

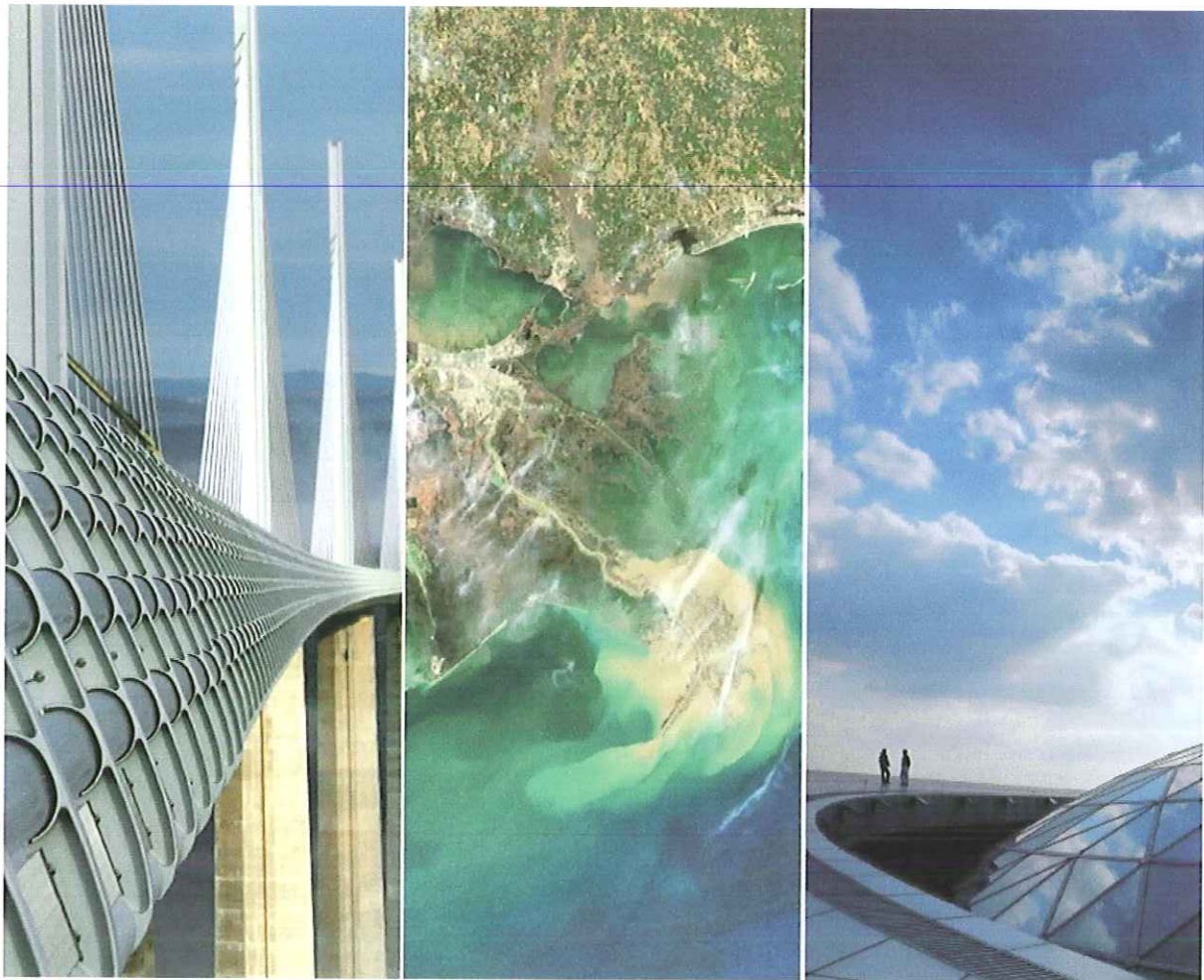
FOS FASTER

Terminal méthanier Fos Sur Mer

Etude géotechnique préliminaire

FOS FASTER

LNG TERMINAL FOS SUR MER
GEOTECHNICAL PRELIMINARY ANALYSIS



Emetteur
AFR

Phase / cat
PHA

Num
00001

Type
RPT

Indice
A01

Statut

 **ARCADIS**

Table des Matières

1	Introduction	4
2	Synthèse géotechnique	5
2.1	Contexte géotechnique.....	5
2.2	Analyse des caractéristiques des terrains	5
2.2.1	Résultats des analyses granulométriques.....	5
2.2.2	Résultats des sondages au pénétromètre statique (CPT).....	5
2.2.3	Récapitulatif des caractéristiques mécaniques.....	7
3	Dispositions constructives	8
3.1	Plateforme en remblai – fondation des ouvrages	8
3.1.1	Dispositions détaillées.....	8
3.1.2	Récapitulatif.....	9
4	Analyse comparative des solutions de fondation	10
4.1	Commentaires sur les hypothèses prises en compte	10
4.1.1	Solution 1 : fondations sur pieux réalisés en voie maritime.....	10
4.1.2	Solution 2A : remblais de bonne qualité vibrocompactés, traitement des sols en place par colonnes ballastées et inclusions rigides.....	11
4.1.3	Solution 3B : remblais de qualité moyenne, préchargement, traitement des remblais et des sols en place par colonnes ballastées et inclusions rigides	11
4.2	Conclusions sur l'analyse.....	11
5	Eléments sur la spécification des remblais	13
5.1	Aperçu des caractéristiques des matériaux alluvionnaires dans le secteur du projet	13
5.2	Spécification et classification des remblais pouvant être mis en œuvre.....	13
6	Conclusion	15

Annexe 1 : Estimation des tassements

Annexe 2 : Analyse comparative

Annexe 3 : Synthèse des courbes granulométriques

Annexe 4 : Interprétation des sondages au pénétromètre statique

1 Introduction

Pour le compte de la société Fos Faster la société Arcadis a réalisé sur la période de janvier à mai 2010 une mission d'assistance à Maitrise d'Ouvrage pour l'analyse géotechnique et le choix des solutions de fondation des ouvrages du Terminal Méthanier sur la commune de Fos sur Mer (13)

La présente étude comporte l'analyse des résultats des sondages et essais. Elle comporte également les analyses de faisabilité géotechnique des solutions de fondation des ouvrages.

2 Synthèse géotechnique

2.1 Contexte géotechnique

Le site étudié est situé sur une extension en mer du site de Caban Sud. Le fond marin est peu profond et situé entre -5.5 à -7 NGF.

Selon la carte géologique, la stratigraphie attendue est la suivante de haut en bas :

- Sédiments fins récents : argiles sableuses et limons avec des intercalations de sables propres,
- Cailloutis de Crau.

Sous les cailloutis de Crau, le substratum Urgonien est composé de grès, marnes et calcaires.

2.2 Analyse des caractéristiques des terrains

Les campagnes de reconnaissance prises en compte dans l'étude sont :

- Campagne Fugro de 2007 au droit du site : (Rapport Fugro n° 07 M-0309-a00 du 29/10/2007)
- Campagne Fugro 2010 (Rapport Fugro n° 10L-0004-a00 du 20/04/2010)

2.2.1 Résultats des analyses granulométriques

Les courbes granulométriques issues de la campagne de reconnaissance (2007) de Fugro ont été tracées sur le même graphique (voir annexe 3).

Ces courbes granulométriques montrent qu'il s'agit essentiellement de **sables fins et de silts**.

2.2.2 Résultats des sondages au pénétromètre statique (CPT)

Ces résultats, issus de la campagne Fugro 2010, sont interprétés dans les graphiques donnés dans l'annexe 4

Sous une couche de vase (sludge) d'un mètre environ, les sondages ont mis en évidence une succession de couches d'argile (clay), d'argile silteuse (silty clay), de silts, de sables silteux (silty sand) et de sables propres.

Au-delà de -17 m, les sondages ont mis en évidence des sables ou des graviers de meilleure qualité. Il s'agit d'une couche de transition vers les cailloutis de Crau.

Argiles et limons

Les valeurs de la résistance de pointe Q_t (valeur corrigée de la pression interstitielle) sont très faibles et comprises entre 0.3 et 0.6 MPa.

Les corrélations données en annexe donnent des cohésions non drainées de l'ordre de 30 KPa.

Le module élastique (Young modulus) peut être estimé suivant la relation empirique suivante :

$$E = 4 \cdot Q_t = 4 \cdot 0.5 \text{ MPa} = 2 \text{ MPa}$$

Ou, également, sur la base d'une corrélation entre le module élastique et la cohésion non drainée :

$$E = K \cdot C_u = 150 \cdot 30 = 4500 \text{ KPa} = 4.5 \text{ MPa}$$

Cette valeur paraît élevée et on retient une valeur intermédiaire de **E = 3 MPa**.

Sables et silts au dessus de -17 m

Les valeurs de résistance de pointe Q_t sont de l'ordre de 2 à 3 MPa. Le module élastique peut être estimé à **E = 10 MPa**.

Sables en dessous de -17 m

D'après les CPT, il s'agit de sables propres avec quelques intercalations fines, voire argileuses. Les valeurs de Q_t sont comprises entre 5 à 8 MPa. Par corrélation, le module élastique peut être estimé à **E = 25 MPa**

2.2.3 Récapitulatif des caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques des terrains sont récapitulées dans le tableau suivant.

	Argiles et limons	Sables fins et limons	Sables en-dessous -17 m	Cailloutis de Crau altéré	Cailloutis de Crau
γ_h (kN/m ³)	(17)	(17)	(19)		
Qt (MPa)	0.5	2 – 3	6	> 20	> 20
E _{Young} (MPa)	3	10	25	200	500
C' (kPa)	(0)	(0)	(0)		
ϕ' (°)	(29)	(34)	(38)		
CU (kPa)	30	-	-		

Tableau 1 Caractéristiques mécaniques des sols.

With :

γ_h : poids volumique

Qt : résistance de pointe du pénétromètre statique

E Young : module de déformation

C', ϕ' : cohésion et angle de frottement effectifs

() : Valeurs estimées

Notons que les caractéristiques ci-dessus peuvent être encore modifiées suite dans études suivantes en fonction des nouvelles données géotechniques.

3 Dispositions constructives

Compte tenu des caractéristiques des terrains et des ouvrages projetés et suivant les prédimensionnements et calculs donnés en annexes, il est possible de tirer les premières conclusions présentées ci-dessous :

3.1 Plateforme en remblai – fondation des ouvrages

3.1.1 Dispositions détaillées

- Les parties du site destinées à recevoir les ouvrages importants, et notamment les tanks, doivent être remblayées par matériaux sableux propre et bien gradué.
- Le tassement dans les sols en place est estimé de l'ordre de 45 cm pour un niveau de plateforme à + 4 NGF. Un pré chargement à + 8 NGF induit un tassement de l'ordre de 70 cm. Il s'agit des estimations préliminaires dont il faudra affiner.
- Compte tenu des hauteurs de pré chargement possibles (quelques mètres au dessus des ouvrages), cette solution permettra de limiter les tassements sous les ouvrages de faible ou de moyenne charge. **En plus, le préchargement n'aura que très peu d'effet sur les caractéristiques des remblais sableux. Elle ne peut à elle seule dispenser des traitements de sols sous les ouvrages lourds.**
- Le vibrocompactage des remblais sableux paraît la solution la plus adéquate pour améliorer les caractéristiques de ces remblais. Cette solution paraît indispensable en cas où les ouvrages lourds, tels que les tanks, seraient fondés dans les remblais.
- Les passages sableux dans les terrains alluvionnaires en place sont liquéfiables (voir interprétation CPT en annexe 4). Une analyse spécifique devra être réalisée sur ce risque de liquéfaction et sur les tassements que peut induire cette liquéfaction. Dorés déjà, on devra tenir compte de ce phénomène dans l'analyse des solutions de fondation. La solution de drainage par un réseau de drains ouverts pour contrer le phénomène de liquéfaction n'est pas admise en France comme solution suffisante. Il est demandé, dans ce cas, une amélioration de la densité relative par variation de volume. Ceci est possible par la mise en œuvre de colonnes ou d'inclusions par refoulement du sol.
- Le tassement des terrains en place sous la charge des Tanks (300 kPa) peut être estimé à 90 cm si l'on considère les caractéristiques actuelles. Néanmoins, la consolidation des terrains sous la charge des remblais correspondra à des caractéristiques meilleures et comparables avec les valeurs mesurées sur les sites déjà remblayés. Même en divisant ce

tassement par 2, il reste important et il est fort probable qu'un renforcement par des inclusions rigides soit nécessaire.

3.1.2 Récapitulatif

Zones peu ou moyennement chargées :

- Remblais en sables propres bien gradués,
- Drains ou colonnes ballastées dans les sols alluvionnaires en place,
- **Option** : préchargement permettant de diminuer les tassements sous les ouvrages moyennement lourds,
- **Option** : vibrocompactage des remblais sableux dans l'emprise des ouvrages.

Remarque importante : *cette solution peut s'avérer insuffisante vis-à-vis du problème de liquéfaction des sables. Il faut évaluer si le réseau de drainage est suffisant, et évaluer dans le cas échéant l'impact de la liquéfaction en termes de tassements.*

Zones très chargées :

- Remblais en sables propres bien gradués (tassement = 50 cm),
- Drains ou **colonnes ballastées** dans les sols alluvionnaires en place afin d'accélérer les tassements sous la charge des remblais. Les colonnes ballastées peuvent également jouer un rôle vis-à-vis de la liquéfaction,
- Mise en place d'un réseau d'inclusions rigides dans les sols en place. Ce réseau d'inclusions peut être prolongé jusqu'aux remblais et pourra ainsi remplacer le vibrocompactage des remblais.
- Vibrocompactage des remblais,

Notons que la solution fondation profondes sur pieux peut être envisagée. Les pieux pourraient être mis en œuvre avant la mise en place des remblais (mode maritime) ou après mis en place des remblais (mode terrestre).

Dans le chapitre suivant (complété par l'annexe 2) est présentée une analyse comparative des solutions de fondations

4 Analyse comparative des solutions de fondation

Dans le présent chapitre, nous présentons une analyse comparative des solutions de remblaiement, de fondation et des traitements des sols au droit de la zone des bacs - première phase (2 bacs). Cette analyse a été réalisée en mars et avril 2010 à la demande de la société Fos Faster.

Les solutions analysées sont les suivantes :

- **Solution 1** : Pieux réalisés en maritime, remblais de qualité moyenne ou médiocre,
- **Solution 2A** : remblais de bonne qualité vibrocompactés, traitement des sols en place par colonnes ballastées et inclusions rigides,
- **Solution 3B** : remblais de qualité moyenne, pré chargement, traitement des remblais et des sols en place par colonnes ballastées et inclusions rigides.

Il s'agit d'une analyse succincte devant être approfondie après réception des derniers résultats de reconnaissance.

Le facteur qui reste le plus difficile à intégrer est celui correspondant à la qualité des remblais mis en œuvre. Ce facteur conditionne bien entendu les dispositions de confortement des remblais et des fondations des ouvrages.

4.1 Commentaires sur les hypothèses prises en compte

4.1.1 Solution 1 : fondations sur pieux réalisés en voie maritime

Le pré dimensionnement de cette solution doit prendre en compte les effets des sollicitations sismiques.

Dans les calculs joints nous avons supposé que les efforts horizontaux sont de l'ordre de 20 % des efforts verticaux. Cette hypothèse de 20 % reste à confirmer.

Le critère déplacement a été pris comme dimensionnant. Les calculs ont été effectués avec un déplacement limité à **8 cm** environ.

La qualité des remblais mise en œuvre « entre les pieux » joue un rôle important. Pour le même déplacement en tête, la modification du module pressiométrique de 2 à 4 MPa permet d'accepter un effort en tête plus élevé de 40 %.

Ainsi le nombre des pieux est lié à la qualité des remblais mis en œuvre après la mise en place des pieux.

4.1.2 Solution 2A : remblais de bonne qualité vibrocompactés, traitement des sols en place par colonnes ballastées et inclusions rigides

Après le dragage des vases en fond marins, les remblais de bonne qualité sont mis en œuvre par voie maritime. Après une période de consolidation des terrains en place on procède à la mise en œuvre des inclusions et des colonnes ballastées dans les sols en place. Au final on pourra réaliser les vibrocompactages des remblais.

La surface de traitement des sols en place déborde de l'emprise des réservoirs.

4.1.3 Solution 3B : remblais de qualité moyenne, pré chargement, traitement des remblais et des sols en place par colonnes ballastées et inclusions rigides

Dans cette solution on suppose que les remblais sont difficilement vibrocompactables, mais avec des caractéristiques permettant, moyennant pré chargement et traitement, de supporter les ouvrages lourds.

Après le dragage des vases en fond marins, les remblais pourraient être mis en œuvre par voie maritime. Une fois le niveau hors d'eau est atteint, on pourra mettre en place dans ces remblais et dans les terrains en place les colonnes ballastées.

On procède ensuite à un pré chargement permettant de consolider très partiellement ces remblais. La mise en œuvre des inclusions rigides sera mise en place après l'évacuation des remblais de pré chargement.

Une variante consiste à mettre en place des drains dans les remblais avant le pré chargement. La mise en place des colonnes ballastées et des inclusions pourra intervenir après l'évacuation des remblais de pré chargement.

4.2 Conclusions sur l'analyse

L'analyse ci-dessous montre que les trois solutions sont techniquement réalisables. La qualité des remblais joue un rôle important dans le choix des ces solutions. Les délais et les conditions de réalisation pourront jouer également un rôle important dans le choix des solutions retenues.

Les solutions, avec un système de fondations superficielles dans les remblais, nécessitent un traitement des remblais et des sols en place. Le critère dimensionnant sera essentiellement celui des tassements à long termes des ouvrages.

Les solutions sur fondations profondes nécessiteront éventuellement de légers compléments de traitement des sols.

Les solutions analysées sont compatibles avec les conditions sismiques du site. Les sollicitations sismiques seront prises en compte dans le dimensionnement des fondations ou des traitements des sols.

5 Eléments sur la spécification des remblais

Dans ce chapitre sont présentées les différentes catégories ou classes de remblais pouvant être mis en œuvre pour réaliser la plateforme du futur site de stockage.

L'analyse ci-dessous est sommaire et aura comme but de permettre au Maître d'Ouvrage d'examiner les solutions de fourniture des matériaux.

5.1 Aperçu des caractéristiques des matériaux alluvionnaires dans le secteur du projet

Les essais de laboratoire de la campagne 2010 sont en cours. Nous disposons des résultats des essais de laboratoire de la campagne Fugro de 2007 et des résultats des essais CPT de 2010.

Dans l'ensemble, les sondages et essais montrent :

- Les sédiments sont constitués essentiellement de sables fins et de silts. Les pourcentages de passant au 80 μ sont supérieurs à 20 %. Un nombre important de d'échantillons est situé aux alentours de 50-60 % ou plus fins à 100 % de passage au 80 μ ,
- Les essais de limites d'Atterberg sur les matériaux les plus fins montrent qu'il ne s'agit pas de matériaux très plastiques. Les valeurs de IP sont majoritairement inférieures à 12 ou proches de la ligne A du diagramme de Casagrande.

5.2 Spécification et classification des remblais pouvant être mis en œuvre

Compte tenu du volume très important de remblais, nous donnons ci-après plusieurs catégories ou classes de matériaux pouvant être utilisés mais nécessitant bien entendu des traitements et des temps de consolidation spécifiques.

Les classes sont données ci-après suivant leur qualité, en ordre décroissant :

A – Matériaux grenus : sables et graves propres à légèrement silteux.

Il s'agit d'un matériau avec un pourcentage de fines (passant au 80 μ) inférieur ou égal à ≤ 12 %.

La partie sablo graveleuse de ce matériau doit être bien graduée : $\frac{D_{60}}{D_{10}} \geq 4$

Et la courbe granulométrique doit également respecter : $1 < \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} < 3$

Ce matériau pourra être facilement vibrocompacté.

Il pourra être destiné moyennant des traitements complémentaires à supporter des constructions lourdes.

B – matériaux grenus : sable et graves moyennement silteux.

Matériau avec un pourcentage des fines (passant au 80 μ) inférieur ou égal à $\leq 25 \%$. La partie fine ne doit pas être plastique. L'indice de plasticité $I_p < 12$ ou la valeur au bleu VBS $< 1,5$.

En fonction de la granulométrie de la partie supérieure à 80 μ (partie sablo graveleuse bien graduée), ce matériau pourrait être éventuellement vibrocompacté. Des traitements par colonnes ballastées et /ou des inclusions peuvent être envisagés.

Il pourra être destiné moyennant ces traitements à supporter des constructions lourdes.

C – matériaux : sable et graves silteux.

Matériau avec un pourcentage des fines (passant au 80 μ) allant jusqu'à 50% . **La faisabilité d'utilisation de ce type de matériau doit être validée par une étude théorique et éventuellement expérimentale et notamment sur les aspects suivants :**

- Faisabilité de mise en œuvre en mer. Etudier les conséquences d'une ségrégation importante lors du déversement. Le dépôt au fond de l'eau peut être constitué d'une alternance de couches en matériau fin et d'autres en plus grossier.
- Temps de consolidation après remblaiement.
- Caractéristiques mécaniques du remblai. Il faut analyser les possibilités de traitement et d'amélioration. En fonction de ces éléments il sera décidé si ces remblais peuvent accueillir des structures même de poids moyen.
- Etudier l'effet de présence d'éléments graveleux ou caillouteux dans le matériau.

6 Conclusion

L'étude présentée ci-avant a permis d'examiner les différentes solutions pour la réalisation des remblais et pour l'exécution des fondations des ouvrages.

Deux solutions principales se dégagent à l'issue de cette étude :

- Traitement des sols en place et des remblais, fondation des ouvrages en superficiel sur radier posée sur une couche d'assise.
- Fondation des ouvrages sur pieux. Ces pieux peuvent être en métal ou en béton. La mise en œuvre peut être effectuée en voie maritime (pieux métalliques) ou en voie terrestre (pieux métalliques ou béton).

Le choix des solutions dépendra des facteurs suivants :

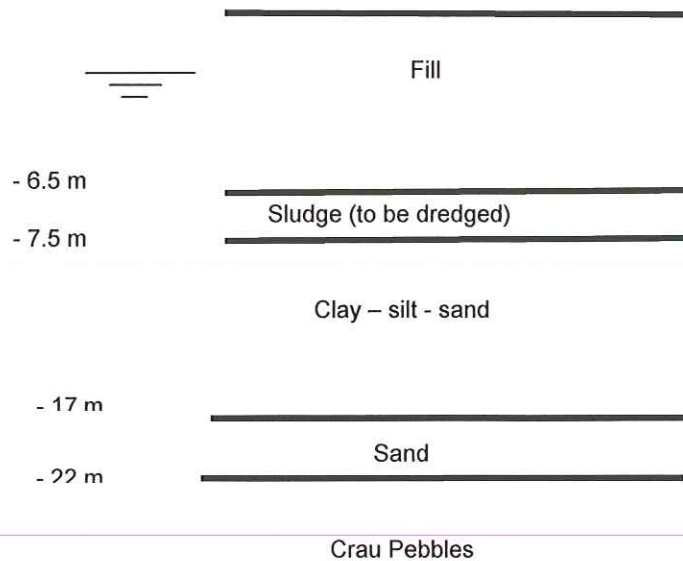
- La nature et la qualité des remblais mis en place.
- Les exigences en termes de tassements des ouvrages.
- Le comportement des ouvrages et des sols sous sollicitations sismiques

La présente étude fruit d'un échange et d'une concertation avec le Maître d'Ouvrage, a montré la faisabilité des solutions présentées dans ce rapport.

Des études et analyses complémentaires seraient nécessaires dans les phases ultérieures du projet afin de définir et d'affiner les solutions et afin d'effectuer les choix adéquats.

Annexe 1 : Estimation des tassements

Dans cette annexe sont données les estimations de tassement dans les sols en place sous la charge des remblais. La coupe géotechnique prise en compte dans l'estimation des tassements est donnée ci-dessous :



Un exemple de calcul paramétrique est donné dans le tableau ci-dessous.

Hypothesis	Sea Bed	Clay and silts thickness	clay - sand distribution	Sand thickness below 17m	Ey clay (kPa)	Ey silt and sand(kPa)	sand below 17 m (kPa)	fill's unit weight
	-7.50	9.50	80.00%	4.00	3000	10000	25000	20

Fill level (CD)	Fill Height	effective stress (Kpa)	settelment (m)
4.00	11.50	155.00	0.447
5.00	12.50	175.00	0.505
6.00	13.50	195.00	0.562
7.00	14.50	215.00	0.620
8.00	15.50	235.00	0.678

Ce calcul de tassement ne prend pas en compte la couche de vase en surface. Cette couche est supposée purgée par dragage avant la mise en place des remblais.

Dans le tableau ci-dessus il est considéré une répartition de 80 % de matériaux fins et 20 % de matériaux sableux.

Les tassements dans les sols en place sont de l'ordre de 45 cm pour un niveau de plateforme à + 4 NGF et 70 cm pour un niveau à + 8 NGF. Ce tassement peut atteindre une valeur de l'ordre de 100 cm dans le cas de modules élastiques légèrement plus faibles.

1 CARACTERISQUES ESTIMEES DES REMBLAIS (FILL'S CHARACTERISTICS)

2-1 Remblais en sables propres bien gradués (Coarse sand)

Remblais mis en œuvre sans traitement par vibrocompactage : Clapage maritime ou déversement.

- La densité relative (D_r) peut être estimée à 40 - 45 %
- La résistance de pointe au pénétromètre statique (CPT) : $Q_t \approx 3 - 4$ MPa
- Le module élastique : $E_y = \alpha \times (3 - 4 \text{ MPa}) = 4 \times (3 - 4 \text{ MPa}) = 12 - 16$ MPa.

Remblais mis en œuvre avec vibrocompactage

- La densité relative (D_r) peut être estimée à 70 - 80 %
- La résistance de pointe au pénétromètre statique (CPT) : $Q_t \approx 10$ MPa
- Le module élastique : $E_y = \alpha \times (10 \text{ MPa}) = 3-4 \times (10 \text{ MPa}) = 30 - 40$ MPa.

2-1 Remblais en matériaux dragués sur place (faisabilité à vérifier)

- Matériau avec 50 à 60 % de passant au 80 μ .
- Tassement important pour atteindre les mêmes caractéristiques que les terrains en place.

Pour un poids volumique γ_h de mise en place en remblais estimé à 15 KN/m³ et un poids volumique final identique aux terrains en place ($\gamma_h = 17$ KN/m³) le tassement peut être estimé de l'ordre de 1,1 m. Pour obtenir ce tassement et les caractéristiques mécaniques il faut avoir recours à un **pré chargement important**.

	Remblais Sables (Coarse sand) With Vibroflotation	Remblais Sables sans vibroflotation	Remblais en sables fins et silts du site*
Qt (MPa)	10	3 - 4	1
E Young (MPa)	30 - 40	12 - 16	7

Tableau 2 : Caractéristiques des remblais

* caractéristiques estimées pouvant être obtenues après pré chargement et tassement supérieur à 1 m.