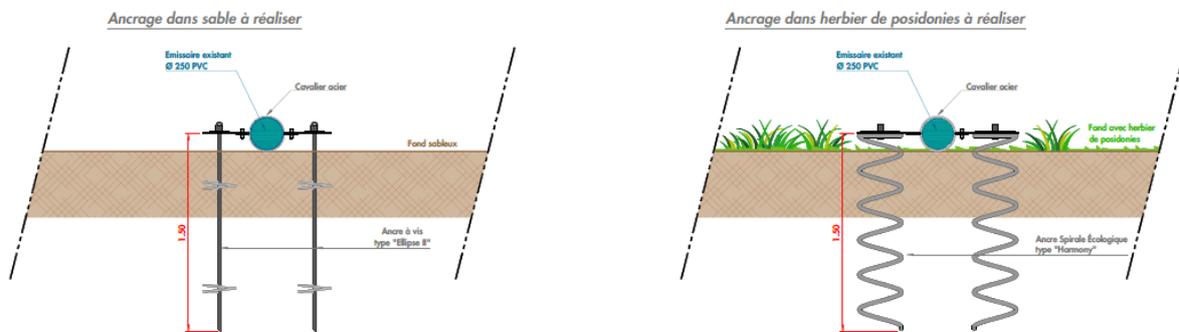


Figure 14 : Coupe type des travaux de type 3 : renforcement de la stabilité externe de la conduite

Moyens matériels nécessaire à la réalisation des travaux :

- Un support maritime équipé d'un bras de levage
- Plongeurs hyperbares
- Une tarière hydraulique pour mise en place des ancrures de lestage
- Clefs hydrauliques
- Tout le matériel de fixation et d'amarrage
- ...

Les moyens seront laissés à l'appréciation du Titulaire.

8.4 REMPLACEMENT D'UNE PARTIE DE LA CONDUITE : EXTREMITÉ DU PIPE (TRAVAUX DE TYPE 4)

Travaux Type 4 **Coupe Type**

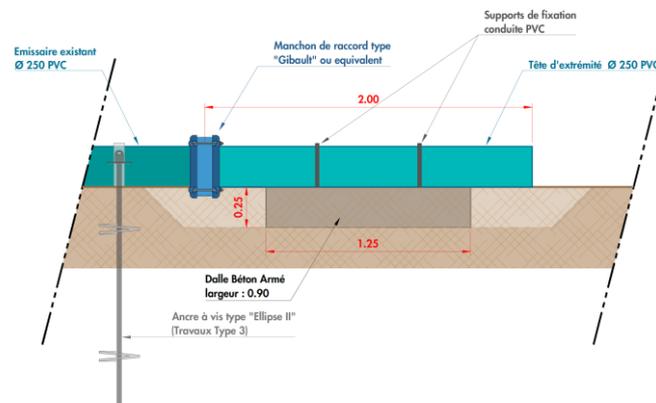


Figure 15 : Coupe type des travaux de type 4 : remplacement d'une partie de la conduite – extrémité du pipe (faisant apparaître la mise en place du système stabilisateur par ancrage (travaux de type 3))

Moyens matériels nécessaire à la réalisation des travaux :

- Support maritime équipé de points d'ancrage et bras hydrauliques
- Plongeurs hyperbares
- Des moyens d'aspiration hydrauliques pour aspiration et de rejet du sable
- Une tarière hydraulique pour mise en place des ancres de lestage
- Clefs hydrauliques
- Tout le matériel de fixation et d'amarrage
- ...

Les moyens seront laissés à l'appréciation du Titulaire.

9 ESTIMATION DU COUT DES TRAVAUX

 Sud Sainte BAUME - STEP du Grenier St CYR Mission de Maitrise d'œuvre relative au remplacement de l'émissaire en mer Détail estimatif - Solution PRO - V00 							
N°	Désignation		U	Qte	PU	Total HT	
1 - TRAVAUX PRÉPARATOIRES							
1	1	Installation de chantier	ft	1,00	15 000,00	15 000,00	
1	2	Amenée et repliement matériels	ft	1,00	30 000,00	30 000,00	
1	3	Validation bathymétrie projet	ft	1,00	3 500,00	3 500,00	
1	4	Barrage anti MES	ft	1,00	8 000,00	8 000,00	
1	5	Ensemble des analyses d'étalonnage et suivi turbidité	ft	1,00	2 500,00	2 500,00	
1	7	Études et plans d'exécution	ft	1,00	25 000,00	25 000,00	
1	8	Suivi qualité, sécurité, environnement	mois	4,00	800,00	3 200,00	
1 - TRAVAUX PRÉPARATOIRES						87 200,00	
2 - EMISSAIRE							
2,1 - REPARATION SARCOPHAGE							
2	1	1	Dégagements des emprises	ml	211	30,00	6 330,00
2	1	2	Repiquage et nettoyage structure du sarcophage existant	ml	100,00	100,00	10 000,00
2	1	3	Fourniture et pose d'une coquille de coffrage BA	ml	100,38	150,00	15 057,00
2	1	4	Passivation des aciers existants	ml	100,38	45,00	4 517,10
2	1	5	Scellement d'acier	u	864,00	25,00	21 600,00
2	1	6	Fourniture et mise en œuvre de Beton hydrofuge immergé	m ³	26,00	850,00	22 100,00
2	1	7	Évacuation en décharge de classe 3	ft	1,00	10 000,00	10 000,00
2	1	8	Fourniture et pose d'anodes sacrificielles	kg	315,00	35,00	11 025,00
2,1 - REPARATION SARCOPHAGE						100 629,10	
2,2 REPARATION CONDUITE							
2	2	1	Dégagement périphérique des emprises et découpe de l'existant	ft	1,00	4 000,00	4 000,00
2	2	2	Fourniture et pose pipe PEHD DN 250	ml	2,00	1 500,00	3 000,00
2	2	3	Fourniture et pose manchons de raccordement	u	2,00	700,00	1 400,00
2	2	4	Resserage collier existant	ft	1,00	180,00	180,00
2	2	5	Évacuation en décharge de classe 1	ft	1,00	2 000,00	2 000,00
2	4	6	Fourniture et mise en place d'un système de lestage complémentaire (comprenant 2 points ancrages -ancres à vis ou spirale, 1 cavalier acier et système anti-corrosion)	u	30,00	1 800,00	54 000,00
2,2 REPARATION CONDUITE						64 580,00	
2,3 - EXTREMITE CONDUITE							
2	3	1	Dégagement périphérique de l'extrémité existante	ft	1,00	5 000,00	5 000,00
2	3	2	Fourniture et mise en place pipe PEHD DN 250 monté sur support béton (y compris préparation de l'assise)	ml	2,00	10 000,00	20 000,00
2	3	3	Prefabrication et mise en place support beton	ft	1,00	8 000,00	8 000,00
2	3	4	Fourniture et pose manchon de raccordement	u	1,00	1 100,00	1 100,00
2,3 - EXTREMITE CONDUITE						34 100,00	
2 - EMISSAIRE						199 309,10	
Total HT						286 509,10	
Aléas 10 %						28 650,91	
Total HT						315 160,01	
TVA 20%						63 032,00	
Total TTC						378 192,01	

10 PLANNING DE REALISATION DES TRAVAUX

11 REFERENCES

- [1] Remplacement de l'émissaire en mer de la station d'épuration de la Pointe Grenier - Maîtrise d'œuvre – AVP OFF-AVP-001-00 – Corinthe Ingénierie - juin 2019
- [2] État et surveillance écologique du milieu marin au droit du rejet de la station d'épuration de Saint-Cyr-sur-Mer / Pointe-Grenier pour l'année 2017 – version complétée - P2A Développement – janvier 2018
- [3] Prises d'eau et rejets en mer, Jean Bougis, edition Paralia, 2015.
- [4] Hydrodynamique des structures offshore, Bernard Molin, edition Technip, 2002.

12 ANNEXE

Dans le tableau ci-dessous sont résumées les différentes conditions simulées dont les caractéristiques ont été définies le corps du rapport.

Caractéristiques des houles de projet simulées				
		Période de retour		
	Direction de propagation	10 ans	20 ans	50 ans
Secteur de propagation de la houle retenue, la plus directe et préjudiciable [N190° - N240°]	N215°	Hs=4.9 m Tp= 9s Vitesse du vent= 14 m/s Niveau d'eau= +0.9m NGF	Hs=5.1 m Tp= 10s Vitesse du vent= 15 m/s Niveau d'eau= +0.9m NGF	Hs=5.4 m Tp= 10.5s Vitesse du vent= 16 m/s Niveau d'eau= +0.9m NGF
Direction d'action du vent retenu et générant un clapot le plus direct et préjudiciable N290°	N290°	Non simulé	Non simulé	Vitesse du vent= 25.6 m/s

Propagation de la houle du large N215°- Niveau d'eau +0.9m NGF

