

Fondations superficielles glissantes pour l'offshore profond – Méthodologie de dimensionnement

Deep Offshore Sliding Footings – Design Methodology

Bretelle S.
GHD, Perth, Australie

Wallerand R.
Subsea7, Paris, France

RÉSUMÉ : Les caractéristiques géotechniques des sols rencontrés en offshore profond conduisent de manière récurrente à des fondations de très grandes dimensions. Ceci induit des difficultés d'installation qui stimulent la recherche de solutions audacieuses pour les fondations dont le dimensionnement intègre des sollicitations horizontales transitoires. Les efforts horizontaux résultent de conditions transitoires pour les pipelines (arrêt et redémarrage de l'exploitation induisant des changements de température dans les pipelines). Ceux-ci induisent un glissement de la fondation. Ces efforts horizontaux étant variables dans le temps, le sol est soumis à des sollicitations cycliques. Cet article détaille les différentes étapes proposées pour le dimensionnement des fondations glissantes, destinées au support des structures liées aux pipelines, en prenant en compte les effets de la dégradation cyclique sur la capacité portante, et l'évaluation des tassements.

ABSTRACT: Due to the geotechnical characteristics of offshore deep-water soils, footing size can become very large. This may induce installation challenges, which in turn stimulates smart design solutions allowing for horizontal displacement of the footing. Horizontal loads results from flow lines expansion during start-up and shut-down of the production, as large temperature changes will induce dilatation. If horizontal loads are above the horizontal capacity of the footing, the foundation will slide. Horizontal loads varying with time, soil cyclic loadings are induced. This paper presents the different steps of the design for the proposed concept, allowing the footing to slide. This design includes cyclic soil degradation effects on bearing capacity and settlements.

MOTS-CLÉS: Offshore, fondation, glissante, pipeline, cyclique, dégradation, tassement.

KEYWORDS: Offshore, footing, sliding, pipeline, cyclic, degradation, settlement.

1 INTRODUCTION

Les caractéristiques géotechniques des argiles molles rencontrées en offshore profond conduisent de manière récurrente à des fondations de très grandes dimensions. Ceci induit des difficultés d'installation qui stimulent la recherche de solutions audacieuses pour les fondations dont le dimensionnement intègre des sollicitations horizontales transitoires.

Les efforts horizontaux résultent des sollicitations horizontales transitoires. C'est le cas notamment des structures intermédiaires ou des structures fin de ligne, qui permettent la connexion entre les pipelines et les différents éléments de l'architecture du champ (puits, risers, manifolds). Les efforts appliqués à ces structures sont transmis au sol par l'intermédiaire de fondations superficielles faites de tôles d'acier. Les efforts verticaux proviennent du poids propre de la structure, de la section de conduite qu'elle supporte, des différents connecteurs et vannes associées. Les efforts horizontaux sont eux provoqués par la dilatation ou la contraction de la conduite (arrêt et redémarrage de l'exploitation induisant des changements de température et de pression dans les pipelines). Ceux-ci induisent un glissement de la fondation (le coefficient de sécurité au glissement est inférieur à 1). Ces efforts horizontaux étant variables dans le temps, le sol est soumis à des sollicitations cycliques.

L'évaluation des effets résultants de la dégradation cyclique des propriétés des sols (ici la résistance au cisaillement) permettra d'assurer que la fondation reste stable sous efforts verticaux et moments.

L'évaluation des tassements est nécessaire. Le cisaillement cyclique (environ 2000 cycles sur la durée de vie de l'ouvrage)

est source de tassements spécifiques, qui sont dus aux déplacements répétés de la fondation.

Cet article détaille les différentes étapes proposées pour le dimensionnement des fondations glissantes, destinées au support des structures liées aux pipelines, et posées sur des argiles molles.

2 COMPARAISON PIPELINES-FONDATIONS

Le tableau 1 rappelle les concepts d'interaction sol-pipeline et sol-fondation. Il permet d'illustrer les différences entre les comportements admis pour les pipelines et ceux généralement requis pour les fondations superficielles (White - Cathie 2010).

Les grandes familles de différences qui sont décrites ci-dessous affectent directement la perception du dimensionnement, qui intègre naturellement les déplacements pour les pipelines, et qui par contre recommande des coefficients de sécurité importants sur la capacité portante (incluant les efforts horizontaux) des fondations pour se prémunir des déplacements.

Pour ce qui concerne les pipelines, il peut s'avérer économiquement impossible d'empêcher le pipeline de se déplacer, en l'enfouissant par exemple, sur des dizaines de kilomètres, et à des profondeurs d'eau de plus de 1000m. Par contre, des modèles d'interaction sol-pipeline intégrant le déplacement permettent d'optimiser les dimensions des pipelines (les épaisseurs des tubes en particulier).

Pour ce qui concerne les fondations, même liées aux pipelines, il reste d'usage de les dimensionner sans autoriser leur déplacement.

Ce choix conduit à des fondations de très grandes dimensions, en particulier sur les argiles marines en grande

profondeur. Il pose aussi des problèmes structuraux au niveau de la connexion du pipeline et de la fondation.

Tableau 1. Comparaison des comportements admis pour les pipelines et pour les fondations.

Paramètre	Pipeline	Fondation
Géométrie de l'interface sol-fondation	Incertaine, la pénétration dépend des méthodes d'installation, de la forme du fond marin	Connue, contrôlée
Critère de dimensionnement en service	Déplacement autorisé, lois de comportement spécifiques	Fixe, déplacements minimales de la fondation
Sol	Perturbé pendant l'installation et les cycles	Similaire à l'état initial
Charges	La réponse du pipeline est affectée par l'interaction avec le sol	Les charges ne sont pas affectées par le sol de fondation
Méthodes de dimensionnement	Non disponible (ou encore contestées), les hypothèses de sol enveloppes (hautes ou basses) doivent être considérées	Disponibles, les hypothèses de sol basses sont conservatives pour la stabilité

3 DIMENSIONNEMENT SOUS CHARGES PERMANENTES

La première étape traite du dimensionnement sous charges permanentes qui requiert un coefficient de sécurité supérieur à 1 avec la prise en compte concomitante des efforts verticaux et moments (Cathie 2008).

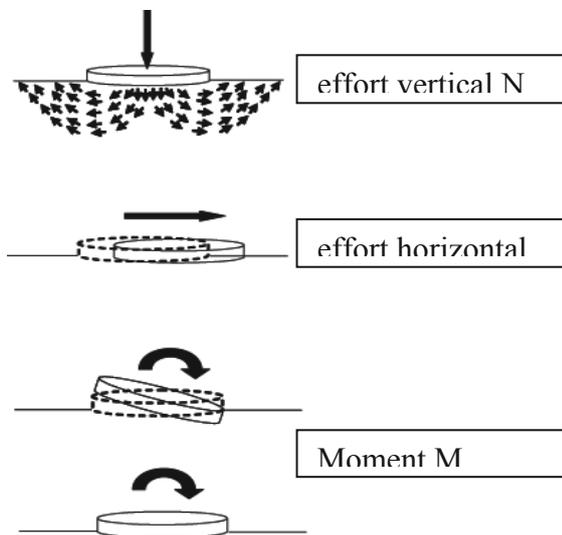


Figure 1 : Mécanismes de rupture

La stabilité au sens usuel du terme doit être assurée. Les charges permanentes sont essentiellement liées au poids de la structure.

La problématique du dimensionnement des fondations superficielles connaît de nombreux développements récents et il existe une normalisation (ISO 19901-4 2011) afférente. Celle-ci permet la prise en compte de manière concomitante des efforts verticaux N , horizontaux T ainsi que des moments M .

On rappelle en préambule les principes du dimensionnement intégrant ces efforts M , N , T , sous la forme d'enveloppes 3D (Randolph 2005).

Les mécanismes de rupture sont rappelés sur la figure 1.

L'approche traditionnelle de dimensionnement de fondations superficielles consiste à simplifier le chargement (M , N , T) en un chargement (N , T) appliqué sur une surface réduite. Cette approche conduit à des surdimensionnements quand ils sont comparés à des calculs par éléments finis tridimensionnels.

L'approche proposée dans l'API-ISO permet l'utilisation d'enveloppes de rupture 3D, utilisant les valeurs de :

- ✓ Nult charge verticale de rupture sous chargement vertical seul ($M=0$ et $T=0$) ;
- ✓ Tult charge horizontale de rupture sous chargement horizontal seul ($M=0$ et $N=0$) ;
- ✓ Mult moment de renversement ultime en condition de renversement seul ($T=0$ et $V=0$).

La surface limite dans l'espace (N/N_{ult} , M/M_{ult} , T/T_{ult}) est alors définie par des calculs spécifiques 3D ou disponibles dans certaines références pour des formes de fondation types. Un exemple est proposé sur la figure 2.

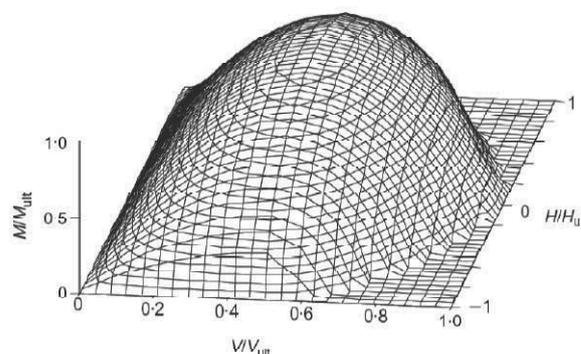


Figure 2 : Enveloppe de rupture (Gourvenec 2007)

4 DIMENSIONNEMENT SOUS CHARGES HORIZONTALES

Les efforts horizontaux résultent de conditions transitoires pour les pipelines (arrêt et redémarrage de l'exploitation induisant des changements de température dans les pipelines).

Un coefficient de sécurité suffisant doit être obtenu pour que la fondation soit stable (pas de rupture sous charges verticales et moments), tout en autorisant son déplacement horizontal.

L'évaluation présentée dans cet article se limite au cas des argiles molles trouvées dans les grands fonds.

4.1 Vérifications de stabilité

L'évaluation des effets résultants de la dégradation cyclique des propriétés des sols (ici la résistance au cisaillement) se décompose en trois étapes :

- ✓ Une évaluation des contraintes de cisaillement est effectuée sous la fondation le long de surfaces de rupture ;
- ✓ l'effet des cycles est intégré en utilisant des résultats usuels d'essais de laboratoire caractérisant la dégradation cyclique ;
- ✓ une vérification de la stabilité de la fondation est effectuée le long des surfaces de rupture précédentes, avec les caractéristiques réduites déterminées précédemment.

4.1.1 Évaluation des contraintes de cisaillement

Il est suggéré d'utiliser un programme de calcul aux éléments finis pour obtenir les contraintes de cisaillement sous la fondation.

Il n'est pas requis d'utiliser un modèle autorisant des grands déplacements (2 à 3 mètres sont observés pour les pipelines), ni

de représenter fidèlement les cycles (les structures concernées subissent 1000 à 5000 cycles), ce qui nécessiterait des temps de calculs importants et des outils complexes.

La modélisation proposée ici applique un effort vertical représentatif du poids de la structure, et un effort horizontal « à la rupture », c'est-à-dire saturant les contraintes de cisaillement à l'interface sol fondation.

La figure 3 présente un modèle type de calcul.

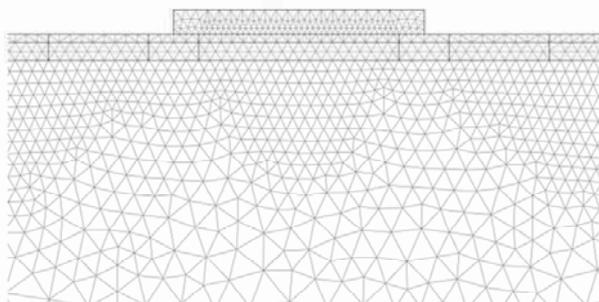


Figure 3 : Modèle de calcul

Ce calcul permet de déterminer l'étendue des zones sollicitées sous la fondation et les contraintes de cisaillement appliquées au sol de fondation.

A partir de ce calcul, on détermine le taux de cisaillement moyen (τ) à différentes profondeurs sous la fondation (en général de 0 à B, où B est la largeur de la fondation).

4.1.2 Dégradation cyclique

La dégradation cyclique est déterminée à partir d'essais de laboratoire cycliques, qui permettent d'obtenir des enveloppes de dégradation en fonction du nombre de cycles.

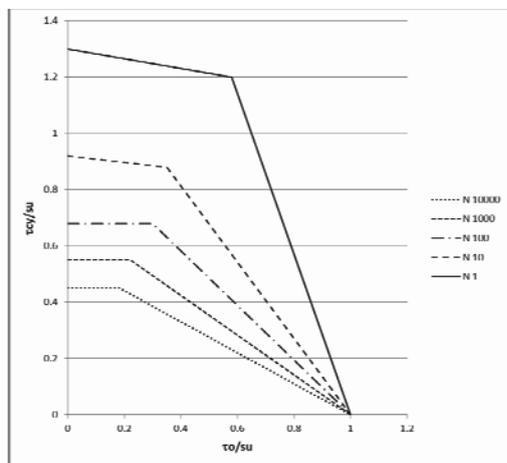


Figure 4 : Dégradation cyclique (Argile de Drammen, OCR=1, d'après Andersen 2004)

On lit sur l'axe horizontal le rapport τ_0/s_u et sur l'axe vertical le ratio τ_{cy}/s_u . Le nombre de cycles correspond aux différentes courbes sur l'abaque.

Les notations suivantes sont utilisées :

τ_0 = cisaillement moyen sans cycles

τ_{cy} = cisaillement dégradé, après N cycles

s_u = résistance au cisaillement moyen

4.1.3 Vérification de la stabilité après dégradation cyclique

Le calcul présenté en 4.1.1 peut être repris en modifiant les valeurs de S_u pour tenir compte de la dégradation cyclique.

Le coefficient de sécurité obtenu est alors représentatif de la stabilité de la fondation après un grand nombre de cycles.

4.2 Calculs des tassements

L'évaluation des tassements (élastique, consolidation, fluage) est nécessaire. Le cisaillement cyclique (environ 2000 cycles sur la durée de vie de l'ouvrage) est source de tassements additionnels, qui sont dus aux déplacements répétés de la fondation. Les tassements additionnels suivants sont considérés :

- ✓ Tassements induits par le chargement cyclique de l'argile profonde (données de triaxiaux DSS publiées),
- ✓ Dégradation de la couche en contact avec la fondation du fait du glissement répété,
- ✓ Erosion par les bords de la fondation (cause potentielle de réduction de la surface effective sous la fondation).

4.2.1 Tassements élastiques, consolidation, fluage

Les tassements élastiques de consolidation et de fluage peuvent être déterminés à partir des méthodes usuelles analytiques, ou à partir du modèle éléments finis décrit plus haut (avec des modèles de type Soft Soil pour Plaxis).

4.2.2 Réduction cyclique du module d'élasticité

Pour les tassements cycliques, il faudra tenir compte :

- ✓ Des déformations dues aux cycles ;
- ✓ Du développement de surpressions interstitielles dû aux cycles.

Dans les deux cas, on utilisera les résultats des calculs décrits plus haut, et les enveloppes obtenues par essais de laboratoire.

Les notations suivantes sont utilisées (différentes de celles du chapitre précédent) :

τ_{av} = cisaillement moyen sans efforts horizontaux

τ_{cy} = cisaillement moyen avec efforts horizontaux

s_u = résistance au cisaillement moyen

La figure 5 présente des résultats types pour la détermination des déformations (γ) dues au cisaillement cyclique.

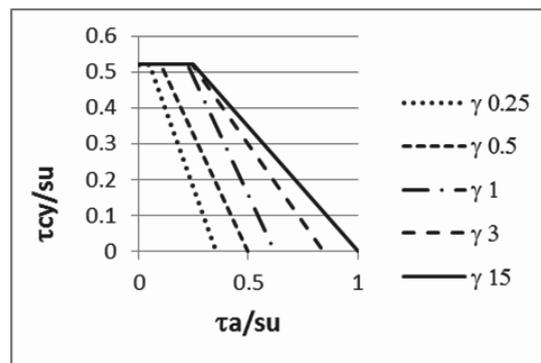


Figure 5 : Déformations moyennes de cisaillement cyclique (Argile de Drammen, OCR=1, d'après Andersen 2004)

La déformation ci-dessus est multipliée par l'épaisseur de la couche concernée pour obtenir le tassement supplémentaire.

La figure 6 présente l'augmentation de pression interstitielle en fonction du nombre de cycles.

La déformation supplémentaire est alors obtenue par :

$$\varepsilon = (\Delta u / \sigma'_v) * \sigma'_v / M$$

Avec

$\Delta u / \sigma'_v$: lu sur la figure 6

σ'_v : contrainte effective verticale

M : module de déformation

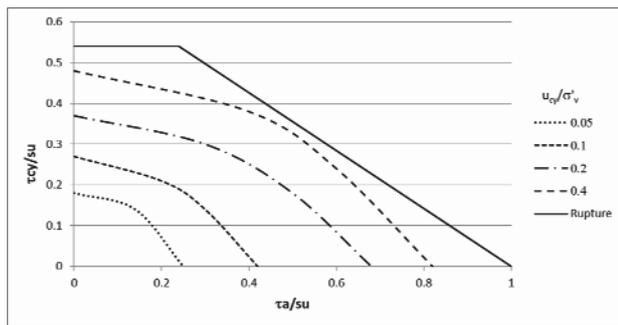


Figure 6 : augmentation de pression interstitielle due au cisaillement de 1000 cycles (Argile de Drammen, OCR=1, d'après Andersen 2004)

4.2.3 Dégradation de la couche de contact

La couche de contact (les 20 à 30 cm d'argile directement en contact avec la face inférieure de la fondation) subit de façon répétée un état de rupture, sous l'effet du glissement.

Cet état de rupture reste en général confiné au niveau de cette couche d'interface, car une couche de meilleures caractéristiques (crouete) est souvent présente entre 0 et 2 m de profondeur. La crouete agit comme une barrière de protection qui limite le transfert des ruptures par cisaillement vers les couches inférieures.

Il est très difficile, voire impossible de modéliser le processus cyclique dans cette couche supérieure, du fait des redistributions de contraintes entre les bords et le centre de la fondation et bien entendu du fait des sollicitations cycliques.

Il est donc proposé de retenir une approche simplifiée qui considère les différents aspects de la dégradation.

Le modèle éléments finis décrit plus haut permet de considérer le moment maximum qui sollicite la fondation, associé au poids de la fondation et à l'effort horizontal qui sature le frottement au niveau de l'interface. Ce calcul peut être mené avec les caractéristiques « intactes » dans la couche de contact, puis avec les caractéristiques remaniées dans cette même couche.

La comparaison directe des résultats permet d'estimer un tassement et une rotation supplémentaire à considérer dans le dimensionnement.

4.2.4 Erosion par les bords

La concentration de contraintes est un phénomène bien connu qui dans ce cas particulier peut créer des tassements supplémentaires par érosion près des angles.

Les skis ont depuis longtemps apporté une réponse appropriée en relevant les bords pour limiter l'effet de l'angle.

Les fondations glissantes devront comporter un dispositif similaire pour éviter de racler progressivement toute une bande de sol.

L'estimation par le calcul de ce phénomène reste à développer, par contre, les conséquences peuvent être évaluées en retirant arbitrairement les éléments de sol de l'interface sous une partie de la fondation. On pourra enlever les éléments sur une bande correspondant au mouvement calculé des pipelines qui se connectent sur la fondation, puisque ce mode de comportement est disponible dans les modèles de pipelines.

Une autre méthode, moins pénalisante consiste à reprendre les résultats du calcul avec les moments présentés au paragraphe précédent 4.2.3, pour déterminer les contraintes dans la couche d'interface.

En comparant ces contraintes à la contrainte ultime ($N_c * S_u$)

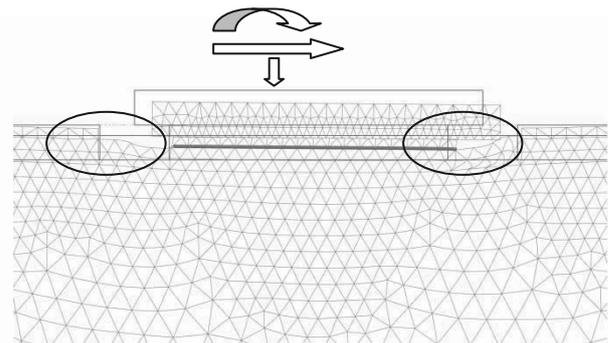


Figure 7 : Exemple de calcul avec dégradation sous les bords (cercleées).

5 CONCLUSION

Cet article a détaillé les différentes étapes proposées pour le dimensionnement des fondations glissantes, destinées au support des structures liées aux pipelines, dans des conditions géotechniques d'argiles grands fonds.

Le tassement à long terme et sous un nombre de cycle représentatif de la vie de la structure sera obtenu par cumul des différentes valeurs de tassements calculées suivant la démarche proposée. La stabilité de la structure sera ainsi assurée, et son fonctionnement ne sera pas altéré par les tassements ou rotations dus au chargement cyclique.

6 REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon mari et mon fils pour leur patience pendant la période de rédaction de cet article, ainsi que pour leur relecture.

Bien entendu, cet article n'aurait pas vu le jour sans mon expérience en France, à Terrasol pour la maîtrise des fondamentaux géotechniques, chez Saipem, pour l'ouverture Internationale et offshore, chez Cathie Associates pour la pratique continue des projets liés aux grands fonds et enfin en Australie, où GHD me donne l'opportunité de travailler sur des grands projets d'infrastructure.

7 REFERENCES

- Andersen 2004 Cyclic clay data for foundation design of structures subjected to wave loading International Conf. on "Cyclic behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena" Keynote lecture CBS04, Bochum, Germany.
- Cathie et Al. 2005 Pipeline Geotechnics State of the Art.
- Cathie et Al 2008 Design of sliding foundations for subsea structures.
- Gourvenec, S. (2007), Shape Effects on Capacity of Rectangular Footings Under Combined Load, *Géotechnique*, 57(8), pp. 637–646.
- ISO 19901-4 2003 modified 2011 API RP2GEO Geotechnical and foundation design considerations.
- Randolph et Al - 2005 Challenges of offshore geotechnical engineering.
- White, D., Cathie, D.N. 2011, 'Geotechnics for subsea pipelines', *Frontiers in Offshore Geotechnics II*, The Netherlands, CD, pp. 87-123.