



Projet de parc éolien en mer au large de
Courseulles-sur-Mer

Etude de dimensionnement des
fondations (2011)

Sommaire

1/ Préambule.....	3
2/ Contexte de l'étude	3
3/ Description d'un monopieu	4
4/ Protocole.....	5
5/ Résultats de l'étude	8

Avertissement

Les résultats obtenus durant l'étude sont fortement liés aux données disponibles au moment de l'étude.

Des études détaillées sur site des conditions météorologiques, de sol, et des efforts dus au fonctionnement de l'éolienne vont être réalisées durant la phase de dimensionnement détaillé. Les résultats obtenus lors de ces études pourraient faire évoluer les dimensions des fondations.

1/ Préambule

En avril 2012, la société Éolien Maritime France (EMF) - consortium regroupant la société EDF EN France et DONG Energy Power - a été autorisée à exploiter un parc éolien localisé sur le domaine public maritime au large de Courseulles-sur-Mer. Cette autorisation fait suite à la désignation de la société EMF comme lauréat de l'appel d'offres lancé par l'État pour l'installation de parcs éoliens au large des côtes françaises. En partenariat avec wpd Offshore, EMF a créé la société de projet « Eoliennes Offshore du Calvados » pour la réalisation du projet.

Dans le cadre du Débat Public, Eoliennes Offshore du Calvados souhaite mettre à disposition de tous, les synthèses des études techniques, économiques ou environnementales, réalisées depuis l'origine du projet.

Cette étude « Dimensionnement préliminaire des fondations » réalisée par DONG Energy en 2011 a été rédigée à partir du descriptif du projet tel qu'il était au moment de sa rédaction. Ainsi, l'ensemble des données décrites dans cette synthèse correspond aux données disponibles au moment de la rédaction de l'étude. Les conclusions qui y sont indiquées sont donc amenées à évoluer en fonction des modifications apportées au projet.

2/ Contexte de l'étude

Cette étude de dimensionnement préliminaire a été réalisée par la société DONG Energy pour le dossier de réponse à l'appel d'offres « Éolien en mer » lancé par l'État pour le site de Courseulles-sur-Mer.

L'objectif principal était de fournir un dimensionnement préliminaire de la structure primaire des fondations de type monopieu du site de Courseulles-sur-Mer, permettant de définir le budget nécessaire à la fabrication des fondations.

Les fondations sont conçues pour soutenir l'éolienne offshore Alstom Haliade 150, d'une puissance unitaire de 6MW, à entraînement direct.

Le dimensionnement préliminaire est réalisé à partir de la norme DNV-OS-J101 pour le dimensionnement des structures des éoliennes en mer.

3/ Description d'un monopieu

Une fondation monopieu se compose de structures primaires et secondaires. Les structures primaires sont le monopieu et la pièce de transition. Les structures secondaires incluent la structure d'accostage, la passerelle d'accès, la plate-forme de travail et le tube d'amené des câbles (tubes en acier qui protègent le câble lors de sa remontée le long de la sous-structure et servent de guide de tirage lors de son installation, ils sont également appelé « J-tubes »).

La structure primaire d'une fondation monopieu se compose de deux parties : le monopieu foncé (battu au moyen d'un marteau hydraulique) et au besoin foré dans le sol, et la pièce de transition, qui vient coiffer le monopieu et qui supporte les structures d'accès ainsi que la plateforme de travail (structures secondaires).

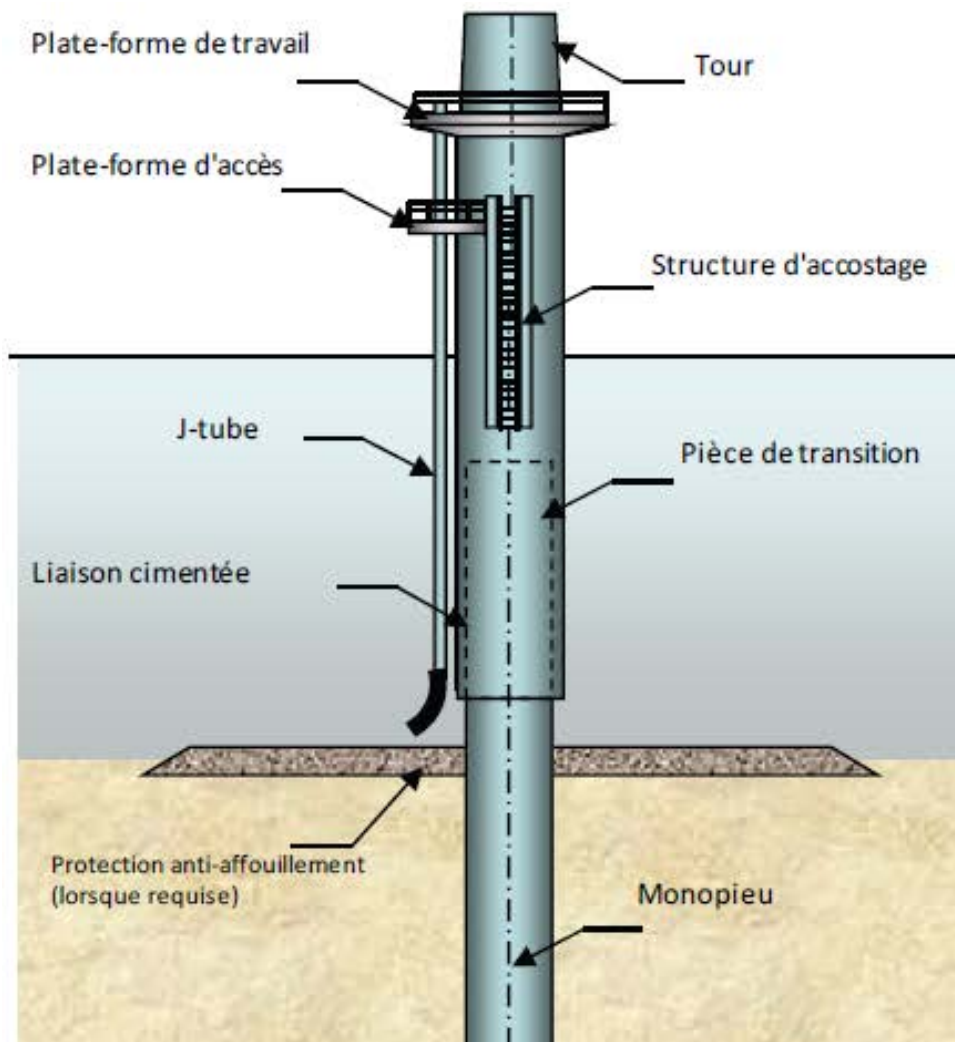


Figure 1 : Fondation de type Monopieu

4/ Protocole

Sur le site de Courseulles-sur-Mer, la profondeur d'eau varie entre 22.3 m et 31 m. Un dimensionnement de monopieu a donc été considéré pour chacune de ces profondeurs.

Le dimensionnement préliminaire a été réalisé avec les données disponibles durant la phase d'appel d'offres et concerne plusieurs paramètres :

- Données bathymétriques,
- Données météorologiques : vent, houle et courant,
- Données de sols,
- Géométrie de l'éolienne, basée sur l'expérience de DONG Energy,
- Efforts préliminaires dus à l'éolienne et fournis par ALSTOM.

Remarque : Toutes les valeurs sont fournies par rapport à la Cote Marine CM (référence pour le calcul des marées : Courseulles sur Mer). La Cote Marine est définie par rapport au zéro des cartes qui correspond au niveau théoriquement atteint par les plus basses mers astronomiques. -11m CM signifie que le fonds est situé 11m sous le zéro des cartes.)

Les données bathymétriques sont fournies pour les deux positions extrêmes en profondeur sur le site de Courseulles-sur-Mer (cf. tableau 1 ci-après).

Description	Eau peu profonde	Eau profonde
Niveau de fond marin	-22,3 m	-31,0 m
Affouillement* global	0 m	0 m
Affouillement* local	2 m	2 m
Niveau de l'interface monopieu/éolienne	24,5 m	24,5 m
<i>*Affouillement: se dit d'une zone creusée par l'eau (érosion) au pied d'un ouvrage ou d'une berge et susceptible de déstabiliser ce dernier.</i>		

Tableau 1 : Données bathymétriques

Le tableau 2 suivant fournit les hauteurs des marées, les hauteurs de houles maximales avec une période de retour de 50 ans, les vitesses de courant maximales et la vitesse de vent moyenne.

Description	Valeur
PHMA (Plus Haute Mer Astronomique)	8,0 m
Marée haute moyenne de vives eaux	7,4 m
MSL (niveau moyen de la mer)	4,6 m
PBMA (Plus Basse Mer Astronomique)	0,3 m
'Splash zone'* (élévation haute)	9,1 m
'Splash zone'* (élévation basse)	-0,7 m
Courant de vives eaux	1,1 m/s
Courant de morte eaux	0,6 m/s
Hs** (période de retour 50 ans)	6,2 m
Hmax*** (période de retour 50 ans)	11,2 m
Vent moyen	8,3 m/s
<i>*Splash zone: zone soumise aux vagues en conditions opérationnelles, où seront implantées les structures d'accostage.</i>	
<i>**Hs: hauteur significative de la houle. Elle s'obtient par intégration du spectre d'énergie de la houle. Au large Hs peut être assimilée à la hauteur moyenne du tiers des vagues les plus hautes.</i>	
<i>***Hmax: hauteur maximale de crête au creux de la houle sur une période donnée.</i>	

Tableau 2 : Données de marée, de houle et de courant

Les tableaux 3 & 4 suivants fournissent les caractéristiques des sols utilisées pour les profondeurs d’eaux extrêmes du site lors de cette étude.

Z (sommet)*	Type	γ'	c_{uk}	ϕ_k	ϵ_{50}
[m]	-	[kN/m ³]	[kPa]	[°]	[%]
0	Sable	8	-	32	-
-2	Argile	10	200	-	0,7
-15	Sable**	10	-	40	-
*Concernant le fond marin **Calcaire modélisé comme du sable (ce qui est admis et conservateur en termes de dimensionnement)					

Tableau 3: Paramètres de résistance caractéristiques des sols relatifs aux emplacements en eau peu profonde

z (sommet)*	Type	γ'	c_{uk}	ϕ_k	ϵ_{50}
[m]	-	[kN/m ³]	[kPa]	[°]	[%]
0	Sable	8	-	32	-
-2	Argile	10	200	-	0,7
-22	Sable**	10	-	40	-
*Concernant le fond marin **Calcaire modélisé comme du sable (ce qui est admis et conservateur en termes de dimensionnement)					

Tableau 4: Paramètres de résistance caractéristiques des sols relatifs aux emplacements en eau profonde

Les monopieux sont dimensionnés avec un acier S355.

Les différentes données ont permis de fournir les efforts globaux aux sections du monopieu et de la pièce de transition.

Les figures 2 et 3 présentent les efforts et moments le long des monopieux pour le cas dans la profondeur d’eau la plus faible.

Les résistances des sections utilisées pour le dimensionnement de la fondation sont illustrées par les figures 2 et 3 pour le positionnement en eau profonde à l’ELU (Etat Limite Ultime) et à l’ELF (Etat Limite de Fatigue).

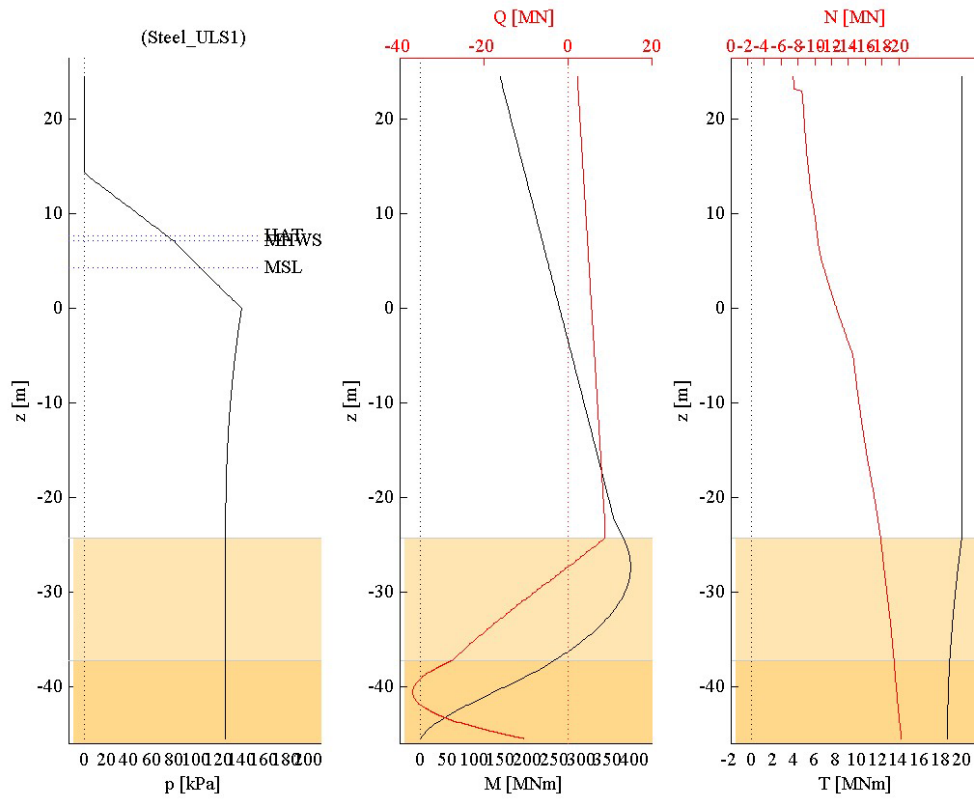


Figure 2: Résistances des sections ELU, positionnement en eau peu profonde

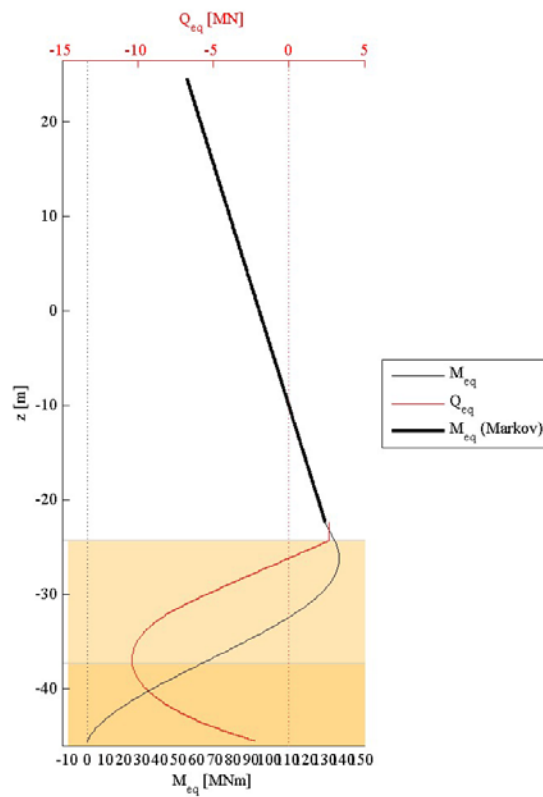


Figure 3 : Résistances similaires des sections ELF, positionnement en eau peu profonde

5/ Résultats de l'étude

L'étude géotechnique associée aux données mécaniques de la turbine Alstom Haliade 6MW ont permis d'élaborer le dimensionnement des fondations, en proposant, par l'intermédiaire du bureau d'ingénierie de DONG Energy, un design préliminaire détaillé. Ce design présente l'évolution des épaisseurs d'aciers constitutifs des parois de la fondation, pour la partie du pieu foncée dans le sol ainsi que pour la pièce de transition. Cette étape fondamentale permet d'évaluer plus précisément la faisabilité technique, en termes de structure, ainsi qu'en termes de chiffrage.

Les efforts obtenus ont permis de déterminer les dimensions préliminaires (diamètre et épaisseur) des monopieux et des pièces de transition pour les deux profondeurs en respectant les critères de résistance à l'état ultime et à la fatigue, et les critères de réponse modale de l'ensemble éolienne plus fondation.

Les figures et tableaux ci-dessous présentent ces différents résultats.

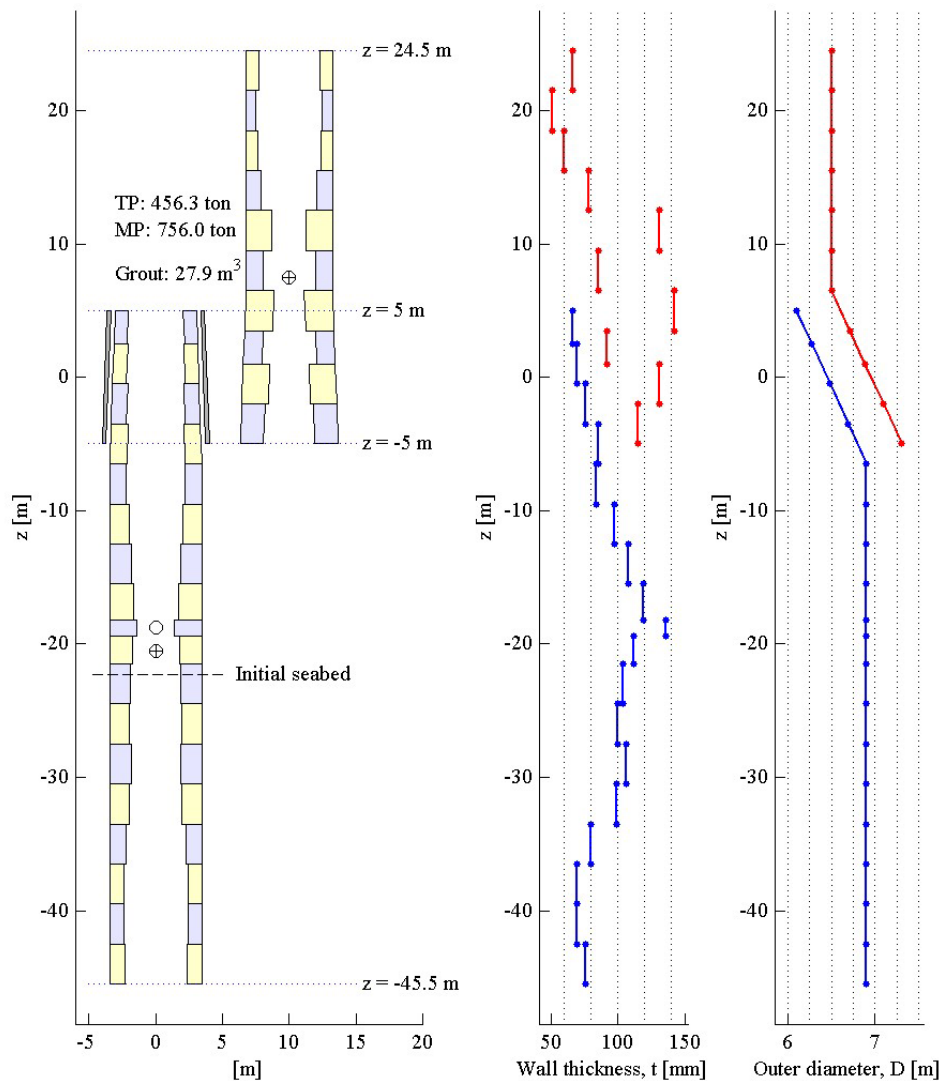


Figure 4: Dimensions d'une fondation pour un positionnement en eau peu profonde
 Grout = volume de ciment // Initial seabed = fonds marin // MP & TP = masse d'acier pour monopieu & la pièce de transition
 Wall thickness = épaisseur en mm // Outer diameter = diamètre extérieur en m

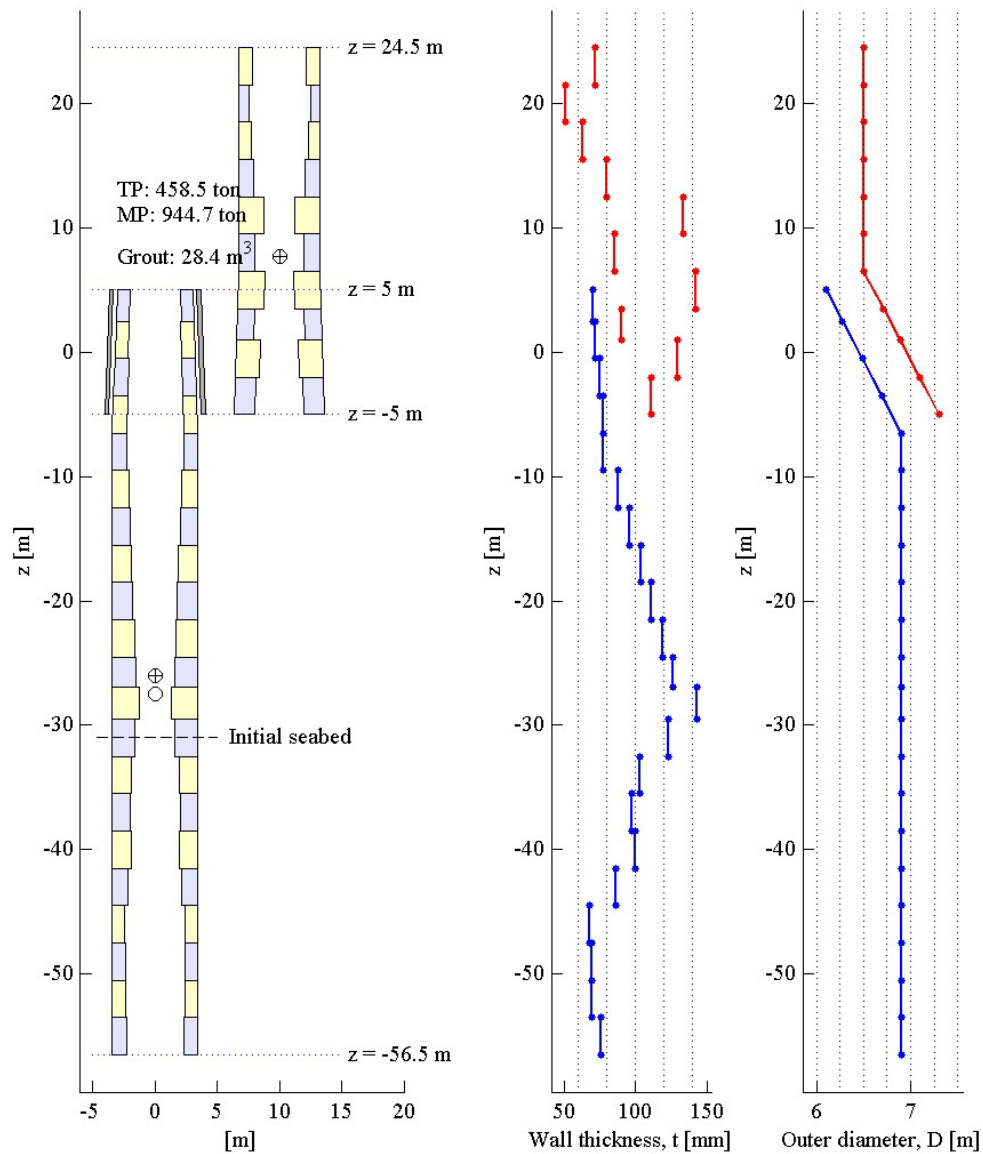


Figure 5: Dimensions d'une fondation pour un positionnement en eau profonde
 Grout = volume de ciment // Initial seabed = fonds marin // MP & TP = masse d'acier pour monopieu & la pièce de transition
 Wall thickness = épaisseur en mm // Outer diameter = diamètre extérieur en m

Emplacement	Fréquence propre (Hz)
Eau peu profonde	0,291
Eau profonde	0,271

Tableau 5: Fréquence propre de l'ensemble fondation + éolienne

Composant	Dimension
Élévation de la plateforme de travail	+18.5 m CM
"Splash-zone"* élévation haute	+9.9 m CM
"Splash-zone"* élévation basse	-1.5 m CM
Hauteur du moyeu	+104.5 m CM
Forme et diamètre du monopieu	cylindrique 6.8 m
Forme et diamètre de la pièce de transition	cylindrique 6.5 m
Diamètre de la plate-forme de travail	10 m (avec extension en encorbellement d'un côté)
Pénétration dans le sol	25 m
Présence d'une protection anti-affouillement	Sur une partie du site

**Splash zone: zone soumise aux vagues en conditions opérationnelles, où seront implantées les structures d'accostage.*

Tableau 6: Principales dimensions des monopieux

En outre, ces études de dimensionnement préliminaire ont permis d'évaluer précisément les volumes et masses mis en jeu, notamment pour des considérations de manutention et d'installation. Ces éléments de dimensionnement sont présentés dans les tableaux ci-après.

	Eau peu profonde (-22m /CM)	Eau profonde (-31m /CM)
Épaisseur du monopieu (mm)	52 à 140	61 à 140
Épaisseur de la pièce de transition (mm)	50 à 145	50 à 145
Volume de ciment (liaison monopieu / pièce de transition) en m3	28	28

Tableau 7: Résumé des dimensions et épaisseurs des monopieux et pièces de transition

Les masses obtenues pour les structures primaires des deux types de fondation (eau peu profonde/eau profonde) sont fournies dans le tableau ci-dessous.

	Eau peu profonde	Eau profonde
Masse d'acier pour la pièce de transition	456 tonnes	459 tonnes
Masse d'acier pour le monopieu	756 tonnes	945 tonnes
Masse totale	1212 tonnes	1404 tonnes

Tableau 8: Masses d'acier des structures primaires

Les épaisseurs et masses seront affinées (et éventuellement réduites) durant la phase de dimensionnement détaillé. Le dimensionnement des monopieux est en effet un processus itératif au début duquel il convient de rester sécuritaire.