



Etude de dimensionnement des fondations

2011



Sommaire

1. TYPES DE FONDATIONS POUR L'ÉOLIEN EN MER	2
2. DEMARCHE INDUSTRIELLE DE SELECTION DU TYPE DE FONDATIONS	3
2.1. CONNAISSANCE DU SITE	3
2.2. ETUDES D'INGENIERIE.....	5
2.3. RESULTAT : LES FONDATIONS GRAVITAIRES COMME MEILLEURE SOLUTION TECHNIQUE ET ECONOMIQUE	7
3. DESCRIPTION DES STRUCTURES EN EMBASE GRAVITAIRE	7
3.1. STRUCTURE	7
3.2. STRUCTURES SECONDAIRES.....	11
<i>Structure d'accostage et plateforme de travail</i>	11
<i>J-tubes</i>	13
4. ETUDES COMPLEMENTAIRES	13

Liste des figures

FIGURE 1 : LES DIFFERENTS TYPES DE FONDATION – MONOPIEU, EMBASE GRAVITAIRE ET JACKET (EMF ET OWEC)	2
FIGURE 2: FUGRO COMMANDER A FECAMP – INSPECTION D'UNE CAROTTE DE FORAGE	4
FIGURE 3: OPERATION DE CAROTTAGE SUR LE FUGRO COMMANDER.....	4
FIGURE 4: CAROTTES DE ROCHE SUR LE SITE DE FECAMP	5
FIGURE 5: STRUCTURE EMBASE GRAVITAIRE	8
FIGURE 6 : PRINCIPALES DIMENSIONS D'UNE FONDATION POUR 31,8 M / CM	10
FIGURE 7 : QUANTITE DE MATERIAUX POUR UNE FONDATION A 31,8 M/CM	10
FIGURE 8 : PLAN EN COUPE ET ISOMETRIE DE FONDATION GRAVITAIRE, PROFONDEUR DE 31,8 M / CM	11
(GL - GARRAD HASSAN, 2011).....	11
FIGURE 9: FORME D'ACCOSTAGE ET PLATEFORME DE TRAVAIL – C- POWER, 2008 (EDF-EN)	12
FIGURE 10: PASSERELLES D'ACCES (VUE DE FACE) ET PLATEFORME DE TRAVAIL (PLAN).....	12
FIGURE 11 : CHEMINEMENT D'UN J-TUBE	13

RESUME NON TECHNIQUE

Les études géotechniques menées par le Maître d'ouvrage en septembre 2011 ont permis d'affiner la connaissance des caractéristiques de la craie représentant la géologie du site. Ces études ont permis de préciser le dimensionnement des fondations et de réorienter le projet vers le type de fondation représentant l'optimum technico-économique : les fondations gravitaires

1. TYPES DE FONDATIONS POUR L'ÉOLIEN EN MER

Il existe principalement trois types de fondations pour l'installation d'éoliennes en mer : les fondations gravitaires (posées au fond de l'eau et assurant la stabilité de l'éolienne par gravité), les fondations monopieu (tube d'acier mis en place dans le sous-sol à une profondeur d'environ 30 mètres), les fondations jackets (structure treillis ancrée dans le sol par 4 pieux de 2m de diamètres environ). Chaque type de fondations est défini afin de répondre aux caractéristiques du site : profondeur d'eau et nature des sols.

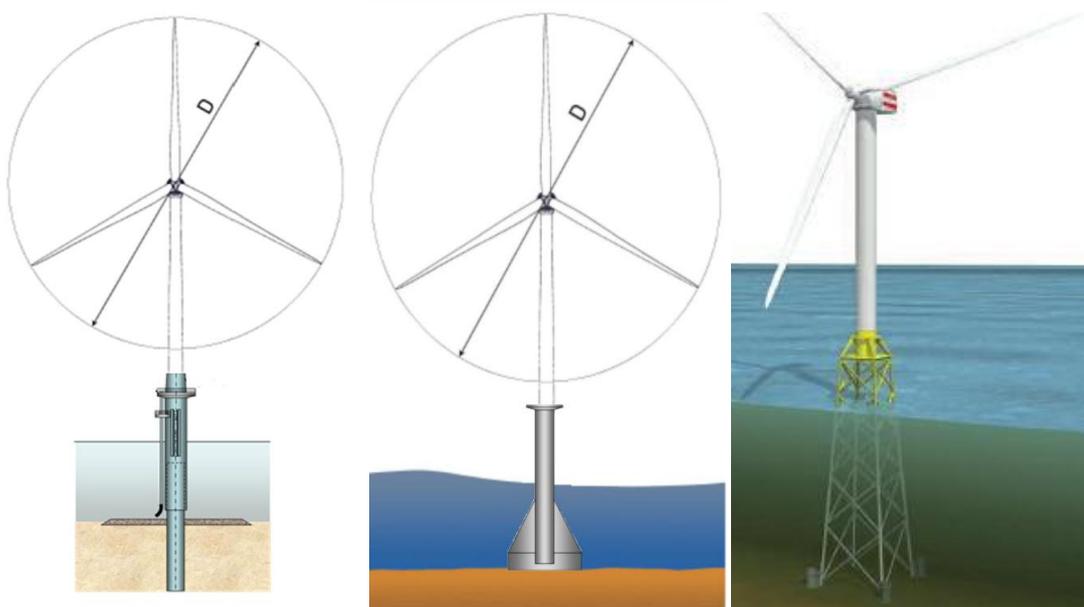


Figure 1 : Les différents types de fondation – monopieu, embase gravitaire et jacket (EMF et OWEC)

2. DEMARCHE INDUSTRIELLE DE SELECTION DU TYPE DE FONDATIONS

Le Maître d'ouvrage a opté pour une démarche industrielle garante de la faisabilité technique, économique et industrielle de la construction du projet éolien de Fécamp.

Cette démarche s'est déclinée en trois grands principes :

- rassembler l'expérience des membres du consortium,
- approfondir la connaissance du site,
- réaliser une ingénierie de qualité.

Le Maître d'ouvrage a fédéré des compétences complémentaires en rassemblant EDF-Energies Nouvelles, DONG Energy et *wpd* Offshore France.

2.1. CONNAISSANCE DU SITE

La constitution de bases de design de qualité est la première étape du développement technique d'un projet. Le Maître d'ouvrage a décidé d'approfondir sa connaissance du site de Fécamp en réalisant les études et campagnes suivantes :

- Des campagnes géophysiques (bathymétrie, sonar, réflexion sismique) ont été réalisées sur la zone du projet.
- Les conditions d'agitation de la mer ont été modélisées sur le site de Fécamp. Les houles du large, extraites de modèles de grande emprise ont été appliquées à la zone d'étude afin d'en déduire les houles extrêmes. Ces travaux ont été menés par des bureaux d'études réputés, BRLi et Actimar¹, sous la supervision du LNHE² d'EDF-R&D.
- Le vent a été caractérisé par plusieurs modèles et calibrés sur des mâts de mesures et LIDAR³.
- Considérant l'importance des caractéristiques de sol sur le choix des fondations et le dimensionnement des moyens d'installation, qui se répercutent sur les coûts, les délais et la faisabilité du projet, le Maître d'ouvrage a décidé d'engager une reconnaissance géotechnique dès la phase d'appel d'offres. Le programme en a été défini par les départements géosciences de DONG Energy, d'EDF - Energies Nouvelles et de *wpd* Offshore France. Sur Fécamp, il consistait en deux sondages carottés de 40 m de profondeur effectués du 19 au 26 septembre 2011 par un navire de forage, le *Fugro Commander*.

Le Maître d'ouvrage a effectué des campagnes d'études géophysiques et géotechniques sur site, avec réalisation de sondages carottés, afin de choisir et dimensionner les fondations.

¹ BRLi (Nîmes) pour l'extraction des houles extrêmes, Actimar (Brest) pour les houles opérationnelles et les courants.

² Laboratoire National Hydraulique et Environnement

³ LIDAR : Light Detection and Rangin ou télédétection par laser, instrument de mesure optique basée sur la réflexion d'impulsions optiques, permettant de déterminer la vitesse et la direction du vent à différentes hauteurs

La Figure 2 présente une illustration du Fugro Commander, affrété pour la campagne de forage, ainsi que l'inspection d'une carotte dans le laboratoire embarqué.



Figure 2: Fugro Commander à Fécamp – inspection d'une carotte de forage



Figure 3: Opération de carottage sur le Fugro Commander

La Figure 4, ci-dessous, présente deux carottes de forages du site de Fécamp : la première est un échantillon du carottage n°2, pris entre 1,55 et 2,88 m de profondeur ; la seconde est un carottage n°1, pris entre 17,6 et 19,1m. On y distingue sur la première photographie des cailloux, puis une couche d'argile qui évolue plus bas vers une craie altérée, alors que la seconde met en évidence une craie saine, de haute densité, avec inclusion de silic.

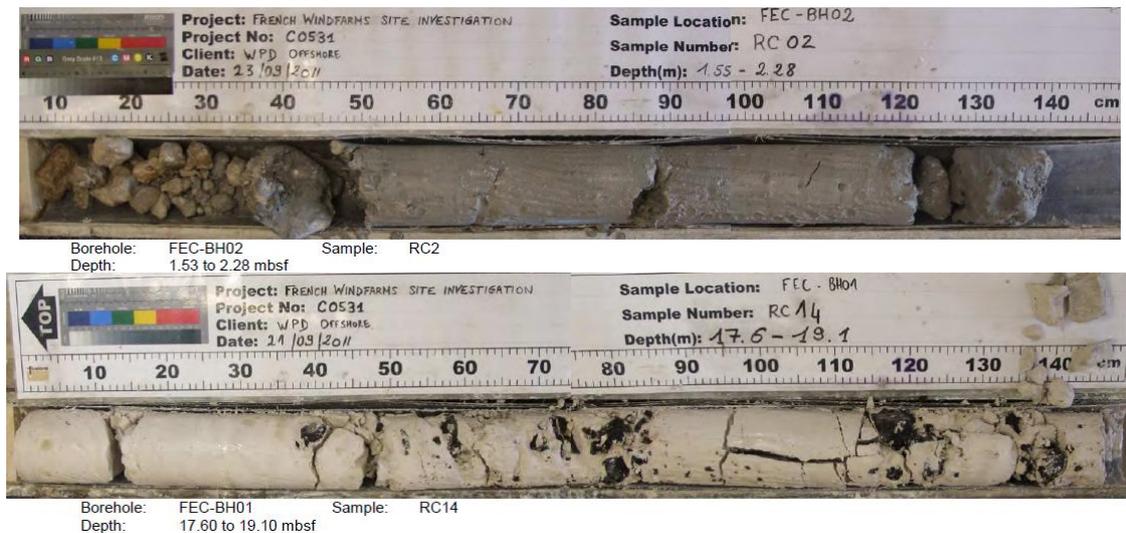


Figure 4: Carottes de roche sur le site de Fécamp

2.2. ETUDES D'INGENIERIE

La recherche de la solution technique la plus adaptée pour les fondations ne peut se limiter à une simple étude conceptuelle, mais nécessite un processus complexe d'ingénierie comprenant la définition des données de dimensionnement (investigations sur site, conditions d'agitation, principales élévations de structure) et des descentes de charges¹. Ceci permet d'effectuer le dimensionnement structurel et géotechnique puis de réaliser une étude de constructibilité et de faisabilité technico-économique des fondations.

C'est à ces seules conditions que la solution retenue peut être considérée comme techniquement et économiquement réalisable.

- **Le Maître d'ouvrage a choisi d'éprouver la faisabilité technique du jacket sur pieux (c'est-à-dire une structure métallique en treillis mécano soudée et fixée sur le fond au moyen de pieux métalliques d'ancrage), ainsi que celle du monopieux.**
- Le Maître d'ouvrage a demandé à Alstom² de calculer les descentes de charges de sa turbine pour les conditions de vent du site et pour la fondation choisie.
- Les données techniques utilisées pour le dimensionnement, issues des études sur site et modélisation citées, ont été compilées par le bureau d'études GL Garrad Hassan qui a également

¹ La descente de charges désigne l'ensemble des forces qui proviennent de l'éolienne, donc dues au vent, à la rotation des pales mais aussi à l'effet du second ordre des charges dues aux vagues, et des charges directement dues aux vagues et aux courants sur la sous-structure. Le tout doit descendre le long de la structure, et conditionne ainsi son dimensionnement avant d'être repris par le sol.

² Il s'agit d'un effort particulier du turbinier. Nombre de turbiniers se contentent en phase conceptuelle de soumettre des « charges génériques ». Il peut alors apparaître en phase design détaillé que la turbine soit impropre à la structure envisagée pour les conditions du site.

vérifié l'élévation requise de la plate-forme de travail¹, ainsi que l'interface entre Alstom et le bureau d'étude structure.

- Le dimensionnement des jackets a été effectué au stade de design conceptuel pour différentes profondeurs d'eau par OWEC, bureau d'étude norvégien spécialisé en jackets éoliens
- Un dimensionnement conceptuel de monopieux a été effectué par le département structure de Dong Energy.
- Le dimensionnement géotechnique de la fondation a été effectué, à partir des données de sondage et des résultats des essais effectués au laboratoire de Fugro, par les experts de Cathie et l'installation des pieux évaluée en conséquence.

Le dimensionnement de la tour et de la fondation est conditionné par la raideur du sol et par la réponse en fréquence de l'éolienne aux chargements de vent et de houle. La succession rigoureuse des étapes décrites est nécessaire pour en prouver la faisabilité. Toute faisabilité conceptuelle qui n'intégrerait pas ces différentes étapes est sujette à caution. Des projets en Europe du Nord sont reportés sine die, voire abandonnés, à cause de choix prématurés basés sur des faisabilités incomplètes.

La reconnaissance géotechnique réalisée sur le site a montré que la craie était d'une meilleure qualité que ce que suggérait la bibliographie. Le battage des pieux d'un jacket est possible, même si localement une forte concentration en silex peut conduire à un refus de battage et donc à utiliser des moyens de forage. **Il apparaît cependant que les énergies de battage à transmettre sont telles que le diamètre et l'épaisseur des pieux d'ancrage des jackets doivent être augmentés (par rapport au strict dimensionnement géotechnique) pour transmettre l'énergie de battage requise.**

Ainsi, un pieu battu de 72in (1,8m) de diamètre, de 50 mm d'épaisseur et de 50 m de pénétration dans le sol permet de reprendre les charges de l'éolienne et du jacket. Le battage va nécessiter un marteau hydraulique d'au moins 900kJ. Les contraintes générées par un tel marteau obligent à porter le diamètre à 84in (2.13m) et l'épaisseur à 60mm pour ne pas tordre le pieu². Le surcroît d'acier est notable³. La masse des quatre pieux (660t) est alors quasiment égale à celle du jacket (690t).

Les conclusions portées sur les pieux des fondations Jacket sont similaires à cette obtenues sur les fondations monopieux. Du fait de la profondeur d'eau (-31m LAT maximum), et de la hauteur des vagues extrêmes (plus de 16m), un pieu de 8m de diamètre et de plus de 1000t est nécessaire. Les caractéristiques de sol rendent probable le recours à du forage à partir d'une certaine profondeur. Cela requière des moyens d'installation (tant en levage, colis plus de 30% plus lourd qu'à St Nazaire par exemple, qu'en forage de gros diamètre) qui ne sont pas encore opérationnels.

1 Plate-forme d'accès et de travail située à la base de l'éolienne

2 Lors du battage, la contrainte dynamique doit rester inférieure, même en tête de pieux ou la contrainte incidente s'additionne à la contrainte réfléchi à 80% de la limite élastique de l'acier pour ne pas endommager les pieux. De plus, l'énergie de battage transmise est proportionnelle à la section du pieu. Un sol dur nécessitera un gros marteau et un gros pieu.

3 Plus 200t par rapport à 4 pieux de 1.8m initialement considérés. Un tel calcul est forcément préliminaire et des hypothèses plus pessimistes conduisent à prévoir un marteau de 1200kJ, d'où des pieux encore plus lourds. Le risque résiduel d'un blocage sur des silex nécessitant un recours au forage demeure. (Cathie, op cité)

Compte tenu du surdimensionnement des pieux d'ancrage des jackets, le jacket sur pieux est apparu moins pertinent que la fondation gravitaire.

De même, le surdimensionnement des monopieux rendent moins pertinent le monopieux que la fondation gravitaire.

2.3. RESULTAT : LES FONDATIONS GRAVITAIRES COMME MEILLEURE SOLUTION TECHNIQUE ET ECONOMIQUE

L'identification du surcoût engendré par le dimensionnement des pieux d'ancrage des jackets pour le battage et les risques d'installation ainsi que les surdimensionnements des monopieux a poussé le Maître d'ouvrage à réorienter le projet vers des fondations par embase gravitaire.

Pour ce faire, la descente de charges de la turbine d'Alstom a été recalculée pour l'embase gravitaire prévue à Fécamp, puis la réponse en fréquence de la turbine a été vérifiée au moyen des raideurs de sol calculées par Cathie.

Le dimensionnement géotechnique de la fondation gravitaire a été vérifié par GL-Garrad Hassan sur la base des paramètres de dimensionnement établis par Cathie après les essais de laboratoire.

D'un point de vue économique et industriel, les premières consultations entreprises par le Maître d'ouvrage, appuyées par des expertises ponctuelles et la connaissance du marché de DONG Energy ont renseigné l'étude économique.

Il a ainsi été vérifié que la fondation gravitaire ne présente aucune contre-indication technique sur un site avec de la craie à faible profondeur comme sur le site de Fécamp.

La fondation retenue par le Maître d'ouvrage pour le site de Fécamp est de type gravitaire, correspondant à l'optimum technico-économique issu de la campagne géotechnique menée sur le site et des analyses d'ingénierie réalisées en conséquence.

3. DESCRIPTION DES STRUCTURES EN EMBASE GRAVITAIRE

3.1. STRUCTURE

Le dimensionnement préliminaire des fondations gravitaires pour le site de Fécamp a été effectué par le bureau d'étude GL-Garrad Hassan sur la base des paramètres de design établis suite à la campagne géotechnique. Il s'agit d'une structure creuse conique en béton armée posée sur une couche de nivellement en cailloutis préalablement préparée et remplie de sable¹ une fois en place.

1 Pour le design de base avant optimisation. Les constructeurs consultés ont aussitôt proposé des variantes sur la forme et les dimensions. De même le sable pourrait avantageusement être remplacé par un matériau d'opportunité plus dense.

La fondation a une emprise au sol circulaire de l'ordre de 36m de diamètre à laquelle s'ajoute une extension d'environ 5 m de chaque côté pour la couche de nivellement et la largeur de la protection anti-affouillement¹, sur les localisations où elle sera nécessaire.

La hauteur de la plateforme de travail est conditionnée par les conditions d'agitation du site. La vague de dimensionnement, à une marée haute exceptionnelle associée à une surcote de tempête, doit passer, avec un tirant d'air suffisant, sous la plate-forme de travail, en tenant compte de la remontée de la vague sur le fût.

La Figure 5 illustre la partie émergée d'une fondation à embase gravitaire (également appelées « GBS » pour « Gravity Based Structure »).²

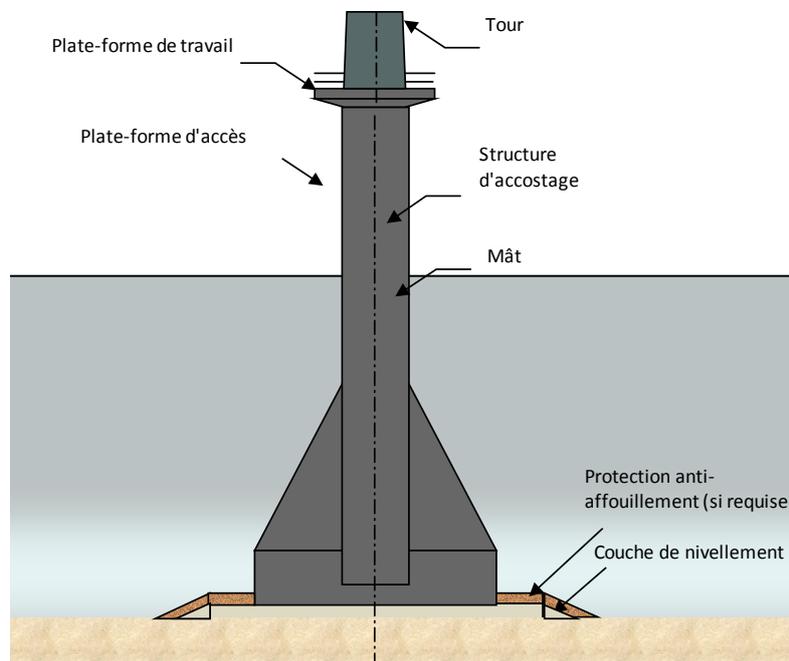


Figure 5: Structure embase gravitaire

La fabrication des embases gravitaires nécessite d'aménager un site de production dans une zone portuaire.

1 Enrochements installés à la base des fondations pour limiter le phénomène de creusement par les eaux

2 C-Power avant la pose des éoliennes

Construction des fondations gravitaires pour le parc éolien de C-Power – Belgique, 2008



Ferrailage



Coffrage et coulage



Coffrage et coulage



Construction simultanée des 6 fondations



Plateforme de travail



Transport au site d'installation



© C-Power

L'étude réalisée par GL-Garrad Hassan a permis de dimensionner les fondations du site. Les principales caractéristiques dimensionnelles sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Dimensions caractéristiques d'une fondation	
Élément caractéristique	Dimension
Hauteur de la plateforme de travail (sous-face de la plate-forme)	28,2 m ¹ (figure présentée)
« Splash-zone ² » élévation haute	12,0 m
« Splash-zone » élévation basse	-2,3 m
Hauteur totale	60 m
Emprunte de l'embase	36 m
Diamètre de la zone artificialisée (embase + rebord de la couche de nivellement)	46 m
Diamètre du fût	6,85 m
Diamètre de la plateforme de travail	10 m ³
Présence d'une protection anti-affouillement	Sur une partie du site

Figure 6 : Principales dimensions d'une fondation pour 31,8 m / CM⁴

Le tableau ci-dessous en précise les masses et volumes. Il est important de noter qu'il est prévu que la fondation soit transportée et installée en flottaison partielle.

Masses et volumes de la fondation	
Volume de béton (m ³)	2790
Masse de béton (tonne)	6500
Masse des aciers de renforcement (tonne)	655
Total : masse de la sous-structure (tonne)	7170
Volume de ballast (m ³)	5490
Masse de ballast ⁵ (tonne)	9760

Figure 7 : Quantité de matériaux pour une fondation à 31,8 m/CM

1 La plate-forme a été placée 3m au dessus du minimum requis afin de conserver une marge pour la remontée de la vague sur le fût, dont la détermination nécessite une modélisation détaillée non encore réalisée.

2 Il s'agit de la zone soumise aux vagues en conditions opérationnelles, donc là où seront implantées les structures d'accostage.

3 Avec une extension en encorbellement d'un côté

4 CM : Côte marine

5 Il s'agit de la masse de ballast requise. Ici basée sur un sable très lâche tel qu'un sable de dragage réinjecté dans la fondation

La Figure 8 présente la fondation dimensionnée pour cette même profondeur : une vue isométrique accompagne une coupe permettant la bonne visualisation des dimensions et proportions de cette fondation gravitaire. Les dimensions et l'organisation interne de la fondation évolueront en phase de design détaillé.

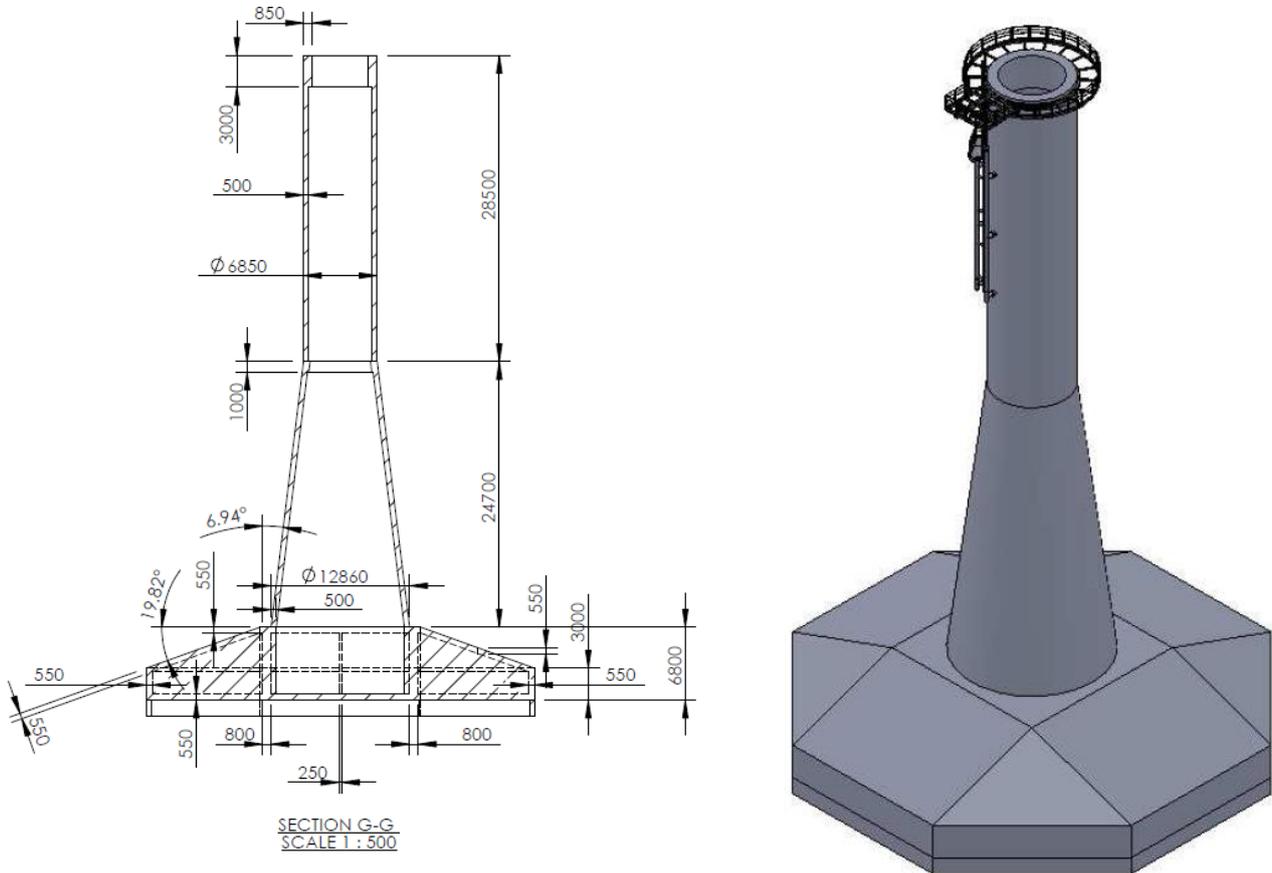


Figure 8 : Plan en coupe et isométrie de fondation gravitaire, profondeur de 31,8 m / CM

(GL - Garrad Hassan, 2011)

3.2. STRUCTURES SECONDAIRES

Les autres éléments constitutifs de la fondation sont les structures secondaires : formes d'accostage, passerelle, plateformes de travail et tubes d'amenée et de protection des câbles (dit « *J-tubes* »). Les « *J-tubes* » sont des structures tubulaires en acier fixées à la fondation lors de sa construction à terre.

Structure d'accostage et plateforme de travail

La Figure 9 montre la forme d'accostage et la plateforme de travail avec son encorbellement avant l'installation des éoliennes. Les échelles d'accès ne sont pas encore installées.



Figure 9: Forme d'accostage et plateforme de travail – C- Power, 2008 (EDF-EN)

Chaque fondation sera équipée de deux formes d'accostage pour améliorer l'accessibilité de l'éolienne.

La hauteur de la structure d'accostage est réglée en fonction des hauteurs de marée au niveau de la « Splash zone ».

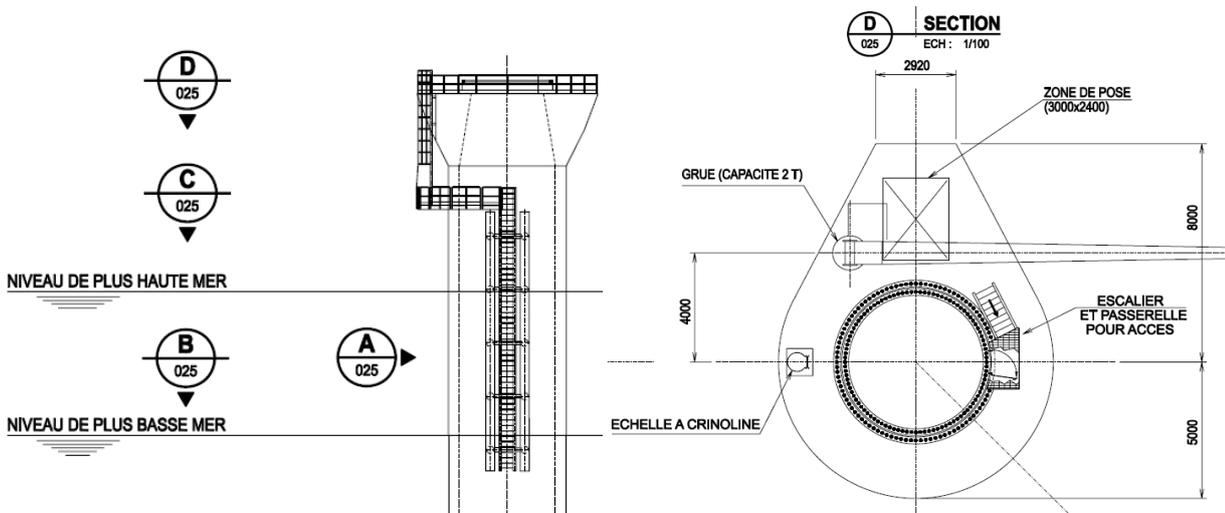


Figure 10: Passerelles d'accès (vue de face) et plateforme de travail (plan)

J-tubes

Les J-tubes sont les tubes de protection des câbles électriques. Chaque éolienne en comporte deux (un tube d'arrivée et un de départ). Ils font typiquement 400mm de diamètre et descendent à l'intérieur de la fondation tel que schématisé la Figure 11, ou éventuellement à l'extérieur.

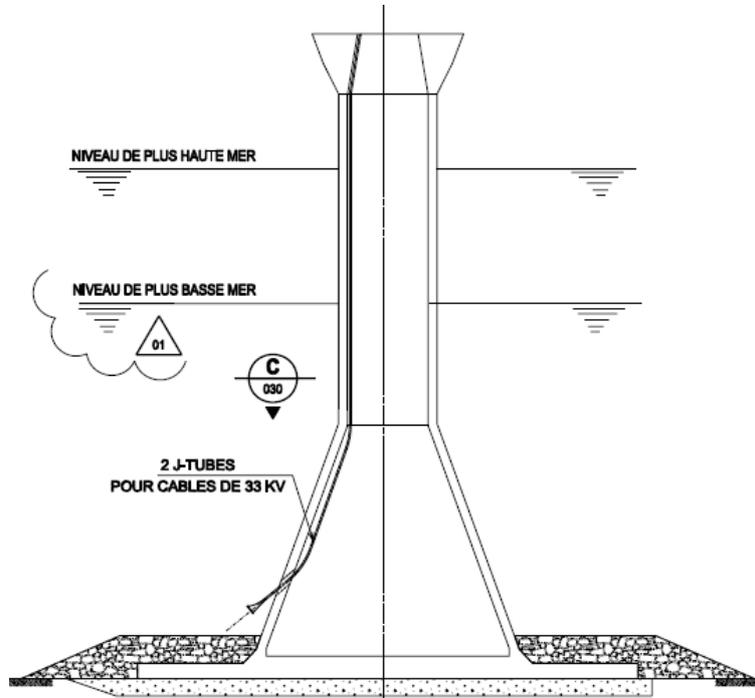


Figure 11 : Cheminement d'un J-tube

4. ETUDES COMPLEMENTAIRES

Des études complémentaires sont menées durant la période de levée des risques afin de préciser le dimensionnement conceptuel et de définir les dimensions finales des fondations. Elles s'appuient notamment sur la réalisation d'études géophysiques et géotechniques, prévues de février 2013 à mai 2013.