

École polytechnique de Louvain

Optimisation de dispositions de pieux uniformisant le tassement des réservoirs

Auteur : **Gaëtan de Caritat de Peruzzis**
Promoteurs : **Alain Holeyman, Benoît Pardoën**
Lecteurs : **SANDRA SOARES, OLIVIER CARLIER**
Année académique 2018–2019
Master [120] : ingénieur civil des constructions

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui m'ont apporté leur soutien, leur aide et leurs encouragements pendant toute la réalisation de ce mémoire de fin d'étude.

Un tout grand merci à ma famille et mes proches qui m'ont soutenu par leur présence et leur bonne humeur, en me permettant de travailler dans les meilleures circonstances et pour qui j'ai trouvé la motivation et l'inspiration.

Je remercie vivement mon promoteur, le Professeur Alain Holeyman de m'avoir fait confiance en me donnant l'opportunité de développer ce sujet. Son soutien et son encadrement m'ont énormément appris et ont fortement contribué à la réalisation de ce travail. Par sa disponibilité et ses conseils, il m'a encouragé à m'améliorer tout au long de ma recherche.

Merci au Professeur Benoît Pardoën d'avoir accepté d'être mon promoteur administratif et lecteur de mon mémoire.

Un grand merci à Mustafa Jafari et Haythem Gharsallaoui, assistants à l'UCL qui m'ont apporté leur aide à de très nombreuses reprises et m'ont permis de débattre mes idées et démarches.

Merci également au Professeur Sandra Soarez et à l'assistant Olivier Carlier d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

RÉSUMÉ

L'étude réalisée dans ce mémoire vise à améliorer la conception de fondations de réservoirs de grandes dimensions par l'optimisation de la disposition et du dimensionnement des pieux de fondation dans le but de minimiser le tassement différentiel subi par la structure.

Le tassement différentiel a été identifié dans la littérature comme un facteur de risque majeur, susceptible d'endommager la structure et de compromettre l'utilisation des réservoirs de stockage. À ce jour, la littérature ne présente pas l'ensemble des principes de dimensionnement à respecter nécessaires afin de concevoir des réservoirs durables, sécuritaires et économiques de manière optimisée. Au travers de notre étude, trois types de fondations, à savoir les fondations en radier simple, les fondations mixtes sur pieux et les fondations profondes sur groupe de pieux, ont été étudiées au moyen d'une analyse paramétrique. Cette analyse complète la littérature existante avec des résultats de calculs numériques en Plaxis 2D et met en évidence l'impact des principaux paramètres sur le tassement différentiel ainsi que sur la quantité de pieux mis en place.

Avec chaque type de fondations étudié, il est possible de réduire grandement le tassement différentiel subi par la structure par la mise en place d'une fondation sur pieux adaptée. A la suite de cette étude, il ne nous est pas encore possible de discriminer ou de promouvoir la fondation mixte sur pieux ou la fondation profonde sur groupe de pieux, étant donné la variabilité des solutions possibles respectant les critères de conception.

Ce mémoire présentent finalement quelques directives de conception de réservoirs sur base de la littérature existante et des résultats obtenus dans cette étude.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	1
RESUME	2
TABLE DES MATIERES	3
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	9
<u>1 DESCRIPTION DE LA PROBLEMATIQUE ETUDIEE</u>	<u>9</u>
1.1 DESCRIPTION D'UN RESERVOIR TYPE	10
1.2 CAS DE CHARGE	11
1.3 DEFORMATIONS	11
1.4 PROBLEMES ENGENDRES PAR UN DEPLACEMENT IMPOSE	12
<u>2 ETAPES DE L'ETUDE</u>	<u>12</u>
2.1 ANALYSE DE LA LITERATURE	12
2.2 VALIDATION DE LA METHODE	12
2.3 ADAPTATION DE FONDATIONS POUR UNIFORMISER LE TASSEMENT	12
<u>3 STRATIGRAPHIES</u>	<u>12</u>
3.1 MATERIAUX	13
3.2 DIMENSION DU PROBLEME ANALYSE	13
3.3 DIFFERENTES CONFIGURATIONS DU PROBLEME	13
CHAPITRE 2 : DEFINITIONS ET CONCEPTS	15
<u>1 DEFINITIONS DES DIFFERENTS TYPES DE TASSEMENTS</u>	<u>15</u>
1.1 TASSEMENT UNIFORME	15
1.2 INCLINAISON PLANE	15
1.3 TASSEMENT NON-UNIFORME	15
<u>2 DESCRIPTIONS DE DIFFERENTES FONDATIONS</u>	<u>16</u>
2.1 RADIER	16
2.2 FONDATIONS PROFONDES SUR PIEUX	17
2.3 FONDATIONS MIXTES SUR PIEUX	17
2.4 RADIER SUR INCLUSIONS RIGIDES	17
2.5 COLONNES BALASTEES	17
2.6 RADIER SUR PIEUX SECANTS	18
2.7 RADIER SUR MURS	18
<u>3 DEFINITIONS DE PARAMETRES</u>	<u>18</u>
3.1 PARAMETRES DE TASSEMENT	18
3.2 PARAMETRES DE GEOMETRIE	18
3.2.1 RADIER	18
3.2.2 FONDATIONS DE PIEUX	18
3.2.3 LONGUEUR TOTALE D'ANNEAUX	19

3.2.4	GEOMETRIE EQUIVALENTE	20
3.3	RIGIDITE FLEXIONNELLE RELATIVE DU RADIER	20
3.4	PARAMETRE DE CAPACITES PORTANTES	21
<u>4</u>	<u>DEFINITIONS DE PRINCIPES</u>	<u>21</u>
4.1	EQUIVALENCE D'UNE RANGEE DE PIEUX EN MODELE PLAN	21
4.2	CONCEPT DE PIEU EQUIVALENT	22
4.3	PRINCIPE D'EQUIVALENCE DE SURFACE HORIZONTALE	23
	<u>CHAPITRE 3 : ANALYSE DE LA LITTERATURE</u>	<u>24</u>
<u>1</u>	<u>CAS HISTORIQUES</u>	<u>24</u>
1.1	FORME DU PROFIL DE TASSEMENT	24
1.2	FACTEURS GOUVERNANTS LE TYPE DE PROFIL DE TASSEMENT	25
1.2.1	LE RAPPORT DIAMETRE / EPAISSEUR COMPRESSIBLE	25
1.2.2	LE FACTEUR DE SECURITE	26
<u>2</u>	<u>PROBLEMES ENGENDRES PAR UN TASSEMENT NON-UNIFORME</u>	<u>27</u>
<u>3</u>	<u>CRITERES DE TASSEMENT DIFFERENTIEL</u>	<u>29</u>
<u>4</u>	<u>ENJEUX DE CONCEPTION DE LA FONDATION</u>	<u>29</u>
4.1	PRIX	29
<u>5</u>	<u>UTILISATION DE FONDATIONS PROFONDES</u>	<u>30</u>
<u>6</u>	<u>ETUDE DE FONDATIONS MIXTES RADIER SUR PIEUX</u>	<u>30</u>
6.1	NIVEAU DE LA CHARGE	30
6.2	RADIER	31
6.2.1	TAILLE DU RADIER	32
6.2.2	EPAISSEUR DU RADIER	32
6.2.3	RIGIDITE FLEXIONNELLE RELATIVE DU RADIER	32
6.3	PIEUX	33
6.3.1	NOMBRE DE PIEUX	33
6.3.2	ESPACEMENT ENTRE PIEUX	34
6.3.3	DISTRIBUTION DE PIEUX	35
6.3.4	LONGUEUR DES PIEUX	36
6.3.5	RAPPORT DE RIGIDITE GROUPE DE PIEUX-RADIER	37
6.3.6	RAPPORT DE RIGIDITE PIEUX-SOL	37
6.4	SOL	38
6.4.1	TYPE DE SOL	38
6.4.2	EPAISSEUR DE SOL COMPRESSIBLE	38
6.4.1	EFFET DU COEFFICIENT DE POISSON DU SOL	39
6.5	EFFET DE RADIER EN CONTACT AVEC LE SOL	39
<u>7</u>	<u>RECOMMANDATIONS POUR LE DESIGN DE RADIER SUR PIEUX</u>	<u>39</u>
<u>8</u>	<u>PRESSION SOUS LE RADIER</u>	<u>40</u>

<u>9</u>	<u>FONDATIONS PROFONDES SUR GROUPE DE PIEUX</u>	<u>41</u>
9.1	RIGIDITE FLEXIONNELLE RELATIVE	42
9.2	DISPOSITIONS DE PIEUX	43
9.3	LONGUEUR ET NOMBRE DE PIEUX	43
9.4	INFLUENCE D'UNE COUCHE RIGIDE DANS LA STRATIFICATION	44
9.5	OPTIMISATION DE GROUPE	45
<u>CHAPITRE 4 :</u>	<u>MODELE NUMERIQUE PLAXIS</u>	<u>47</u>
<u>1</u>	<u>INTRODUCTION A PLAXIS 2D</u>	<u>47</u>
<u>2</u>	<u>MODELISATION DES MATERIAUX EN PLAXIS</u>	<u>47</u>
2.1	TYPE DE DRAINAGE	47
2.1.1	CHOIX DES TYPES DE DRAINAGE DANS LES MODELISATIONS	49
2.2	MODELES DE MATERIAUX	49
2.2.1	ÉLASTIQUE LINEAIRE	49
2.2.2	MOHR-COULOMB (MC)	50
2.2.3	HARDENING SOIL (HS)	51
2.2.4	SOFT SOIL CREEP MODEL (SSCM)	52
<u>3</u>	<u>VALEURS DE PARAMETRES</u>	<u>53</u>
<u>4</u>	<u>FROTTEMENT EQUIVALENT</u>	<u>53</u>
<u>5</u>	<u>MODELES DE MATERIAUX UTILISES</u>	<u>54</u>
5.1	MATERIAUX ELASTIQUES	54
5.2	MATERIAUX MODELISES EN MOHR-COULOMB	54
<u>6</u>	<u>MODELISATION EN PLAN</u>	<u>55</u>
6.1	EMBEDDED BEAM ROW	55
<u>7</u>	<u>MODELISATION AXISYMETRIQUE</u>	<u>55</u>
7.1	EQUIVALENCE ENTRE UNE SERIE DE PIEUX ET UN MUR	56
7.1	EQUIVALENCE DE SURFACE HORIZONTALE	56
<u>CHAPITRE 5 :</u>	<u>VALIDATION DE LA METHODE</u>	<u>57</u>
<u>1</u>	<u>VALIDATION DU MODELE NUMERIQUE</u>	<u>58</u>
1.1.1	DESCRIPTION DU MODELE DE VALIDATION	58
1.1.2	RESULTATS DE L'ANALYSE DE VALIDATION	59
<u>2</u>	<u>UTILISATION DE LA VALIDATION</u>	<u>61</u>
<u>CHAPITRE 6 :</u>	<u>ANALYSE DE CAS</u>	<u>62</u>
<u>1</u>	<u>EVALUATION OF PERFORMANCE OF PILED-RAFT FOUNDATIONS ON SOFT CLAY: A CASE STUDY.</u>	<u>62</u>

1.1	VALIDATION DE LA METHODE D'ETUDE	63
1.2	STRATIFICATION DU SOL	63
1.3	PARAMETRES DE MATERIAUX	64
1.3.1	MODIFICATION DES PARAMETRES DE RESISTANCE ET DE DEFORMATION	64
1.4	DESCRIPTION DU MODELE DE RADIER SUR PIEUX	66
1.5	ETUDE DE (KHANMOHAMMADI & FAKHARIAN, 2018)	67
1.5.1	CHARGES REPRISES PAR LES PIEUX	68
1.6	ETUDE PLAXIS	69
1.6.1	MODELISATION DES MATERIAUX	69
1.6.2	MODELE PLAXIS	69
1.6.3	HYPOTHESE DE MODELISATION	70
1.6.4	RESULTATS PLAXIS	70
1.6.5	COMPARAISON DES RESULTATS	71
1.7	CONCLUSION DE L'ETUDE DE (KHANMOHAMMADI & FAKHARIAN, 2018)	72
<u>2</u>	<u>NOMBRE DE CAS A ETUDIER</u>	<u>72</u>
	<u>CHAPITRE 7 : ANALYSE PARAMETRIQUE</u>	<u>74</u>
<u>1</u>	<u>SOL DE REFERENCE</u>	<u>74</u>
<u>2</u>	<u>MATERIAUX</u>	<u>74</u>
<u>3</u>	<u>RAPPEL DE PARAMETRES DIMENSIONNANTS</u>	<u>75</u>
3.1	RAPPORT D'OCCUPATION DE PIEUX	75
3.2	RAPPORT DE L'ESPACEMENT SUR LE DIAMETRE	75
3.3	RIGIDITE FLEXIONNELLE RELATIVE	75
3.4	LONGUEUR TOTALE D'ANNEAUX	75
3.5	RAPPORT DE LA LONGUEUR DE PIEUX SUR LE DIAMETRE	75
<u>4</u>	<u>FONDATIONS MIXTES SUR PIEUX</u>	<u>76</u>
4.1	SITUATION DE REFERENCE D'UNE FONDATION MIXTE SUR PIEUX	76
4.2	VARIATION DU RAPPORT D'OCCUPATION AGR	77
4.3	VARIATION DE LA LONGUEUR DE PIEUX ET DU RAPPORT D'OCCUPATION	79
4.4	VARIATION DU RAPPORT S/d	81
4.5	INCLINAISON DES PIEUX	82
4.6	VARIATION DE L'ESPACEMENT ET DU DIAMETRE DES PIEUX	83
4.7	VARIATION DE LONGUEURS MULTIPLES	86
4.8	COMPARAISON AVEC LE RADIER SIMPLE	90
4.9	APPORT DU RADIER DANS LA REPRISE DE CHARGE	90
<u>5</u>	<u>FONDATIONS PROFONDES SUR GROUPE DE PIEUX</u>	<u>92</u>
5.1	SITUATION DE REFERENCE D'UNE FONDATION PROFONDE SUR UN GROUPE DE PIEUX	92
5.1.1	HYPOTHESES DE MODELE	93
5.2	VARIATION DE LA LONGUEUR DES PIEUX	93
5.3	VARIATION DE LONGUEUR MULTIPLE	95
5.3.1	COMPARAISON AVEC LA FONDATION MIXTE SUR PIEUX	96

CHAPITRE 8 :	PISTES D'AMÉLIORATIONS	99
<u>1</u>	<u>COMPLEMENT A L'ANALYSE NUMERIQUE</u>	<u>99</u>
1.1	VARIATION D'AUTRES PARAMETRES DIMENSIONNANTS	99
1.2	REALISATION D'UNE MODELISATION 3D	99
1.3	ÉTUDE EN FONCTION DU COEFFICIENT DE SECURITE	99
1.4	ETUDE DE TASSEMENT DIFFERENTIEL BASE SUR LES TYPES DE PROFILS DE TASSEMENT	99
1.5	HYPOTHESES DE MODELISATION EN PLAXIS 2D	100
1.5.1	MODELISATION AXISYMETRIQUE	100
1.5.2	MODELISATION D'UNE RANGEE DE PIEUX PAR UN MUR	100
1.5.1	CONFINEMENT DU SOL ENTRE PIEUX	100
<u>2</u>	<u>MODELISATION DES MATERIAUX</u>	<u>100</u>
<u>3</u>	<u>ETUDE DE SIMILITUDE</u>	<u>101</u>
<u>4</u>	<u>ETUDE D'AUTRES SOLS</u>	<u>101</u>
4.1	MODIFICATION DU TYPE DE SOL	101
4.2	MODIFICATION DE LA STRATIGRAPHIE DE SOL	101
CHAPITRE 9 :	CONCLUSIONS	102
<u>1</u>	<u>PROPOSITION DE DIRECTIVES DE CONCEPTION</u>	<u>103</u>
1.1	DIRECTIVE OPTIMISEE DE CONCEPTION DE FONDATIONS MIXTES SUR PIEUX	103
1.2	DIRECTIVE OPTIMISEE DE CONCEPTION DE FONDATIONS PROFONDES SUR GROUPE DE PIEUX	104
CHAPITRE 10 :	BIBLIOGRAPHIE	106
	TABLE DES ILLUSTRATIONS	109
	TABLE DES TABLEAUX	112
CHAPITRE 11 :	ANNEXES	113
<u>1</u>	<u>ANNEXE 1 : CAS HISTORIQUES</u>	<u>113</u>
1.1	DETAIL DES CAS HISTORIQUES (D'ORAZIO & DUNCAN, 1987)	114
1.2	ILLUSTRATIONS DES PROFILS DE TASSEMENTS (BELL & IWAKIRI, 1980)	115
<u>2</u>	<u>ANNEXE 2 : METHODES ANALYTIQUES DE CALCUL DE TASSEMENT ELASTIQUE</u>	<u>116</u>
2.1	METHODE DE LA THEORIE ELASTIQUE	116
2.2	METHODE DE SCHMERTMAN ET HARTMAN	117
<u>3</u>	<u>ANNEXE 3 : RESULTATS DES ANALYSES NUMERIQUES EN FONDATIONS MIXTES</u>	<u>119</u>
3.1	VARIATIONS DU NOMBRE DE PIEUX	119
3.2	VARIATIONS DE LA LONGUEUR DES PIEUX	119
3.3	VARIATIONS DE LONGUEURS MULTIPLES DES PIEUX	120
3.4	VARIATIONS DE L'INCLINAISON DE PIEUX	121
3.5	VARIATIONS DE L'ESPACEMENT ET DU DIAMETRE DES PIEUX EN $K_{rs} = 0,001$	122
3.6	VARIATIONS DE L'ESPACEMENT ET DU DIAMETRE DES PIEUX EN $K_{rs} = 0,01$	123

3.7	VARIATIONS DE L'ESPACEMENT ET DU DIAMETRE DES PIEUX EN $K_{RS} = 0,1$	124
<u>4</u>	<u>ANNEXE 4 : RESULTATS DES ANALYSES NUMERIQUES EN FONDATIONS PROFONDES</u>	
	<u>SUR GROUPE DE PIEUX</u>	<u>125</u>
4.1	VARIATION DE LA LONGUEUR DES PIEUX EN $K_{RS} = 0,001$	125
4.2	VARIATION DE LA LONGUEUR DES PIEUX EN $K_{RS} = 0,01$	125
4.3	VARIATION DE LA LONGUEUR DES PIEUX EN $K_{RS} = 0,1$	126
4.4	VARIATION DE LONGUEURS MULTIPLES DES PIEUX	126

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Ce mémoire s'inscrit dans le domaine de la géotechnique. Il vise à aider à la conception de fondations de réservoirs circulaires de grandes dimensions afin de réduire les problèmes liés aux tassements non-homogènes, principalement le tassement différentiel.

À la suite d'un travail de recherche bibliographique, cette analyse porte sur les fondations mixtes sur pieux et les fondations profondes sur groupe de pieux ainsi que sur l'étude de dispositions de pieux pour réduire le tassement différentiel.



Figure 1 : Exemple de réservoirs de stockage de grande dimension.

Source : (Enagás Tanks, sd), Réservoirs de stockage de LNG situés dans le port de Barcelone.

Les réservoirs illustrés en Figure 1 ont un diamètre de 80 [m] pour une hauteur de près de 40 [m]. Ils révèlent l'existence d'une demande de conception de réservoirs de grandes dimensions, conception directement concernée par ce travail.

Le fait est que, dans la majorité des cas de conception de réservoirs, avec fondations de grandes dimensions, la mise en contact du radier avec le sol permet d'assurer à la fondation une grande capacité portante. Toutefois, le contrôle des déformations n'est pas facilement réalisable avec le radier seul. La présence de pieux est alors recommandée pour diminuer le tassement différentiel.

Les enjeux de ce type d'ouvrages sont gigantesques dès la conception, que ce soit en matière de sécurité, de durabilité et de rentabilité. Ces enjeux seront développés ultérieurement.

1 DESCRIPTION DE LA PROBLÉMATIQUE ÉTUDIÉE

Suite à l'analyse de nombreux cas historiques, le tassement non-homogène sous réservoirs circulaires a été identifié comme l'un des risques majeurs pouvant mener à la dégradation et à l'inutilisation complète des réservoirs.

On trouve dans la littérature de nombreux cas de réservoirs de stockage circulaires qui ont été mis hors d'état de fonctionnement suite à un tassement différentiel de trop grande

importance. Certains cas historiques ont été étudiés afin de trouver les possibles raisons de défaillances des fondations mises en place.



Figure 2 : Illustrations de cas réels de réservoirs avec tassement différentiel.

Source: University of California (Davis, sd)

La Figure 2, ci-dessus, illustre des déformations de fondations de réservoirs suite au tremblement de terre de 1995 de Kobe au Japon.

Cette étude souhaite apporter une aide à la conception de fondations de réservoirs circulaires amenant à un tassement non-homogène réduit sous des critères de fonctionnement, c'est-à-dire d'uniformiser le tassement des réservoirs.

1.1 DESCRIPTION D'UN RÉSERVOIR TYPE

Un réservoir de stockage se compose globalement de trois éléments structurels principaux, à savoir la paroi verticale, le radier (paroi de fond) et le toit.

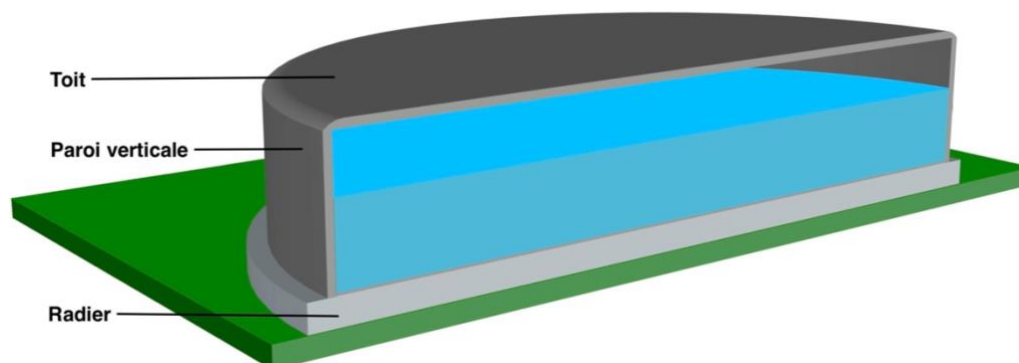


Figure 3 : Schéma d'un réservoir type

Dans le cas d'un réservoir à toit flottant, celui-ci est alors un quatrième élément à prendre en considération. Ce toit flottant constitue un élément mobile permettant de confiner le contenant dans un espace restreint et de limiter et/ou contrôler l'évaporation du contenant.

1.2 CAS DE CHARGE

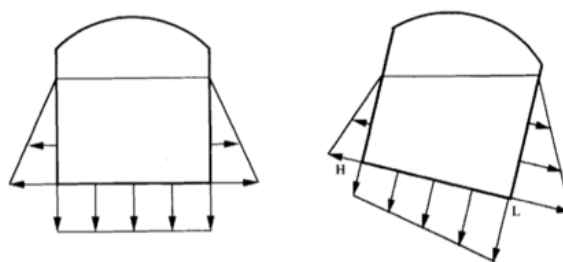
Dans le cadre de cette étude, l'hypothèse de base considère une charge uniforme. Cette hypothèse se justifie par la présence dominante de charges hydrostatiques.

Ces charges produisent un tassement du sol sous la fondation que la structure doit pouvoir supporter pour être utilisée et exploitée en toute sécurité. Ce tassement est l'objet de cette étude avec comme interrogation principale : « Comment homogénéiser le tassement sous les réservoirs de stockage de grandes dimensions par une conception optimisée de leurs fondations ? »

1.3 DÉFORMATIONS

Dans une situation réaliste de chargement de fondation de réservoir, en d'autres termes la pression appliquée sur le radier, aucune conception ne peut garantir un chargement totalement uniforme sur la surface de fondation. Le poids fixe de la structure et le poids variable du contenant appliquent des charges plus ou moins proches d'une charge uniformément répartie.

On peut facilement en déduire que le tassement homogène est utopiste et qu'il va évoluer en s'aggravant par un effet boule de neige et une concentration et un déplacement des contraintes.



Source : Guide DT94 pour l'inspection et la maintenance des réservoirs aériens cylindriques verticaux.

Figure 4 : Illustration d'une concentration de contraintes

Divers tassements peuvent apparaître dans le cas de réservoirs de stockage tels que le tassement uniforme, l'inclinaison plane, la déformation localisée en bord ou ailleurs sur la surface de fond, etc.

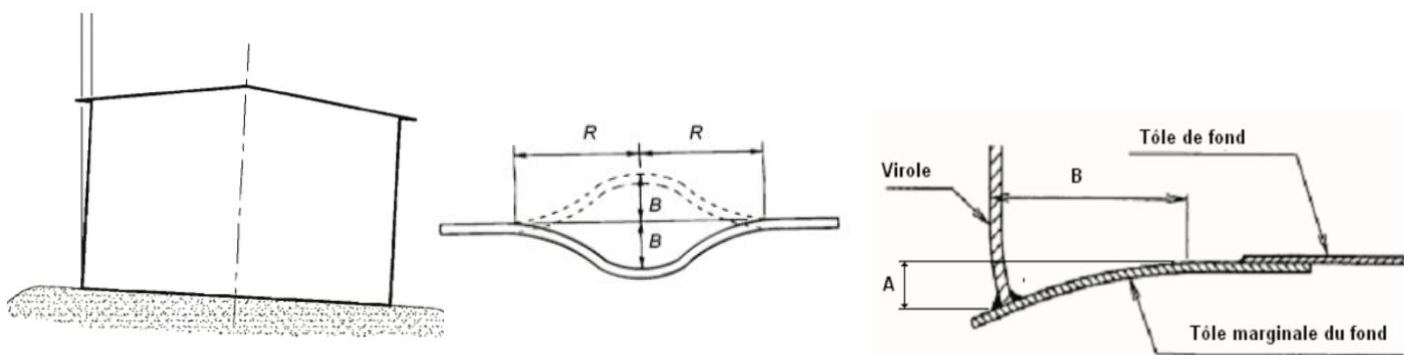


Figure 5 : Illustrations de l'impact de tassement sous réservoir.

Source : Guide DT94 pour l'inspection et la maintenance des réservoirs aériens cylindriques verticaux.

1.4 PROBLÈMES ENGENDRÉS PAR UN DÉPLACEMENT IMPOSÉ

Chaque élément de réservoir peut potentiellement subir des conséquences propres aux divers déplacements et charges qui lui sont imposés.

Dès lors, les conséquences vis-à-vis de chacun de ces éléments doivent être prises en compte dans le design de la fondation afin de respecter les critères de conception.

Les problèmes les plus courants pour la fondation des réservoirs, circulaires ou autres, sont généralement engendrés par un tassement non-uniforme pouvant provoquer des déformations de la structure et une modification de l'application des contraintes sur la fondation.

2 ÉTAPES DE L'ÉTUDE

2.1 ANALYSE DE LA LITTÉRATURE

Une analyse approfondie de la littérature permet de mettre en évidence quelques constatations et conclusions concernant les bonnes pratiques de conception de fondations de réservoirs circulaires, auxquels cette étude porte une attention spécifique.

Afin de valider la modélisation Plaxis et de justifier les hypothèses émises, des cas historiques détaillés, trouvés dans la littérature, sont développés et modélisés en Plaxis.

2.2 VALIDATION DE LA MÉTHODE

Un cas largement développé dans la littérature est étudié avec une méthode analytique et est modélisé en Plaxis.

En se référant aux résultats de ces études préalables et détaillées, un calcul préliminaire idéalisé va permettre de comparer les résultats des méthodes, en vérifier la fiabilité et l'exactitude et au besoin, de synchroniser les paramètres de notre modèle numérique avec ceux de méthodes analytiques.

2.3 ADAPTATION DE FONDATIONS POUR UNIFORMISER LE TASSEMENT

A l'aide du logiciel Plaxis, différentes situations sont ensuite modélisées dans le but de déterminer l'influence des paramètres dimensionnants de fondations de réservoir circulaires pour uniformiser le tassement.

3 STRATIGRAPHIES

Une stratigraphie simple avec un sol homogène est utilisée pour servir de base aux diverses modélisations.

Des modifications pourraient être réalisées pour analyser l'influence de la variation de divers paramètres et l'analyse de cas d'études.

3.1 MATÉRIAUX

Des matériaux types seront définis et utilisés tout au long de cette étude. Les paramètres influençant seront donc étudiés pour en comprendre l'influence sur le tassement différentiel.

Des paramètres utilisés dans ce travail pour caractériser les matériaux, seront choisis parmi les matériaux décrits dans la littérature, parmi les valeurs typiques du sol en question et en rapport avec l'étude de validation.

Le sol étudié, ici, sera composé d'une argile raide.

3.2 DIMENSION DU PROBLÈME ANALYSÉ

Cette analyse se concentre sur les réservoirs de grande taille avec fondations flexibles. La littérature dans le domaine servira de base pour l'analyse de nouveaux cas. La dimension du réservoir est variable en fonction du cas étudié.

La largeur peut varier d'une dizaine à plus d'une centaine de mètres pour les plus grands réservoirs construits à ce jour.

La hauteur varie également fortement d'un réservoir à l'autre pour atteindre de l'ordre d'une cinquantaine de mètres.

Comme exemple de réservoir de stockage, un cas que cette étude va développer est repris dans la littérature de (Bell & Iwakiri, 1980). Ce réservoir, le tank T-270, a une hauteur de 52,3 [m] de diamètre pour 23,7 [m] de hauteur et subit une charge de $23,5 \left[\frac{\text{tonnes}}{\text{m}^2} \right]$, soit 230,5 [kPa].

D'autres réservoirs sont présentés dans les chapitres d'étude de cas. Un recensement de cas historiques de réservoirs de stockage a été réalisé par (D'Orazio & Duncan, 1987) et est repris en annexe 1 page 113

3.3 DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS DU PROBLÈME

La configuration d'un radier simple sera utilisée comme référence pour la comparaison avec les autres configurations de fondations.

Différentes fondations vont être testées afin de déterminer une fondation optimisée dans le but d'uniformiser le tassement sous le réservoir.

Trois types de fondations sont principalement étudiées dans ce travail.

La présente étude réalise une comparaison des comportements de fondations profondes sur groupe de pieux, de fondations mixtes en radier sur pieux et d'un radier simple utilisé comme référence. Ces fondations sont définies dans le chapitre suivant.

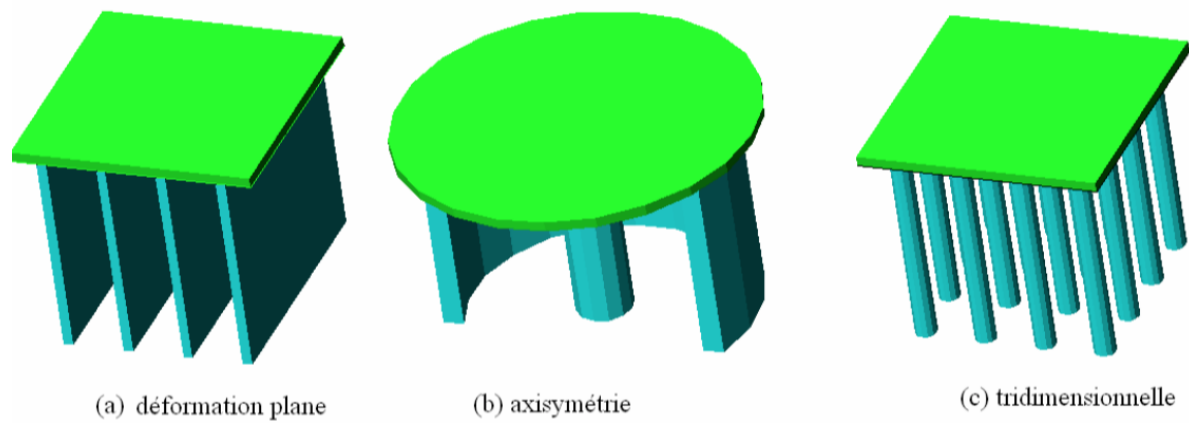


Figure 6 : Différentes configurations de fondations – Partie 1

Source : (Nguyen, 2008)

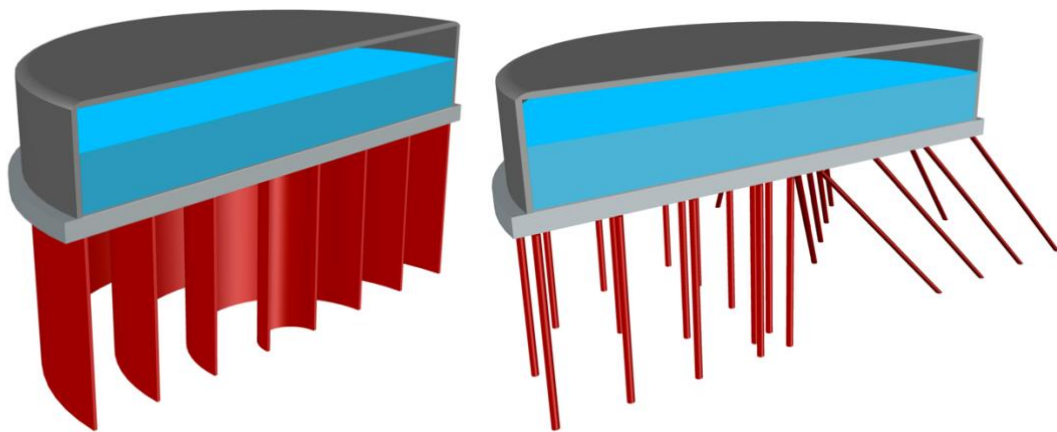


Figure 7 : Différentes configurations de fondations – Partie 2

L'étude paramétrique est réalisée sur des fondations dont le diamètre varie entre 10 et 40 [m] afin de mettre en évidence certains principes de conception développés ci-après.

CHAPITRE 2 : DÉFINITIONS ET CONCEPTS

Afin d'imaginer une conception optimale, une évaluation du comportement du réservoir doit se référer à diverses notions telles que le tassement moyen et le tassement différentiel, les moments de flexion, les contraintes internes, le coefficient de sécurité, ...

Pour ce faire, la fondation est paramétrée afin d'analyser son comportement et les influences de chaque paramètre.

Cette étude va se concentrer sur l'influence de ces paramètres dans la réduction du tassement différentiel.

1 DÉFINITIONS DES DIFFÉRENTS TYPES DE TASSEMENTS

Dans cette section, sont définis trois types de tassements et leurs impacts sur une structure et son utilisation.

1.1 TASSEMENT UNIFORME

Le tassement uniforme est le type de déplacement qui entraîne généralement le moins de dommage à la structure du réservoir.

Cela peut effectivement générer des dommages au niveau des connections et des canalisations, dus à la différence de déplacement entre la paroi du réservoir et les supports extérieurs de ces mêmes canalisations. Pour éviter que cela n'entrave le réservoir, il est possible de solutionner ce problème par la mise en place de connections flexibles ou en repositionnant voire en remplaçant périodiquement les supports de canalisations. (Marr, Ramos, & William, 1982)

1.2 INCLINAISON PLANE

Une inclinaison générale du réservoir peut impliquer des dommages relativement importants tels que la réduction de la surface d'appui horizontale, la modification de la surface du fluide et une imposition de contraintes supplémentaires sur la paroi verticale, sur le fond du réservoir et sur leurs connexions. Des considérations pratiques invitent aussi à limiter l'inclinaison des réservoirs afin éviter des débordements ou des efforts appliqués sur le toit flottant de confinement du contenant.

(Marr, Ramos, & William, 1982) déterminent sur base de statistiques et de considérations géométriques le maximum d'inclinaison qu'une paroi peut supporter sans contraintes excessives.

1.3 TASSEMENT NON-UNIFORME

Les tassements non-uniformes sont critiques pour les réservoirs de stockage. Ils peuvent déformer radialement les parois du réservoir et occasionner de lourds dommages structurels. Aussi appelés ovalisation de la paroi, cela peut causer un mauvais fonctionnement du toit de

confinement du contenant, éventuellement flottant. Un excès de déplacement non-uniforme peut également surcharger la structure et provoquer des ruptures, locales ou globales, voire même des fuites du contenu du réservoir.

La connexion entre la paroi et le fond du réservoir est particulièrement sensible à ce genre de déplacements et peut être fortement endommagée si la paroi et le fond du réservoir sont contraints à des déplacements différents.

Concernant le fond du réservoir, les tassements non-uniformes provoquent deux types de déformations : la déformation en « cuvette » et les dépressions localisées.

- La déformation en « cuvette » génère une déformation globalisée de la surface de fond qui subit un étirement pouvant à terme atteindre une rupture en traction de la plaque de fond.
- Les dépressions localisées sont des déformations locales ou aléatoires de la plaque de fond des réservoirs.

2 DESCRIPTIONS DE DIFFÉRENTES FONDATIONS

Afin d'avoir la capacité portante et le comportement en déformation nécessaires, les sols compressibles sont renforcés. Il existe de nombreuses techniques de renforcement des sols.

Quelques-unes des principales méthodes de renforcement d'un sol de fondation sont le préchargement, le préchargement avec drains, le remplacement de sol, les colonnes ballastées et colonnes de sable compacté, la dalle sur pieux, la dalle avec mur de contournement, l'électro-osmose avec injection, le remblais léger, le remblais avec inclusions rigides, les injections de ciment.

La méthode utilisée sera choisie en considérant le coût, la facilité de mise en place, l'efficacité du procédé.

Cette étude s'intéresse principalement aux fondations avec radier. Les radiers simples, les fondations profondes sur pieux et les fondations mixtes sur pieux sont comparées sur base de la réduction du tassement différentiel.

Ces méthodes ont une mise en place rapide et présentent l'avantage économique et environnemental de laisser le sol compressible en place.

La réalisation de pieux est un procédé dont le coût est supérieur à certaines alternatives citées ci-dessus mais apporte une bonne fiabilité.

2.1 RADIER

Le radier seul constitue la fondation superficielle la plus simple à mettre en place et sans doute à analyser.

Cette fondation n'est toutefois pas efficace pour diminuer et contrôler le tassement différentiel.

2.2 FONDATIONS PROFONDES SUR PIEUX

Cette fondation, illustrée en Figure 8a , est composée d'un radier fixé sur des pieux qui transmettent les efforts au sol. Le radier ne contribue pas à la transmission des efforts au sol.

2.3 FONDATIONS MIXTES SUR PIEUX

Une fondation mixte sur pieux se distingue par un radier qui est en contact avec le sol et donc contribue à la capacité portante de la fondation, Figure 8b.

La contribution du radier dans la diminution du tassement différentiel sera étudiée par l'intermédiaire d'une comparaison entre ces 3 types de fondations.

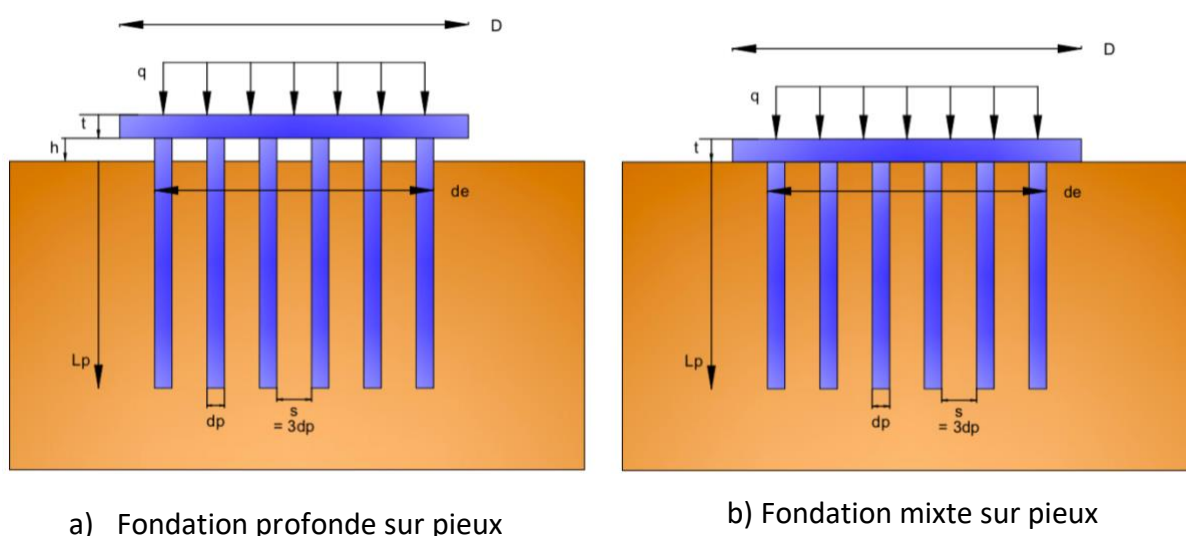


Figure 8 : Illustration de fondations profondes sur pieux et de fondations mixtes sur pieux

Ces fondations sur pieux sont caractérisées par de nombreux paramètres dimensionnants comme par exemple la dimension principale du radier, D_e , la longueur des pieux, L_p , le diamètres des pieux, d_p , etc.

2.4 RADIER SUR INCLUSIONS RIGIDES

Les inclusions rigides font référence à une partie des fondations sur pieux. Dans ce cas, les inclusions rigides ne sont pas solidaires de la fondation superficielle. Dans certains cas, la transmission des efforts est réalisée par le biais d'un matelas de transfert.

2.5 COLONNES BALASTÉES

Les colonnes ballastées sont généralement considérées comme un renforcement de sol. Ces colonnes sont des inclusions composées de matériaux à la fois perméables et aux caractéristiques mécaniques élevées.

L'aspect de cette technique et son comportement dans des sols mous est étudiée en détail par (Nguyen, 2008), (Kirsch, 2005).

2.6 RADIER SUR PIEUX SÉCANTS

Cette fondation profonde est une variante des fondations sur pieux. Les pieux sont rapprochés les uns des autres, au point d'être en contact en s'emboîtant les uns dans les autres. Les pieux forment ainsi un mur de pieux sécants.

2.7 RADIER SUR MURS

Ce type de fondation se classe dans la continuité des radiers sur pieux sécants. Généralement, ces fondations sont composées d'un radier positionné sur un ou plusieurs murs de couronnement.

3 DÉFINITIONS DE PARAMÈTRES

Les pieux ont pour utilité d'améliorer le contrôle du tassement du radier et d'améliorer la capacité portante du radier.

L'amélioration sera établie en la comparant avec la situation de référence du radier sans pieu.

3.1 PARAMÈTRES DE TASSEMENT

Le tassement est noté ρ , au centre ρ_{cen} , au bord ρ_{edge} .

Le tassement de référence du radier sans pieu est noté ρ_r .

Le tassement différentiel est noté δ .

Le tassement différentiel du radier sans pieu est généralement noté δ_r .

La distorsion angulaire est notée $\beta = \delta/l$, où l est la distance sur laquelle la distorsion est mesurée.

3.2 PARAMÈTRES DE GÉOMÉTRIE

3.2.1 RADIER

D : le diamètre du radier

t : l'épaisseur du radier

A : l'aire du radier

3.2.2 FONDATIONS DE PIEUX

n : le nombre de pieux, ou nombre de murs en anneaux

L_p : la longueur des pieux

S : l'espacement entre pieux

A_p : la surface horizontale d'un pieu

A_{tp} : la somme des surfaces horizontales des pieux

A_g : la surface d'occupation du groupe de pieux

$a_{gr} = \frac{A_g}{A}$: le rapport de surface d'occupation du groupe de pieux sur la surface du radier.

i : l'inclinaison des pieux par rapport à la verticale.

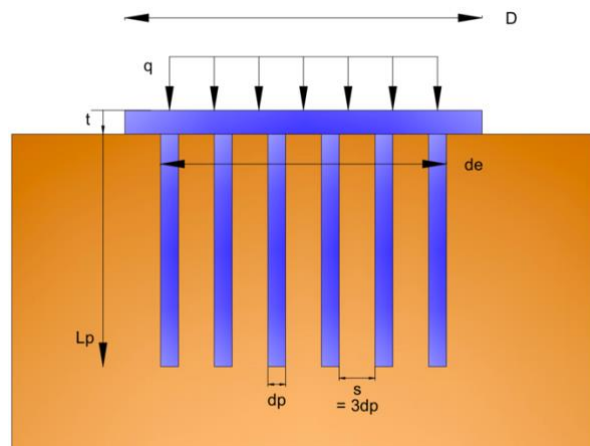
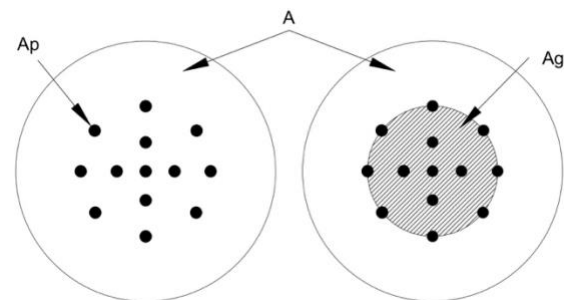


Figure 9 : Illustration d'une fondation mixte sur pieux

Pour décrire un radier sans pieu, le rapport d'occupation a_{gr} présente une valeur de 0. Une valeur de 1 correspond à un radier entièrement sur pieux.

Figure 10 : Illustrations des paramètres d'une fondation sur pieux



3.2.3 LONGUEUR TOTALE D'ANNEAUX

Dans la littérature, pour faire référence à la quantité de pieux utilisée dans une fondation, il est courant d'exprimer cette quantité sous l'appellation de la longueur totale de pieux. Cette longueur totale de pieux correspond à la somme des longueur de pieux. En cas de longueur constante, cette quantité est égale à $n \cdot L$ où n est le nombre de pieux et L est la longueur des pieux.

Dans l'étude actuelle, la modélisation étant réalisée en Plaxis 2D, avec des murs en anneaux en modèle axisymétrique, une équivalence a dû être réalisée.

La longueur des pieux et des anneaux est équivalente et est notée L .

La longueur totale d'anneaux est notée L_{tA} .

$$L_{tA} = n_{anneaux} \cdot L$$

Le nombre d'anneaux est ici noté $n_{anneaux}$ également.

Une équivalence peut être définie dans le cas d'une fondation sur pieux dont l'espacement entre pieux dans le plan et hors plan est équivalente.

Un exemple simple est le cas d'une fondation avec un arrangement carré de pieux.

Pour un nombre pair de rangées :

$$n_{\text{pieux}} = (2 \cdot n_{\text{anneaux}})^2$$

Pour un nombre impair de rangées :

$$n_{\text{pieux}} = (2 \cdot n_{\text{anneaux}} - 1)^2$$

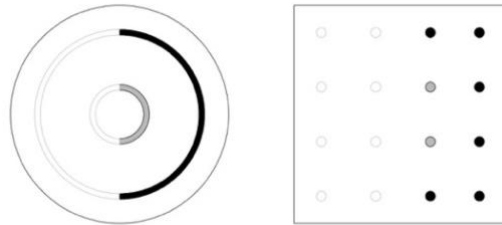


Figure 11 : Illustration de la relation entre le nombre de rangées de pieux et le nombre de murs en anneaux

3.2.4 GÉOMÉTRIE ÉQUIVALENTE

La dimension d'un radier circulaire équivalent à un radier rectangulaire est déterminée par un diamètre équivalent d'un radier circulaire, diamètre noté a_{eq} dans certaines études et correspond également à la notation de ce travail D_{eq} .

L'expression de D_{eq} , utilisée dans cette étude et notamment par (Horikoshi & Randolph, 1998), pour une fondation rectangulaire de longueur L et de largeur B , est la suivante :

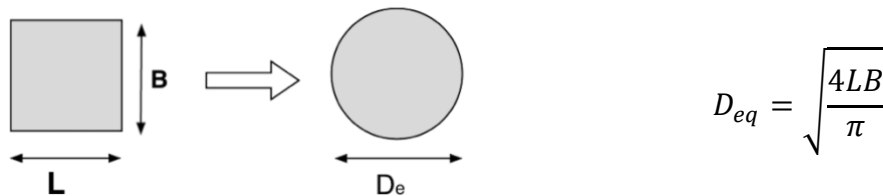


Figure 12 : Équivalence de géométrie

3.3 RIGIDITÉ FLEXIONNELLE RELATIVE DU RADIER

(Sanctis, Mandolini, Russo, & Viggiani, 2002) arrive à la conclusion que la rigidité flexionnelle du radier, K_{rs} , influence peu le tassement moyen mais a une influence notable sur le tassement différentiel.

$$K_{rs} = \frac{4 E_r (1 - \nu_s^2)^2}{3 E_s (1 - \nu_r^2)^2} \left(\frac{t}{B} \right)^3 \quad (\text{Viggiani, 2000})$$

Où

- E_s et E_r : les modules d'élasticité du sol et du radier
- ν_s et ν_r : les coefficients de poisson du sol et du radier
- B : la dimension principale de la fondation

Le rapport de rigidité entre le radier et le sol donne une indication quant à la rigidité flexionnelle relative du radier. Une valeur de $K_{rs} = 0,001$ représente le cas d'une fondation

totalelement flexible, tandis qu'une valeur $K_{rs} = 1000$ représente une fondation totalelement rigide.

L'expression met en évidence une influence au cube de l'augmentation de l'épaisseur et de la diminution de l'épaisseur du radier ainsi qu'une influence linéaire du rapport du module d'élasticité de la fondation et du sol.

3.4 PARAMÈTRE DE CAPACITÉS PORTANTES

En se basant sur les définitions de (Horikoshi & Randolph, 1998) concernant la reprise de charge des pieux et du radier, le rapport de chargement du radier sur la capacité portante, P_t^* , est défini comme ci-dessous :

$$P_t^* = \frac{P_t}{nq_p}$$

Où

- P_t : la capacité portante de la fondation.
- q_p : la capacité portante d'un pieu.

Le rapport de la charge reprise par la surface de la partie du radier sur pieux par la capacité portante d'un pieux est noté P_g .

$$P_g = \frac{pA_g}{nq_p}$$

Où p est la pression uniforme appliquée au radier.

Le degré de mobilisation du pieux est noté m .

$$m = \frac{P_g}{nq_p}$$

Les charges axiales P_{pieux} dans les pieux ont également été obtenues dans les éléments par l'analyse des contraintes verticales dans les pieux, σ_v , et dépendent du rayon des pieux, r .

$$P_{pieux} = \pi r^2 \sigma_v$$

La charge reprise par le groupe de pieux est la somme des charges reprises par chaque pieu. Le coefficient de reprise de charges, α_{pr} , décrit le rapport entre la charge reprise par l'ensemble des pieux sur la charge totale.

$$\alpha_{pr} = \frac{\sum R_{pile}}{R_{tot}}$$

4 DÉFINITIONS DE PRINCIPES

4.1 ÉQUIVALENCE D'UNE RANGÉE DE PIEUX EN MODÈLE PLAN

Dans un modèle plan dont la dimension hors plan est infinie, il est nécessaire d'adapter la modélisation d'un groupe de pieux à l'aide d'une équivalence.

(Dessais, 1974) propose une relation d'équivalence par mètre linéaire décrite par les expressions suivantes du module de Young équivalent de la rangée de pieux, E_{eq} , et du frottement latéral équivalent, τ_{eq} .

$$E_{eq} = \frac{n_{p,row,i} \cdot A_p E_p}{B_r \cdot d_p}$$

$$\tau_{eq} = \frac{n_{p,row,i} \cdot A_p \tau_s}{2 \cdot B_s}$$

Où $n_{p,row,i}$: le nombre de pieux dans une rangée, A_p : l'aire d'un pieu, E_p : le module de Young des pieux, B_r : la largeur du radier, d_p : le diamètre des pieux, L : la longueur des pieux, A_s : l'aire latérale d'un pieu, τ_s : le frottement latéral d'un pieu.

4.2 CONCEPT DE PIEU ÉQUIVALENT

Ce concept est développé ici car il sera abordé dans l'analyse de certains paramètres.

Cette équivalence, illustrée en Figure 13, constitue la zone caractérisée par les paramètres nommés « équivalents » pour remplacer plusieurs éléments différents, comme le sol et les pieux, dans un modèle unique.

Plusieurs auteurs basent leur analyse de radier sur pieux sur le concept de pieu équivalent, développé par (Poulos & David, 1980) et fort utilisé notamment par (Horikoshi & Randolph, 1998). Une équivalence similaire est également développée par (Prakoso & Kulhawy, 2001). Cela consiste donc à remplacer le groupe de pieux de la fondation en un pieu unique équivalent. La zone du sol dans laquelle sont incorporés les pieux est considérée dans l'équivalence.

Ce concept est utile pour modéliser et analyser de façon adimensionnelle des variations de paramètres dimensionnant de structure.

Le diamètre du pieu équivalent, d_e , soumis à des frottements latéraux et des efforts en pointe, est développé par analogie géométrique.

$$d_e = \frac{2\sqrt{A_g}}{\pi}$$

Où A_g : la section du groupe de pieux.

Le module de Young équivalent est défini par la relation suivante.

$$E_{eq} = \frac{E_p A_{tp}}{A_g} + E_s \left(1 - \frac{A_{tp}}{A_g} \right)$$

Où E_p : le module de Young du pieu

E_s : le module de Young du sol

A_{tp} : la somme des sections de pieux dans le groupe

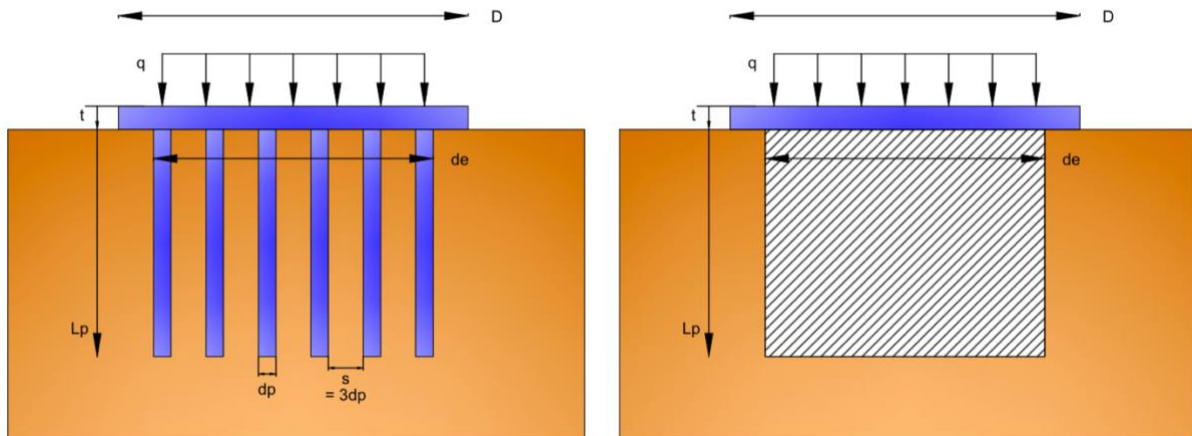


Figure 13 : Concept de pieux équivalent

4.3 PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE DE SURFACE HORIZONTALE

La série de pieux est modélisée par des murs en anneaux de façon telle que la surface horizontale du mur soit équivalente à la somme des surfaces horizontales des pieux isolés.

La Figure 14 illustre le principe de cette équivalence pour une fondation supportée par un arrangement de pieux (4 x 4).

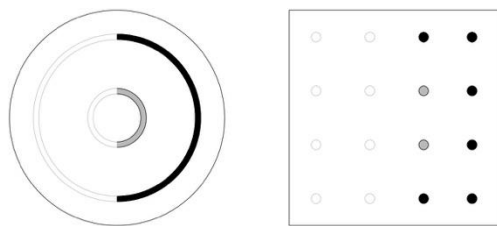


Figure 14 : Équivalence de surface horizontale

Surface d'un mur en anneau = Surface des pieux d'une série.

$$\pi (R^2 - r^2) = \pi \cdot r_{\text{pieux}}^2$$

Où R est le rayon extérieur du mur en anneau, r le rayon intérieur et r_{pieux} le rayon des pieux.

CHAPITRE 3 : ANALYSE DE LA LITTÉRATURE

La littérature dénombre de très nombreux cas historiques de réservoirs de stockage de grandes dimensions.

Souvent, ces réservoirs de stockage sont relativement flexibles et capables de tolérer une déformation dans des limites strictes. Malgré cette tolérance et les critères abordés dans cette section, le tassement et la distorsion ont été des facteurs déterminants dans la rupture et l'inutilisation de réservoirs construits sur des sols compressibles.

Les dommages et les tassements subits par des cas historiques sont analysés afin de déterminer les facteurs du tassement différentiel des réservoirs, souvent déterminants.

1 CAS HISTORIQUES

(D'Orazio & Duncan, 1987) ont réalisé une étude comparative de cas regroupant le comportement d'une trentaine de réservoirs de stockage de grandes dimensions sur sol compressible.

Le détail de ces réservoirs se trouve en annexe 1 page 113 avec également les profils de tassement des réservoirs regroupé en 2 graphes.

L'étude comprend également une évaluation des déformations, des mesures de tassements et de distorsions.

Tout comme cette étude comparative, les mesures réalisées sur réservoirs existants sont primordiales. Elles fournissent des données empiriques sur le comportement de nombreux réservoirs. Leurs fondations ayant subis de larges déformations, certains réservoirs ont continué à accomplir leur fonction, dans d'autres cas, les réservoirs ont été déclassés.

Certains facteurs sont mis en évidence dans leur contribution à la rupture des réservoirs et le tassement différentiel est l'un d'eux.

1.1 FORME DU PROFIL DE TASSEMENT

Dans le but de mettre en évidence le fait que le profil de tassement est tout aussi important que l'importance du tassement différentiel, les mesures normalisées de tassement de 28 réservoirs ont été comparées.

Le tassement mesuré, ρ , a été divisé par le tassement mesuré au centre de chaque réservoir, ρ_{cen} . Ce rapport est représenté en fonction de la distance radiale normalisée en terme de r/R , où R est le rayon du réservoir.

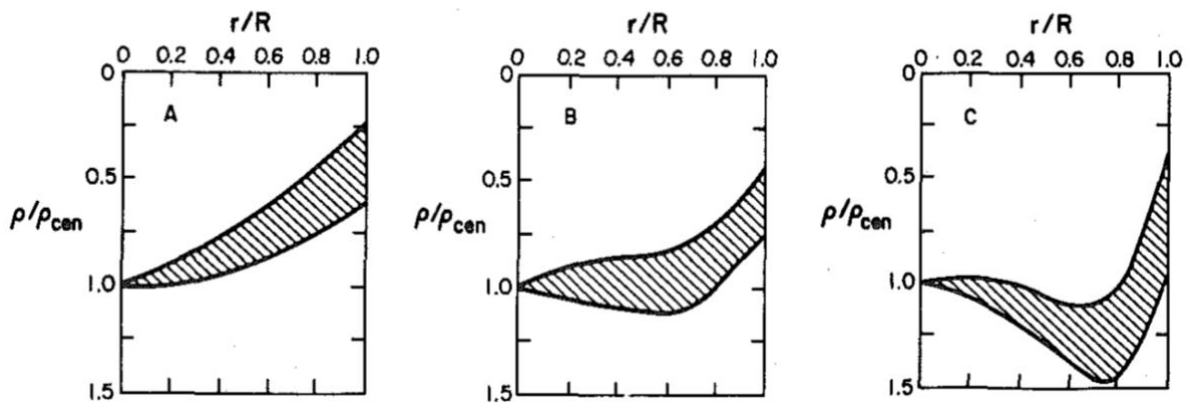


Figure 15 : Mesures normalisées de tassement de cas historiques, regroupés en 3 profils types

Source : (D'Orazio & Duncan, 1987)

Ces résultats mettent en évidence trois profils types permettant de catégoriser les profils de tassement de réservoirs de grandes dimensions.

- Le profil de tassement de type « A » indique une tendance à se déformer d'avantage au centre et de moins en moins vers l'extérieur.
- Le type « B » manifeste un tassement uniforme dans la zone centrale et une diminution brusque au bord.
- Le type « C » se caractérise par un tassement maximum localisé proche des 2/3 de la distance du centre.

Pour un tassement de même grandeur, les trois types de profils auront des amplitudes de distorsion du fond des réservoirs différentes.

D'un point de vue du tassement différentiel, le profil « A » sera le plus souhaitable et le type « C » le plus critique d'un point de vue de la distorsion angulaire et du tassement différentiel. Ces profils de tassement permettront d'interpréter les résultats de cette étude.

1.2 FACTEURS GOUVERNANTS LE TYPE DE PROFIL DE TASSEMENT

1.2.1 LE RAPPORT DIAMÈTRE / ÉPAISSEUR COMPRESSIBLE

Le rapport entre diamètre effectif du réservoir et l'épaisseur de la couche compressible a été établi comme déterminant du profil de tassement.

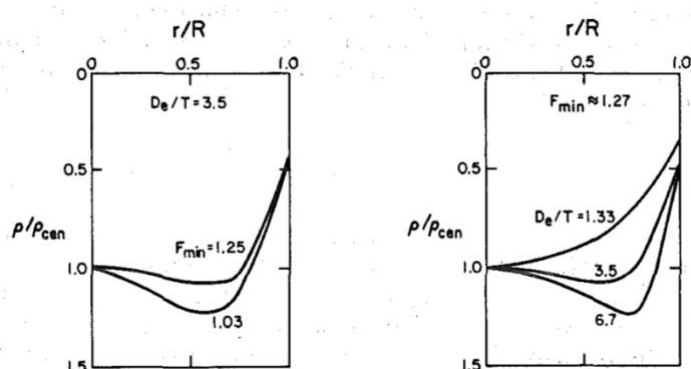


Figure 16 : Profils de tassement normalisés en fonction du $\frac{D_e}{T}$ et F_{min} .

Source : (D'Orazio & Duncan, 1987)

Le diamètre effectif est considéré comme le diamètre de la surface de report de charge, prenant en compte, par exemple, la présence de couche granulaire ou de couche compactée. Une modification du rapport $\frac{D_e}{T}$ va influencer le profil de tassement jusqu'à en changer le type décrit ci-dessus. Si ce rapport augmente, le tassement maximum a tendance à s'écarter du centre.

1.2.2 LE FACTEUR DE SÉCURITÉ

Le facteur de sécurité vis-à-vis de la résistance en cisaillement de la fondation, F_{min} , apparaît comme indicateur pour le tassement maximum. Dans cette étude, ce facteur se base sur la résistance du sol en condition non-drainée. Le facteur de sécurité conservé, F_{min} , est le facteur minimal des facteurs de capacité portante du centre au bord de la fondation.

Les fondations proposant un facteur de sécurité réduit, présentent également un tassement maximal écarté du centre.

La Figure 17 décrit les profils de tassement et leur légende pour la Figure 18 qui illustre l'influence du facteur de sécurité et du rapport D_e/T .

Quelques remarques peuvent être émises sur base de ces données.

- Les réservoirs peuvent être stables malgré un coefficient de sécurité inférieur à l'unité. Ce cas se présente lors d'un chargement lent, d'un drainage rapide ou les deux.
- Les réservoirs ayant $F_{min} > 1,1$ et $\frac{D_e}{T} < 4$, ont un profil de tassement de type « A ».
- La plupart des réservoirs ayant $F_{min} > 1,1$ et $\frac{D_e}{T} > 4$ sont de type « B ».
- La plupart des réservoirs ayant $F_{min} < 1,1$ sont de type « C ».

Lors d'une analyse théorique, il est donc recommandé de réaliser une comparaison avec les conclusions des résultats empiriques.

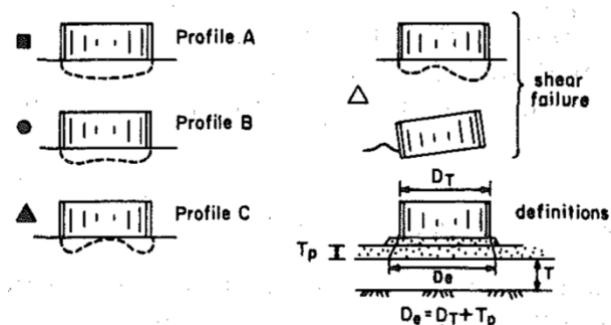


Figure 17 : Profils de tassement des cas historiques

Source : (D'Orazio & Duncan, 1987)

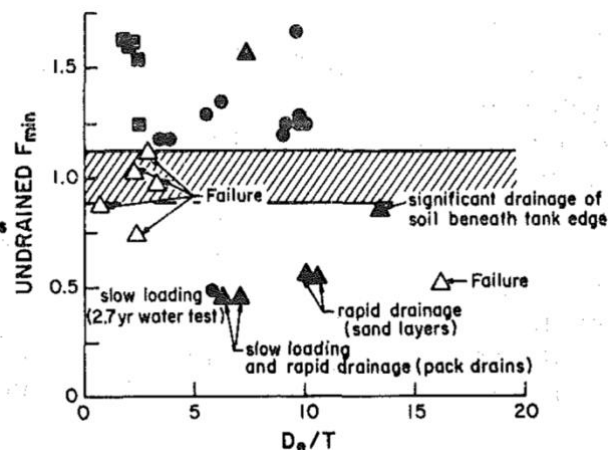


Figure 18 : Influence du facteur de sécurité et du profil de tassement

2 PROBLÈMES ENGENDRÉS PAR UN TASSEMENT NON-UNIFORME

Les déformations que peut subir la fondation d'un réservoir sont multiples, tassement uniforme, l'inclinaison plane, la déformation localisée en bord ou ailleurs sur la surface de fond, etc.

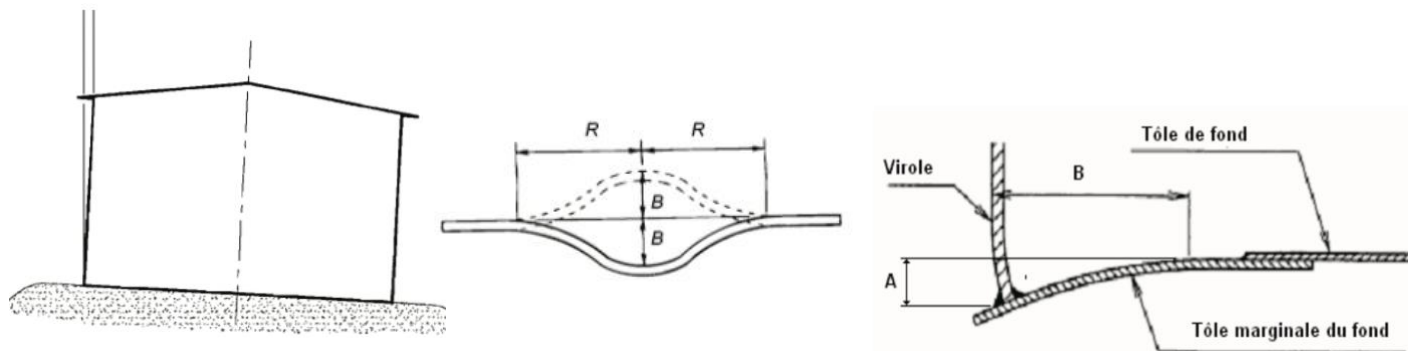


Figure 19 : Illustrations de l'impact de tassement sous réservoir.

Source : Guide DT94 pour l'inspection et la maintenance des réservoirs aériens cylindriques verticaux.

Dès lors, les conséquences vis-à-vis de chacun de ces éléments doivent être pris en compte dans le design de la fondation afin de respecter les critères de conception.

Les problèmes les plus courants sous réservoirs circulaires sont généralement engendrés par un tassement non-uniforme, pouvant provoquer des déformations de la structure et modification de l'application des contraintes sur la fondation.

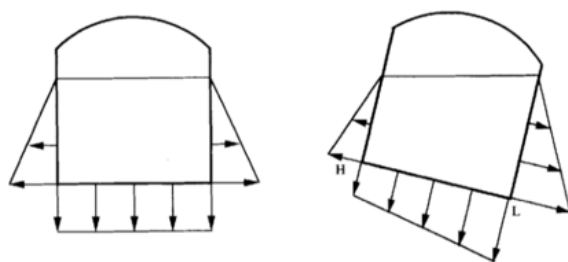


Figure 20 : Illustration d'une concentration de contraintes

Source : Guide DT94 pour l'inspection et la maintenance des réservoirs aériens cylindriques verticaux.

Un chargement non-uniforme de la surface de fondation peut provoquer un tassement amplifié dans les zones surchargées, entraînant un tassement différentiel et une modification du profil de contrainte.

Une inclinaison de la surface du liquide de chargement induit une modification du profil de contrainte au sein du réservoir comme illustré par la Figure 20.

Les réservoirs étant généralement solidaires de leur fondation, les déformations du sol se répercutent également sur la structure et engendrent des déformations pouvant endommager la structure.

Les défauts du réservoir ou de la fondation peuvent compromettre l'utilisation du réservoir si l'état limite de service est dépassé. La jonction avec les canalisations est un point d'attention souvent résolu par la mise en place de canalisations flexibles. Des fissures peuvent apparaître dans la structure, dans la paroi verticale ainsi que dans le fond du réservoir généralement et entraîner des fuites du contenu, avec les risques éventuels pour la santé.

Le gauchissement des parois de réservoir est couramment observé dû à l'application de pressions localisées. Une distorsion géométrique de la structure affecte la résistance au gauchissement mise à l'épreuve en cas de vent. (Godoy, 2016)

Les réservoirs munis d'un toit flottant sont les plus sensibles au gauchissement et à l'inclinaison plane car le mouvement du toit flottant, souvent suspendu, est peu tolérant à des déplacements non-uniformes et conditionne les critères de tassement différentiel pour éviter un dysfonctionnement.



Figure 21 : Illustrations d'un tassement sous réservoir avec fissuration de la fondation

Source : Radarvieww, Geophysical survey, lieux inconnus.

Le tassement sous réservoir peut être permis si des mesures sont prises afin de permettre le déplacement du réservoir.

Les solutions courantes sont la mise en place de réservoirs plus souples acceptant de grands déplacements et un assouplissement des jonctions et canalisations.

Il est souvent plus complexe de mettre en œuvre ce genre de mesures lors de tassements non-homogènes. Les déplacements localisés génèrent plus rapidement des ruptures locales et des déplacements critiques.

Une fois ces risques repérés et analysés, il est ensuite nécessaire de déterminer des critères de conception assurant la conformité des réservoirs à la reprises de tous les cas de charges en utilisation à long terme.

Ces critères de conception sont définis dans la littérature sur base d'essais expérimentaux et d'analyses de cas réels ainsi que d'études empiriques de réservoirs.

3 CRITÈRES DE TASSEMENT DIFFÉRENTIEL

De nombreuses études ont été réalisées afin d'estimer la capacité des réservoirs à résister à des tassements différentiels. Le critère à respecter dépend de la conception de l'ouvrage et des conditions de sols.

Les critères dépendent également du type de profil de tassement. En cas de profil de type « C », les critères sont plus restrictifs qu'en cas de type « B » et encore plus qu'en cas de type « A ». Les critères sont définis pour chacun des éléments composant les réservoirs et permettant d'éviter les diverses déformations possibles détaillées précédemment.

Le but de cette étude n'est pas de modifier ces critères qui ne sont pas développés dans le cadre de cette étude mais d'indiquer des principes de conceptions afin de pouvoir les respecter.

Ils sont, par ailleurs, détaillés dans de nombreuses sources : (D'Orazio & Duncan, 1987), (Bell & Iwakiri, 1980), (Marr, Ramos, & William, 1982), (Rosenberg & L. Journeaux, 1982), (Sheil & McCaben, 2015).

4 ENJEUX DE CONCEPTION DE LA FONDATION

Les enjeux lors de la conceptions de fondation de réservoirs de stockage sont importants. La sécurité doit être maintenue pour éviter des risques de détérioration et des risques de rupture.

La durabilité d'un ouvrage est primordiale pour assurer la rentabilité de l'investissement conséquent du réservoir.

Sur base de l'expérience issue du réservoir de stockage T-270 de 52 [m] de diamètre, les auteurs, (D'Orazio & Duncan, 1987), développent un exemple de coûts de réparations de la fondation endommagée d'un réservoir ainsi que le manque à gagner pour le site de la raffinerie mise à l'arrêt durant 9 mois. Le coût total atteint, en ce cas, les 150 Millions d'euro.

Le site de construction de 4 réservoirs de stockage, (Enagás Tanks, sd), de 80 [m] de diamètre réalisé par FCC City au port de Barcelone a été réalisé pour un prix de 250 Millions d'Euro, voir Figure 1.

Cela met en évidence l'importance d'une conception efficace, optimale et sécuritaire.

4.1 PRIX

Selon plusieurs sources, (Viggiani, 2000), (Sanctis, Mandolini, Russo, & Viggiani, 2002), et en accord avec nos observations, la conception optimal d'une fondation peut être définie comme la plus économique, tout en assurant un comportement satisfaisant.

Il est surprenant de ne pas retrouver d'analyse de coûts lors des études de conception. Un grand nombre d'études dans la littérature considèrent l'optimisation de la structure sans considérer le coût comme un paramètre à prendre en compte.

La conception idéale est certes la plus sûre, mais, économiquement, la conception optimale est la fondation la moins onéreuse tout en respectant les critères prédéfinis.

En réalité, le coût a une influence majeure, sur le choix de la structure, de sa mise en place, des matériaux utilisés, ainsi que le coût des possibles améliorations et réparations en cas de maintenance ou de problème.

Les études de la littérature ainsi que l'étude actuelle abordent cet aspect économique d'une fondation par le biais de l'étude de la quantité de pieux. Cette quantité représente la longueur cumulée de pieux à diamètre constant dans la fondation. Les dispositions de pieux peuvent ainsi être comparées sur base d'une variable quantifiable.

5 UTILISATION DE FONDATIONS PROFONDES

Divers auteurs se sont intéressés à l'analyse de fondations profondes afin de permettre la construction sur des sols très compressibles, soit en permettant une assez grande reprise des efforts par frottement, soit en allant chercher une couche profonde avec une raideur suffisante pour servir d'appui à la fondation.

Parmi ces fondations profondes, sont développées les fondations mixtes sur pieux et les fondations profondes sur groupe de pieux.

6 ÉTUDE DE FONDATIONS MIXTES RADIER SUR PIEUX

La littérature des fondations mixtes en radier sur pieux, où le radier est en contact avec le sol et participe à la capacité portante, est sans nul doute la plus abondante. De nombreux scientifiques ont réalisé des recherches exhaustives sur le sujet en mettant en évidence l'influence de certains paramètres.

Les études de fondations mixtes ont principalement été réalisées sur des sols résistants tels que des sables et des argiles raides. Les sources étudiées sur ce thème sont (Horikoshi & Randolph, 1998), (Viggiani, 2000), (Prakoso & Kulhawy, 2001), (Sanctis, Mandolini, Russo, & Viggiani, 2002), (Randolph, 2004), (Lee, Kim, & Jeong, 2010), (Cho, Lee, Jeong, & Lee, 2012), (Sheil & McCaben, 2015), (Khanmohammadi & Fakharian, 2018).

6.1 NIVEAU DE LA CHARGE

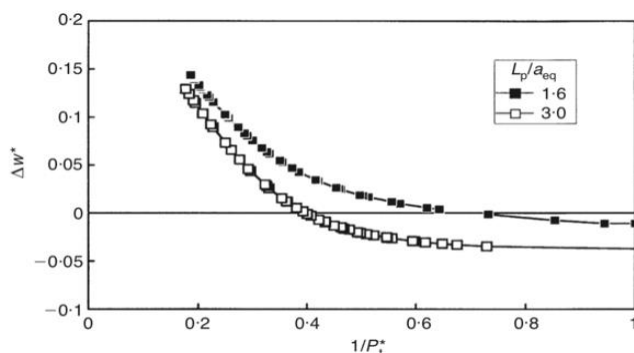


Figure 22 : Effet du rapport de chargement du radier et de la capacité portante sur le tassement différentiel

Source : (Horikoshi & Randolph, 1998)

La Figure 22 illustre une influence positive d'une baisse du niveau de charge, P_t^* , des pieux pour diminuer le tassement différentiel, comme représenté dans la figure au moyen du rapport inversé, $\frac{1}{P_t^*}$.

Cela indique également qu'il est approprié d'augmenter la capacité portante des pieux soit en augmentant leur nombre soit leur longueur.

Le tassement différentiel a tendance à augmenter rapidement quand le degré de mobilisation des pieux, m , approche de l'unité, illustré en Figure 23. Dès lors (Horikoshi & Randolph, 1998) indique de garder cette valeur en dessous de 0,8.

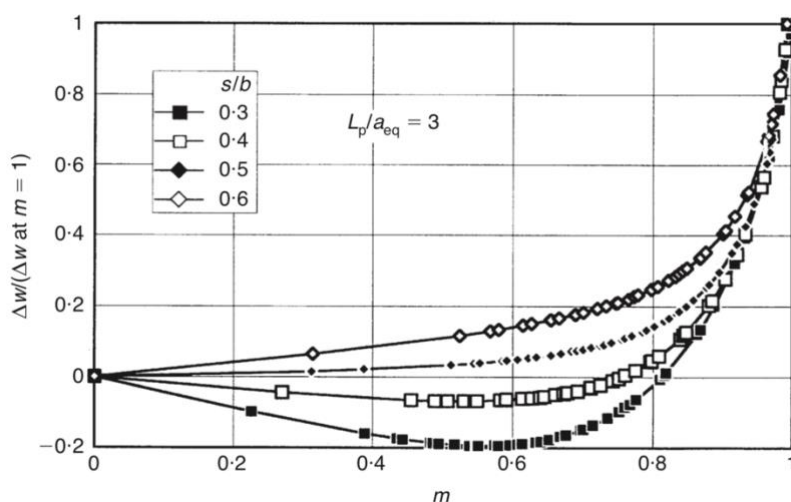


Figure 23 : Influence du degré de mobilisation des pieux sur le tassement différentiel

Source : (Horikoshi & Randolph, 1998)

Où $a_{eq} = D_e =$ Diamètre équivalent pour un radier circulaire.

Ceci induit à dimensionner les groupes de pieux de façon à limiter le tassement différentiel sous des conditions de charge de service.

Dans les cas où des comportements non-linéaires des pieux sont anticipés, le tassement différentiel, en condition totalement élastique, peut être dimensionné théoriquement à des valeurs légèrement négatives.

(Randolph, 2004) décrit une diminution du tassement différentiel normalisé lors d'une augmentation du niveau de charge. Il explique cela par la mise en place de déformations des bords de la fondation jusqu'à leur comportement plastique où a lieu une augmentation de leur rigidité. L'ensemble de la fondation est donc soutenu par un sol plus rigide et le tassement différentiel est réduit. Le tassement moyen est toutefois augmenté.

6.2 RADIER

Les paramètres liés au radier, utiles à cette étude, sont la taille du radier B , l'épaisseur du radier t et la rigidité flexionnelle relative K_{rs} .

La dimension du radier est paramétrée par la dimension du radier B , ainsi que par la longueur des pieux L .

6.2.1 TAILLE DU RADIER

Lors de la conception de radier de petite dimension, généralement pour $5 [m] \leq B \leq 15 [m]$, le tassement différentiel est rarement un problème dû à la rigidité du radier. L'ajout de pieux peut alors présenter un intérêt pour l'augmentation de la capacité portante. En général, la dimension du radier est petite par rapport à la longueur des pieux, $B/L \leq 1$.

Pour des radiers de plus grandes dimensions, où la capacité portante du radier est généralement suffisante, les pieux apportent un avantage certain pour le contrôle de la déformation du radier.

En général, la dimension du radier est grande par rapport à la longueur des pieux, $B/L \geq 1$.

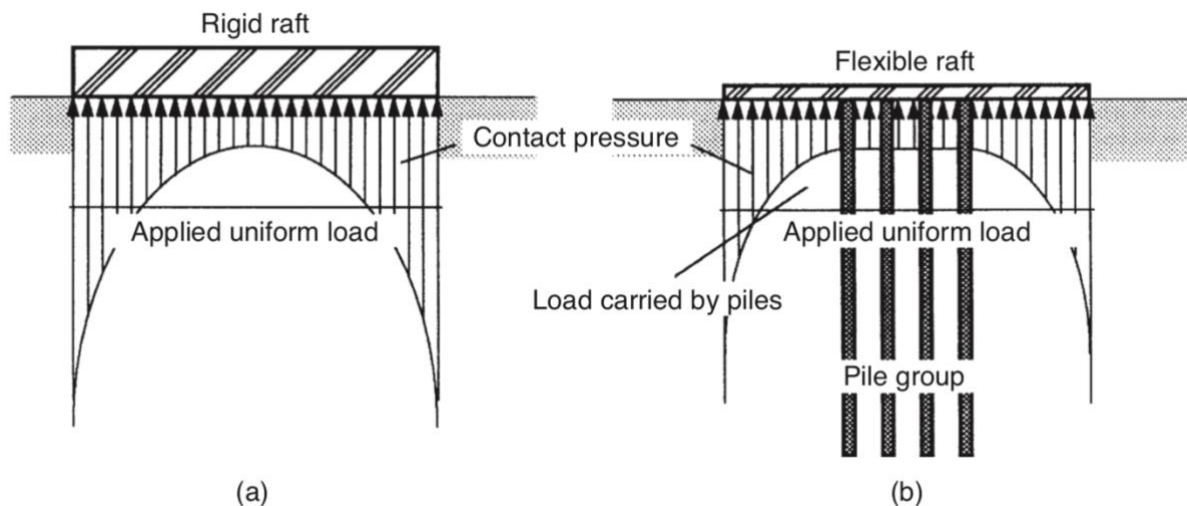


Figure 24 : Illustration de radier a) de petite taille, b) de grande taille, flexible avec un groupe de pieux centrés

Source : (Horikoshi & Randolph, 1998)

6.2.2 ÉPAISSEUR DU RADIER

Ce paramètre, noté t , est difficilement mis en évidence. Dans de nombreuses études, il est lié au paramètre de rigidité flexionnelle relative et est généralement défini par cet intermédiaire.

(Prakoso & Kulhawy, 2001) conseille également de déterminer l'épaisseur du radier sur base d'une analyse structurelle plutôt que sur l'analyse du tassement différentiel.

Le radier doit en effet résister à divers efforts tels que la reprise de charge de la structure du réservoir, les efforts de poinçonnement locaux aux endroits des pieux, etc.

6.2.3 RIGIDITÉ FLEXIONNELLE RELATIVE DU RADIER

(Sanctis, Mandolini, Russo, & Viggiani, 2002) arrivent à la conclusion que la rigidité du radier influence peu le tassement moyen mais a une influence notable sur le tassement différentiel.

$$K_{rs} = \frac{4 E_r (1 - \nu_s^2)^2}{3 E_s (1 - \nu_r^2)^2} \left(\frac{t}{B} \right)^3 \quad (\text{Viggiani, 2000})$$

Cette expression est définie dans le chapitre 2 : Définitions et concepts.

En analysant une fondation carrée de 45 m de côté chargée uniformément à 800 [MN], soit 395 [kPa], et en faisant varier K_r , ils comparent les valeurs de tassement.

Tableau 1 : Tassement moyen et différentiel d'un radier sans pieu chargé à 800 [MN]

K_r	w_r [mm]	δ_r [mm]
0,01	270	183
0,1	262	94

Une plus grande rigidité du radier améliore le comportement de la fondation vis-à-vis du tassement différentiel et constitue une amélioration simple et économique. Sa mise en place est aisée et nécessite peu de développement.

Toutefois, pour un contrôle précis et optimal de la déformation, il reste préférable de limiter la dimension du radier aux besoins structurel et d'ajouter de pieux pour améliorer la capacité portante et/ou le contrôle des déformations.

La capacité portante du radier sans pieu est généralement suffisante, pour des fondations larges pour supporter la charge totale avec un coefficient de sécurité acceptable. (Sanctis, Mandolini, Russo, & Viggiani, 2002)

6.3 PIEUX

La disposition de pieux est caractérisée par différents paramètres tels que le nombre de pieux, n , le diamètre des pieux, d_p , l'espacement entre pieux, s , le rapport d'occupation des pieux sous le radier, $a_{gr} = \frac{A_g}{A}$ où A_g est la surface du groupe de pieux, et A la surface du radier.

6.3.1 NOMBRE DE PIEUX

Le nombre de pieux, n , est peu utilisé comme paramètre dimensionnant à lui seul.

Il peut être pris en considération via la somme des surfaces horizontales des pieux, notée A_p ou via la quantité totale de pieux, notée nL .

Cette quantité de pieux est donc liée à l'étude de la longueur des pieux.

Comme discuté à propos du niveau de charge des pieux, la Figure 25 indique qu'une augmentation du nombre de pieux engendre un effet de diminution du tassement différentiel

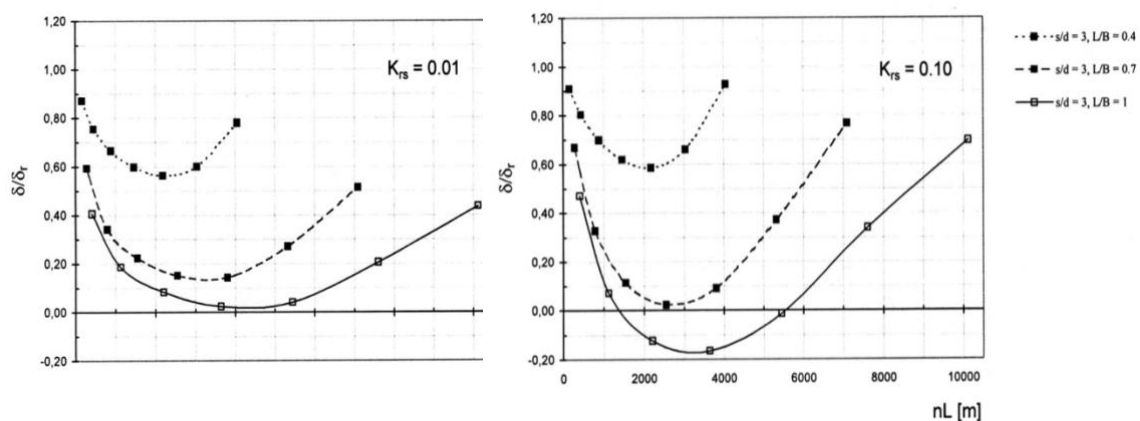


Figure 25 : Tassement différentiel en fonction du K_r et de nL

Source : (Sanctis, Mandolini, Russo, & Viggiani, 2002)

6.3.2 ESPACEMENT ENTRE PIEUX

(Sanctis, Mandolini, Russo, & Viggiani, 2002) décrivent un espacement optimal pour $s = 3d$, ce qui amène au tassement différentiel minimum, malgré la variation de longueur de pieux.

(Horikoshi & Randolph, 1998) réalise l'étude paramétrique élastique d'un radier carré sur pieux illustré en Figure 26 et montre une grande variation de tassements différentiels quand l'espacement entre pieux est varié. L'un des graphes montrant cette influence est la Figure 27.

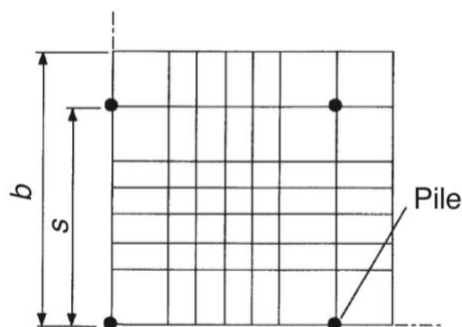


Figure 26 : Modèle de radier carré sur pieu de (Horikoshi & Randolph, 1998)

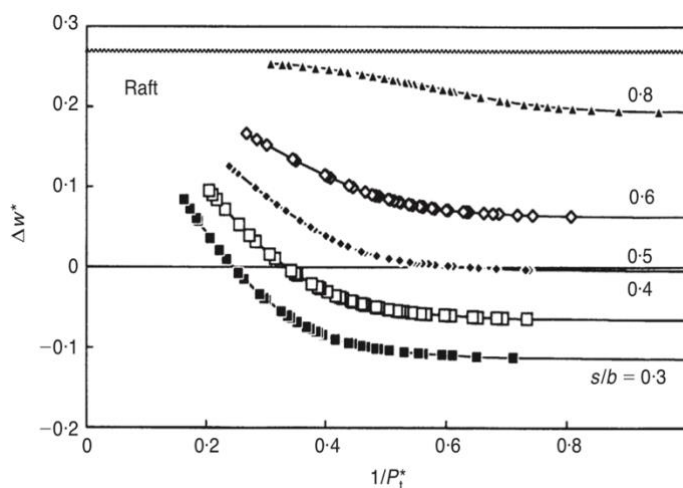


Figure 27 : Effet de l'espacement entre pieux sur le tassement différentiel

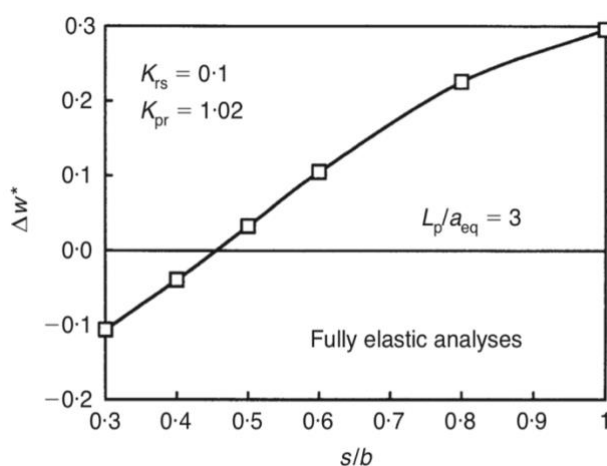


Figure 28 : Effet de l'espacement entre pieux sur le tassement différentiel

Source : (Horikoshi & Randolph, 1998)

L'étude en modèle élastique indique une valeur plus précise de l'optimum de l'espacement entre pieux.

Cet optimum est entre $\frac{s}{b} = 0,4$ et $0,5$, où s est l'espacement entre pieux et b le rayon ou la demi dimension de la fondation.

Cela correspond aux valeurs de rapport des aires $a_{gr} = 0,16$ et $0,25$.

La fondation optimale est donc composée d'un groupe de pieux centré dont la dimension est entre 16 à 25% de la surface du radier .

Un rapide calcul permet de comparer avec la méthode de (Sanctis, Mandolini, Russo, & Viggiani, 2002).

$$s = 3d_p = 0,9$$

$$b = \frac{a_{eq}}{2} = 3,75$$

$$\frac{s}{b} = 0,24$$

Avec d_p , le rayon des pieux et a_{eq} le diamètre équivalent d'un radier circulaire.

La méthode de (Sanctis, Mandolini, Russo, & Viggiani, 2002) considère un espacement entre pieux plus petit comme étant l'optimum et donc à une surface couverte par les pieux plus petite.

6.3.3 DISTRIBUTION DE PIEUX

L'ajout de pieux sous le radier est très efficace pour diminuer le tassement différentiel.

On considère un rapport de surface $a_{gr} = A_g/A$, pour caractériser le rapport d'occupation des pieux sous le radier.

A_g est la surface du groupe de pieux. Cette surface est définie dans le chapitre 2 : Définitions et concepts.

$$A_g = [(\sqrt{n} - 1)s]^2 \text{ pour une fondation carrée}$$

Pour une distribution uniforme de pieux sur l'ensemble de la surface du radier, le rapport A_g/A tend vers l'unité.

A_g/A croît avec une diminution du rapport δ/δ_r , jusqu'à même devenir négatif, comme illustré à la Figure 29.

L'optimum déterminé par cette étude indique un rapport A_g/A de 0,2 à 0,45 en fonction de la longueur de pieux et donc des pieux centrés au centre de la fondation. Les études de la littérature ont étudié des fondations rigides et semi rigides caractérisées par une rigidité flexionnelle relative $K_{rs} = 0,1$ et 0,01.

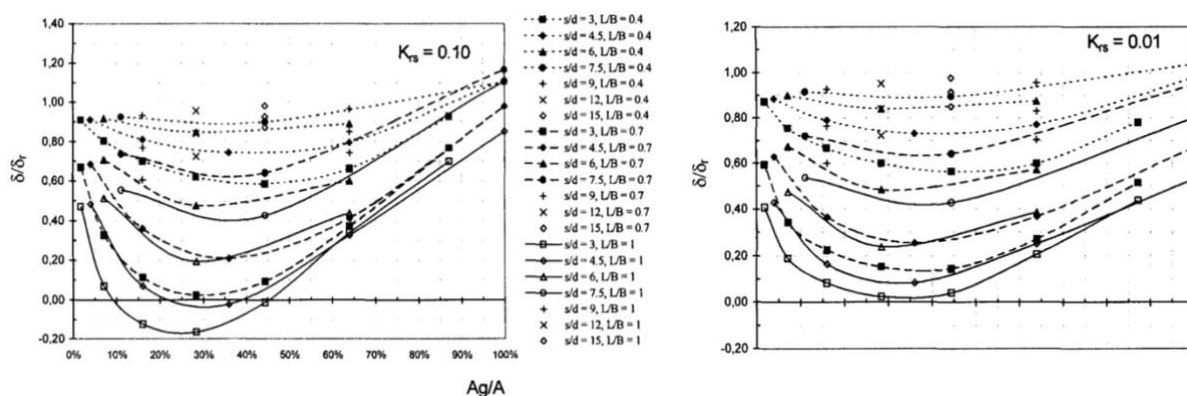


Figure 29 : Tassement différentiel, $K_r = 0,1$ et $0,01$ en fonction de $\frac{A_g}{A}$, de $\frac{s}{d}$ et $\frac{L}{B}$

Source : (Sanctis, Mandolini, Russo, & Viggiani, 2002) et (Horikoshi & Randolph, 1998)

Il est possible de détailler chaque cas séparément.

L'analyse de fondations caractérisées par $K_{rs} = 0,1$ est développée par (Horikoshi & Randolph, 1998) et (Sanctis, Mandolini, Russo, & Viggiani, 2002). Ces derniers illustrent leurs résultats dans la Figure 29 et la Figure 26 respectivement. L'optimum de rapport d'occupation varie entre les valeurs $[0,16 ; 0,25]$ en cas de $K_{rs} = 0,1$ et entre $[0,2 ; 0,35]$ en cas de $K_{rs} = 0,01$.

L'analyse de (Horikoshi & Randolph, 1998) portant sur les fondations avec $K_{rs} = 0,01$ indique un optimum de rapport d'occupation a_{gr} aux valeurs $[0,3 ; 0,45]$.

Dans la littérature, les intervalles de valeurs optimales sont rassemblées dans un ensemble $[0,2 ; 0,45]$ regroupant donc l'analyse des fondations avec $K_{rs} = 0,1$ et $0,01$.

Cette analyse portant sur deux valeurs de K_{rs} sera complétée par l'analyse paramétrique de ce travail.

6.3.4 LONGUEUR DES PIEUX

Plus la longueur de pieux augmente, plus ceux-ci sont efficaces pour réduire le tassement différentiel. Toutefois, une longueur excessive peut amener à un tassement différentiel négatif et donc une déformation convexe du radier.

Comme discuté à propos du niveau de charge des pieux, une augmentation de la longueur à un effet de diminution du tassement différentiel, Figure 22.

La Figure 29 indique une moindre influence de la longueur des pieux que celle du rapport des surfaces A_g/A sur le tassement différentiel.

En considérant la quantité totale de pieux, $n L$, en Figure 25, (Sanctis, Mandolini, Russo, & Viggiani, 2002) estiment la solution d'augmenter la longueur de pieux comme une solution économique. Pour une quantité de pieux équivalente, la solution de recourir à un petit nombre de long pieux au centre de la fondation est convenable et peut éventuellement annuler complètement le tassement différentiel.

(Horikoshi & Randolph, 1998) réalisent une étude sur un fondation de pieu équivalent illustrée par la Figure 30. Sur base des solutions d'une étude élastique et pour un rapport constant de rigidité du radier et du pieu équivalent, une variation de longueur du pieu même significative n'a que très peu d'influence sur le tassement différentiel. L'analyse non-linéaire, en Figure 30 (b) indique peu de variation significative. L'étude compare les résultats des rapports longueur sur diamètre équivalent de pieux, $\frac{L_p}{a_{eq}} = 1,6$ et 3. Pour une longueur plus importante des pieux, le tassement différentiel diminuera de façon accrue lors d'une diminution du degré de mobilisation des pieux. Pour des valeurs décroissantes du rapport de charge totale du radier sur la capacité portante des pieux, P_t^* , une longueur des pieux plus grande conduit à une réduction plus prononcée du tassement différentiel.

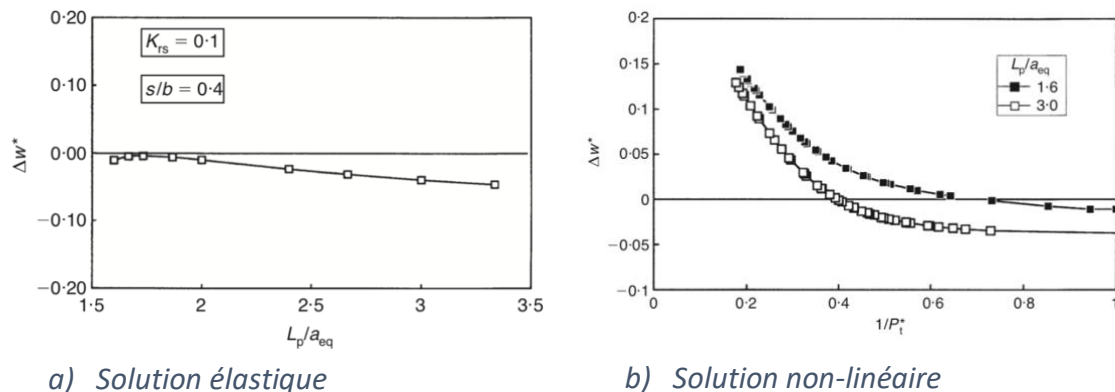


Figure 30 : Effet de la variation de longueur de pieu sur le tassement différentiel, a) en solution élastique, b) en solution non-linéaire

Source : (Horikoshi & Randolph, 1998)

6.3.5 RAPPORT DE RIGIDITÉ GROUPE DE PIEUX-RADIER

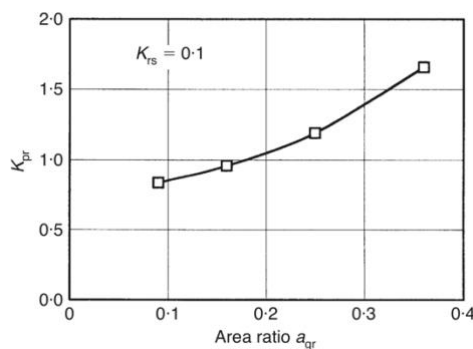


Figure 31 : Effet du rapport des aires a_{gr} sur le rapport de rigidité K_{pr}

Source : (Horikoshi & Randolph, 1998)

Le rapport de rigidité du groupe de pieux par rapport à celle du radier K_{pr} a été analysé à l'aide du rapport des aires du groupe de pieux et du radier, a_{gr} .

Le tassement différentiel est fort dépendant de l'espacement entre pieux, qui lui-même influence le rapport d'aires groupe de pieux - radier, a_{gr} .

Dès lors, la Figure 31 illustre la dépendance entre K_{pr} et a_{gr} .

Une diminution du rapport des aires induit une augmentation du rapport des rigidités du groupe de pieux (ou pieu équivalent) et du radier, K_{pr} , nécessaire pour minimiser le tassement différentiel.

Le K_{pr} optimal peut dès lors être déterminé sur base du rapport d'aires, a_{gr} .

La valeur optimal de a_{gr} étant déterminée entre 0,16 et 0,25, la valeur optimale de K_{pr} est proche de l'unité.

6.3.6 RAPPORT DE RIGIDITÉ PIEUX-SOL

Le rapport de rigidité sol-pieu, noté $\frac{E_p}{E_s}$ où E_p est la rigidité du pieu et E_s celle du sol. Ce rapport a été étudié par (Horikoshi & Randolph, 1998), sur base d'un concept de pieu équivalent. Ce rapport a été varié entre une valeur de 100 et une valeur de 10000. Le comportement, quel que soit la valeur $\frac{E_p}{E_s}$, reste très similaire avec peu de variations de tassement différentiel.

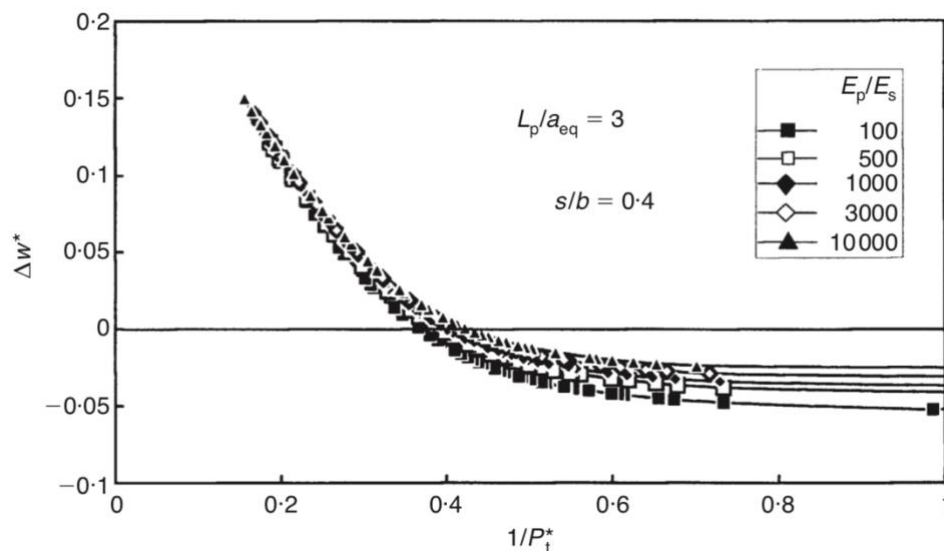


Figure 32 : Effet du rapport de rigidité Sol - Pieu sur le tassement différentiel

Source : (Horikoshi & Randolph, 1998)

6.4 SOL

6.4.1 TYPE DE SOL

Le type de sol a une influence sur les valeurs optimales des paramètres étudiés. (Cho, Lee, Jeong, & Lee, 2012) indiquent que le rapport des aires a_{gr} minimisant le tassement différentiel est sensiblement supérieur dans le cas d'une argile molle en comparaison avec le cas d'une argile dure. Cette affirmation remet en cause les conclusions préalables décrites pour un sol unique.

Le facteur de sécurité nécessaire pour une argile molle est également supérieur, car sa grande compressibilité est associée à une augmentation du tassement.

La variation du type de sol doit donc être également prise en considération.

6.4.2 ÉPAISSEUR DE SOL COMPRESSIBLE

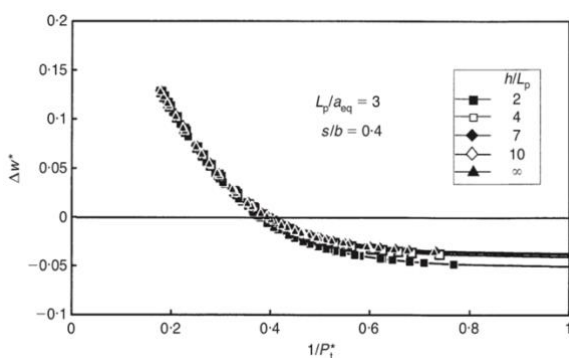


Figure 33 : Influence de l'épaisseur de sol modélisée sur le tassement différentiel, $K_r = 0,1$

Source : (Horikoshi & Randolph, 1998)

(Horikoshi & Randolph, 1998) ont étudié l'influence de l'épaisseur de sol du modèle, h , sur le tassement différentiel et ont conclu que l'épaisseur de sol n'a pas, ou très peu, d'influence sur le tassement différentiel. Les épaisseurs considérées sont au moins 2 fois supérieures à la longueur des pieux. Cette épaisseur a cependant une influence sur le tassement moyen. Pour un sol de 25 [m] comparé à un sol d'épaisseur infini, la différence de tassement moyen est de 40%

6.4.1 EFFET DU COEFFICIENT DE POISSON DU SOL

(Horikoshi & Randolph, 1998) ont étudié l'effet de la variation du coefficient de poisson du sol, sur base du concept de pieu équivalent.

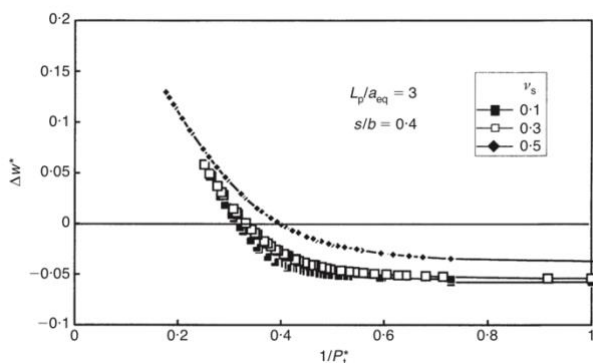


Figure 34 : Effet du coefficient de poisson du sol sur le tassement différentiel

Pour leur étude, le rapport de rigidité du pieu équivalent et du sol a été gardé constant à $K_{pr} = 1,02$, à l'aide d'une variation du diamètre du pieu. Le rapport de rigidité du radier et du sol a également été gardé constant à $K_{rs} = 0,1$ par une variation de l'épaisseur du radier.

Le graphe, Figure 34, qui illustre cet effet indique une faible tendance du tassement différentiel à augmenter quand le coefficient de poisson du sol diminue.

Source : (Horikoshi & Randolph, 1998)

6.5 EFFET DE RADIER EN CONTACT AVEC LE SOL

(Nguyen, 2008) décrit cet effet et indique que l'apport du radier dans la reprise de charge est très important.

La capacité portante peut être améliorée car le radier peut reprendre de l'ordre de 20 à 40% de la charge ultime d'une fondation mixte, d'autant plus que la dimension du radier et donc sa surface d'appui est grande.

(Nguyen, 2008) indique également que le radier peut réduire les tassements différentiels dans la fondation.

L'effet du radier en contact avec le sol sera analyser dans l'analyse paramétrique.

7 RECOMMANDATIONS POUR LE DESIGN DE RADIER SUR PIEUX

Sur base des sources étudiées, quatre grandes directives peuvent être mises en évidence pour la conception de réservoirs. Ces directives seront par après complétées avec les résultats de l'analyse paramétrique de cette étude.

Premièrement, il ressort que pour l'arrangement de pieux optimal dans une fondation mixte sur pieux, placer les pieux au centre de la fondation et les répartir sur une surface comprenant entre 16 et 25% de la surface du radier soit conseillé. Cette surface a tendance à augmenter pour un sol plus compressible. Enfin, le rapport optimal de couverture croît également lorsque le niveau de charge ou le nombre de pieux augmente.

Deuxièmement, l'augmentation de la longueur de pieux a une influence positive sur la réduction du tassement différentiel mais moindre que l'augmentation du nombre de pieux. Pour chaque cas, il est donc possible de calculer une longueur optimale.

Troisièmement, le groupe de pieux ou le pieu équivalent considéré doit proposer une rigidité équivalente ou proche à la rigidité du radier seul. La fondation doit, dès lors, présenter un rapport de rigidité Radier- pieux proche de l'unité, $K_{pr} \approx 1$. Le radier joue donc un rôle important dans le design de la fondation optimale.

Quatrièmement, les pieux doivent être dimensionnés afin de présenter une capacité portante suffisante qui dépend du coefficient de poisson du sol et du rapport de surface du groupe de pieux sur la surface du radier. Cela signifie pouvoir reprendre 40 à 70% de la charge totale de la fondation avec une mobilisation de la résistance des pieux de maximum 80%.

8 PRESSION SOUS LE RADIER

Un coefficient d'efficacité du radier est développé dans la littérature et est déterminé comme le rapport entre la charge reprise par le radier et la charge totale.

La comparaison des fondations profondes sur groupe de pieux et de fondations mixtes réalisées par (Nguyen, 2008) indique que le tassement moyen d'une fondation mixte est toujours inférieur à celui d'une fondation profonde sur groupe de pieux en conservant le même entraxe entre pieux et la même géométrie. La différence est faible pour un espacement supérieur à $5d$, où d est le diamètres des pieux, mais devient plus grande pour un entraxe de $3d$. Leur analyse indique que le radier reprend de 5 à 10% de la charge totale, en général. Toutefois, ce travail porte sur la réduction de tassement différentielle qui n'est pas abordé par (Nguyen, 2008).

Dans son étude de comportement de fondations profondes dans des argiles molles, (Nguyen, 2008) indique que le radier d'une fondation mixte reprend entre 5 et 10 % de la charge totale et que le reste est transmis par les pieux.

Par ailleurs, dans l'étude de la fondation mixte du viaduc de Garigliano, (Viggiani, 2000) indique néanmoins une reprise de charge par le radier d'environ 16% , soit légèrement supérieure.

Il est intéressant de noté que les deux études présentent un résultat d'un ordre de grandeur équivalent. Il est possible de supposer que la déformation subie par le radier en fondation profonde sur pieux doit être proche de la déformation d'une fondation mixte.

Dès lors, sur base de ces résultats, nous tenterons de valider l'hypothèse d'une similitude de tassement différentiel entre les fondations mixtes sur pieux et les fondations profondes sur groupes de pieux, en situation comparable. Une situation comparable signifie que les paramètres suivants sont équivalents : nombre, longueur et diamètre de pieux, espacement entre pieux, rigidité flexionnelle relative du radier, paramètres de sol, etc.

9 FONDATIONS PROFONDES SUR GROUPE DE PIEUX

La littérature sur l'étude de fondations profondes sur groupe de pieux est moins fournie que celle sur les fondations mixtes sur pieux. Il est en effet plus courant de mettre le radier en contact avec le sol pour que celui-ci participe à la capacité portante.

Dans le cas de fondations profondes sur groupe de pieux, le radier est supporté par une série de pieux disposés sous l'ensemble de la surface du radier, qui n'est alors pas en contact avec le sol. Afin d'éviter un porte-à-faux trop important, le rapport d'occupation de pieux sera toujours proche de l'unité.

Certaines études présentent une comparaison entre les fondations profondes sur groupe de pieux et les fondations mixtes sur pieux. Toutefois, ces études fournissent principalement une comparaison basée sur le tassement moyen de ces fondations. C'est d'ailleurs le cas de (Nguyen, 2008) qui réalise une étude de tassement moyen et une comparaison approfondie de ces deux types de fondations dans un sol composé d'argile molle.

Néanmoins, certaines études développent des analyses de réduction de tassement différentiel en fondations profondes sur groupe de pieux.

En effet, (Sheil & McCaben, 2015) réalisent une étude de modélisation de distorsion angulaire de fondations sur pieux. Parmi ces fondations, ils détaillent également les fondations mixtes sur pieux et les fondations profondes sur groupe de pieux. Leur analyse porte sur une fondation supportée par pieux dont l'arrangement du de cas avec 9 pieux et quelques notations propres de cette étude sont illustrés par la Figure 35.

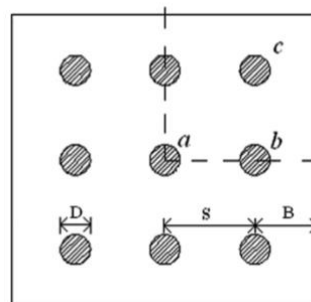


Figure 35 : Géométrie du groupe de pieux et différentes notations de (Sheil & McCaben, 2015).

Source : (Sheil & McCaben, 2015)

Les auteurs réalisent une analyse de l'interaction entre le radier et le sol et compare les résultats produits pour une fondation profonde sur groupe de pieux et une fondation mixte sur pieux.

L'arrangement de pieux pour les deux types de fondations est illustré en Figure 35, avec 9 pieux.

Les résultats de cette analyse sont observables dans la Figure 36.

Précisons que les auteurs présentent l'inverse de la distorsion angulaire en échelle logarithmique pour représenter de façon plus visuelle les valeurs de distorsion angulaire généralement très faibles.

L'interaction entre le radier et le sol est représentée par le coefficient de rigidité flexionnelle relative du radier par rapport au sol.

En échelle logarithmique, une valeur $\log K_r = -3$ est équivalente à une fondation flexible caractérisée communément par $K_{rs} = 0,001$.

Les interprétations et résultats de (Sheil & McCaben, 2015), sont repris dans cette section.

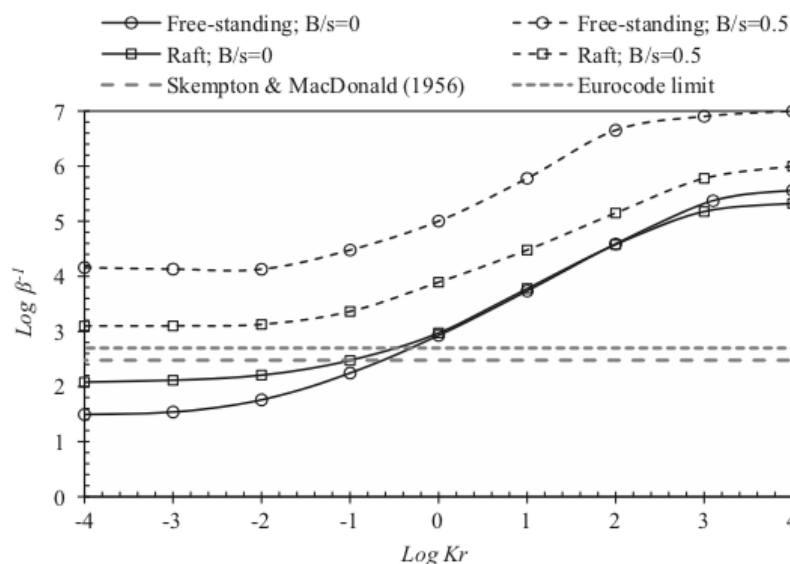


Figure 36 : Influence de l'interaction entre le radier et le sol sur la distorsion angulaire pour deux géométries de radier et deux types de fondations.

Source : (Sheil & McCaben, 2015)

9.1 RIGIDITÉ FLEXIONNELLE RELATIVE

Les auteurs déterminent que l'interaction entre le radier et le sol semble avoir peu d'influence sur la distorsion angulaire et le tassement différentiel.

Pourtant, selon cette représentation, la variation de flexibilité de la fondation dans l'intervalle $\log K_r \in [-1; 1]$, soit $K_{rs} = [0,1; 10]$, semble amener une grande variation de distorsion angulaire, que ce soit en fondations profondes sur groupe de pieux ou en fondation mixte. Pour des valeurs hors de cet intervalle $\log K_r \in [-1; 1]$, la variation de K_r semble réduite, principalement en fondations profondes sur groupe de pieux. Dans le cas de fondations mixtes, la variation de $\log K_r$ sur cet intervalle semble affecter légèrement plus la distorsion angulaire.

Les limites acceptables de distorsion angulaire sont définies pour ce cas avec les limites de l'Eurocode 7 ($\beta < \frac{1}{500}$) et de (Skempton & MacDonald, 1956) ($\beta < \frac{1}{300}$),

Notons également que, dans le cas présenté, la valeur minimale de la distorsion angulaire, β , requise pour satisfaire l'Eurocode 7 diffère très peu entre les fondations profondes sur groupe de pieux que et les fondations mixtes sur pieux.

9.2 DISPOSITIONS DE PIEUX

Le rapport $\frac{B}{s}$ semble avoir de l'influence sur la distorsion angulaire, β . B est la distance la plus courte entre le bord du radier et le centre d'un des pieux de la rangée extérieure et s est l'écartement entre pieux.

Le cas $\frac{B}{s} = 0,5$ semble significativement plus approprié que le cas $\frac{B}{s} = 0$ pour maintenir une valeur acceptable de distorsion angulaire, particulièrement pour une fondation profonde sur groupe de pieux.

Selon (Sheil & McCaben, 2015), le rapport entre l'espacement et le diamètre des pieux a une influence relativement faible sur la distorsion angulaire, principalement dans le cas de fondations flexibles, $K_{rs} < 0,1$.

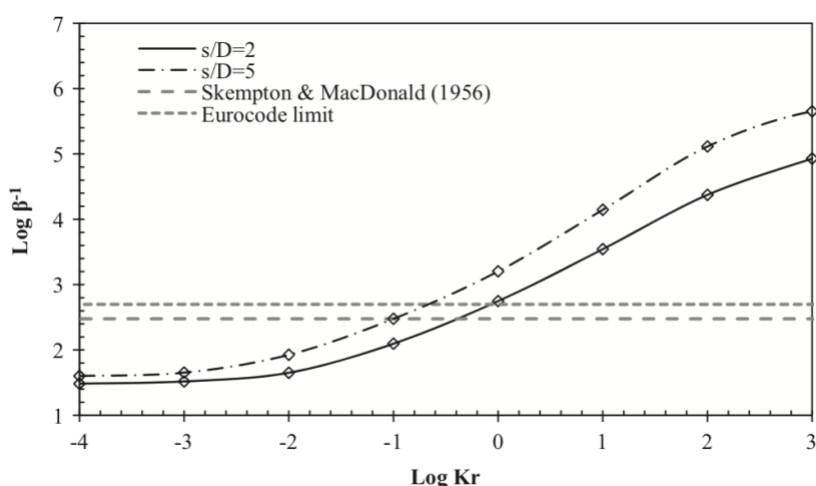


Figure 37 : Influence du rapport $\frac{s}{d}$ entre l'espacement entre pieux et le diamètre des pieux en fonction de la rigidité flexionnelle relative, K_r .

Source : (Sheil & McCaben, 2015)

9.3 LONGUEUR ET NOMBRE DE PIEUX

Par la suite, les auteurs indiquent que, pour des fondations relativement flexibles ($K_r < 0,1$), réduire le nombre de pieux et en augmenter la longueur a un impact positif sur le tassement différentiel et la distorsion angulaire de fondations sur groupe de pieux, en Figure 38 et Figure 39.

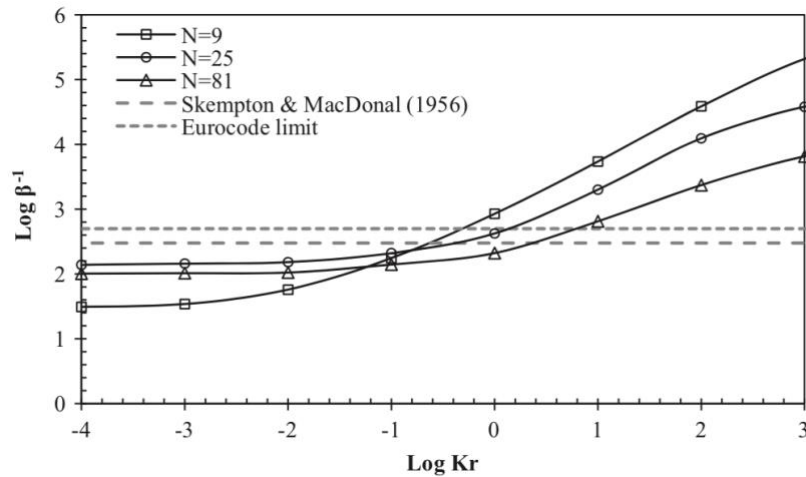


Figure 38 : Influence de la taille du groupe de pieux sur la distorsion angulaire en fonction de la rigidité flexionnelle relative, K_r .

Source : (Sheil & McCaben, 2015)

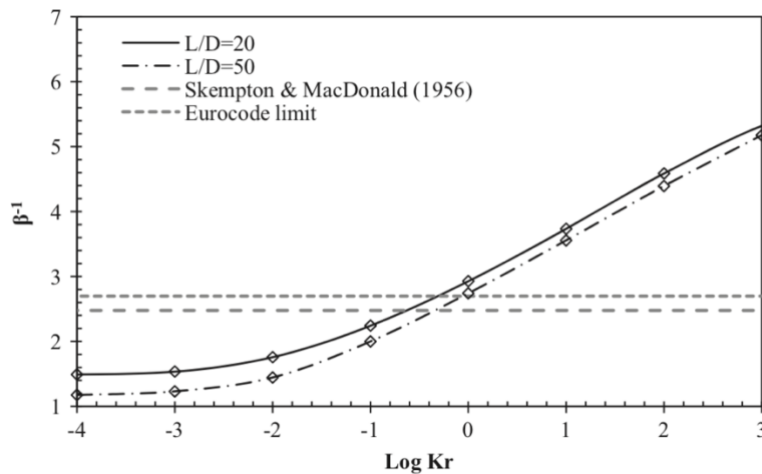


Figure 39 : Influence du rapport L/D entre la longueur et le diamètre des pieux en fonction de la rigidité flexionnelle relative, K_r .

Source : (Sheil & McCaben, 2015)

9.4 INFLUENCE D'UNE COUCHE RIGIDE DANS LA STRATIFICATION

Dans la même étude, les auteurs s'intéressent également à l'influence de la mise en place d'une couche plus raide incluse dans la stratification. Le module de Young est le seul paramètre modifié entre le matériau de référence et celui de la couche plus raide. Ils sont respectivement E_1 et E_2 .

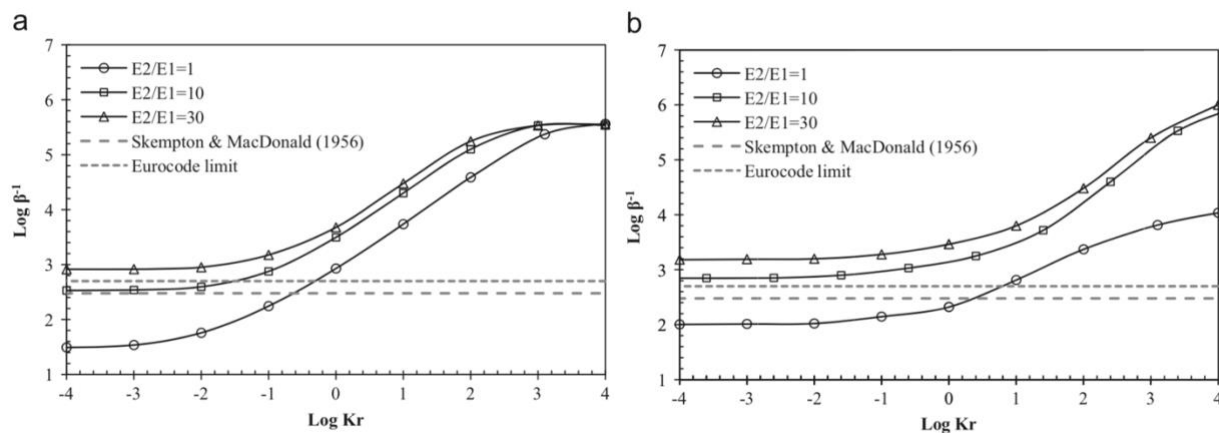


Figure 40 : Influence du rapport $\frac{E_1}{E_2}$, sur la distorsion angulaire β en fonction de la rigidité flexionnelle relative, K_r , a) pour 9 pieux, b) pour 81 pieux.

Source : (Sheil & McCaben, 2015)

Comme attendu, cette analyse montre qu'une augmentation de la rigidité du matériau de sol réduit la distorsion angulaire subie par la fondation.

9.5 OPTIMISATION DE GROUPE

(Sheil & McCaben, 2015) ont modélisé une série de disposition de pieux afin d'étudier l'optimisation du groupe de pieux sur base de résultats de distorsion angulaire.

Pour une empreinte de fondation identique, ils concluent qu'il est préférable d'utiliser un nombre de pieux réduit et de longueur plus grande.

En effet, réduire le nombre de pieux est bénéfique à l'augmentation de la rigidité angulaire de la fondation. Cela induit une augmentation de l'espacement entre pieux.

Logiquement, l'étude identifie qu'il est efficace de réaliser un groupe de pieux en cas de présence d'une couche raide dans la stratification du sol.

De plus, l'effet de la réduction de la longueur des pieux extérieurs du groupe a été étudiée en partant de l'observation que la distorsion angulaire la plus grande apparaît au bord de la fondation dans la majorité des cas, comme illustré à la Figure 45, en prenant en compte deux cas de rigidité flexionnelle relative du radier, relativement rigides.

La longueur des pieux sur le périmètre extérieur de la fondation est notée L_0 et la longueur du reste des pieux est notée L . Le rapport $\frac{L_0}{L}$ est étudié pour les valeurs de 1 | 0,75 | 0,5.

L'analyse a été réalisée avec un facteur de sécurité moyen constant.

Il est clair que la réduction de la longueur des pieux de périphérie est profitable à la réduction de la distorsion angulaire. La figure illustre une augmentation du logarithme de l'inverse de la distorsion angulaire pour afficher des valeurs perceptibles.

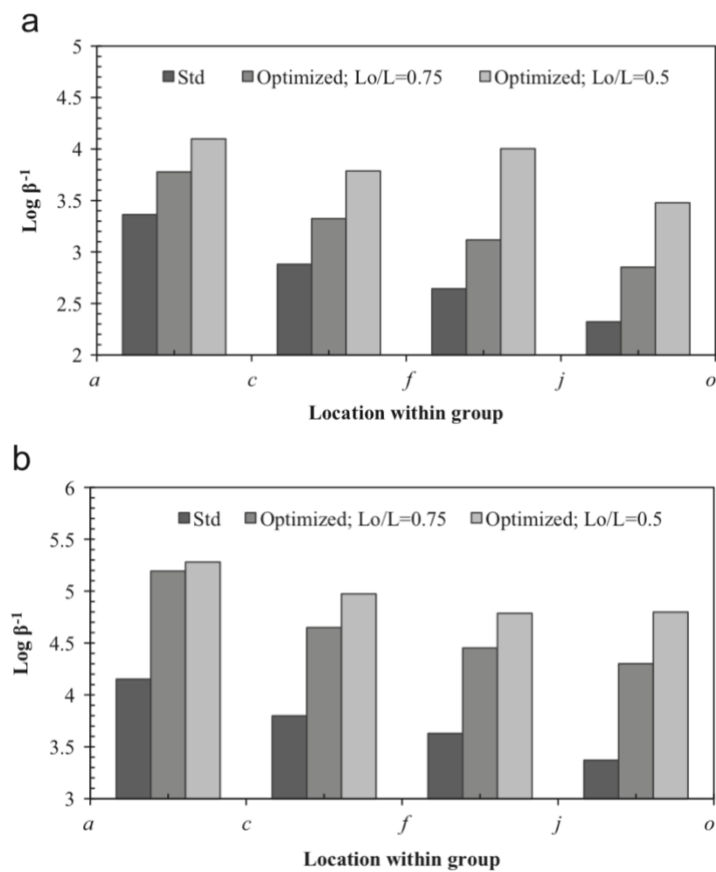


Figure 41 : Effet de l'optimisation du groupe de pieux sur la distorsion angulaire, β ; pour $n=81$ pieux ; a) $\log K_r = 0$, b) $\log K_r = 2$.

Source : (Sheil & McCaben, 2015)

CHAPITRE 4 : MODÈLE NUMÉRIQUE PLAXIS

A l'aide du logiciel de modélisation numérique Plaxis 2D, des modélisations sont ici réalisées pour vérifier les hypothèses établies et pour étudier certaines des nombreuses fondations possibles dans le but de distinguer les principes dimensionnants d'une fondation amenant au plus faible tassement différentiel pour chaque situation étudiée.

1 INTRODUCTION À PLAXIS 2D

Plaxis est un logiciel d'élément fini permettant la modélisation de structures géotechniques et le calcul de stabilité, de déformation et d'écoulement pour divers types d'applications géotechniques.

La version utilisée, lors de ce travail, est Plaxis BV 2018.

Plaxis 2D permet l'analyse géotechnique de nombreux problèmes géotechniques, en plan ou en axisymétrique.

Il existe également Plaxis 3D, permettant la modélisation et l'analyse de problèmes géotechnique en 3 dimensions.

Les matériaux sont représentés dans Plaxis à l'aide de modèles prédéfinis et caractérisés par des paramètres propres à chaque modèle. Il est donc possible, voire nécessaire, de choisir le modèle de matériau le plus adapté afin de représenter le sol et la fondation au plus proche de la réalité en fonction du type d'analyse voulue et des paramètres à disposition.

2 MODÉLISATION DES MATÉRIAUX EN PLAXIS

Plusieurs modèles de matériaux sont disponibles avec PLAXIS afin de modéliser au plus près de la réalité le matériau utilisé selon son affectation.

Le type de drainage et le modèle de représentation des matériaux sont dépendant l'un de l'autres et doivent être choisis parmi les propositions du logiciel.

2.1 TYPE DE DRAINAGE

Le type de drainage doit être choisi en fonction de la situation étudiée et du sol en présence. Le choix doit également prendre en compte les paramètres disponibles. En effet, chaque type de drainage se base sur une caractérisation différente du sol.

Le Tableau 2 ci-dessous résume les divers paramètres qui doivent être disponibles afin de modéliser le sol selon son type de drainage.

Le comportement d'un sol est toujours gouvernable sur base des valeurs effectives des paramètres. La modélisation d'un sol non-drainé, tel qu'une argile, à l'aide du modèle non-

drainé de type A est donc préférable. Cette option permet une prédiction de l'excès de pression interstitielle d'une manière relativement précise et également de l'augmentation de la résistance au cisaillement pendant la consolidation du sol.

Tableau 2 : Description des modèles de drainage

	<i>Drainé</i>	<i>Non-drainé Type A</i>	<i>Non-drainé Type B</i>	<i>Non-drainé Type C</i>
<i>Analyse de contrainte</i>	Valeur effective			Valeur totale
<i>Type de matériau</i>	Drainé	Non-drainé		Non-poreux ou drainé
<i>Paramètres de résistance</i>	Valeur effective	Valeur effective c', ϕ', Ψ'	Valeur totale $c = c_u, \phi' = 0,$ $\Psi = 0$	
<i>Paramètres de rigidité</i>	Valeur effective	Valeur effective E'_{50}, ν'		Valeur non-drainée $E_u, \nu_u = 0,495$

Toutefois, le modèle de Mohr-Coulomb indique également un point d'attention en cas de modélisation d'un sol non-drainé à l'aide du modèle de drainage de type A. Ce modèle « undrained (A) en Mohr Coulomb peut amener à surestimer la résistance aux contraintes de cisaillement. (Gouw, 2014)

Plaxis ajoute automatiquement la rigidité de l'eau à la valeur de rigidité encodée pour le matériau quand le drainage de type non-drainé (A) est choisi. Dès lors, si les valeurs des paramètres sont encodées à leur valeur totale, comme conseillé dans les conventions de mécanique des sols, alors la rigidité du matériau non-drainé est notablement supérieure à sa valeur adéquate. Il en retourne une prédiction erronée des déformations.

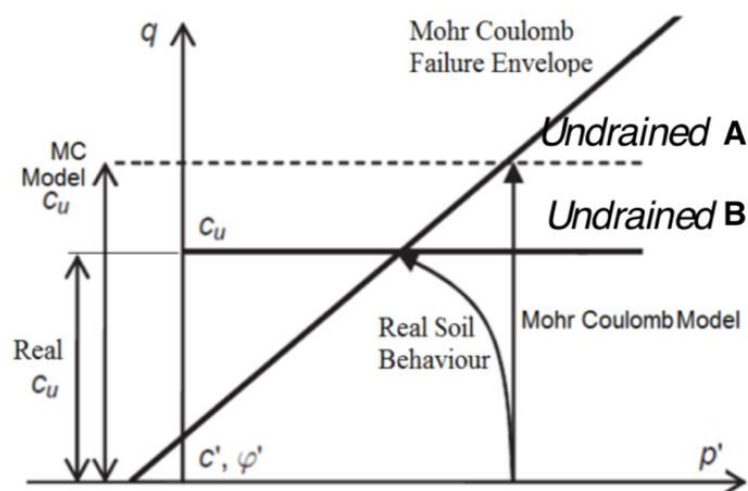


Figure 42 : Surestimation de la résistance au cisaillement du modèle de Mohr-Coulomb.

Source : (Gouw, 2014)

Un sol non poreux est caractérisé par des paramètres définis différemment selon le modèle de matériaux choisi. La valeur des paramètres sera déterminée en suivant la description d'un matériau drainé dans un modèle linéaire élastique et suivant la description d'un matériau drainé (type A) dans un modèle de Mohr-Coulomb.

2.1.1 CHOIX DES TYPES DE DRAINAGE DANS LES MODÉLISATIONS

Cette étude s'est intéressée au comportement de fondations sur le long terme. Les matériaux du sol ont donc été considérés drainés dès lors que leur perméabilité est considérée comme non nulle.

Lors de l'utilisation du type de drainage « drainé », les paramètres de sol sont définis à leur valeur effective comme décrit dans le Tableau 2.

L'hypothèse d'une fondation non poreuse a été choisie. Les fondations étudiées sont composées de béton qui se caractérise par une porosité efficace et une perméabilité très faible. Le perméabilité de la fondation joue un rôle très faible pour ce qui concerne les déplacements de l'eau dans le sol.

Dès lors, les matériaux de fondations sont, dans ce travail, modélisés à l'aide du type de drainage non poreux.

2.2 MODÈLES DE MATÉRIAUX

De nombreux modèles sont disponibles pour décrire un matériau. Chacun dépend d'un certain nombre de paramètres proportionnellement à la complexité du modèle. Chacun d'eux présentent des avantages et des inconvénients, auxquelles il faut s'adapter pour représenter la situation de façon la plus réaliste possible.

Dans cette section sont présentés les principaux modèles prédéfinis en Plaxis pour modéliser les matériaux : Le modèle élastique linéaire, le modèle de Mohr-Coulomb, le modèle Hardening Soil et le modèle Soft Soil Creep.

Pour une description plus détaillée des modèles, nous pouvons nous référer aux documents de références du logiciel Plaxis.

2.2.1 ÉLASTIQUE LINÉAIRE

Le modèle élastique linéaire est le modèle le plus simple. Il est basé sur la loi de Hooke d'isotropie élastique. Cette loi décrit un comportement élastique, linéaire et isotrope.

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

Le modèle se base sur deux paramètres :

- le module de Young E
- le coefficient de Poisson ν

Un matériau, dit « élastique », reprend sa forme de départ lorsque les charges qui lui étaient appliquées sont enlevées. Les déformations sont temporaires et réversibles.

Bien que par sa simplicité ce modèle n'est pas toujours adapté, il peut toutefois être utile pour modéliser des volumes rigides tels que des murs en béton ou des fondations en roche.

Dans cette étude, les contraintes dans la structure restent sous la limite élastique lors des cas de charges de service, limites de déformations acceptables.

2.2.2 MOHR-COULOMB (MC)

Le modèle Mohr coulomb décrit un comportement linéaire élastique parfaitement plastique. Ce modèle est fort utilisé en pratique. Il est simple mais modélise néanmoins la non-linéarité des matériaux du sol par un modèle composé de deux lignes bilinéaires.

Ce modèle représente une approximation de premier ordre du comportement du matériau. Il est recommandé comme première analyse d'un problème géotechnique.

De ce fait, les calculs effectués sont relativement rapides et on obtient une première estimation des déformations.

Pour chaque couche de sol, ce modèle considère la rigidité soit constante, soit linéairement croissante avec la profondeur.

Ce modèle se base sur cinq paramètres :

- Le module de Young : $E_{50} \left[\frac{kN}{m^2} \right]$
- Le coefficient de Poisson : $\nu [-]$
- La cohésion : $c \left[\frac{kN}{m^2} \right]$
- L'angle de frottement : $\varphi [^\circ]$
- L'angle de dilatance : $\psi [^\circ]$

La simplicité de ce modèle peut être problématique et amener à des résultats inexacts.

Le choix de considérer le module de Young à la valeur constante E_{50} ne représente pas le comportement réel d'un matériau. En cas de niveau de contrainte inférieur à 50% de la contrainte de rupture, le tassement est surestimé. Si le niveau de contrainte est supérieur à 50%, le tassement est sous-estimé.

L'hypothèse dans cette étude est de considérer les comportements des matériaux à l'état de service, ce qui va limiter l'influence de ce défaut.

Ce modèle considère un seul module de Young. Cela signifie qu'il considère un module unique équivalent en comportement de chargement et de déchargement. Or dans la réalité, un sol en rechargement présente une plus grande rigidité.

$$E_{50} = E_{ur}$$

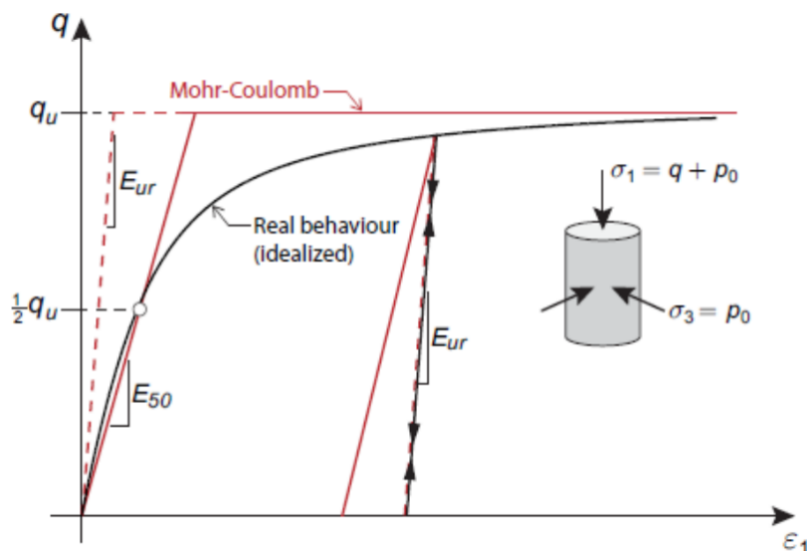


Figure 43 : Courbe bilinéaire contrainte - déformation du modèle Mohr-Coulomb

Source : (Sołowski, 2018)

La première partie de ce graphe représente le comportement élastique linéaire caractérisé par les paramètres E et ν tandis que la deuxième partie représente le comportement parfaitement plastique, jusqu'à la rupture caractérisée par les paramètres c , φ et ψ .

Le modèle Mohr Coulomb comporte une surestimation déjà abordée de la résistance aux contraintes de cisaillement en cas de modélisation d'un sol non-drainé à l'aide du modèle de drainage de type A.

Ce phénomène sera à considérer lors d'une comparaison de résultats obtenus avec des modèles différents.

2.2.3 HARDENING SOIL (HS)

Le modèle Hardening soil décrit un comportement élasto-plastique avec écrouissage. En pratique, il est particulièrement utilisé pour modéliser des sols très mous ou durs.

Le modèle « Hardening Soils » permet de pallier certains défauts du modèle de Mohr-Coulomb, dont celui de la simplicité d'une approche linéaire de l'élasticité du matériau.

La plupart des sols montrent un comportement non linéaire peu après l'application d'une contrainte de cisaillement. Cela signifie qu'il y a une dépendance entre la raideur, la déformation plastique irréversible associée et le niveau de contrainte. Ce modèle approxime au second ordre le comportement de tous types de matériaux.

Le hardening soil model caractérise donc un comportement plus réel du sol par rapport au modèle de Mohr-Coulomb et est caractérisé par plus de paramètres que ce dernier.

La raideur est caractérisée au moyen de 3 paramètres :

- E_{50} [kPa] : le module triaxial pris à 50% de la rupture en cisaillement
- E_{ur} [kPa] : le module de chargement/déchargement triaxial
- E_{oed} [kPa] : le module œdométrique

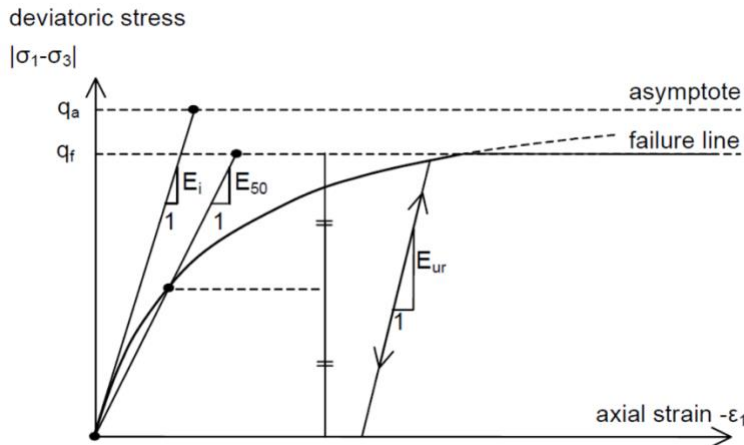


Figure 44 : Courbe hyperbolique contrainte - déformation en chargement primaire

Source : (Emeriault, 2011)

Notons que le critère de rupture est toujours caractérisé au moyen des paramètres c , φ et ψ comme dans le modèle de Mohr-Coulomb.

- La cohésion : $c \left[\frac{kN}{m^2} \right]$
- L'angle de frottement : $\varphi [^\circ]$
- L'angle de dilatance : $\psi [^\circ]$

Le modèle comporte également d'autres paramètres :

- L'exposant : $m [-]$
- Le coefficient de poisson en déchargement : $\nu_{ur} [-]$
- Le quotient de rupture : $R_f [-]$
- La préconsolidation initial : K_0^{nc}

Il est aussi possible de modéliser le matériau sur base des coefficients de consolidation C_c ou C_s et du rapport de vide initial e_{init} .

Ce modèle est indiqué pour une étude en chargement-déchargement car le modèle distingue le comportement de ces deux cas au moyen de différents modules de Young.

L'écrouissage est pris en compte au moyen d'un critère de plasticité qui évolue au cours des sollicitations. Ce critère de plasticité, basé sur un mécanisme isotrope et déviatoire, est différent de celui de rupture, contrairement au modèle de Mohr-Coulomb qui a un critère unique.

Ce modèle ne sera pas utilisé dans cette étude qui ne portera pas sur l'analyse en chargement – déchargement. Une détermination arbitraire des valeurs de paramètres pour définir ce modèle n'est donc pas nécessaire.

2.2.4 SOFT SOIL CREEP MODEL (SSCM)

Ce modèle est destiné à modéliser des sols mous tels que des argiles de façon précise, particulièrement en compression primaire. Il prend en compte l'écrouissage du matériaux avec une consolidation secondaire. Il considère l'évolution en fonction du temps de la déformation axiale d'un essai œdométrique après la consolidation primaire.

Notons que le critère de rupture est à nouveau caractérisé au moyen des paramètres c , φ et ψ comme dans le modèle de Mohr-Coulomb.

Ce modèle se base sur les paramètres suivants :

- La cohésion : $c \left[\frac{kN}{m^2} \right]$
- L'angle de frottement : $\varphi [^\circ]$
- L'angle de dilatance : $\psi [^\circ]$

Ainsi que sur des paramètres propres aux modèles de soft soil :

- L'indice de gonflement modifié : $\kappa^* [-]$
- L'indice de compression modifié : $\lambda^* [-]$
- L'indice de fluage modifié : $\mu^* [-]$
- Le coefficient de poisson en décharge-recharge : $\nu_{ur} [-]$

Ces paramètres possèdent des relations avec des paramètres plus classiques.

$$\lambda^* = \frac{C_c}{1+e} ; \kappa^* = \frac{3}{2,3} \frac{1-\nu_{ur}}{1+\nu_{ur}} ; \mu^* = \frac{C_\alpha}{2,3(1+e)}$$

Où

- $C_c [-]$: Le coefficient de compressibilité
- $e [-]$: Le rapport de vide
- $C_\alpha [-]$: Le coefficient de consolidation secondaire

Le fluage des matériaux est négligé lors de cette étude. Par conséquent, ce modèle ne sera pas utilisé dans cette étude. À nouveau, une détermination arbitraire des valeurs de paramètres pour définir ce modèle n'est donc pas nécessaire.

3 VALEURS DE PARAMÈTRES

Les valeurs de paramètres sont, pour la plupart, définis sur base des sources bibliographiques. Les valeurs qui ne sont pas définies sont alors déterminées parmi les valeurs typiques reprises dans la littérature. Certaines relations entre paramètres pour un même matériau sont privilégiées.

Plusieurs références utiles pour trouver des valeurs de paramètres sont (Carter, 1991), (Onasch, 2000), (GEOL_615, 2011), (Braja M. Das, 2014), (Subramanian, 2016).

4 FROTTEMENT ÉQUIVALENT

La mise en place d'intervalles permet de corriger le comportement d'un contact entre 2 matériaux. Un coefficient d'interface de réduction de résistance au frottement, R_{inter} , permet de corriger la rugosité à l'interaction entre les matériaux. L'angle de frottement et le coefficient de cohésion peuvent également être corrigés dans la zone environnante à l'interface où leur valeur est généralement différente de celle des matériaux isolés.

5 MODÈLES DE MATÉRIAUX UTILISÉS

Dans cette section, sont présentés les divers modèles Plaxis utilisés pour représenter les matériaux, pour la validation de la méthode, pour les études de cas et pour l'analyse paramétrique.

5.1 MATÉRIAUX ÉLASTIQUES

Le modèle élastique linéaire est utilisé pour les matériaux du modèle de validation ainsi que pour les matériaux de fondation, dont le comportement est supposé toujours dans le domaine élastique.

Le Tableau 3 regroupe les valeurs de paramètres des sols modélisés au moyen ce modèle élastique linéaire dans cette étude.

Tableau 3 : Paramètres de matériaux modélisés en modèle élastique linéaire.

	E [MPa]	ν -	γ [kN/m ³]	s_u [kPa]	Type de drainage
<i>Validation</i>					
<i>Sol (argile)</i>	16,8	0,4	17,5	41,4	Drainé
<i>fondation en béton</i>	40	0,16	20	-	Non poreux
<i>Sol de référence</i>					
<i>fondation en béton</i>	30	0,2	25	-	Non poreux

5.2 MATÉRIAUX MODÉLISÉS EN MOHR-COULOMB

Le modèle de Mohr-Coulomb est utilisé pour les matériaux de l'étude de cas de (Khanmohammadi & Fakharian, 2018) et de l'étude paramétrique.

Le

Tableau 4 regroupe les valeurs de paramètres de matériaux modélisés au moyen ce modèle dans cette étude.

Tableau 4 : Paramètres de matériaux modélisés en modèle élastique linéaire.

	E [MPa]	ν -	γ [kN/m ³]	c' [kPa]	ϕ' [°]	Type de drainage
<i>Sol de l'étude de cas</i>						
<i>Couche 1 : Argile molle</i>	1,5	0,3	19,5	11	22	Drainé
<i>Couche 2 : Argile molle</i>	2	0,3	20	11	20	Drainé
<i>Couche 3 : Argile molle</i>	2,3	0,3	20,2	12	19	Drainé
<i>Couche 4 : Argile molle</i>	3,5	0,3	20,2	12	19	Drainé
<i>Couche 5 : Sable limoneux</i>	35	0,3	20	10	28	Drainé

<i>Couche 6 : Argile raide</i>	35	0,3	20	18	26	Drainé
<i>Sol de référence</i>						
<i>Argile raide</i>	45	0,3	19	20	20	Drainé

6 MODÉLISATION EN PLAN

Lors d'une modélisation d'une situation tridimensionnelle en plan dans Plaxis 2D, la dimension hors plan de la fondation est infinie.

Ce type de modélisation amène à des résultats intéressants pour des situations où la dimension hors plan L est largement supérieure à la dimension dans le plan B , soit $L \gg B$.

La dimension infinie hors plan empêche une équivalence exacte de surface horizontale, mais une équivalence par mètre est possible.

La modélisation en plan est également moins indiquée pour l'étude de réservoir circulaire.

6.1 EMBEDDED BEAM ROW

Pour contourner cette analyse 2D, Plaxis possède notamment une approche simplifiée, « Embedded Beam row », pour traiter la modélisation de rangées de pieux, ancrages ou autres, dans une direction hors plan.

Cette fonctionnalité est cependant seulement disponible en modélisation en plan. La modélisation en modèle axisymétrique de rangée de pieux doit être représenté autrement, par exemple via une équivalence analytique.

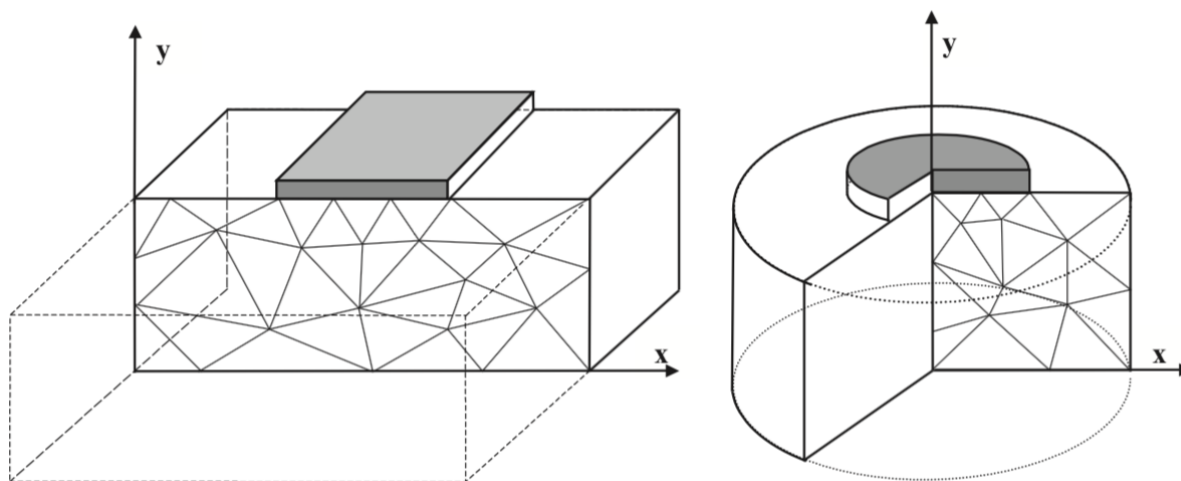


Figure 45 : Exemples de problème en modèle Plan et Axisymétrique

Source: PLAXIS 2D Reference Manual 2018

7 MODÉLISATION AXISYMÉTRIQUE

La modélisation axisymétrique est utilisée pour des structures circulaires avec une section radial uniforme et un état de contrainte identique autour d'un axe de symétrie. Ce modèle est donc bien indiqué pour l'analyse de réservoirs circulaires.

Ce modèle se limite à représenter une fondation continue et identique dans toutes les directions. Il n'est donc pas possible de représenter des rangées de pieux ponctuels. Il est donc nécessaire de définir deux équivalences pour modéliser une série de pieux en axisymétrique.

7.1 ÉQUIVALENCE ENTRE UNE SÉRIE DE PIEUX ET UN MUR

Afin d'analyser une fondation de réservoir en radier sur pieux, une hypothèse d'équivalence entre une série de pieux et un mur a été posée. Basée sur l'hypothèse de (Sluis, Besseling, & Stuurwold, 2014), les pieux dont le rapport entre leur espacement, s , et leur diamètre, d , est petit, peuvent être représentés par un mur de même épaisseur avec une faible erreur. (Sluis, Besseling, & Stuurwold, 2014) indique un critère de validité $\frac{s}{d} < \approx 3$.

La modélisation d'une série de pieux par un mur dont l'épaisseur est égale au diamètre reste une approximation.

L'application directe de cette méthode de modélisation est l'analyse de fondations composées de pieux sécants.

7.1 ÉQUIVALENCE DE SURFACE HORIZONTALE

Cette équivalence de surface horizontale a été pensée afin d'égaliser le comportement de la rangée de pieux et celui du mur. La résistance à la base est ainsi identique car la surface d'appui est égale.

Le frottement sur les parois verticales est comparable, voire égal, tant que le critère d'espacement reste valide.

Réaliser une équivalence de surface horizontale permet une approximation plus juste et plus réaliste.

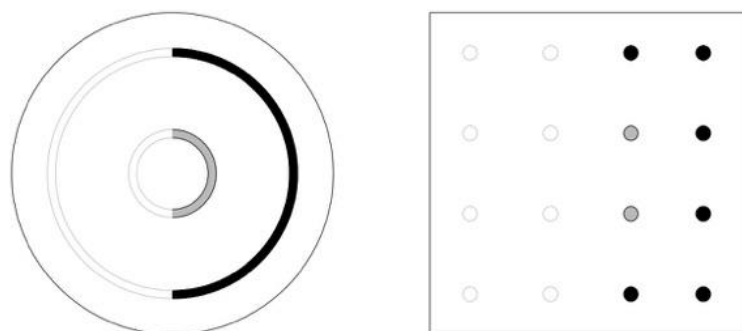


Figure 46 : Équivalence de surface horizontale

À l'aide de ces équivalences, la modélisation de rangées de pieux en axisymétrique se rapproche de la réalité.

CHAPITRE 5 : VALIDATION DE LA MÉTHODE

Dans cette section est développé un cas largement étudié dans la littérature et plus particulièrement par (Horikoshi & Randolph, 1998) et (Lee, Kim, & Jeong, 2010). Cette situation est développée en détail dans ce chapitre, dans un premier temps avec des méthodes analytiques et dans un second temps avec une analyse numérique en Plaxis.

En se référant aux résultats de ces études préalables et détaillées, ce calcul préliminaire idéalisé va permettre de comparer les résultats des méthodes, d'en vérifier la fiabilité et l'exactitude et, au besoin, de synchroniser les paramètres du modèle numérique avec ceux de méthodes analytiques.

Calcul analytique

Diverses méthodes analytiques de calcul de tassement élastique ont été utilisées.

La méthode de calcul du tassement élastique, basée sur l'équation de tassement de Boussinesq ainsi que la méthode de Schmertman et Hartman sont détaillées dans l'annexe 2 page 116.

La méthode de Terzaghi, la méthode de Bjerrum ainsi que la méthode de Schleicher ont été utilisées pour les calculs mais ne sont pas présentées ici. En effet, bien que leurs résultats soient cohérents et d'un bon ordre de grandeur, ces méthodes ne peuvent permettre de décrire un sol composé de plusieurs couches.

Les deux méthodes mises en évidence présentent les avantages de réaliser un calcul de tassement élastique par des expressions linéaires et permettant facilement de considérer un sol multicouche, de différents types de sol, et potentiellement à rigidité variable avec la profondeur.

Calcul numérique

Ensuite, le tassement d'une fondation en situation identique est calculé numériquement au moyen du programme Plaxis.

Ceci permet de conforter l'exactitude des calculs et modélisations.

Ensuite, la même méthode est appliquée à un cas historique simple, qui a été étudié et détaillé dans la littérature afin de disposer d'une base à la comparaison.

Après cette validation du modèle Plaxis sur base de travaux existants, de nouvelles fondations innovantes vont être imaginées et testées avec pour objectif la réduction de tassement différentiel.

1 VALIDATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE

L'essai de validation a été réalisé sur base d'une situation étudiée de la littérature.

(Horikoshi & Randolph, 1998) ont réalisé en 1976 un essai expérimental en centrifugeuse d'une fondation de radier sur pieux. Cette étude a été reproduite en ABAQUS par (Lee, Kim, & Jeong, 2010) et par (Khanmohammadi & Fakharian, 2018), dans le but de valider leur modèle numérique de modélisation en radier sur pieux.

Ils ont réalisé une étude numérique à l'aide du logiciel ABAQUS d'une situation identique.

1.1.1 DESCRIPTION DU MODÈLE DE VALIDATION

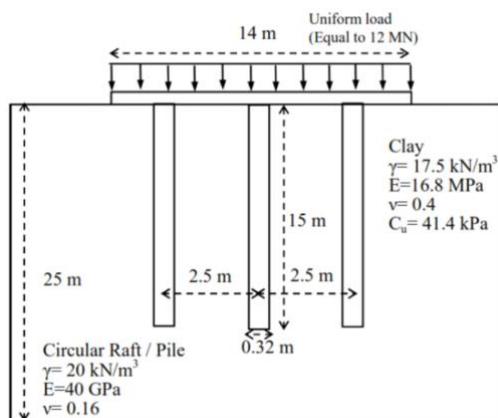


Figure 47 : Géométrie et propriété de matériaux du modèle de validation

Source : (Khanmohammadi & Fakharian, 2018)

Le modèle est composé d'un radier circulaire positionné sur un sol en argile raide. Le radier est supporté par un total de 9 pieux.

Le radier a un diamètre de 14 [m] et une épaisseur de 0,05 [m]. Les pieux ont une longueur de 15 [m], un diamètre de 0,32 [m] et sont espacés de 2,5 [m]. Le radier et les pieux sont en béton.

Le sol est considéré sur une épaisseur de 25 [m].

La charge appliquée uniformément sur la fondation est de 12 [MN], soit environ 78 [kPa].

Les paramètres de sol et de la fondation, reporté par (Horikoshi & Randolph, 1998), sont également repris dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Paramètres de matériaux utilisés pour l'analyse numérique de validation

			Sol	Pieux et radier
Module de Young	E	[MPa]	16,8	40
Coefficient de poisson	ν	-	0,4	0,16
Poids volumique	γ	$\left[\frac{kN}{m^3}\right]$	17,5	20
Résistance au cisaillement non drainée	s_u	[kPa]	41,4	-

Tel que réalisé par (Lee, Kim, & Jeong, 2010), le comportement de l'argile rigide est modélisé en Plaxis par le modèle Mohr-Coulomb, en condition « drainée » pour analyser le comportement à long terme. Les paramètres sont considérés à valeur constante dans la couche de sol. Le radier et les pieux sont modélisés par un modèle élastique et isotrope.

(Lee, Kim, & Jeong, 2010) ont modélisé la situation en mettant en évidence l'impact d'une interface entre la fondation et le sol.

Le modèle est décrit par la relation de la théorie du frottement de Mohr Coulomb, composée de la contrainte de cisaillement τ , du coefficient de frottement μ et de la contrainte normale de compression p' .

$$\tau_{crit} = \mu \cdot p'$$

Une contrainte de cisaillement peut être transférée à une paroi sur laquelle s'applique une force de compression normale, ce qui est modélisé en meilleur accord de la réalité à l'aide de l'interface.

(Jeong, Lee, & Lee) ont rapporté que le coefficient de frottement de l'interface μ pour de l'argile, telle que dans le cas présent, a une valeur entre 0,2 et 0,4. Une valeur de 0,3 a donc été choisie.

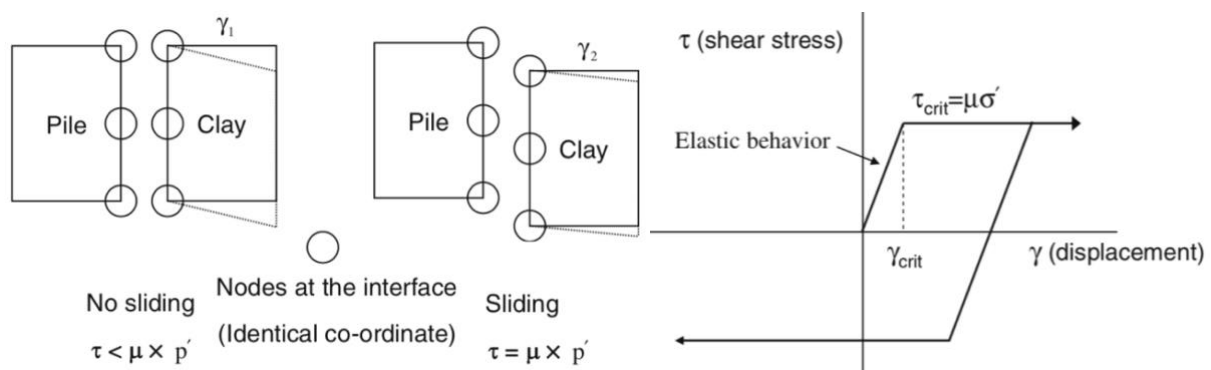


Figure 48 : a) Comportement de l'interface Sol-Pieu b) Loi de frottement de Coulomb

Source : (Jeong, Lee, & Lee)

De plus, un déplacement critique en cisaillement γ_{crit} est, en générale, à 5 mm lors d'une mobilisation complète de la résistance en friction.

Lors des différentes analyses, le tassement vertical moyen a été calculé à l'aide de la formule ci-dessous.

$$s_{moy} = \frac{2 s_{centre} + s_{bord}}{3}$$

1.1.2 RÉSULTATS DE L'ANALYSE DE VALIDATION

Le tassement de la fondation est déterminé pour une charge de 12 MN.

Les résultats des trois modèles numériques sont repris dans le Tableau 6.

Une comparaison des résultats originaux et des résultats de la méthode Plaxis développée permet de valider la méthode. En effet, l'écart entre les résultats, suffisamment faible, peut alors être considéré comme négligeable pour cette étude.

Tableau 6 : Résultats numériques de l'analyse de validation

Méthodes		Tassement moyen (mm)	
Mesuré (Horikoshi & Randolph, 1998)		22	
FEM (Lee, Kim, & Jeong, 2010)		21	avec interface de glissement
		19	sans interface de glissement
FEM (Khanmohammadi & Fakharian, 2018)		22.3	
FEM (étude actuelle)	sans équivalence	18,68	avec interface de glissement
		17,22	sans interface de glissement
En Plaxis	Avec équivalence de surface horizontale	19,4	avec interface de glissement
		17,79	sans interface de glissement

*FEM : Finite Element Method

La Figure 49 illustre la modélisation numérique réalisée en Plaxis. Ce modèle comporte une équivalence de surface, l'utilisation d'interface de frottement et est en modèle axisymétrique. Le maximum de tassement est de 17,79 [mm], situé à une distance du centre du radier valant 2/3 du rayon.

La déformation représentée dans la figure est une représentation agrandie d'un facteur 50.

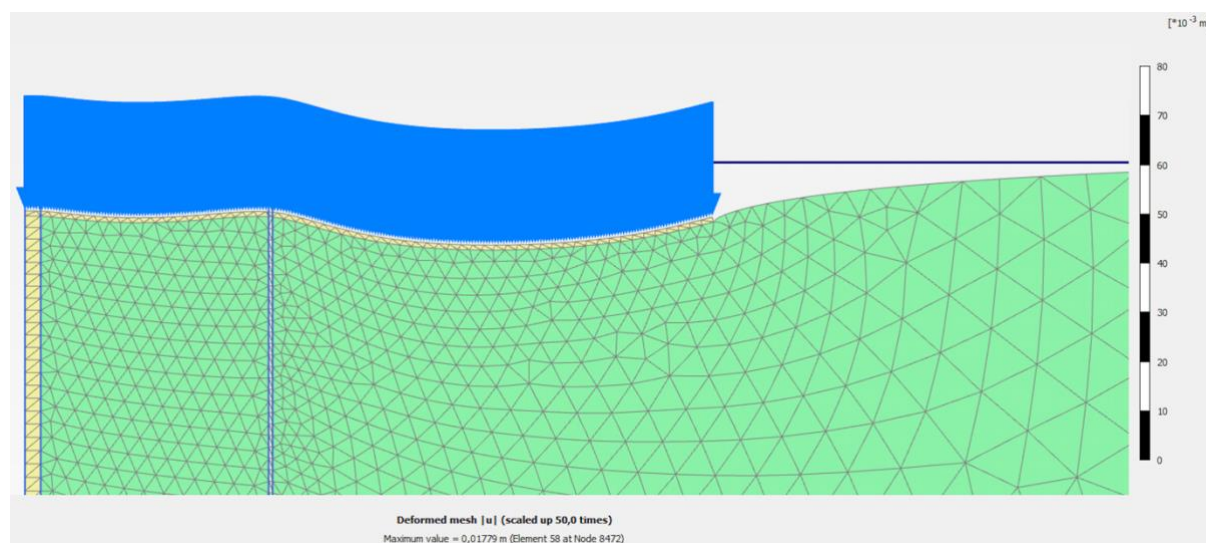


Figure 49 : Illustration de la modélisation numérique en Plaxis de la validation

Les résultats des 5 analyses analytiques sont repris dans le Tableau 7.

Les résultats analytiques représentent une situation différente car ils ne prennent en compte ni le radier, ni les pieux de la fondation. Ils illustrent le tassement d'un sol soumis à une charge uniformément répartie de 12 [MN]. Les résultats analytiques sont donc logiquement supérieurs.

Ces analyses ont permis, par une première approche, de déterminer l'ordre de grandeur du résultat à attendre des méthodes numériques.

Tableau 7 : Résultats analytiques de l'analyse de validation sans pieu

Méthodes	Tassement moyen [mm]	Commentaires
Théorie élastique	38,91	Modèle pour l'argile uniquement
Méthode de Schmertman et Hartman	59,09*	
Méthode de Bjerrum	28,78	
Méthode de Schleicher	51,87	
Méthode de Terzaghi	27,64*	Méthode logarithmique avec plusieurs paramètres arbitraires. e=1 , Cc = 0,01

* Tassement au centre de la fondation

2 UTILISATION DE LA VALIDATION

Un cas détaillé dans la littérature proche du domaine de cette étude a été étudié et modélisé à l'aide de Plaxis 2D. Cette démarche a permis une familiarisation avec le programme Plaxis et de tester différentes pratiques de modélisation numérique telles que les représentations en modèles plan et axisymétrique, la représentation d'éléments structuraux à l'aide de plusieurs outils du logiciel, comme : « plates, embedded beam row, polygon, anchor, etc. »

Cela permet de justifier la démarche et la méthode utilisée pour la réalisation de résultats de cas similaires.

Les sols utilisés lors des études de cas et paramétriques sont proches de ceux du modèle de validation.

CHAPITRE 6 : ANALYSE DE CAS

Cette section a pour but d'analyser plus en détail des fondations de réservoirs présents dans la littérature.

D'une part, cela va illustrer les enjeux de la conception de réservoirs, les détails de conceptions et les paramètres dimensionnants d'une structure, d'autre part, cette étude nous sert à améliorer nos compétences d'utilisation de Plaxis et à progresser dans la réalisation d'une modélisation numérique.

1 EVALUATION OF PERFORMANCE OF PILED-RAFT FOUNDATIONS ON SOFT CLAY: A CASE STUDY.

Auteurs : (Khanmohammadi & Fakharian, 2018)

Le document étudie au moyen du logiciel ABAQUS la fondation de réservoirs d'eau de grande dimension localisés dans le secteur et la zone pétrochimique de Mahshahr en Iran, Figure 50.

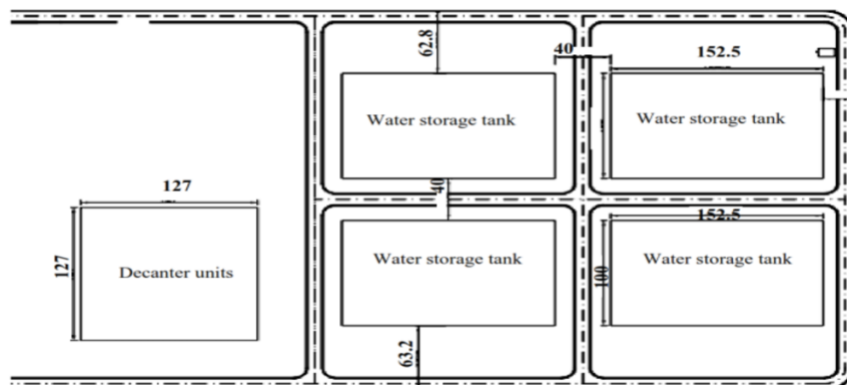


Figure 50 : Réservoirs de stockage et unité de décantation à Marshahr dans la région de Khuzestan, Iran

Source : (Khanmohammadi & Fakharian, 2018)

Les quatre réservoirs reposent sur une fondation en radier sur pieux. Ils sont de dimensions rectangulaires de 152m x 100m. Deux réservoirs sont déjà exécutés, préalablement à l'étude de (Khanmohammadi & Fakharian, 2018), sur des micro-pieux. Les deux autres réservoirs, ainsi que l'unité de décantation, sont en cours de conception et font l'objet de l'étude.

Le sol du site est divisé en plusieurs couches et est composé d'argile molle et dure, de sable limoneux et d'argile limoneuse.

Les auteurs ont réalisé, sur base de forages et d'autres essais géotechniques, la stratification de la zone, détaillée dans la Figure 52.

L'étude a réalisé une modélisation 3D en éléments finis pour simuler le système rigide en radier sur pieux sur un sol mou. Le modèle a été calibré à l'aide des mesures du project de pré-chargement du site.

Le modèle a été utilisé pour évaluer l'influence de certains paramètres sur le tassement total, le tassement différentiel et la capacité portante de pieux dans divers positionnements.

L'intérêt de cette recherche pour cette recherche réside du fait qu'elle présente de nombreuses mesures in situ, de nombreux résultats numériques ainsi que des conclusions sur la conceptions de fondations en radier sur pieux.

1.1 VALIDATION DE LA MÉTHODE D'ÉTUDE

En prenant ce document comme référence principale et en observant ses sources, (Jeong, Lee, & Lee) et (Lee, Kim, & Jeong, 2010), une procédure de validation de méthode par élément fini a été mise en évidence. Dans le chapitre 5, cette méthode a été reproduite en Plaxis. Cette méthode se base sur les travaux de (Jeong, Lee, & Lee) et (Lee, Kim, & Jeong, 2010).

1.2 STRATIFICATION DU SOL

A partir d'essais géotechniques, l'étude a réalisé une stratification du site divisée en trois couches majeures illustrées en Figure 52. Les essais ont été réalisés jusqu'à une profondeur de 30 [m].

Une étude de tassement, sur base des mesures d'extensomètres et de l'analyse du modèle numérique, a démontré que les profils de tassement tendaient à être de grandeur négligeable à une profondeur de 30 [m], Figure 51 de la source : (Khanmohammadi & Fakharian, 2018). Cela appuie la conclusion qu'une modélisation de cette épaisseur de sol ne s'éloignerait pas trop de la réalité.

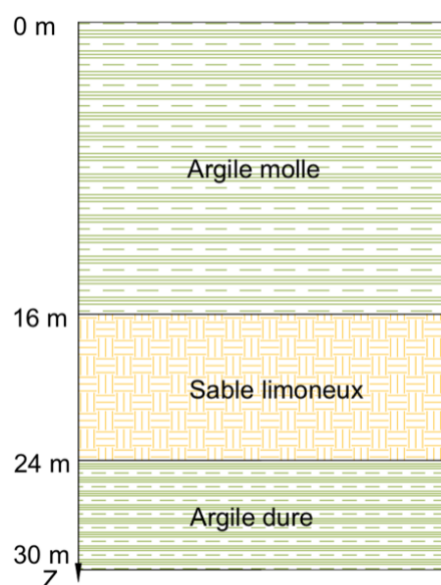


Figure 52 : Stratification simplifiée du sol de (Khanmohammadi & Fakharian, 2018)

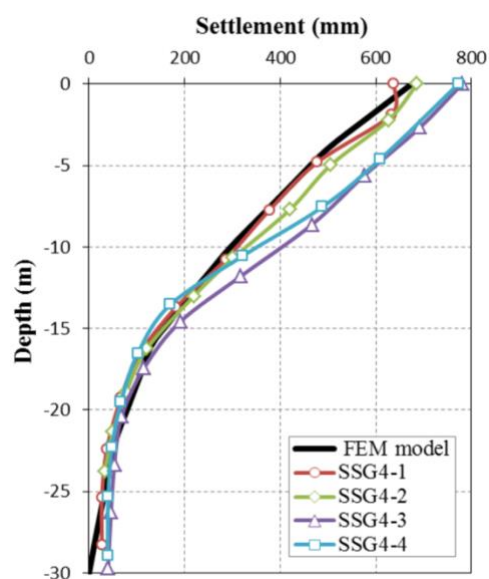


Figure 51 : Profils de tassement avec la profondeur

1.3 PARAMÈTRES DE MATÉRIAUX

Les valeurs de paramètres ont été déterminés sur base des essais géotechniques à dispositions, à savoir des SPT, des forages, des extensomètres, etc.

Ces résultats sont présentés sous forme de tableaux et regroupés selon une stratification plus précise, propre au document source.

Dès lors que l'attention a été portée sur un comportement à long terme du radier sur pieux, les paramètres sont supposés correspondre à leur valeur effective et en condition drainée.

Tableau 8 : Paramètres de sol de (Khanmohammadi & Fakharian, 2018)

N° couche			1	2	3	4	5	6
Profondeur	z	[m]	0-4	4-10	10-13	13-16	16-22	22-30
Poids volumique	γ	$\left[\frac{kN}{m^3}\right]$	19,5	20	20,2	20,2	20	20
Coefficient de poisson	ν	[—]			-----	0,3	-----	
Module d'élasticité	E	[MPa]	1,5	2	2,3	3,5	35	35
Cohésion	c'	[kPa]	11	11	12	12	10	18
Angle de frottement	Φ'	[°]	22	20	19	19	28	26
			----- Argile molle -----			Sable limoneux		Argile raide

1.3.1 MODIFICATION DES PARAMÈTRES DE RÉSISTANCE ET DE DÉFORMATION

Les auteurs procèdent également à une modification des paramètres de résistance et de déformation concernant des blocs de sol situés sous les pieux. Les valeurs de paramètres, E , c' et ϕ' sont largement augmentées, à des valeurs différentes et propres à chaque longueur de pieux de la modélisation, tel que détaillé dans le Tableau 9.

Pour plus de clarté, cette modification n'affecte donc pas la modélisation d'un radier sans pieu et rigidifie une fondation sur pieux proportionnellement à la longueur des pieux modélisés.

Tableau 9 : Paramètres modifiés des blocs de sol situés en pointe de pieux

Longueur de pieux	L_p	[m]	18	14	11
Diamètre du bloc de sol	d	[m]		3	
Module d'élasticité	E	[MPa]	400	70	20
Cohésion	c'	[kPa]	20	50	40
Angle de frottement	Φ'	[°]	45	28	28

Cette décision s'appuie sur le fait d'un manque de données concernant des tests en charge statique pour des pieux de 11 et 14 [m] et sur base d'une estimation d'essais in situ des pieux de 18 [m] et encore d'expériences préalables à leur étude.

Les valeurs N des SPT étant à disposition, les résultats peuvent être contrôlés, en particulier la valeur du module de Young.

Cette démarche est effectuée afin d'évaluer la nécessité de modifier les valeurs de paramètres à des valeurs arbitraires et largement surévaluées en comparaison aux valeurs présentées précédemment au Tableau 8, tableau qui regroupe les valeurs découlant des essais géotechniques.

Les couches réalisées dans cette section sont basées uniquement sur les SPT présentés. Une valeur-N moyenne a été déterminée pour chaque couche.

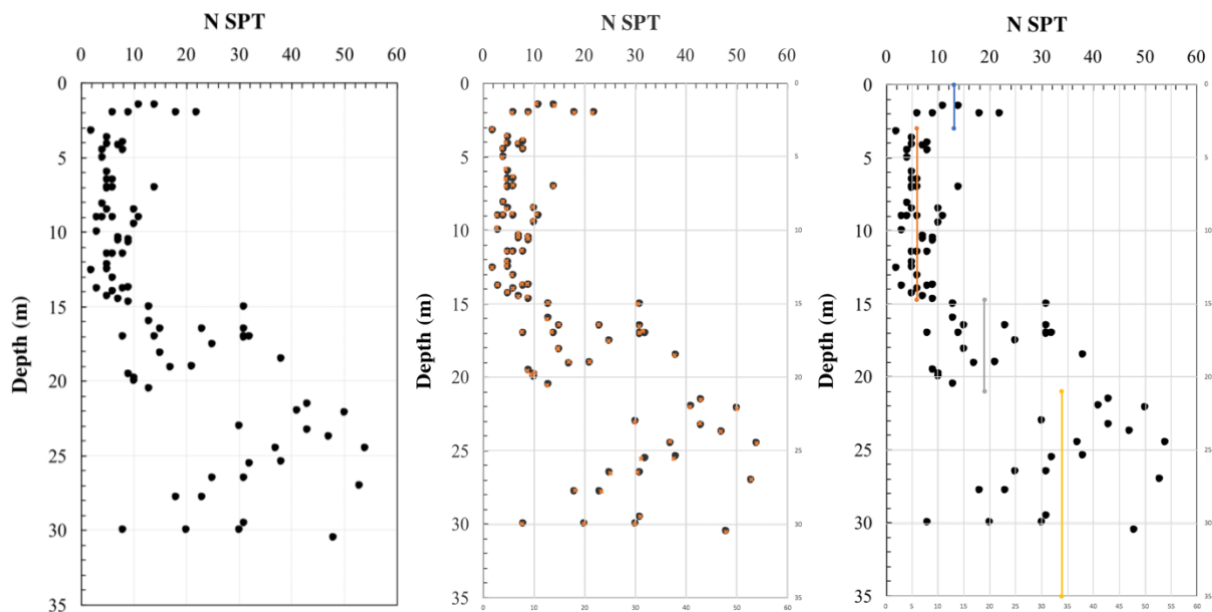


Figure 53 : SPT - Détermination des paramètres de sol

De nombreuses méthodes possibles existent pour analyser un SPT afin d'en ressortir la valeur moyenne du module de Young par couche, telles que (Schmertmann, 1970), (Decourt, 1989) et (Trofimov, 1974).

La méthode utilisée se base sur une corrélation avec le CPT afin de déterminer le module d'élasticité.

Tableau 10 : Corrélation SPT-CPT

Zone dans le graphe de Robertson	Type de sol	$(q_c/100kPa)$ N60
1	Sensitive fine grained	2
2	Organic soils – clay	1
3	Clays: clay to silty clay	1,5
4	Silt mixtures: clayey silt & silty clay	2
5	Sand mixtures: silty sand to sandy silt	3
6	Sands: clean sands to silty sands	5
7	Dense sand to gravelly sand	6
8	Very stiff sand to clayey sand*	5
9	Very stiff fine-grained*	1

Source : (Robertson & Cabal, 2015)

L'équivalence de (Trofimenkov, 1974) permet l'approche la plus cohérente à l'aide des expressions suivantes :

$$E_s = 3 * q_c \quad \text{pour du sable}$$

$$E_s = 3 * q_c \quad \text{pour de l'argile}$$

On peut dès lors comparer les valeurs du documents avec celles générées via cette méthode sur base des SPT.

Tableau 11 : Comparaison du SPT et du tableau de la source

N° couche			1	2	3	4	5	6
Profondeur	z	[m]	0-4	4-10	10-13	13-16	16-22	22-30
Module d'élasticité Document	E	[MPa]	1,5	2	2,3	3,5	35	35
Profondeur	z	[m]	0-3		3-14,7		14,7-21	21-30
Module d'élasticité Sur base des SPT	E	[MPa]	9		4,1		17,9	130,2

L'estimation du module d'élasticité sur base du graphique des SPT indique une valeur largement supérieure aux valeurs utilisées dans le modèle du document. La stratification indiquée par le SPT est également significativement différente. Ceci pourrait influencer les résultats de déformations qui sont présentés plus loin.

Toutefois, la différence de valeur des paramètres peut être due à diverses raisons. Parmi elles, l'utilisation des autres essais géotechniques qui ont pu amener à considérer d'autres valeurs de ces paramètres et une autre stratification. Ensuite, rien n'indique si les SPT ont été réalisés à l'endroit exact des autres essais, ce qui pourrait également amener une variation de sol.

En conclusion de cette vérification des valeurs de paramètres à l'aide du SPT, il semble avéré que les valeurs reprises dans le Tableau 8 soit sous-évaluées par rapport aux valeurs du sol étudié. Toutefois, la démarche utilisée par les auteurs manque de clarté et de fiabilité, considérant les décisions arbitraires de modification de paramètres.

Les valeurs du document, repris au Tableau 8, sont conservées afin de garder une cohérence avec les résultats obtenus dans l'étude de (Khanmohammadi & Fakharian, 2018). Mais une attention particulière doit alors être retenue lors de la comparaison et de l'analyse des résultats obtenus sur base de ces valeurs.

1.4 DESCRIPTION DU MODÈLE DE RADIER SUR PIEUX

L'étude de tassement des réservoirs de 152m x 100m a été réalisée par le biais d'une modélisation simplifiée de moindre dimension. L'étude est faite sur une fondation en radier sur pieux, carrée, de 20 [m] de côté. Les calculs ont été réalisés pour une charge de 100 [kPa] uniforme sur le radier pour modéliser la charge du réservoir d'eau.

Cette modélisation se rapproche ainsi de l'analyse de validation de la méthode, mais en s'écartant potentiellement de la réalité.

Les auteurs n'indiquent pas de raison à ce choix mais réalisent peut-être l'hypothèse que l'étude d'une fondation réduite mènerait aux mêmes conclusions.

Cette hypothèse semble peu fondée avec les éléments contenus dans le document. Toutefois, une étude des résultats empiriques du cas étudié pourra en dire plus sur la validité de cette simplification.

Les résultats portent donc sur cette fondation de taille réduite illustrée en Figure 54 et détaillée dans le Tableau 12.

Trois arrangements de pieux, avec trois longueurs de pieux, sont comparés à la situation du radier seul tout au long de l'étude.

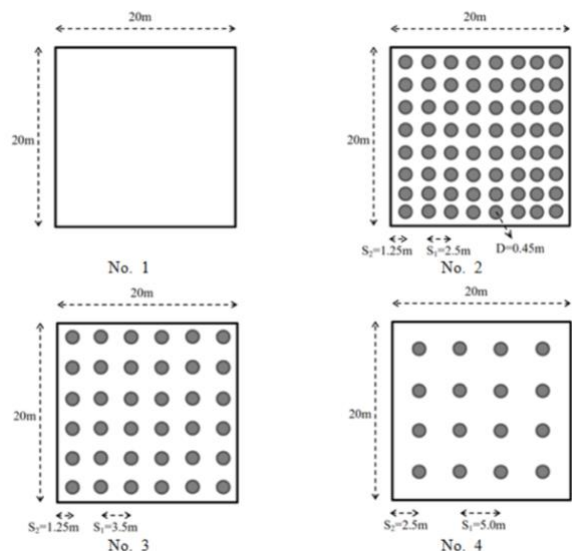


Figure 54 : Modèles de radier sur pieux étudiés ; nombre de pieux 0, 16, 36, 64.

Source : (Khanmohammadi & Fakharian, 2018)

Tableau 12 : Géométrie et arrangements de pieu du modèle étudié de radier sur pieux

N° modèle	1	2	3	4
Dimension du radier [m]	20 x 20 x 0,5			
Arrangement des pieux	0	8 x 8	6 x 6	4 x 4
Longueur des pieux [m]	0	11, 14 ou 18		
Espacement du bord S_1 [m]	-	2,5	3,5	2
Espacement entre pieux S_2 [m]	-	1,25	1,25	2,5
Rapport s/d	0	11,1	7,7	5,5

1.5 ÉTUDE DE (KHANMOHAMMADI & FAKHARIAN, 2018)

Les résultats de l'étude rapportent un tassement au centre de la fondation atteignant 0,5 [m] au centre de la fondation sans pieu. La mise en place de pieux réduit fortement le tassement total, jusqu'à atteindre moins de 0,1 [m]. L'augmentation de la longueur des pieux entraîne une réduction notable du tassement.

Le tassement différentiel est lui aussi diminué par l'ajout d'un plus grand nombre de pieux. L'augmentation de la longueur a toutefois un impact réduit lorsque le nombre de pieux est élevé.

Le tassement différentiel calculé pour le radier sans pieu est de 0,35 [m] et est réduit à 0,015 [m] avec l'ajout de 64 pieux de soit 14 [m], soit 18 [m] de longueur.

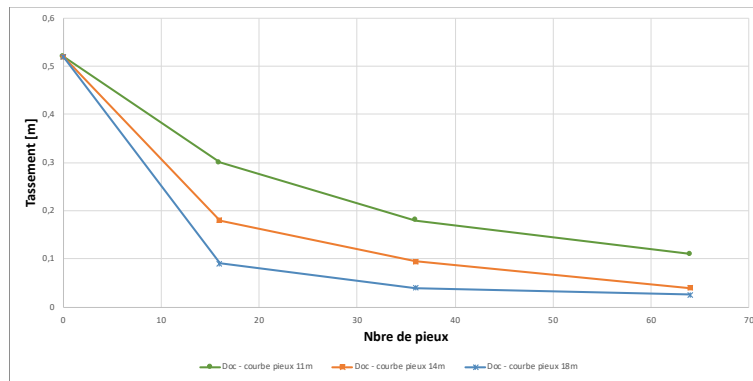


Figure 55 : Tassement en fonction du nombre de pieux et de leur longueur de (Khanmohammadi & Fakharian, 2018)

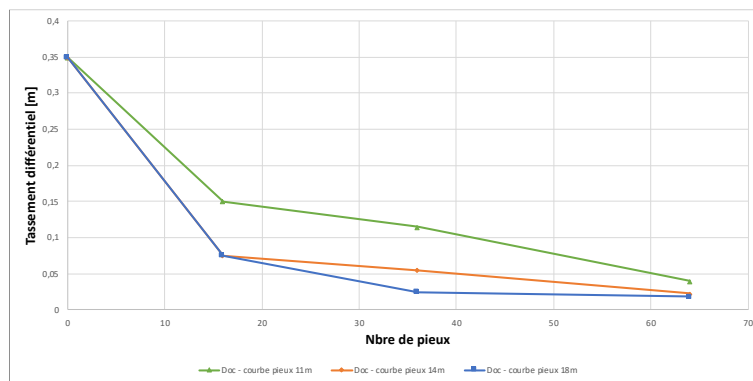


Figure 56 : Tassement différentiel en fonction du nombre de pieux et de leur longueur de (Khanmohammadi & Fakharian, 2018)

1.5.1 CHARGES REPRISES PAR LES PIEUX

La Figure 57 illustre le pourcentage de charge repris par les pieux dans les différentes configurations de pieux étudiées.

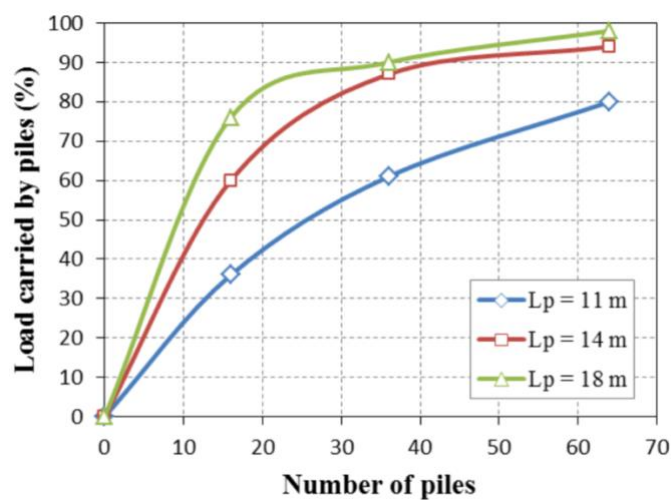


Figure 57 : Contribution à la capacité portante des pieux en fonction de la longueur et du nombre de pieux

Source : (Khanmohammadi & Fakharian, 2018)

Dans le cas d'un grand nombre de pieux, 36 et 64 pour un radier de 20[m] de côté, le pourcentage de reprise de charge des pieux est rapidement très élevé. Cela indique que le comportement dans ce système de fondation mixte sur pieux est largement gouverné par les caractéristiques des pieux. La mise en place de pieux permet un meilleur contrôle du tassement différentiel, une augmentation de la capacité portante de la fondation. Cela contribue également à la réduction de la participation du radier à la capacité portante.

Avec des pieux d'une longueur suffisante, il est donc imaginable de faire une assimilation de cette fondation mixte sur pieux à une fondation sur groupe de pieux.

1.6 ÉTUDE PLAXIS

Une étude Plaxis a été réalisée pour modéliser la même situation que le document.

1.6.1 MODÉLISATION DES MATÉRIAUX

Le matériau de fondation, du béton, a été modélisé au moyen d'un modèle linéaire élastique avec le type de drainage « non-poreux ». Les différentes couches de sol ont été modélisées au moyen de modèle Mohr coulomb en condition drainée.

1.6.2 MODÈLE PLAXIS

La situation a été étudiée en plan ainsi qu'en axisymétrique.

Les efforts de frottement entre les pieux de fondation et le sol ont été considérés sans restriction et n'ont pas été réduits au moyen d'un coefficient d'interface de réduction de frottement.

En axisymétrique, des équivalences ont été réalisées pour neutraliser la modélisation 2D, à savoir l'équivalence de géométrie et l'équivalence de surface horizontale.

Elles sont définies dans le chapitre des définitions et concepts et rappelées rapidement ci-dessous.

a) Équivalence de géométrie

La fondation carrée est modélisée par un radier circulaire à diamètre équivalent dont l'expression est la suivante.

$$D_e = \sqrt{\frac{4BL}{\pi}}$$

Équivalence de surface horizontale

La série de pieux est modélisée par des murs en anneaux de telle façon que la surface horizontale du mur soit équivalente à la somme des surfaces horizontales des pieux isolés.

1.6.3 HYPOTHÈSE DE MODÉLISATION

(Sluis, Besseling, & Stuurwold, 2014) ont indiqué que le rapport entre l'espacement et le diamètre des pieux ne doit pas être trop grand afin de pouvoir supposer que la série de pieux se comporte comme un mur et est modélisé comme tel.

Le critère $\left(\frac{s}{d} < 3\right)$ n'est pas respecté dans ce cas. L'hypothèse de modélisation des séries de pieux par un mur n'est dès lors pas validée. Les résultats modélisés sont donc à considérer prudemment.

1.6.4 RÉSULTATS PLAXIS

Les résultats de l'étude de tassement et de tassement différentiel Plaxis sont représentés dans les Figure 58 et Figure 59.

Les modèles en Plan et en Axisymétrique amènent à des résultats très proches. La différence de résultats entre les 2 modèles pour les cas représentés est inférieure à 3%. Cela conforte l'hypothèse que le choix de la méthode de modélisation en Plaxis 2D n'influence les résultats de la situation étudiée.

Ceci appuie également la décision décrite dans le chapitre précédent portant sur le modèle numérique Plaxis. Seule la modélisation en axisymétrique est dès lors utilisée lors de cette étude.

Les résultats obtenus donnent des indications importantes :

- Une utilité certaine de l'ajout de pieux sous la fondation. En effet, le tassement différentiel est directement réduit par l'ajout de pieux répartis sous la fondation.
- La longueur des pieux semble avoir une influence faible mais peut malgré tout participer à l'amélioration du tassement au centre de la fondation.
- Le nombre de pieux et leur espacement semblent jouer un rôle plus important dans la réduction du tassement et du tassement différentiel.

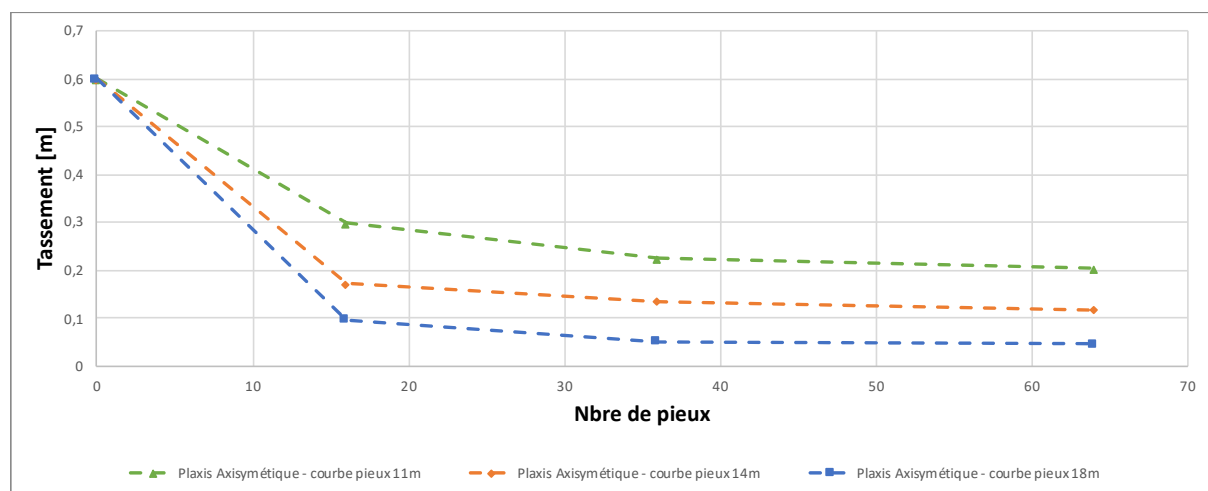


Figure 58 : Tassements au centre en fonction du nombre de pieux n , Résultats Plaxis en modèle Axisymétrique

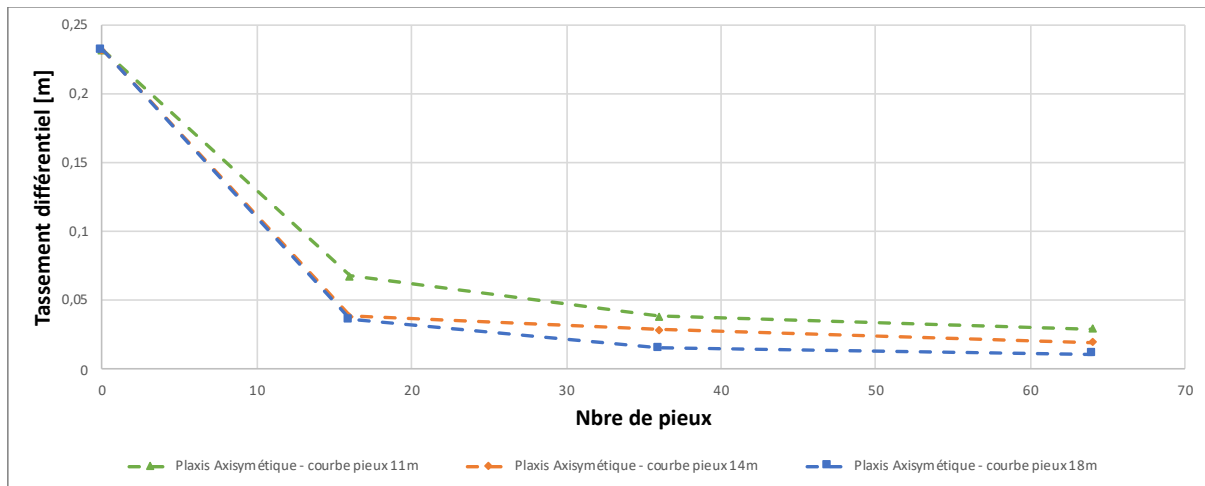


Figure 59 : Tassements différentiel en fonction du nombre de pieux n , Résultats Plaxis en modèle Axisymétrique

1.6.5 COMPARAISON DES RÉSULTATS

Les résultats Plaxis obtenus sont cohérents avec le modèle étudié.

Ils sont toutefois légèrement supérieurs dans le cas du tassement au centre et sensiblement inférieurs au niveau du tassement différentiel par rapport aux résultats présentés dans l'étude de (Khanmohammadi & Fakharian, 2018).

L'influence de la longueur des pieux est moins prononcée que celle affichée par le document de (Khanmohammadi & Fakharian, 2018).

Le modèle Plaxis illustre une reprise importante des charges à la base des murs en anneaux et par le radier et le reste par frottement sur les parois latérales des murs .

Autrement dit, une augmentation de la longueur des pieux induit une augmentation de la résistance au frottement le long des murs en anneaux. Cela se traduit en une légère diminution du tassement proportionnelle à la longueur des pieux.

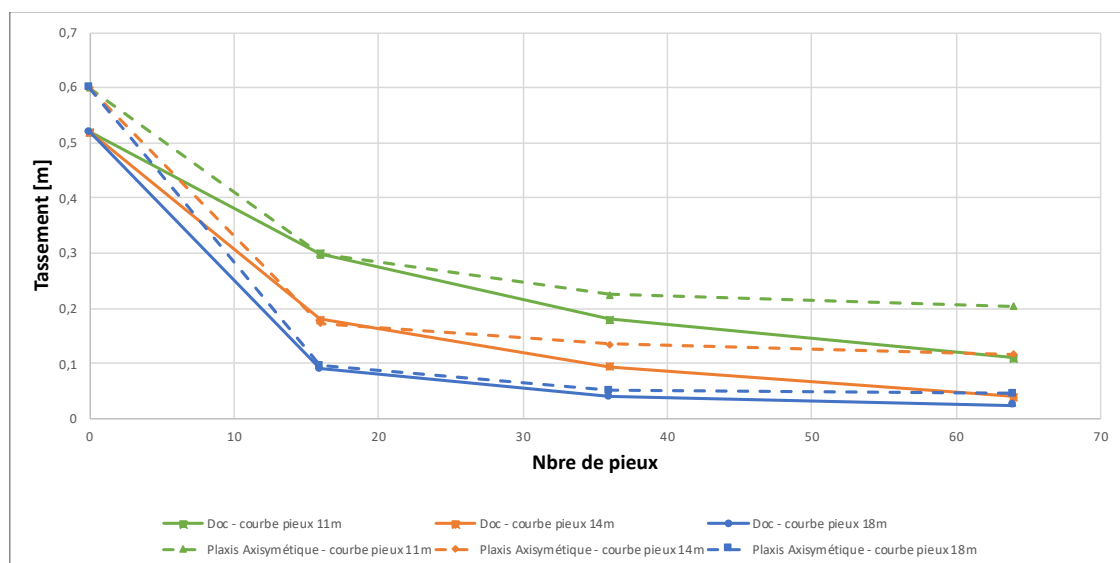


Figure 60 : Tassements au centre en fonction du nombre de pieux n , Résultats Plaxis en modèle axisymétrique et du document (Khanmohammadi & Fakharian, 2018)

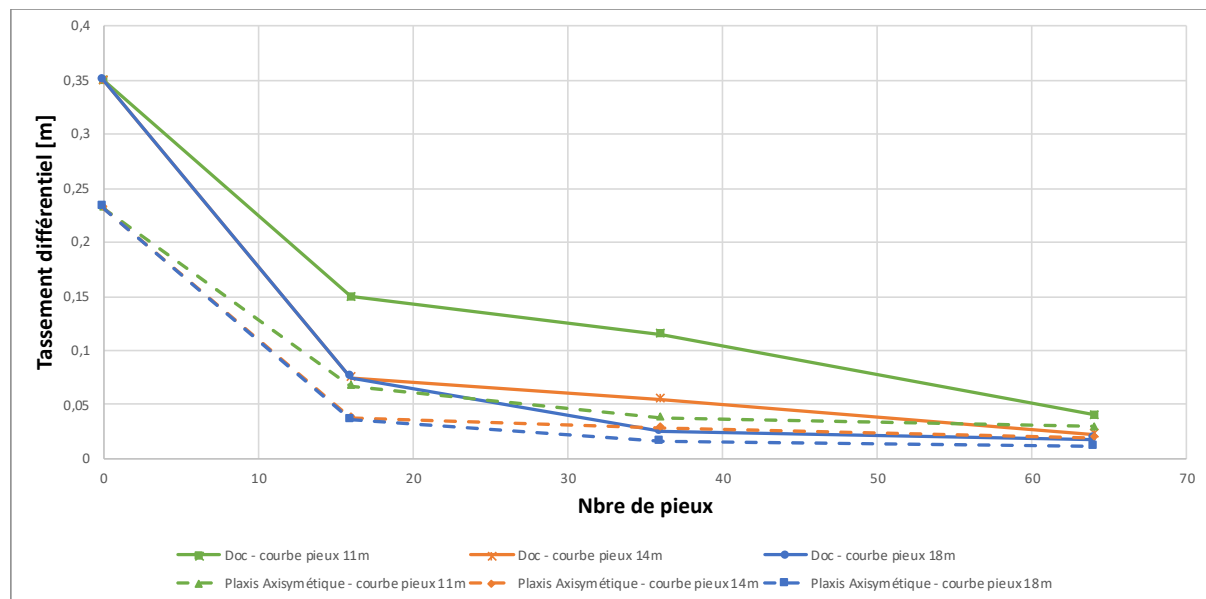


Figure 61 : Tassements différentiel en fonction du nombre de pieux n , Résultats Plaxis en modèle axisymétrique et du document (Khanmohammadi & Fakharian, 2018)

1.7 CONCLUSION DE L'ÉTUDE DE (KHANMOHAMMADI & FAKHARIAN, 2018)

Les essais indiquent un réel intérêt à l'ajout de pieux sous la fondation pour réduire le tassement au centre de la fondation mais surtout afin de réduire et contrôler le tassement différentiel.

(Khanmohammadi & Fakharian, 2018) concluent que les fondations sur pieux ne sont pas les plus efficaces pour réduire le tassement total en sols mous. Mais, ils concluent également que ce type de fondation est applicable pour réduire le tassement différentiel, objectif de cette étude, par le choix d'une combinaison appropriée d'une longueur et d'un espacement des pieux spécifiques. Cette conclusion est également valable avec l'analyse Plaxis réalisée.

L'augmentation de la longueur et du nombre de pieux a donc un impact positif sur le tassement différentiel.

2 NOMBRE DE CAS À ÉTUDIER

Dans le but de couvrir un maximum de situations dans cette étude, plus de cas réels devraient être analysés.

(D'Orazio & Duncan, 1987) ont regroupé certaines informations concernant le tassement et tassement différentiel de plus de 30 réservoirs, voir l'annexe 1 page 113.

Il serait donc utile de réaliser une étude plus approfondie au moyen d'analyses numériques indisponibles à l'époque, pour compléter leur analyse.

Toutefois certaines informations sont encore manquantes. Certaines informations peuvent être déterminées à l'aide du complément d'informations fourni par (Bell & Iwakiri, 1980).

Les propriétés de sols peuvent également être précisées avec la réalisation d'un rapprochement entre les appellations utilisées par (D'Orazio & Duncan, 1987) avec la classification des sols USCS (« Unified Soil Classification System »). Les sols définis par cette classifications ont été étudiés en détail et des relations entre paramètres de ces sols ont été déterminées.

D'autres cas ont également été trouvés lors de la recherche bibliographique.

(Bahar, Omar, & Djahid, 2013) étudient le tassement différentiel de 2 réservoirs de 56 et 67 [m] de diamètre. (Clemente, Desai, Senapathy, & Jr., 1998) étudient le tassement de 6 réservoirs à toit flottant de 60 [m] de diamètre ainsi que 6 réservoirs à toit fixe de 97 [m] de diamètre. (Contreras, F.Lupini, & Pestaña) réalisent une étude de tassement sur base de 3 réservoirs de 45 [m] de diamètre.

Les sources nécessaires ont été en partie déterminées mais n'ont pas pu être exploitées dans le cadre de ce mémoire.

CHAPITRE 7 : ANALYSE PARAMÉTRIQUE

Une analyse paramétrique est réalisée pour mettre en évidence l'influence de certains paramètres sur le tassement différentiel.

Le comportement de fondations profondes sur groupe de pieux et de fondations mixtes sur pieux sera mis en évidence et en comparaison.

Les analyses seront effectuées sur base d'un sol de référence choisi, composé d'une argile raide uniforme détaillée ci-dessous.

Les situations de référence sont décrites et sont utilisées comme référence pour l'analyse des variations de fondation.

Dans le cadre d'un mémoire, l'analyse ne peut pas prendre en compte tous les cas.

Les cas les plus prometteurs qui n'ont pas pu être développés sont listés et seront laissés pour une continuation à ce travail. Les résultats des analyses numériques réalisées sont repris aux annexes 3 et 4 à partir de la page 119.

1 SOL DE RÉFÉRENCE

Le sol de référence est une argile raide dont le modèle a été utilisé par (Jeong, Lee, & Lee) et proche du sol utilisé lors de la validation de la méthode.

L'étude détermine les tassements à long terme en condition « consolidé-drainée ». Les paramètres de sol sont définis en valeur drainée.

Une épaisseur compressible, H , de 50 [m] est considérée dans la modélisation.

2 MATÉRIAUX

Le matériau de sol est modélisé en Plaxis au moyen du modèle de Mohr-Coulomb.

Le matériau de fondation est du béton et est modélisé au moyen d'un modèle élastique linéaire.

Tableau 13 : Paramètres de référence du béton de fondation

Modèle élastique linéaire			Pieux et radier
Type de drainage			Non poreux
Module de Young	E	[MPa]	40
Coefficient de poisson	ν	-	0,2
Poids volumique	γ	$[kN/m^3]$	25

Tableau 14 : Paramètres de référence du sol

Modèle Mohr-Coulomb			Sol
Type de drainage			Drainé
Module de Young	E	[GPa]	45
Coefficient de poisson	ν	-	0,3
Cohésion	c	[kPa]	20
Poids volumique	γ	$[kN/m^3]$	19
Angle de frottement	φ	[°]	20

3 RAPPEL DE PARAMÈTRES DIMENSIONNANTS

Cette section effectue un rappel des paramètres principaux utilisés dans l'analyse paramétrique et définis dans le chapitre portant sur les définitions et concepts.

3.1 RAPPORT D'OCCUPATION DE PIEUX

$a_{gr} = \frac{A_g}{A}$: le rapport de surface d'occupation du groupe de pieux sur la surface du radier. A_g est la surface du groupe de pieux. A est la surface du radier.

3.2 RAPPORT DE L'ESPACEMENT SUR LE DIAMÈTRE

Ce rapport, noté $\frac{s}{d}$, est le rapport entre l'espacement entre pieux sur le diamètre des pieux.

3.3 RIGIDITÉ FLEXIONNELLE RELATIVE

K_{rs} est un paramètre qui permet de définir la rigidité flexionnelle relative du radier d'une fondation. Ce paramètre dépend de E_s et E_r , les modules de Young du sol et du radier, de ν_s et ν_r , leur coefficient de Poisson, de t et B, l'épaisseur et la dimension principale du radier. Une valeur de 1 indique un radier totalement rigide. Une valeur plus basse indique une fondation semi flexible, totalement flexible pour une valeur $\sim 0,001$.

3.4 LONGUEUR TOTALE D'ANNEAUX

La longueur totale d'anneaux, notée L_{tA} , est la somme des longueurs des anneaux de fondation.

3.5 RAPPORT DE LA LONGUEUR DE PIEUX SUR LE DIAMÈTRE

Ce rapport, noté $\frac{L}{D}$, est le rapport de la longueur des pieux sur le diamètre du radier. Il permet d'adimensionnaliser la longueur des pieux.

4 FONDATIONS MIXTES SUR PIEUX

La littérature développe fort l'analyse de fondations mixtes sur pieux mais certains cas ne sont pas détaillés.

Les analyses dans la littérature portent généralement sur l'étude d'un petit nombre de pieux lors des modélisations numériques et emploient le concept de pieu équivalent pour la modélisation de groupe de pieux.

La littérature connue ne détaille pas les fondations comportant un radier fort flexible et caractérisées par une rigidité flexionnelle relative de $K_{rs} = 0,001$.

L'analyse est réalisée en Plaxis au moyen du modèle axisymétrique. Les rangées de pieux sont modélisés par application du principe d'équivalence avec un mur en anneaux.

4.1 SITUATION DE RÉFÉRENCE D'UNE FONDATION MIXTE SUR PIEUX

Le radier est considéré en contact avec le sol. Cette étude analyse une fondation composée d'un radier flexible d'une dimension de 40 [m] de diamètre et de 0,5 [m] d'épaisseur.

La charge considérée est une charge uniformément répartie sur la surface du radier de 150 [kPa].

- Charge $q = 150$ [kPa]
- Diamètre $D = 40$ [m]
- Épaisseur $t = 0,5$ [m]

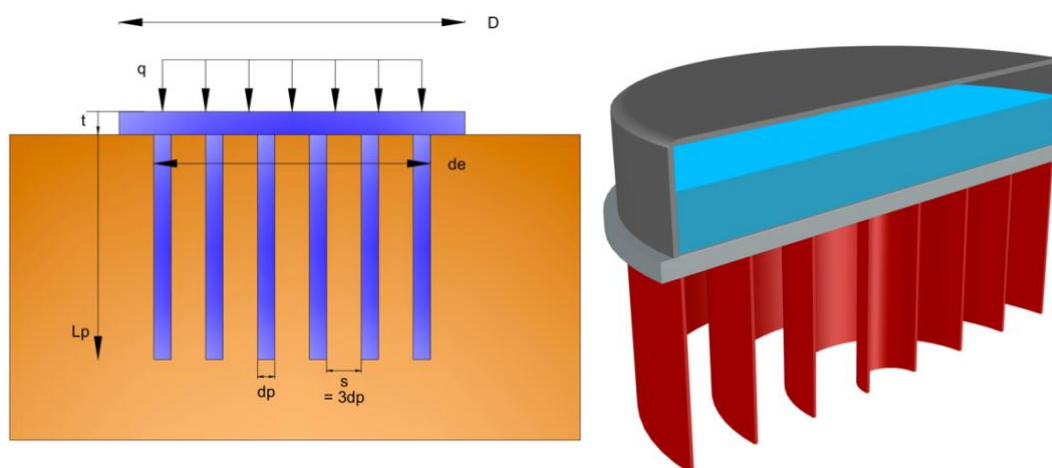


Figure 62 : Illustration de la situation de référence d'une fondation mixte sur pieux

Comme énoncé plus haut, ces dimensions permettent la modélisation d'une fondation possédant la rigidité flexionnelle relative souhaitée, $K_{rs} = 0,001$.

La fondation de référence est composée d'une série de murs en anneaux pour modéliser les pieux, dont l'épaisseur définie de diamètre $d_p = 0.3$ [m], d'une longueur $L_p = 20$ [m] et d'un écartement $s = 3d_p$.

La fondation de référence dans son ensemble repose donc sur 23 anneaux répartis sous la fondation avec un écartement de 0.9 [m] avec un rapport d'occupation $a_{gr} = 0,98$. Le radier est donc supporté par des pieux sur (presque) toute sa surface.

Ces dimensions permettent la modélisation d'une fondation possédant la rigidité flexionnelle relative souhaitée, $K_{rs} = 0,001$.

4.2 VARIATION DU RAPPORT D'OCCUPATION a_{gr}

La variation du rapport d'occupation, $a_{gr} = \frac{A_g}{A}$, est réalisée dans le cas de la fondation de référence avec $K_{rs} = 0,001$ en faisant varier le nombre de pieux dans la fondation.

La longueur, le diamètre et l'espacement des pieux sont gardés constants à $L_p = 20$ [m], $d_p = 0,3$ [m], $s = 3d_p$.

Pour $K_{rs} = 0,001$, l'optimum du rapport d'occupation de pieux se situe dans l'intervalle $a_{gr} \in [0,4 ; 0,73]$.

Cela indique que le plus efficace est de concevoir une fondation supportée par des pieux placés au centre de la fondation et couvrant de 40 à 73% de la surface.

La littérature indique un optimum de 20 à 45%, en $a_{gr} \in [0,2; 0,45]$ soit pour l'ensemble des fondations caractérisées par $K_{rs} = 0,01$ et 0,1. Cette optimum est défini comme la superposition des optimums des deux cas de fondations, soit un optimum en $a_{gr} \in [0,2; 0,35]$ ([0,16 ; 0,25] selon (Horikoshi & Randolph, 1998) pour une fondation $K_{rs} = 0,1$ et un optimum en $a_{gr} \in [0,3; 0,45]$ pour une fondation $K_{rs} = 0,01$, comme décrit par (Sanctis, Mandolini, Russo, & Viggiani, 2002) et (Horikoshi & Randolph, 1998).

Cette étude émet donc l'idée que l'optimum du rapport d'occupation dépend de la rigidité flexionnelle et que ce rapport d'occupation optimum augmente si la flexibilité de la fondation diminue.

En relation avec la rigidité flexionnelle relative du radier, le diamètre et l'épaisseur du radier ont une influence proportionnelle au résultat. Une augmentation du diamètre va réduire la rigidité flexionnelle relative de la fondation. L'épaisseur du radier va avoir l'influence inverse.

A noter que la modification du type de sol ainsi que des paramètres du sol, E_s , module de Young, et ν_s , coefficient de poisson, vont également influencer le résultat.

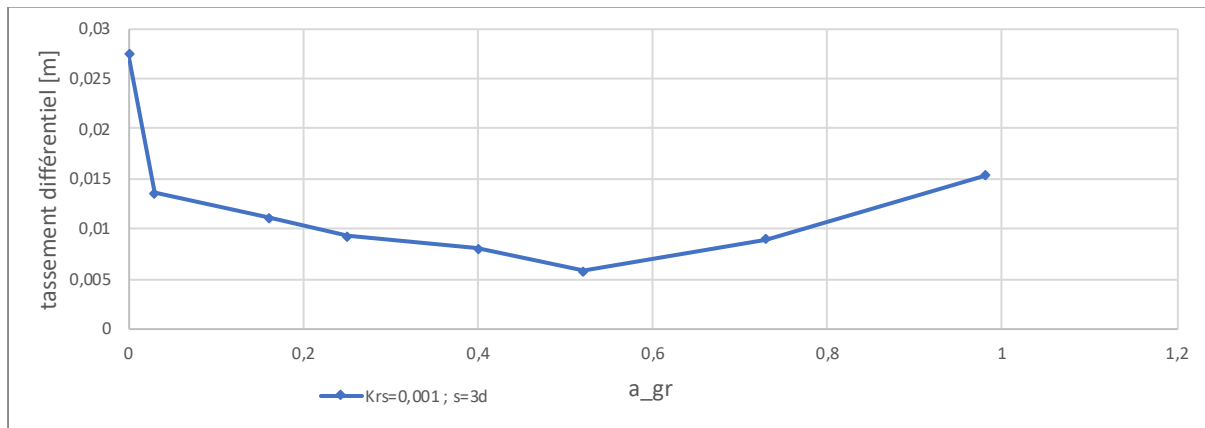


Figure 63 : Variation de tassement différentiel en fonction du rapport d'occupation de pieux a_{gr} ; $K_{rs} = 0,001$.

Tableau 15 : Description de la situation en terme de nombre d'anneaux, rapport d'occupation et longueur totale d'anneaux

Nombre d'anneaux	n	23	20	17	15	12	10	5	0
Taux d'occupation	a_{gr}	0,98	0,73	0,52	0,4	0,25	0,16	0,03	0
Longueur totale d'anneaux [m]	nL	460	400	340	300	240	200	100	0

La variation du rapport d'occupation a également un impact sur la longueur totale d'anneaux utilisée comme illustré dans la Figure 64.

Cette longueur totale d'anneaux représente la quantité de pieux mis en place dans la fondation. Plus la longueur totale d'anneaux est réduite, plus la fondation sera économique.

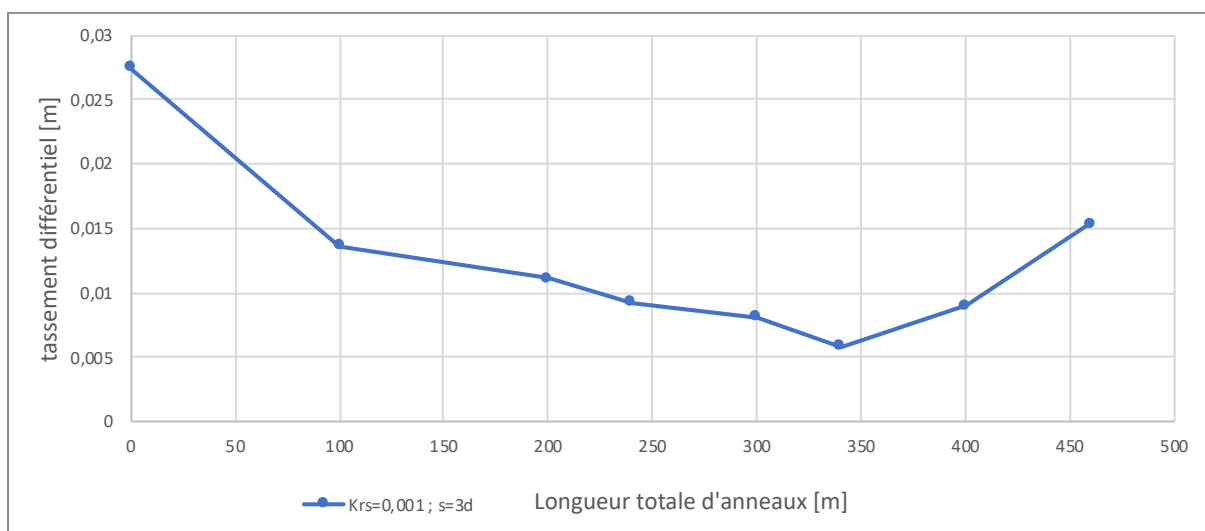


Figure 64 : Variation de tassement différentiel en fonction de la longueur totale d'anneaux L_{tA} ; $K_{rs} = 0,001$.

Exprimé différemment, la Figure 63 et la Figure 64 indiquent le même optimum. La valeur optimale du rapport d'occupation [0,4 à 0,73] correspondant à un nombre de pieux entre 15 et 20, *cfr.* Tableau 15, toujours pour une fondation de 40 [m] de diamètre.

4.3 VARIATION DE LA LONGUEUR DE PIEUX ET DU RAPPORT D'OCCUPATION

La variation de la longueur des pieux en fonction du nombre de pieux et du rapport d'occupation est réalisée dans le cas de la fondation de référence avec $K_{rs} = 0,001$. Dans ce cas, la longueur des pieux est considérée comme identique pour tous les pieux de la fondation.

La longueur est variée : $L_p = 20 \mid 15 \mid 10 \mid 5 \mid 0 \text{ [m]}$.

Le rapport d'occupation et la longueur totale des pieux varient en fonction du nombre de d'anneaux, Tableau 16.

Tableau 16 : Variation du nombre d'anneaux et rapport d'occupation correspondant

Nombre d'anneaux	n	23	20	15	10	5	0
Rapport d'occupation	a_{gr}	0,98	0,73	0,4	0,16	0,03	0

L'influence de la longueur des pieux est illustrée aux Figure 65 et Figure 66, ci-dessous.

La variation de L_p semble avoir une influence sur le tassement différentiel. Seul dans le cas de la plus grande longueur considérée $L = 20 \text{ [m]}$, il est montré un résultat où la variation de longueur n'a que peu d'impact. L'ajout de pieux amène cependant une grande réduction du tassement différentiel dépassant 44%.

Les autres cas montrent une longueur optimale variable. La longueur des pieux a une grande influence sur la réduction du tassement différentiel pour tous les cas. La réduction du tassement différentiel varie entre 61 et 77% par rapport au radier sans pieu. Chaque cas avec un nombre de pieux différent indique la présence d'une longueur de pieux optimale.

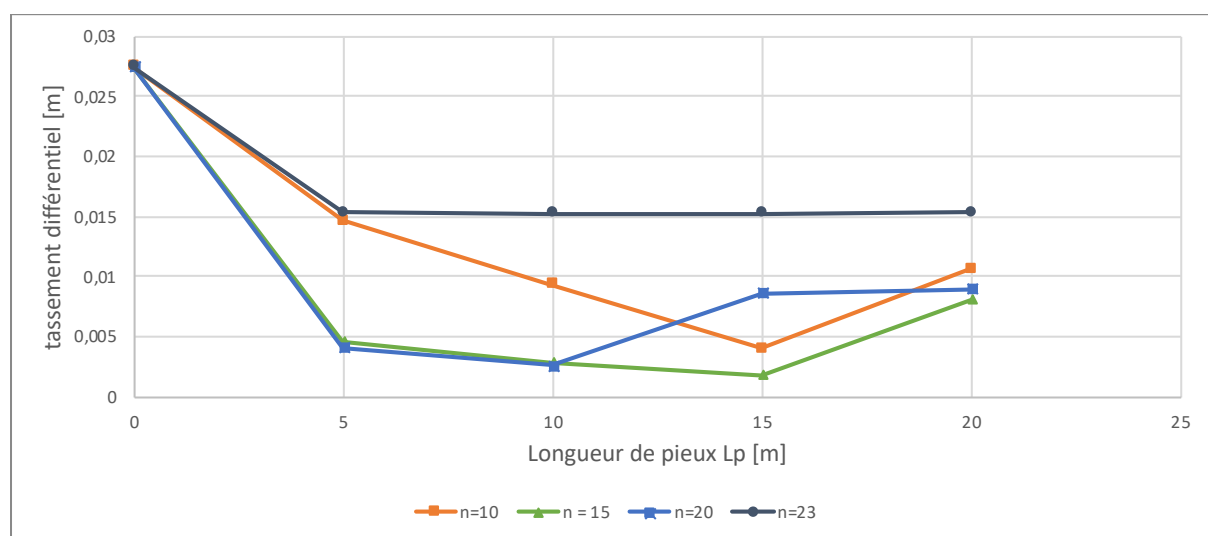


Figure 65 : Variation de tassement différentiel en fonction de la longueur de pieux L_p ; $K_{rs} = 0,001$.

La Figure 66 représente le tassement différentiel normalisé par le tassement différentiel du radier sans pieu, δ/δ_r .

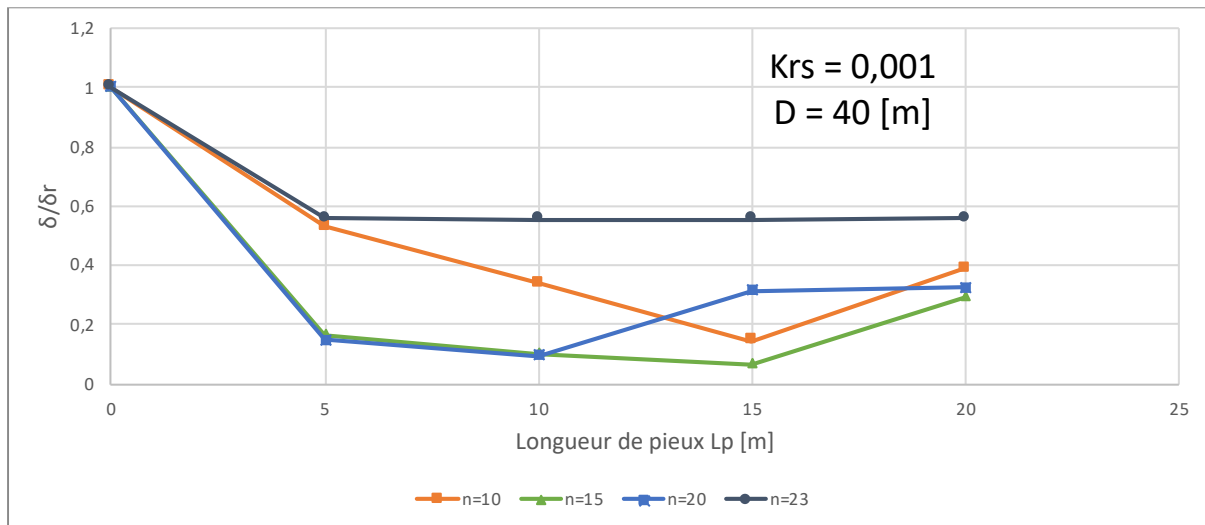


Figure 66 : Variation de tassement différentiel normalisé en fonction de la longueur de pieux L_p ; $K_{rs} = 0,001$.

Pour des réductions de tassement d'un même ordre de grandeur, une réduction du nombre de pieux semble plus efficace car la quantité de pieux, représentée par la longueur totale d'anneaux, est largement réduite comme illustrée à la Figure 67, ci-dessous.

Parmi les situations étudiées, une longueur de pieux entre $\frac{1}{4}$ et $\frac{1}{2}$ de la dimension du radier [m] amène au tassement différentiel le plus bas.

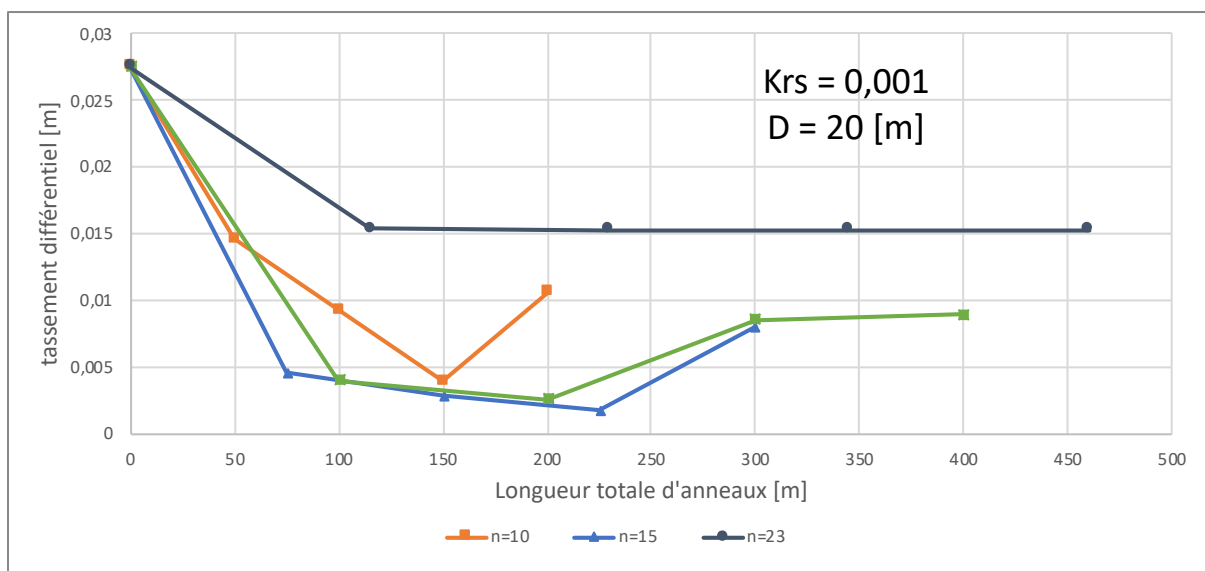


Figure 67 : Variation de tassement différentiel en fonction de la longueur totale d'anneaux L_{tA} ; $K_{rs} = 0,001$.

4.4 VARIATION DU RAPPORT S/D

La variation du rapport entre l'espacement entre pieux, s et le diamètre des pieux, d_p , est réalisée dans le cas de la fondation de référence avec $K_{rs} = 0,001$, soit une fondation de 40 [m] de diamètre.

La longueur des pieux est considérée constante à une valeur $L_p = 20[m]$.

La comparaison a été réalisée entre le rapport d'espacement du cas de référence, $\frac{s}{d} = 3$, et un autre cas dont le rapport d'espacement est $\frac{s}{d} = 6$.

Il est à noter que cette variation d'espacement nuit à l'hypothèse de validité de la méthode consistant à modéliser les rangées de pieux par des murs continus de mêmes épaisseurs ($\frac{s}{d} \leq 3$).

Cependant, l'analyse indique une faible influence de ce rapport $\frac{s}{d}$ sur le tassement différentiel mais une grande influence sur la quantité de pieux. La variation de $\frac{s}{d}$ peut donc avoir un grand impact économique.

Tableau 17 : Correspondance entre le nombre d'anneaux et le rapport d'occupation correspondant pour $\frac{s}{d} = 3$ et $\frac{s}{d} = 6$.

$\frac{s}{d} = 3$	Nombre d'anneaux	n	23	20	17	15	10	5	0
	Rapport d'occupation	a_{gr}	0,98	0,73	0,52	0,4	0,16	0,03	0
$\frac{s}{d} = 6$	Nombre d'anneaux	n	10	9	8	6	5	3	0
	Rapport d'occupation	a_{gr}	0,66	0,52	0,4	0,2	0,13	0,03	0

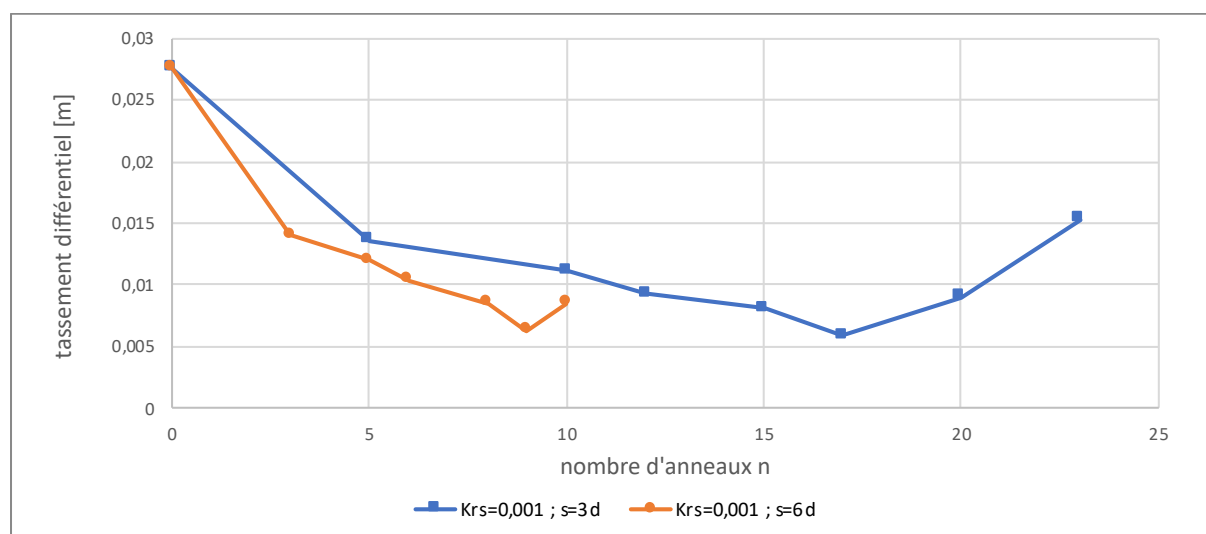


Figure 68 : Variation de tassement différentiel en fonction a) du nombre d'anneaux, b) du rapport d'occupation a_{gr} ; $\frac{s}{d} = 3$ et 6; $K_{rs} = 0,001$, Partie 1.

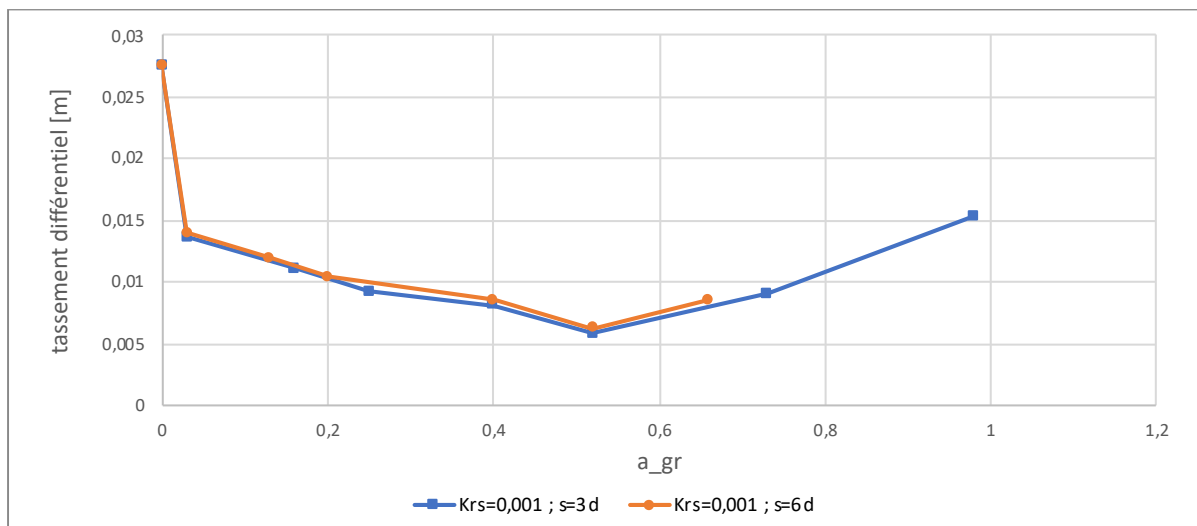


Figure 69 : Variation de tassement différentiel en fonction a) du nombre d'anneaux, b) du rapport d'occupation a_{gr} ; $\frac{s}{d} = 3$ et 6 ; $K_{rs} = 0,001$, Partie 2.

4.5 INCLINAISON DES PIEUX

L'inclinaison apparaît comme un facteur important de réduction de tassement différentiel. Le degré d'inclinaison, i , a été varié de 0 à 60 [°], sur base de la fondation de référence $K_{rs} = 0,001$. L'angle d'inclinaison est considéré par rapport à la verticale.

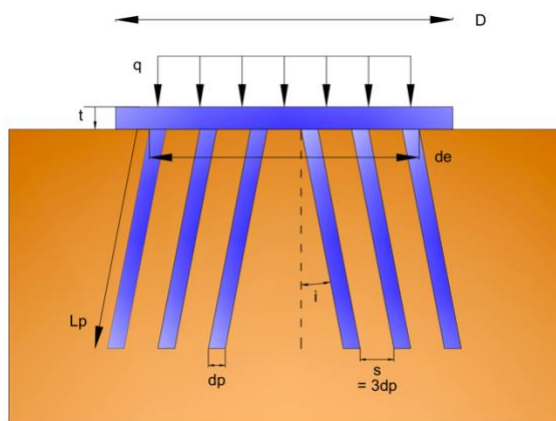


Figure 70 : Illustration d'une fondation mixte avec pieux inclinés

Les résultats montrent clairement une réduction de tassement différentiel lors de l'inclinaison des pieux.

Comme le montre la Figure 71 ci-dessous, pour de faibles inclinaisons, une légère augmentation de l'inclinaison induit une grande réduction du tassement différentiel. La réduction tend à se réduire quand l'angle d'inclinaison devient très important. Par exemple, pour une inclinaison des pieux de 20 [°] de l'ensemble des pieux, l'amélioration du tassement différentiel par rapport à celui du radier sur pieux verticaux est de 60 %.

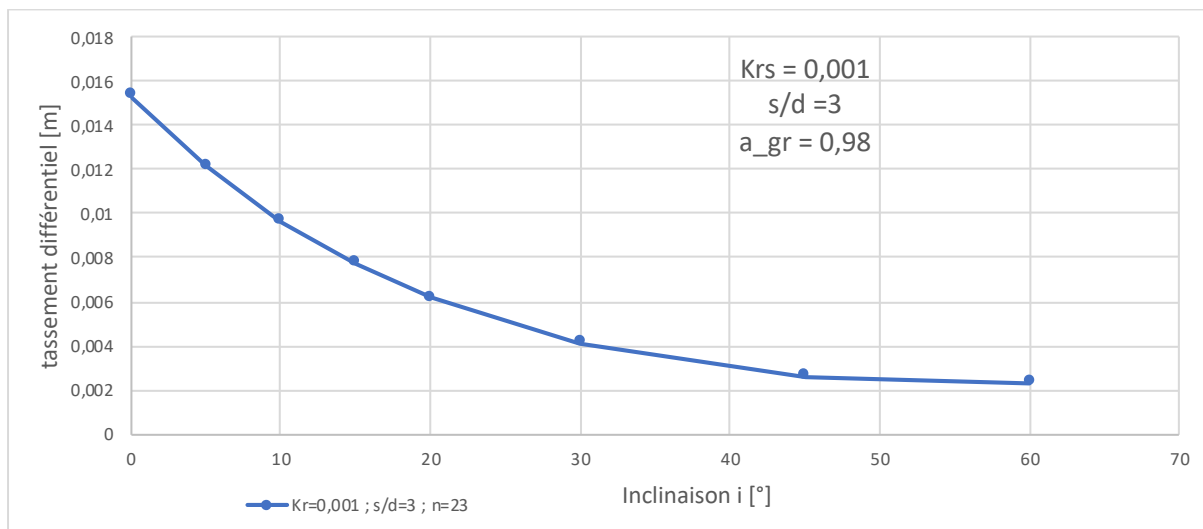


Figure 71 : Variation de tassement différentiel en fonction de l'inclinaison des pieux $a_{gr} = 0,98$; $K_{rs} = 0,001$.

Les fondations sur pieux verticaux ont généralement un tassement maximum au centre de la fondation. Les résultats pour fondations sur pieux inclinés indiquent que le maximum de tassement a tendance à s'écarter du centre. Pour une inclinaison de 60 [°], le tassement maximum a été déterminé numériquement au 3/4 de la dimension du radier. Cet écartement du maximum de tassement implique une meilleure répartition du tassement et une diminution de la distorsion angulaire du radier.

Dans la réalité, la mise en place de pieux inclinés est plus complexe et plus longue que celle de pieux verticaux. La machinerie est également plus complexe et plus coûteuse. L'inclinaison réalisable sera donc limitée aux contraintes technologiques et économiques.

L'estimation du coût de l'utilisation de pieux inclinés n'a pas été réalisée dans ce travail. Une étude de rentabilité pourrait être effectuée en vue de déterminer l'intérêt de ce système dont l'influence semble prometteuse et intéressante.

4.6 VARIATION DE L'ESPACEMENT ET DU DIAMÈTRE DES PIEUX

Dans cette section est étudié l'espacement entre pieux, s , et le diamètre des pieux, d_p . Le rapport s/d va être gardé constant et égal à $\frac{s}{d} = 3$.

L'influence en cas de variation de la rigidité flexionnelle relative va également être étudiée en modifiant le diamètre de la fondation. Les fondations étudiées sont caractérisées par une rigidité flexionnelle de $K_{rs} = 0,001 \mid 0,01 \mid 0,1$.

Trois valeurs d'espacement entre pieux et de diamètres de pieux ont été étudiées.

Tableau 18 : Variation d'espacement entre pieux et de diamètre de pieux, à rapport $\frac{s}{d} = 3$.

Diamètre de pieux [m]	d_p	0,3	0,5	1
Espacement entre pieux [m]	s	0,9	1,5	3

Le facteur qui a été modifié, pour obtenir les rigidités flexionnelles souhaitées, est le diamètre.

Tableau 19 : Correspondance entre la Rigidité flexionnelle relative du radier, K_{rs} , et le diamètre de la fondation, D .

Rigidité flexionnelle relative du radier	K_{rs}	0,001	0,01	0,1
Diamètre de la fondation [m]	D	40	20	10

La Figure 72 indique une faible influence de l'espacement entre pieux et de leur diamètre respectif, influence qui est différente selon les trois cas étudiés, sur le tassement différentiel.

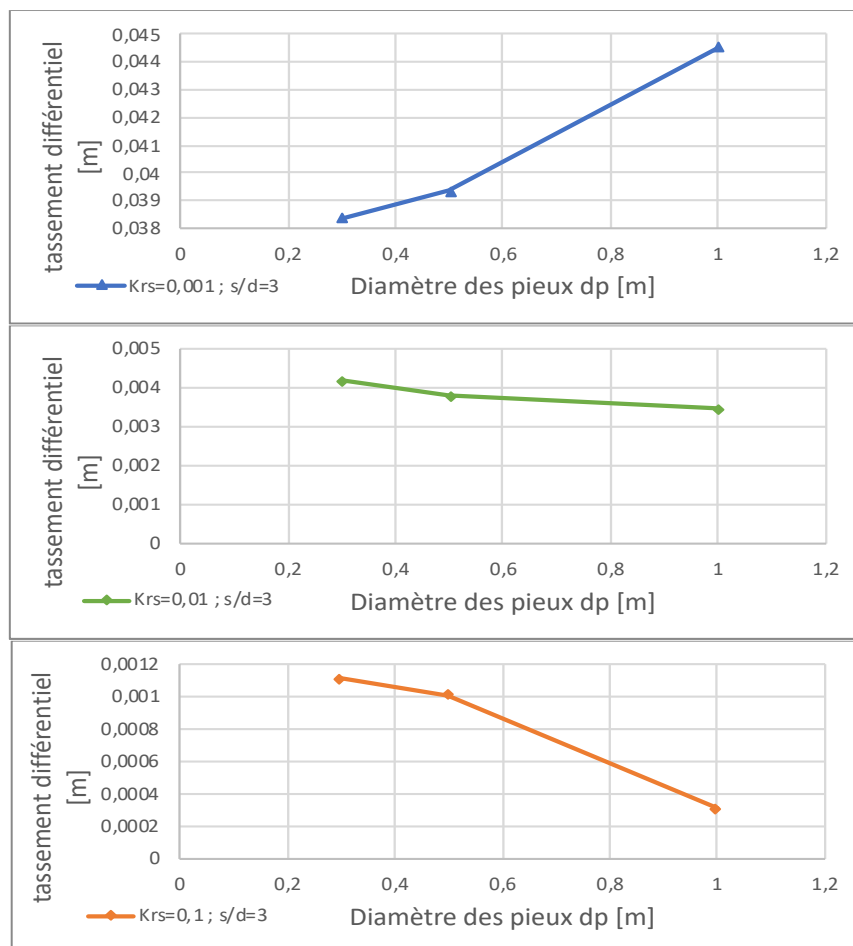


Figure 72 : Résultats numériques de variation de diamètre de pieux; Graphes individuels ; $K_{rs} = 0,001 \mid 0,01 \mid 0,1$.

Cette figure indique une nouvelle fois que l'augmentation de la rigidité flexionnelle relative de la fondation, ici représentée par une diminution du diamètre de la fondation, permet de réduire le tassement différentiel.

Concernant la réduction de tassement différentiel, l'ajout de pieux est moins utile pour des fondations plus rigides. Les pieux y sont généralement utilisés pour augmenter la capacité portante de la fondation.

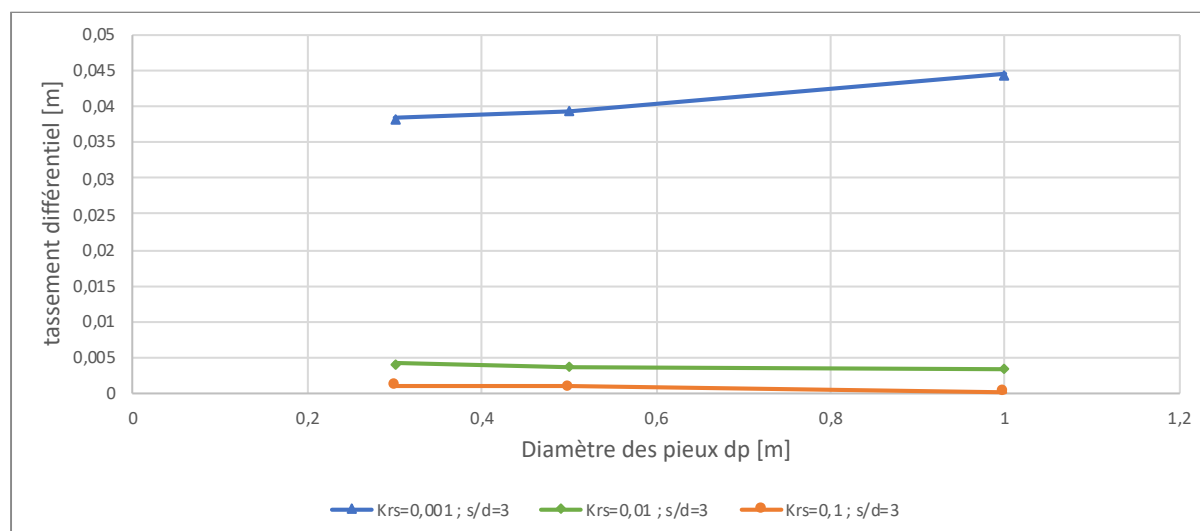


Figure 73 : Résultats numériques de variation de diamètre de pieux; $K_{rs} = 0,001 \mid 0,01 \mid 0,1$.

L'étude de la variation conjointe de l'espacement entre pieux et du diamètre des pieux illustrée en fonction de la longueur totale d'anneaux présente les résultats de manière plus exploitable que présenté selon le diamètre des pieux, uniquement.

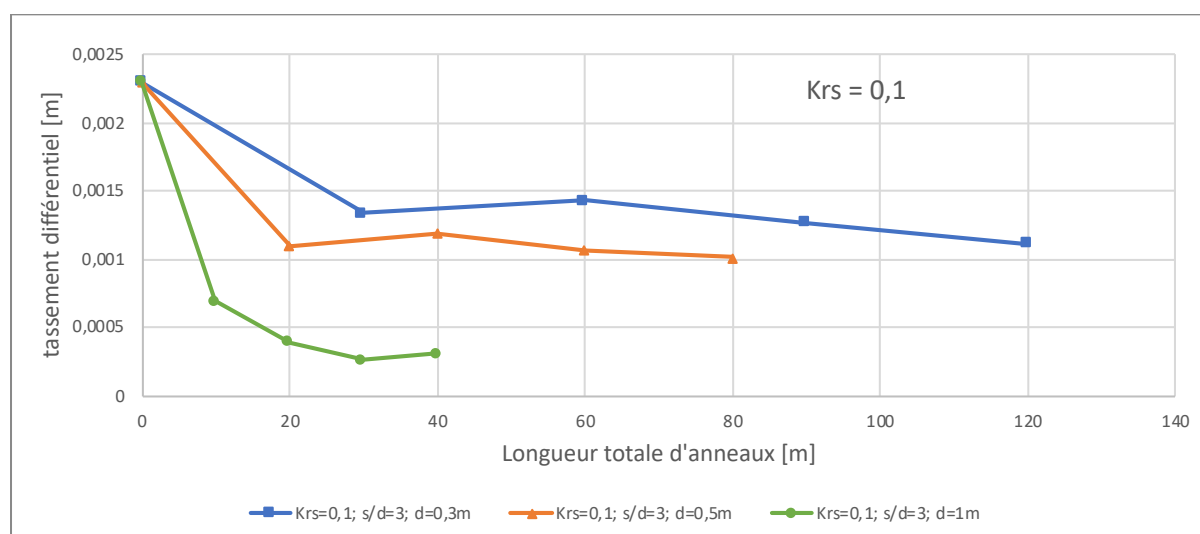


Figure 74 : Résultats numériques de variation d'espacement entre pieux en fonction de la longueur totale d'anneaux, L_{tA} ; $K_{rs} = 0,001 \mid 0,01 \mid 0,1$; Partie 1.

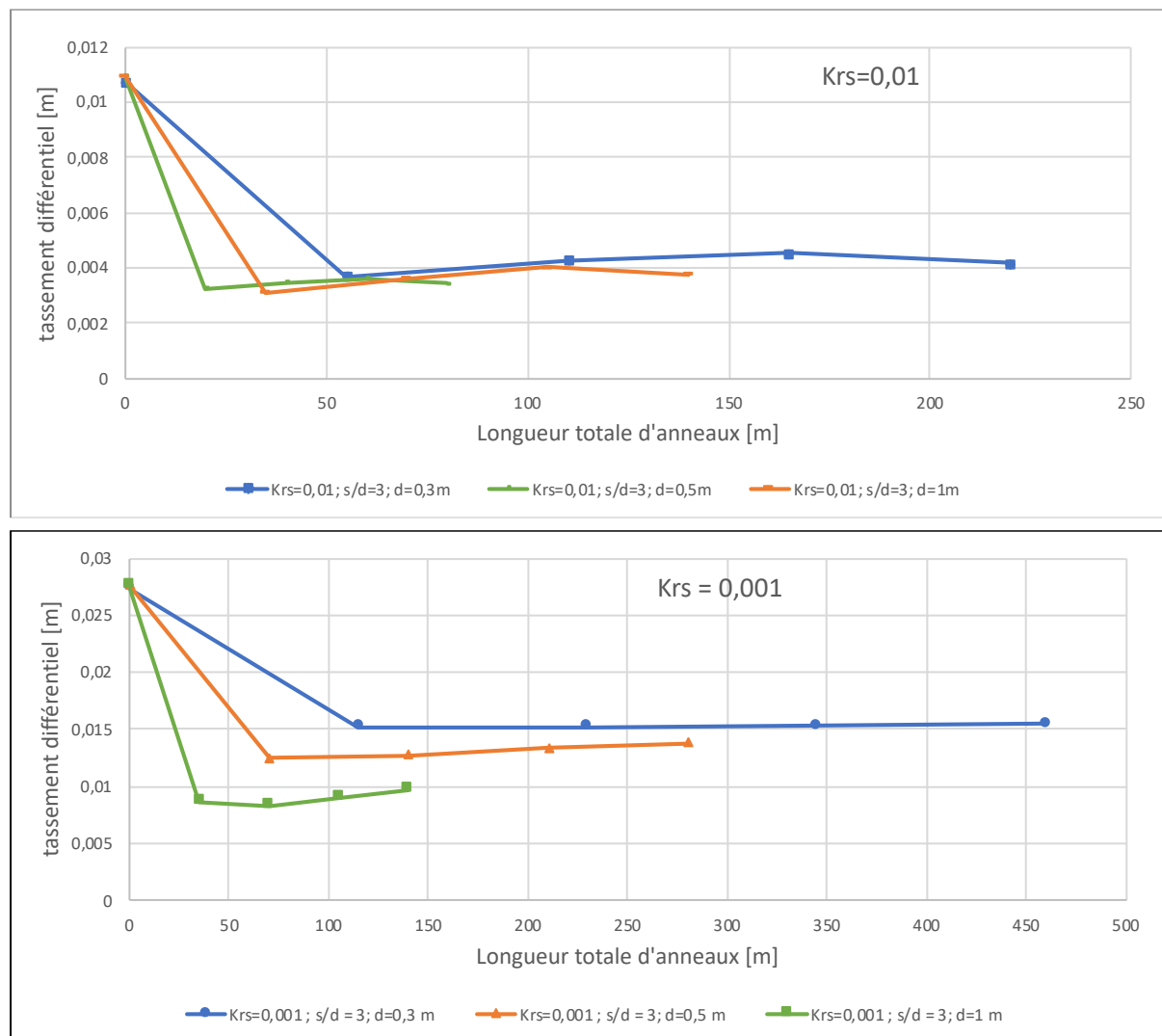


Figure 75 : Résultats numériques de variation d'espacement entre pieux en fonction de la longueur totale d'anneaux, L_{tA} ; $K_{rs} = 0,001 | 0,01 | 0,1$; Partie 2.

Les conclusions pour ces trois analyses sont similaires. La variation du diamètre et de l'espacement entre pieux a peu d'influence sur le tassement différentiel, mais a une influence importante sur la longueur totale d'anneaux et donc sur la quantité de pieux.

Il est dès lors préférable d'augmenter l'espacement ainsi que le diamètre des pieux en gardant un rapport constant entre les deux. Ceci permet de faire des économies en terme de quantité de pieux avec un résultat similaire ou meilleur sur le contrôle du tassement.

4.7 VARIATION DE LONGUEURS MULTIPLES

La variation de longueurs multiples des pieux a été étudiée dans le but de mettre en évidence l'impact de la géométrie de la fondation avec pieux sur le tassement différentiel en plus d'une étude de disposition des pieux.

L'ensemble des cas possibles n'a pas pu être modélisé et analysé numériquement. Deux cas sont modélisés et sont définis avec différents groupes où le nombre de pieux et leur longueur respective sont variables.

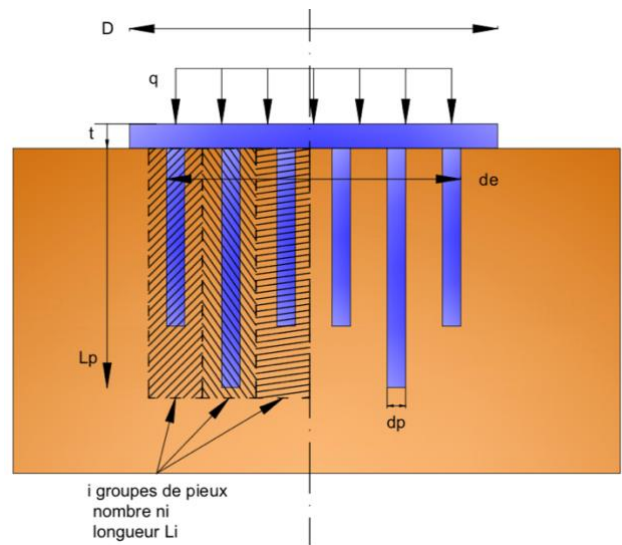


Figure 76 : Illustration de fondations avec longueur de pieux multiple

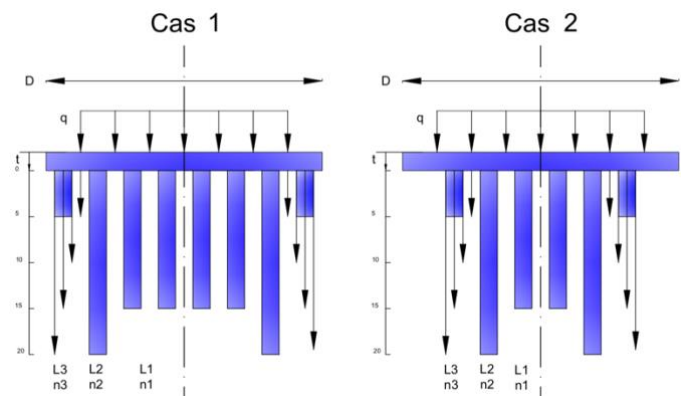


Figure 77 : Schéma simplifié des 2 cas étudiés de variations de longueurs multiples de pieux

La première fondation étudiée comporte 20 murs en anneaux pour un rapport d'occupation $a_{gr} = 0,73$, répartis sur un rayon de 17,1 [m].

Tableau 20 : Description du premier cas de variation de longueurs multiples.

		Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Nombre d'anneaux de pieux	n	10	5	5
Longueur de pieux [m]	L	15	20	Variable

La deuxième fondation étudiée comporte 15 murs en anneaux pour un rapport d'occupation $a_{gr} = 0,4$, répartis sur un rayon de 12,6 [m].

Tableau 21 : Description du second cas de variation de longueurs multiples.

		Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Nombre d'anneaux de pieux	n	5	5	5
Longueur de pieux [m]	L	15	20	Variable

Seule la longueur des pieux extérieurs, nommé groupe 3 dans les deux cas étudiés, est variée, $L_3 = 20 \mid 15 \mid 10 \mid 5 \mid 0$ [m].

Une longueur de pieux plus faible à l'extérieur semble peu impacter le tassement différentiel mais réduit la quantité de pieux mis en place.

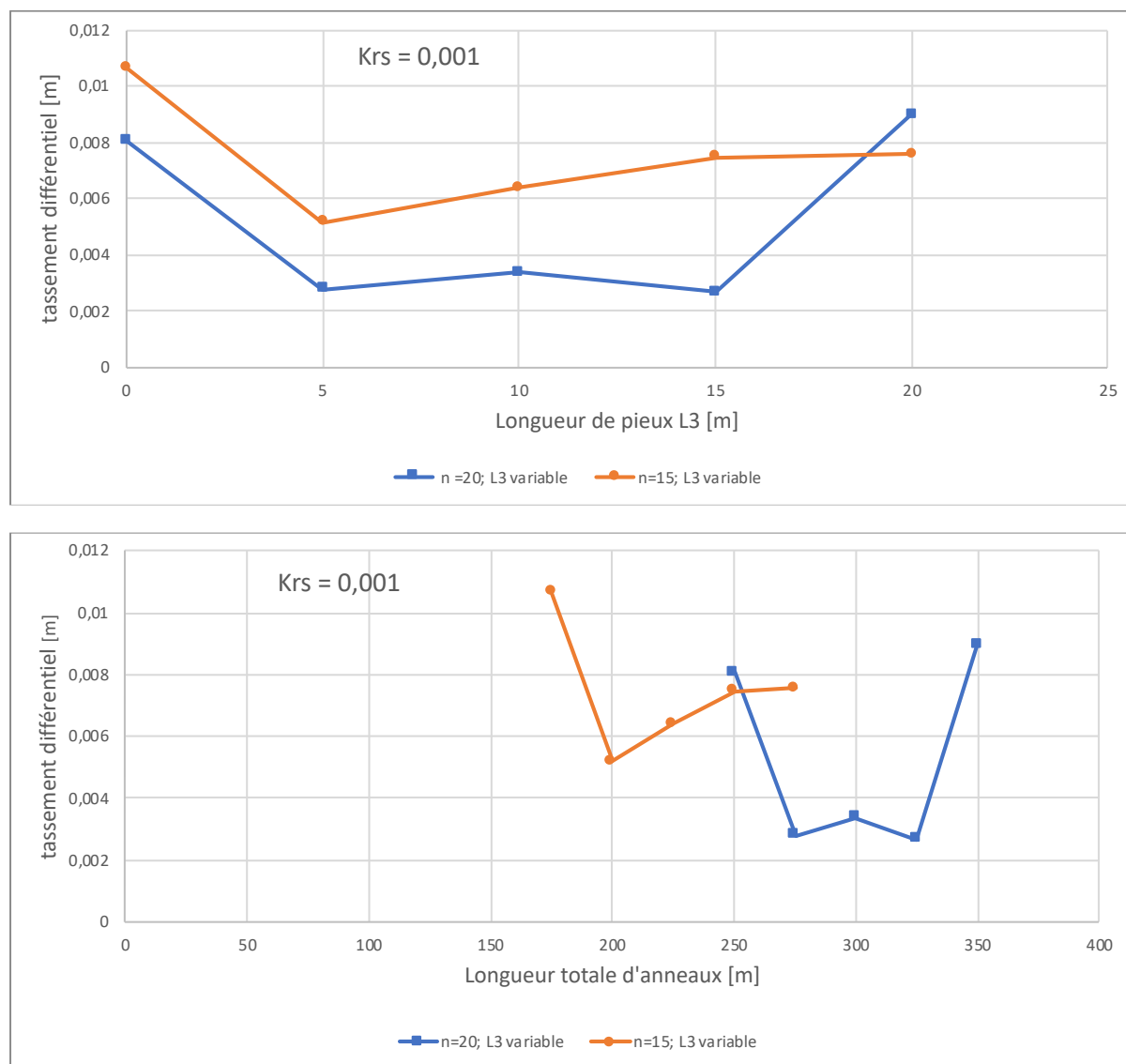


Figure 78 : Résultats numériques des 2 cas de variation de longueurs multiples ; $K_{rs} = 0,001$.

Dans la Figure 79, une mise en comparaison des résultats obtenus pour une fondation avec longueurs de pieux multiples, d'une part, et d'autre part, des résultats de la précédente étude de variation de longueurs uniformes met en évidence l'utilité de la variation de longueurs multiples pour différents nombres de pieux.

Pour la même quantité de pieux, la réduction de tassement différentiel peut être améliorée grâce à une disposition adéquate des pieux.

Le premier cas proposé, composé de 20 anneaux de pieux de longueurs variables, utilise une quantité de pieux moindre qu'une fondation mixte sur 20 anneaux de pieux de longueurs uniformes et en plus permet un plus petit tassement différentiel.

Le second cas, composé de 15 anneaux de pieux de longueurs variables, n'est pas aussi performant qu'une fondation mixte sur 15 anneaux de pieux de longueurs uniformes. En effet, le tassement différentiel est moins réduit et la quantité d'anneaux utilisée y est supérieure.

Le choix de la disposition amène à des résultats très variables. Il serait donc intéressant de réaliser une étude comportant de plus nombreux cas pour déterminer des tendances représentatives.

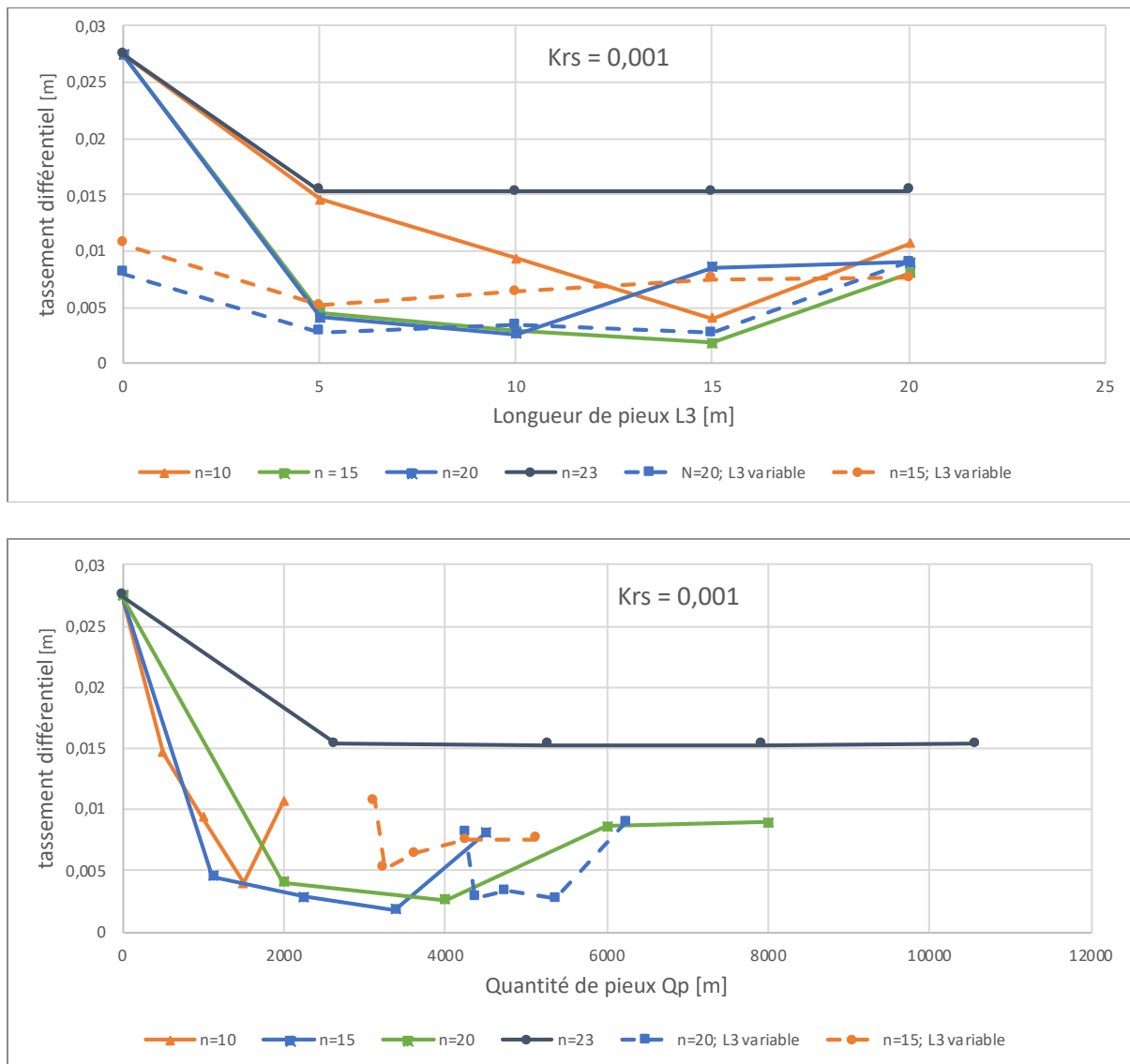


Figure 79 : Résultats numériques de variation de longueurs multiples ; $K_{rs} = 0,001$.

4.8 COMPARAISON AVEC LE RADIER SIMPLE

L'ajout de pieux a une influence significative sur la réduction de tassement différentiel.

La modification de la disposition des pieux affecte cette influence qui reste positive dans l'ensemble des cas considérés.

Considérant l'ensemble des cas, l'amélioration du tassement différentiel varie de 20 à 70% par rapport au cas d'utilisation d'un radier simple, sans pieu. L'amélioration varie en fonction de la rigidité flexionnelle relative du radier.

- De 20 à 40% en cas de radier rigide, $K_{rs} \sim 0,1$.
- De 50 à 70% en cas de radier souple, $K_{rs} \sim 0,001$

Pour rappel, l'objectif de la mise en place de pieux sous radier rigide, est principalement d'augmenter la capacité portante de la fondation. Sous radier souple, la mise en place de pieux a pour objectif le contrôle des tassements et la réduction du tassement différentiel.

Les pieux sont une solution efficace pour le contrôle de déformation d'un radier flexible.

4.9 APPORT DU RADIER DANS LA REPRISE DE CHARGE

Une analyse de la reprise de charge dans les fondations mixtes modélisées avec un rapport d'occupation des pieux de 0,98 indique que la charge reprise par les pieux est toujours très grande, à savoir supérieure 90%, de la charge totale. Les efforts repris par le radier sont par conséquence très faibles, comme illustré en Figure 80.

La déformation que subit le radier vient donc principalement des efforts transmis par les pieux au radier.

La contrainte dans le sol est très faible et relativement négligeable pour des longueurs de pieux dépassant $\frac{1}{4}$ de la dimension du diamètre du radier.

Ce rapprochement met en évidence la possibilité d'utiliser les conclusions émises pour des fondations mixtes sur pieux dans la conception de fondations profondes sur groupe de pieux.

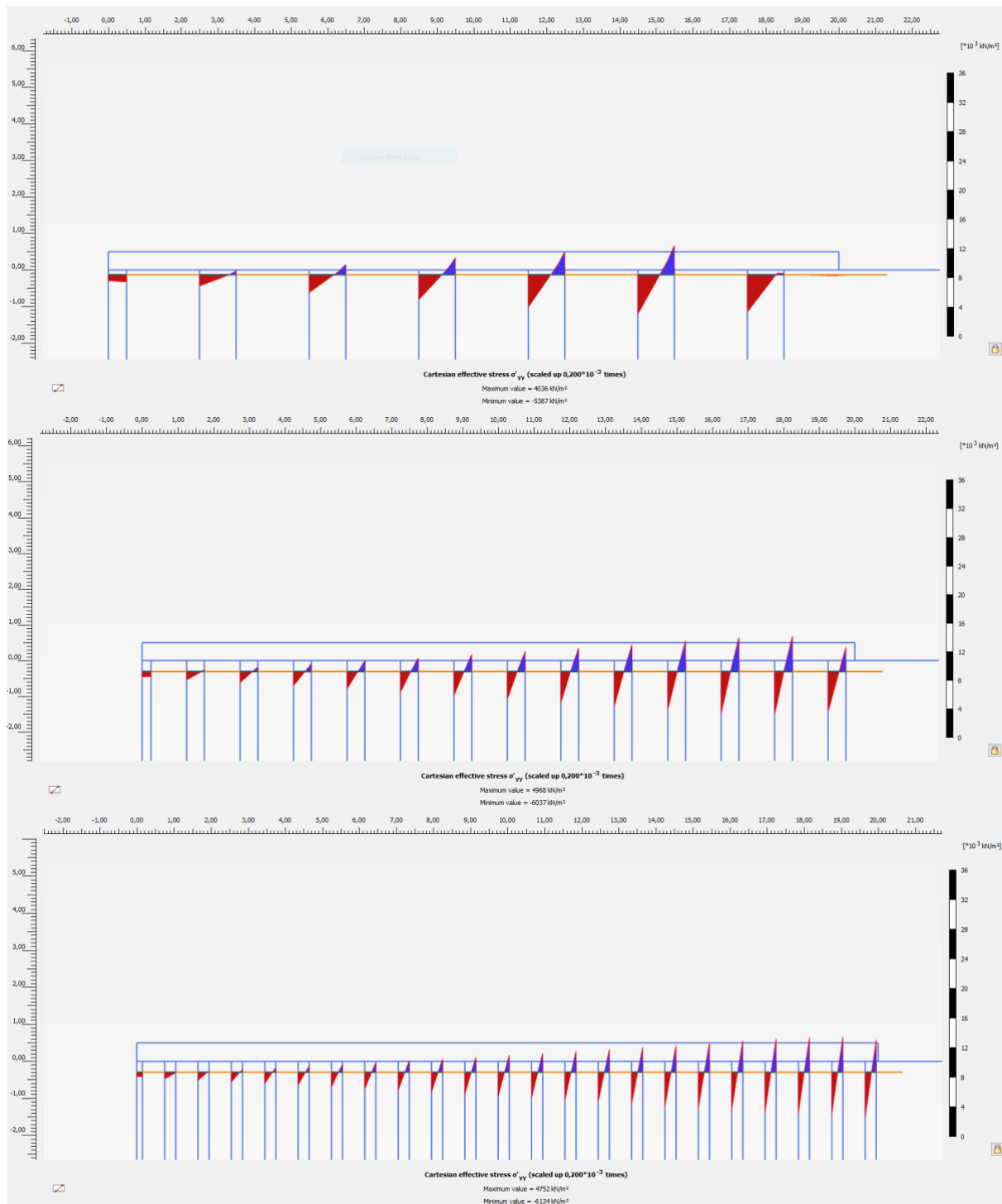


Figure 80 : Reprise de charges de fondations mixtes sur pieux ; $K_{rs} = 0,1 | 0,01 | 0,001$

5 FONDATIONS PROFONDES SUR GROUPE DE PIEUX

Ce type de fondation est peu documenté dans la littérature. Dans cette étude, quelques situations et variations sont développées afin de mettre en évidence quelques influences des paramètres dimensionnants.

Le fait est que, dans la majorité des cas de conception de réservoirs, avec fondation de grande dimension, la mise en contact du radier avec le sol permet d'assurer à la fondation une capacité portante importante. Toutefois, le contrôle des déformations n'est pas facilement réalisable avec le radier seul.

La présence de pieux est alors recommandée pour diminuer le tassement différentiel.

La présence de pieux de fondation vient alors mettre en avant la question de l'optimisation de la disposition des pieux pour la réduction de tassement différentiel tout en reprenant entièrement les charges de la structure.

Dans cette section, sont étudiées des variations de certains paramètres dimensionnants de fondations profondes sur groupe de pieux pour mettre en évidence leur influence sur le tassement différentiel. L'étude se concentre principalement sur la variation de rigidité flexionnelle relative, de longueur de pieux et de nombre de pieux.

Dans cette section, est réalisée une comparaison avec les fondations mixtes sur pieux afin de juger la possibilité d'une similitude de résultats.

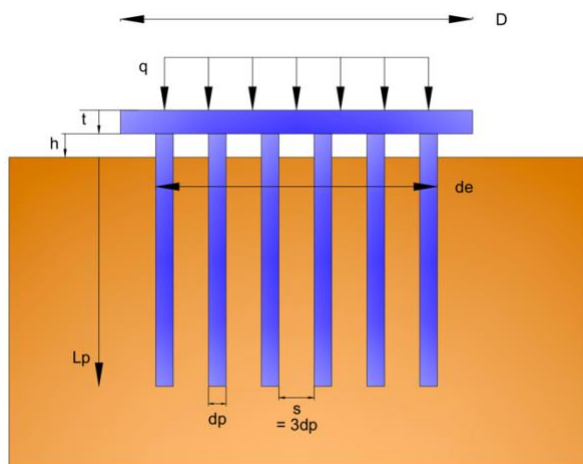
Cette hypothèse de similitude découle de la faible reprise de charge du radier dans les fondations mixtes. Cela appuie l'hypothèse que l'absence de raider en contact avec le sol n'ait pas de grande influence sur le tassement différentiel.

5.1 SITUATION DE RÉFÉRENCE D'UNE FONDATION PROFONDE SUR UN GROUPE DE PIEUX

Le radier, dans ce type de fondation et notamment pour la fondation de référence de ce cas, est considéré sans contact avec le sol. Il est cette fois placé à une hauteur, h , de 0,5 [m] arbitraire et est supporté par une prolongation des pieux de fondation.

Cette étude analyse une fondation composée d'un radier flexible d'une épaisseur, t , de 0,5 [m], sous une charge, q , de 150 [kPa] considérée uniformément répartie sur la surface du radier, comme illustré en Figure 81.

La fondation de référence est composée d'une série de murs en anneaux pour modéliser les pieux, murs dont l'épaisseur est définie de diamètre $d_p = 0.3$ [m], la longueur $L_p = 20$ [m] et l'écartement $s = 3d_p$.



- Charge $q = 150$ [kPa]
- Diamètre $D = 40 \mid 20 \mid 10$ [m]
- Épaisseur $t = 0,5$ [m]
- Hauteur du radier $h = 0,5$ [m]

Figure 81 : Illustration d'une fondation profonde sur groupe de pieux

Trois dimensions sont analysées correspondant respectivement à $K_{rs} = 0,001 \mid 0,01 \mid 0,1$. Une fondation flexible de 40 [m], identique au cas de fondations mixtes. Deux fondations moins flexibles avec des diamètres de 20 et 10 [m].

Les trois fondations dans leur ensemble reposent donc sur 23, 11 et 6 murs en anneaux répartis sous la fondation avec un écartement, $s = 3d_p$, de 0.9 [m] avec un rapport d'occupation $a_{gr} = 0,98$.

5.1.1 HYPOTHÈSES DE MODÈLE

La partie découverte des pieux de fondation n'a pas été étudiée en détail lors de ce travail. La longueur a été arbitrairement définie afin d'éviter le flambement des pieux dans le pire cas étudié et afin d'éviter un contact entre le radier et le sol en cas de grande déformation.

Les pieux sont disposés sous la majorité de la surface de la fondation. L'ensemble des cas étudiés ont un radier dont l'extrémité est en porte à faux sur une distance inférieure à $3d_p$. Le calcul de structure du radier n'a pas été réalisé et la structure est supposée suffisante pour supporter la charge. La fondation est donc étudiée pour supporter la structure ainsi modélisée avec une charge uniforme de 150 [kPa].

5.2 VARIATION DE LA LONGUEUR DES PIEUX

La variation de la longueur de pieux est réalisée dans le cas de la fondation de référence avec un rapport d'occupation $a_{gr} = 0,98$. Le rapport s/d va être gardé constant et égal à $\frac{s}{d} = 3$. Le diamètre de pieux est également constant, $d_p = 0,3$ [m].

Les fondations étudiées sont caractérisées par une rigidité flexionnelle de $K_{rs} = 0,001 \mid 0,01 \mid 0,1$. Le diamètre de ces fondations est respectivement $D = 40 \mid 20 \mid 10$ [m].

La longueur uniforme des pieux est variée, $L_p = 20 \mid 15 \mid 10 \mid 5 \mid 0$ [m]

L'analyse de l'influence de la longueur des pieux est illustrée à la Figure 82 ci-dessous.

La présence de pieux en fondation profonde sur groupe de pieux est par définition imposée. La variation de la longueur semble avoir une influence très variable sur le tassement différentiel.

La longueur de pieux minimale est le cas composé d'un radier sur des pieux simplement posés sur la surface. Ce cas sera une première référence pour déterminer l'amélioration du tassement différentiel.

Le tassement maximal varie d'endroit en fonction de la longueur des pieux, de façon identique quel que soit K_{rs} . Pour une longueur de 20 [m], il se situe au centre de la fondation. Pour 10 et 15 [m] de long, le maximum se situe au bord et le minimum au centre.

Pour une fondation minimale, le maximum de tassement se situe au $\frac{3}{4}$ du rayon du radier. Ce type de profil de tassement est généralement dénommé de type « B » dans la littérature (Horikoshi & Randolph, 1998).

L'amélioration du tassement différentiel pour les cas modélisés est supérieure à 70% par rapport à la fondation avec la longueur de pieux minimale.

Les résultats des trois fondations étudiées indiquent la présence d'une longueur optimale pour réduire le tassement différentiel. Cependant, une trop grande longueur de pieux amène à un tassement différentiel supérieur à celui de la fondation avec la longueur de pieux minimale.

La longueur des pieux a donc une influence plus importante sur la fondation avec une rigidité intermédiaire. Le rapport d'amélioration du tassement différentiel atteint 90% pour une longueur de pieux de 15[m].

Logiquement, une augmentation de la rigidité flexionnelle relative K_{rs} de la fondation induit une diminution du tassement différentiel.

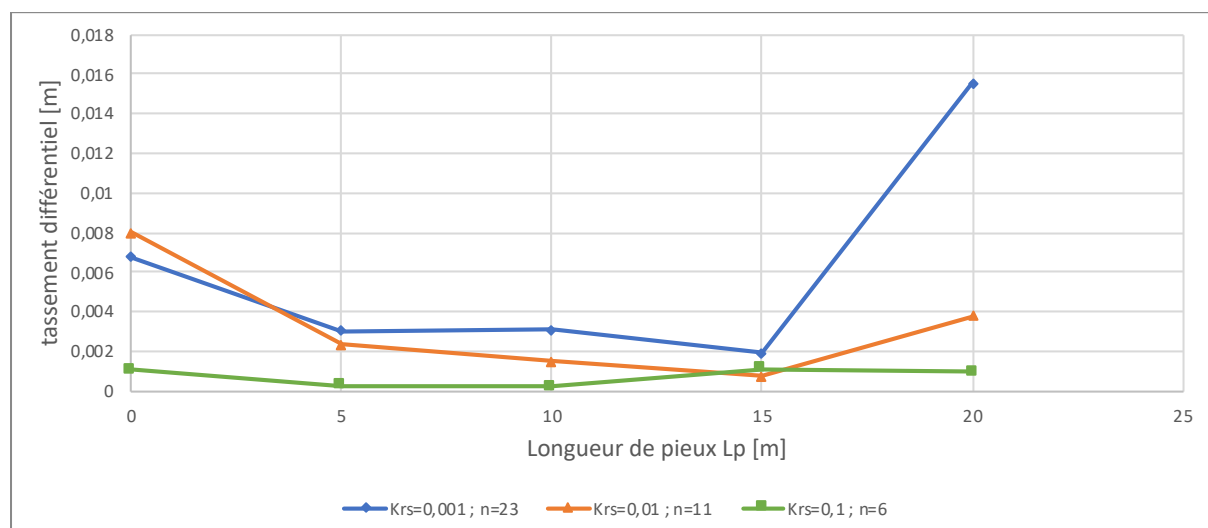


Figure 82 : Résultats numériques de tassement différentiel en fonction de la longueur des pieux, L_p ; $K_{rs} = 0,001 \mid 0,01 \mid 0,1$; Fondation profonde sur groupe de pieux.

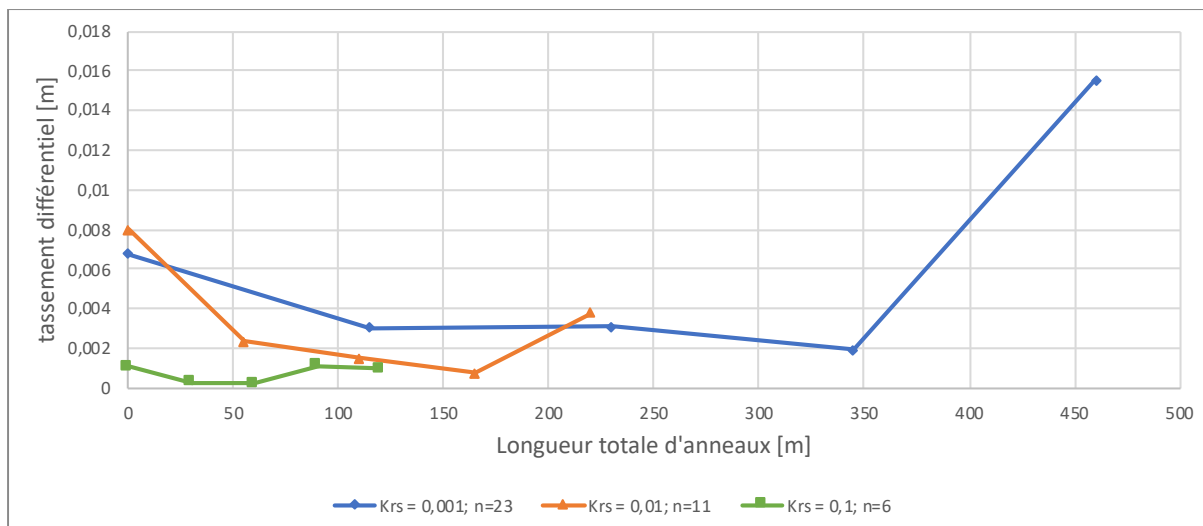


Figure 83 : Résultats numériques de tassement différentiel en fonction de la longueur totale d'anneaux, L_{tA} ; $K_{rs} = 0,001 \mid 0,01 \mid 0,1$; Fondation profonde sur groupe de pieux.

5.3 VARITATION DE LONGUEUR MULTIPLE

La variation de la longueurs de pieux multiples a été réalisée dans trois cas aux géométries arbitraires mais inspirées de la littérature, (Leung & Klar, 2010).

Trois cas sont modélisés et sont définis avec des différents groupes dans lesquels le nombre de pieux et leurs longueurs respectives sont variables.

Ces cas sont comparés à la fondation supportée par des pieux d'une longueur uniforme de 20 [m].

Tableau 22 : Description des cas de variation de longueur multiple en fondation profondes sur groupe de pieux

Nombre de d'anneaux de pieux			Longueur	Cas 1	Cas 2	Cas 3
n1	6	L1	5	10	15	
n2	6	L2	10	10	15	
n3	5	L3	15	15	15	
n4	6	L4	20	20	20	

Parmi les 3 cas, une longueur de pieux inférieure amène à un tassement différentiel réduit. Cette réduction de longueur de pieux permet la mise en place d'une quantité moindre de pieux une longueur de pieux plus petite amène à une réduction significative de la quantité de pieux.

Toutefois, les résultats obtenus indiquent que le tassement différentiel est plus faible avec des pieux de longueurs uniformes que lors des cas modélisés avec longueurs variables. Ce constat indique qu'il est préférable d'avoir une longueur de pieux uniforme plutôt qu'une longueur de pieux plus faible au centre que sur les bords.

D'autres arrangements de disposition de pieux ou de longueurs de pieux peuvent être modélisés pour pouvoir conclure de façon plus générale sur l'influence d'une variation de longueurs multiples, pour déterminer des tendances représentatives.

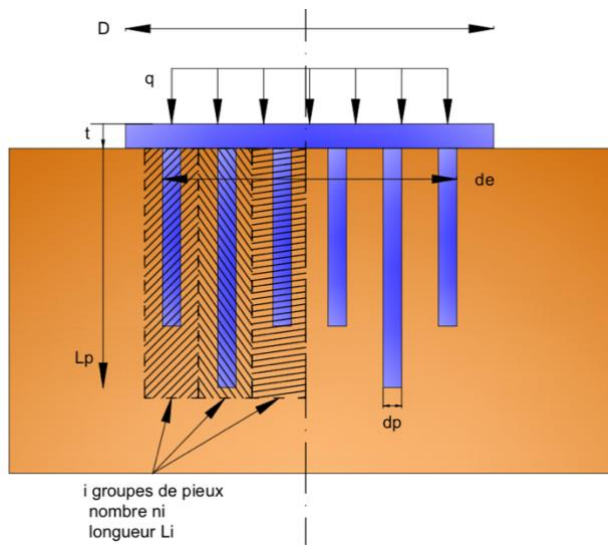


Figure 84 : Illustration de fondations profondes avec longueurs de pieux multiples

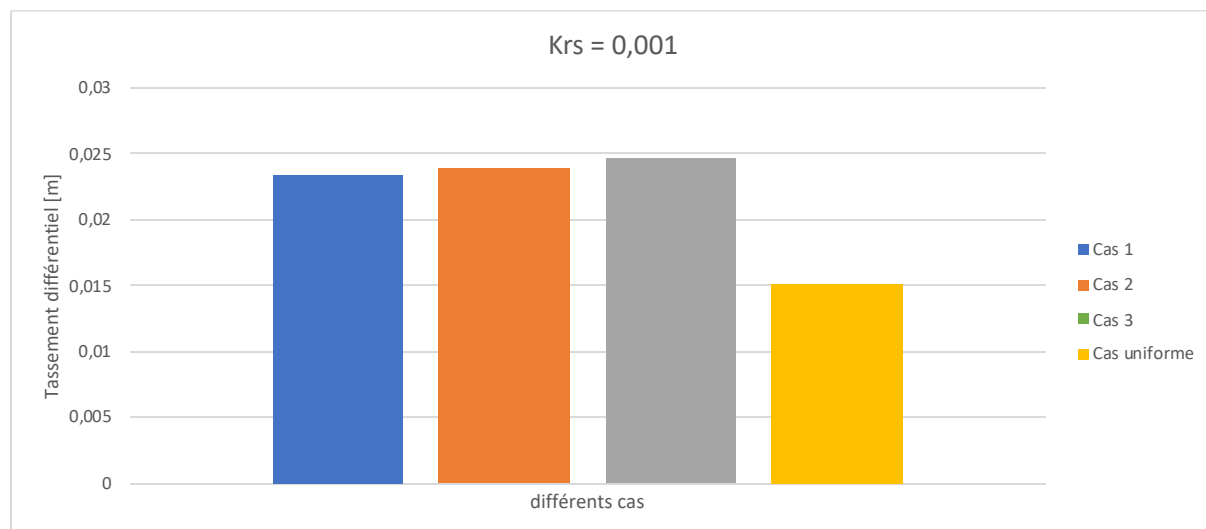


Figure 85 : Résultats numériques de variation de longueurs multiples en fondation profonde sur groupe de pieux ; $K_{rs} = 0,001$.

5.3.1 COMPARAISON AVEC LA FONDATION MIXTE SUR PIEUX

Les résultats indiquent que le tassement moyen est plus grand dans les cas étudiés de fondations profondes sur groupe de pieux, soit avec un radier simple en contact avec le sol, que dans les cas similaires en fondation mixte sur pieux. Cela est cohérent avec la littérature.

Au niveau du tassement différentiel, les fondations sur groupe de pieux amènent cependant des résultats inférieurs par rapport aux fondations mixtes sur pieux. Cette affirmation est valable quelle que soit la longueur des pieux et dans les trois variations de rigidité flexionnelle relative. Le tassement différentiel est illustré à la Figure 86.

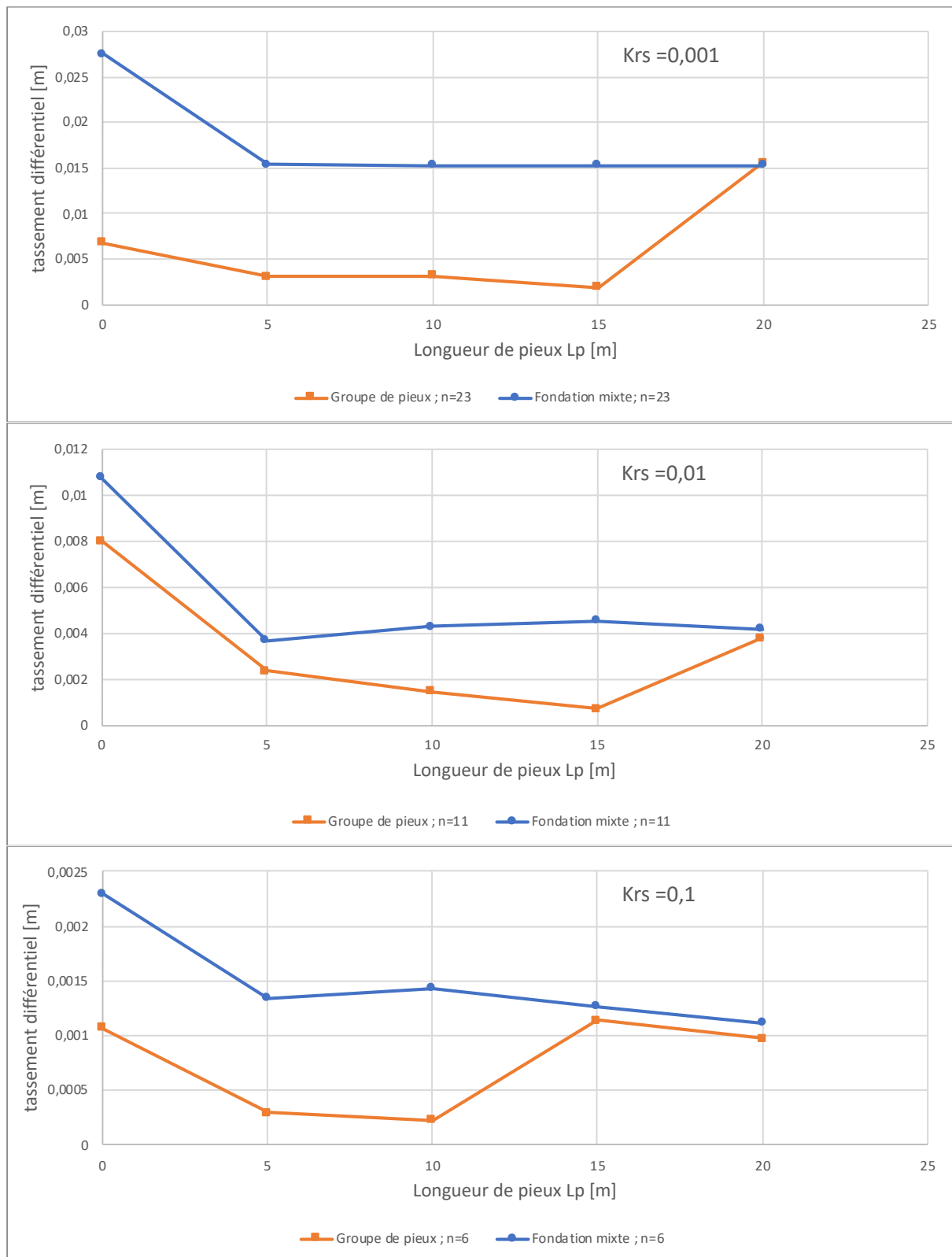


Figure 86 : Comparaison des résultats numériques de Fondations profondes sur groupe de pieux et de fondations mixtes sur pieux ; tassement différentiel en fonction de la longueur des pieux, L_p ; $K_{rs} = 0,001 \mid 0,01 \mid 0,1$.

L'amélioration maximale du tassement différentiel dans le cas des fondations profondes sur groupe de pieux est également plus importante. L'amélioration est définie par rapport à la fondation superficielle, en radier seul en fondation mixte et en radier sur pieux à longueur minimal en fondation sur groupe de pieux. L'amélioration est de l'ordre de 80% en fondations sur groupe de pieux contre 50 % pour les fondations mixtes sur pieux, avec des longueurs de pieux uniformes sous le radier.

Sur base des profils de tassement type décrit dans la littérature pour répertorier les fondations, le profil de tassement des fondations mixtes est généralement de type « A » avec le maximum au centre du radier. Celui d'une fondation profonde sur groupe de pieux a tendance à varier entre le type « A » et le type « B » où le maximum se décale du centre.

Dans les cas modélisés, ce décalage du maximum de tassement dans les fondations profondes sur groupe de pieux profite à une réduction du tassement différentiel

Il est possible de conclure que la fondation profonde sur pieux est mieux adaptée à la réduction de tassement différentiel qu'une fondation mixte, dans le cas où le rapport d'occupation est proche de l'unité. Cette conclusion est valable quelle que soit la rigidité flexionnelle relative du radier.

Un rapport d'occupation proche de l'unité est imposé pour les fondations profondes sur groupe de pieux afin d'éviter un trop grand porte à faux du radier.

Mais, pour les fondations mixtes sur pieux, une disposition de pieux avec un rapport d'occupation plus faible est possible et amène une meilleure réduction du tassement différentiel et une quantité de pieux réduite.

L'hypothèse établie au début de cette section d'une similitude de résultats entre les fondations mixtes et les fondations sur groupes de pieux ne semble pas vérifiée par les analyses numériques de cette étude.

Il serait intéressant de réaliser la modélisation de cas complémentaires afin de pouvoir valider ou invalider cette hypothèse.

L'analyse de la variation d'autres paramètres peut potentiellement mettre en évidence cette similitude.

CHAPITRE 8 : PISTES D'AMÉLIORATIONS

Dans cette section, sont regroupées des pistes d'amélioration tous azimuts, de manière non exhaustive et sans hiérarchie de pertinence.

Il est à noter que cette étude se base sur une considération de charges hydrostatiques et que les charges variables et dynamiques n'ont pas été considérées.

Les pistes d'amélioration proposent donc un complément à cette étude sur base de ces mêmes charges. Hydrostatiques.

1 COMPLÉMENT À L'ANALYSE NUMÉRIQUE

1.1 VARIATION D'AUTRES PARAMÈTRES DIMENSIONNANTS

Des variations supplémentaires sont réalisables afin de compléter la présente approche. Chaque paramètre pourrait faire l'objet d'une déclinaison de cas pertinents.

D'autres arrangements de disposition de pieux ou de longueurs de pieux (longueur, diamètre, nombre, espacement, positionnement, etc.) peuvent être modélisés pour pouvoir conclure de façon plus générale sur l'influence d'une variation de fondation sur pieux pour déterminer des tendances représentatives sur le tassement différentiel.

1.2 RÉALISATION D'UNE MODÉLISATION 3D

L'utilisation d'un logiciel 2D a représenté une contrainte pour la modélisation de situations tridimensionnelles.

Une adaptation de ce travail au format 3D, via le logiciel Plaxis 3D ou autres, pourrait constituer un complément adéquat :

- plus proche de la réalité.
- moins d'approximations lors des relations d'équivalence.
- fonctionnalités du logiciel avec des perspectives plus étendues.

1.3 ÉTUDE EN FONCTION DU COEFFICIENT DE SÉCURITÉ

À côté de l'étude de réduction du tassement différentiel, il serait intéressant d'aborder le sujet de la variation de coefficient de sécurité. En effet, la littérature décrit une influence de ce coefficient de sécurité sur le tassement différentiel.

1.4 ÉTUDE DE TASSEMENT DIFFÉRENTIEL BASÉ SUR LES TYPES DE PROFILS DE TASSEMENT

La littérature indique, sur base d'analyses empiriques, que le profil de tassement d'une fondation peut se décliner selon trois profils de tassement établis.

Des analyses portant séparément sur chacun de ces profils de tassement types pourraient amener à des directives de conception plus précises.

1.5 HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION EN PLAXIS 2D

1.5.1 MODÉLISATION AXISYMÉTRIQUE

Le problème tridimensionnel est approximé au moyen d'un outil en deux dimensions. Les modélisation en plan et en axisymétrie permettent de considérer certains aspects de la dimension hors plan.

Toutefois, cela limite l'analyse à des cas infinis dans la dimension hors plan ou symétriques autour d'un axe de symétrie.

Dès lors, toutes les variations d'un problème ne peuvent pas être prises en considération.

Une différenciation des écartements en plan et hors plan est une approche qui n'a pas été abordée dans le cadre de cette étude.

1.5.2 MODÉLISATION D'UNE RANGÉE DE PIEUX PAR UN MUR

L'équivalence se base sur un critère développé dans la littérature afin de réduire la validité de cette équivalence aux cas où une rangée de pieux à un comportement proche de celui d'un mur.

La validité de cette hypothèse n'a pas été vérifiée.

1.5.1 CONFINEMENT DU SOL ENTRE PIEUX

Les rangées de pieux étant modélisés comme des murs en anneau, le sol entre ces anneaux forme un bloc et subit un déplacement d'ensemble avec la fondation.

Par un effet d'enserrement du sol, cela va engendrer un frottement largement inférieur sur les parois latérales des murs intérieurs que sur les pieux extérieurs, ce qui n'est pas réaliste.

De plus, le matériau de fondation est modélisé de façon simplifiée avec un type de drainage non poreux. Dès lors, le déplacement de l'eau dans le sol est également peu réaliste.

2 MODÉLISATION DES MÉTÉRIAUX

Les matériaux de fondation ont été modélisés à l'aide du modèle linéaire élastique. L'hypothèse a été faite que les déformations sont négligeable dans l'utilisation en service du réservoir.

Les matériaux de sol ont été modélisé à l'aide d'un modèle Mohr-Coulomb. Ce modèle est limité par son approche du premier ordre et son approximation du module de Young au moyen d'une valeur unique et constante.

Les modèles tels que « Hardening soil Model » et « Soft soil creep Model » permettrait d'avantage de possibilités telles que l'analyse des déformations en chargement – déchargement et l'analyse du fluage.

3 ÉTUDE DE SIMILITUDE

Une étude de similitude entre fondations mixtes sur pieux et fondations profondes sur groupe de pieux présenterait un intérêt certain.

L'hypothèse établie dans ce rapport d'une similitude de résultats entre ces deux types de fondations n'a pas été validée ou invalidée. Une étude sur un plus grand nombre de cas pertinents devrait être envisagée.

L'analyse de la variation d'autres paramètres peut potentiellement mettre en évidence cette similitude.

4 ÉTUDE D'AUTRES SOLS

4.1 MODIFICATION DU TYPE DE SOL

Le sol étudié, dans ce travail, est composé d'une argile raide.

Les autres sols intéressants sont les sols avec une grande compressibilité comme des argiles molles ou moyennement raide.

Les sols en sable sont largement documentés dans la littérature.

4.2 MODIFICATION DE LA STRATIGRAPHIE DE SOL

Par la suite, des stratigraphies plus spécifiques, qui sont des situations courantes, peuvent être analysées tels qu'un sol à rigidité croissante en fonction de la profondeur ou encore un sol composé d'une couche compressible superposée à une couche plus raide, par exemple.

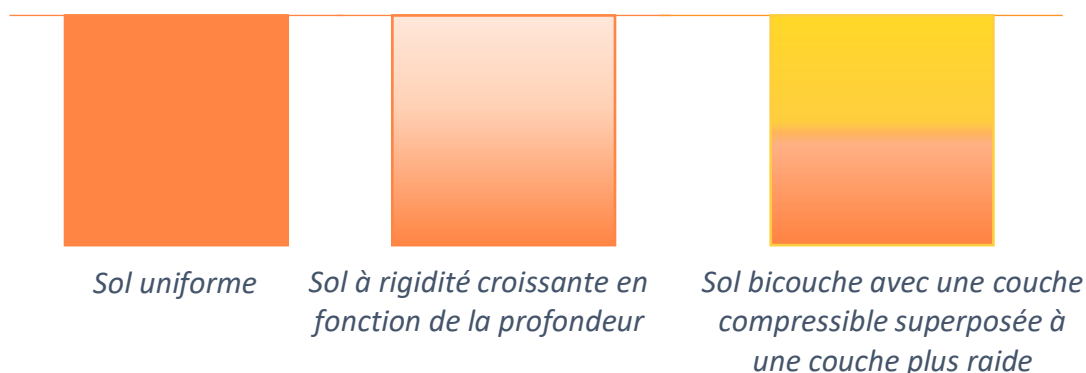


Figure 87 : Stratigraphies de sol

La modification de l'épaisseur de la couche compressible peut également influencer les résultats de l'analyse et est un facteur supplémentaire à prendre en considération.

CHAPITRE 9 : CONCLUSIONS

L'étude réalisée dans ce mémoire vise à améliorer la conception de fondations de réservoirs de grandes dimensions par l'optimisation de la disposition et du dimensionnement des pieux de fondation dans le but de minimiser le tassement différentiel subi par la structure.

En effet, le tassement différentiel a été identifié dans la littérature comme un facteur de risque majeur, susceptible d'endommager la structure et de compromettre l'utilisation des réservoirs de stockage. À ce jour, la littérature ne présente pas l'ensemble des principes de dimensionnement à respecter nécessaires afin de concevoir des réservoirs durables, sécuritaires et économiques de manière optimisée.

Au travers de notre étude, trois types de fondations, à savoir les fondations en radier simple, les fondations mixtes sur pieux et les fondations profondes sur groupe de pieux, ont été étudiées au moyen d'une analyse paramétrique. Cette analyse complète la littérature existante avec des résultats de calculs numériques en Plaxis 2D et met en évidence l'impact des principaux paramètres sur le tassement différentiel ainsi que sur la quantité de pieux mis en place. Ceci constitue un pas de plus vers une conception optimisée de réservoirs de stockage.

Pour ce faire, ce travail a développé une analyse du comportement de fondations mixtes très flexibles caractérisées par une rigidité flexionnelle relative de $K_{rs} = 0,001$.

Pour ce type de fondations mixtes, des variations ont été réalisées sur le nombre de pieux et respectivement leur longueur, leur diamètre, leur espacement ou leur inclinaison. Le rapport d'occupation des pieux a également été considéré comme une variable. L'influence d'une variation de longueurs multiples a également été analysée.

La variation du rapport d'espacement sur le diamètre des pieux, $\frac{s}{d}$, a elle aussi été étudiée pour des fondations moins flexibles, $K_{rs} = 0,01$ et $0,1$.

Concernant les fondations profondes sur groupe de pieux, cette analyse s'est principalement intéressée à l'influence de la longueur des pieux ainsi qu'à la variation de longueurs multiples de pieux sur le tassement différentiel.

Enfin, une comparaison a été menée entre les fondations mixtes sur pieux et les fondations profondes sur groupe de pieux afin de confronter l'hypothèse d'une similitude de résultats de tassement et de tassement différentiel lors de situations identiques ou similaires, quel que soit le type de fondations considéré. Sur base des cas étudiés, cette hypothèse n'a pas pu être validée.

Nous pouvons conclure que dans chaque cas, il est possible de réduire grandement le tassement différentiel subi par la structure par la mise en place d'une fondation sur pieux adaptée. Une conception efficace peut être calculée pour chaque type de fondations étudiées. A la suite de cette étude, il ne nous est pas encore possible de discriminer ou de

promouvoir la fondation mixte sur pieux ou la fondation profonde sur groupe de pieux, étant donné la variabilité des solutions possibles respectant les critères de conception. De plus, dans la pratique, le choix d'un type de fondation se base sur un ensemble de facteurs qui ne sont pas tous strictement géotechniques et qui n'ont pas été abordés ici, par exemple l'impact financier des différents types de structures.

Bien que des recherches dans le domaine doivent encore être effectuées, il est toutefois possible de proposer des directives de conception de réservoirs sur base de la littérature existante et des résultats obtenus dans cette étude.

1 PROPOSITION DE DIRECTIVES DE CONCEPTION

1.1 DIRECTIVE OPTIMISÉE DE CONCEPTION DE FONDATIONS MIXTES SUR PIEUX

La directive de conception de fondation de réservoirs en fondations mixtes sur pieux réalisée sur base de la littérature est complétée par les résultats de cette étude dans le cadre des hypothèses retenues et prédéfinies pour ce travail. Huit directives sont proposées ci-dessous.

Premièrement, l'arrangement de pieux optimal dépend de la rigidité flexionnelle relative. Contrairement à la littérature qui considère un arrangement optimal quelle que soit la rigidité flexionnelle relative de la fondation, cette étude met en évidence que l'arrangement optimal varie en fonction de cette rigidité.

- Pour une rigidité flexionnelle relative de $K_{rs} = 0,001$, ce qui représente une fondation très flexible, l'arrangement des pieux optimum est une disposition de pieux centrés sous la fondation et couvrant 40 à 73% de la surface du radier.
- Pour une fondation relativement flexible, caractérisée par $K_{rs} = 0,01$, il est recommandé de couvrir 30 à 45% de la surface du radier avec un groupe de pieux centrés.
- Enfin, pour une fondation peu flexible, caractérisée par $K_{rs} = 0,1$, il est recommandé de couvrir 20 à 35% de la surface du radier avec un groupe de pieux centrés.

De manière générale, plus la fondation est flexible, plus il est recommandé de disposer des pieux centrés couvrant une surface plus importante du radier afin d'uniformiser le tassement différentiel.

Deuxièmement, l'augmentation de la longueur des pieux présente une influence positive sur la réduction du tassement différentiel mais moindre que l'augmentation du nombre de pieux. Néanmoins, il existe une longueur de pieux optimale. Plus la longueur des pieux s'écarte, qu'à la hausse ou à la baisse, de cette longueur de pieux optimale, moindre sera l'effet positif. Il est donc intéressant de ne pas dépasser cette longueur optimale pour des raisons d'efficacité et des raisons économiques.

Troisièmement, le rapport entre l'espacement et le diamètre des pieux semble peu influencer le tassement différentiel mais permet d'avoir un impact significatif sur la quantité de pieux mis en place et donc économique.

Quatrièmement, l'inclinaison apparaît comme un facteur très influençant sur le tassement différentiel. Il est donc recommandé de chercher l'inclinaison des pieux la plus grande possible et réalisable avec la machinerie disponible. Une augmentation de l'inclinaison des pieux induit une diminution du tassement différentiel. Toutefois, la réduction tend à se réduire quand l'inclinaison devient très importante.

Cinquièmement, une augmentation du diamètre et de l'espacement des pieux, avec un rapport constant entre ces deux paramètres $\left(\frac{s}{d}\right)$, engendre peu d'influence sur le tassement différentiel. Cependant, cette augmentation implique une réduction significative de la quantité de pieux mis en place pour le même résultat. Il est donc préférable de concevoir une fondation sur pieux dont le diamètre et l'espacement sont aussi grand que possible, techniquement et économiquement réalisable.

Sixièmement, la mise en place d'arrangement de pieux à longueurs variables a permis de mettre en avant une influence, prometteuse et à approfondir, de cette variation sur le tassement différentiel et sur la réduction de quantité de pieux mis en place.

Sur base de la littérature, deux directives complémentaires ont déjà été énoncées mais n'ont pas été approfondies et sont reprises ci-dessous.

D'une part, le groupe de pieux de la fondation doit se caractériser par une rigidité équivalente ou proche de la rigidité du radier seul. Le rapport de rigidité entre le groupe de pieux et le radier doit être proche de l'unité, $K_{pr} \approx 1$.

D'autre part, les pieux doivent être dimensionnés afin de présenter une capacité portante suffisante. Cela signifie pouvoir reprendre 40 à 70% de la charge totale de la fondation avec une mobilisation de la résistance des pieux de maximum 80%.

1.2 DIRECTIVE OPTIMISÉE DE CONCEPTION DE FONDATIONS PROFONDES SUR GROUPE DE PIEUX

Cette directive porte les fondations profondes sur groupe de pieux et a été réalisée sur base de la littérature et des résultats de cette étude, dans le cadre des hypothèses retenues et prédéfinies.

D'une part, une augmentation de la rigidité flexionnelle relative de la fondation présente une influence positive sur la réduction du tassement différentiel et de la distorsion angulaire.

D'autre part, une optimisation de la disposition de pieux amène dans les cas étudiés, une amélioration de la réduction du tassement différentiel.

Il est recommandé de réduire le nombre de pieux et d'en augmenter leur longueur car cela impacte positivement la réduction de tassement différentiel et de distorsion angulaire.

Par ailleurs, un écartement du bord de la rangée de pieux en périphérie réduit le tassement différentiel.

De plus, une diminution de la longueur des pieux de la rangée extérieure du groupe de pieux amène à une réduction du tassement différentiel par rapport à la fondation sur pieux à longueur uniforme. Cependant, certaines dispositions de pieux à longueurs variables ont, au contraire, amené à des résultats moins bons que la fondation avec des pieux de longueurs uniformes.

Il est donc recommandé de réaliser une variation de longueurs multiples en prenant en compte la réduction de tassement différentiel ainsi que la quantité de pieux mis en place afin de considérer l'efficacité du système de fondation et son coût.

La littérature sur ce type de fondations étant moins fournie et le nombre de cas étudiés dans ce travail étant limités, il peut être intéressant de compléter cette directive au moyen de nouvelles modélisations.

Espérant avoir contribué à la réflexion et à l'analyse dans le domaine de l'optimisation de dispositions de pieux uniformisant le tassement des réservoirs, il est toutefois évident qu'une prolongation de l'analyse, via notamment les pistes d'amélioration évoquées précédemment, est souhaitable pour approfondir ce sujet.

CHAPITRE 10 :BIBLIOGRAPHIE

- Anand, J. (2016). *Stress analysis of storage tank piping*. Récupéré sur SlideShare: <https://fr.slideshare.net/JebaAnandNadar/stress-analysis-of-storage-tank-piping-jeba-anand>
- Ata, A., Badrawi, E., & Nabil, M. (2015, juin). Numerical analysis of unconnected piled raft with cushion. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(2), 421-428.
- Bahar, R., Omar, S., & Djahid, A. (2013). *Differential Settlements of Cylindrical Steel Storage Tanks: Case of the Marine Terminal of Bejaia*. Missouri University of Science and Technology.
- Bell, R. A., & Iwakiri, J. (1980). Settlement comparison used in tank failure study. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106(2), 153-169.
- Bowles, J. E. (1968). *Foundation analysis and design*. Illinois, USA: McGraw-Hill.
- Braja M. Das, K. S. (2014). *Principles of Geotechnical Engineering* (Vol. 8). SI Edition.
- Brian B. Sheil, B. A. (2015, juin). Numerical modelling of pile foundation angular distortion. *Soils and Foundations*, 55(3), 614-625.
- Carter, M. a. (1991). *Correlations of Soil Properties*. London: Pentech Press.
- Cho, J., Lee, J.-H., Jeong, S., & Lee, J. (2012, octobre). The settlement behavior of piled raft in clay soils. *Ocean Engineering*, 53, 153-163.
- Clemente, J. L., Desai, A., Senapathy, H., & Jr., L. W. (1998). *Foundation performance of large diameter tanks*. Missouri University of Science and Technology.
- Contreras, I. A., F.Lupini, J., & Pestaña, J. M. (s.d.). Settlement of steel tanks in soft clays: Caripito tank farm case history.
- Davis, U. (s.d.). *Liquefaction & Tanks*. (U. o. California, Producteur) Récupéré sur UC Davis, Civil and environmental engineering: <https://research.engineering.ucdavis.edu/gpa/earthquake-hazards/liquefaction-tanks/>
- D'Orazio, T. B., & Duncan, J. M. (1987). Differential settlements in steel tanks. *Journal of the Geotechnical Engineering*, 113(9), 967-983.
- Emeriault, F. (2011). *Module 1 – Connaissances de base, Introduction à la modélisation numérique*. Grenoble INP - Ense3, Laboratoire sols, solides, structures, risques.
- Enagás Tanks. (s.d.). Récupéré sur FCC City: <http://www.ciudadfcc.com/en/-/tanques-de-enagas>
- Foray, P., Flavigny, E., Nguyen, N.-T., Lambert, S., & Briançon, L. (2009). Modélisation numérique 3D de colonnes ballastées et application. *Stand alone*, 2382-2385.
- GEOL_615. (2011). *Some Useful Numbers on the Engineering Properties of Materials (Geologic and Otherwise)*. University of Mississippi.
- Godoy, L. A. (2016). Buckling of vertical oil storage steel tanks: Review of static buckling studies. *Thin-Walled Structures*, 103, pp. 1-21.
- Gouw, T.-L. (2014). Common Mistakes on the Application of Plaxis 2D in Analyzing Excavation Problems. *International Journal of Applied Engineering Research*, 9(21), 8291-8311.
- Horikoshi, K., & Randolph, F. (1998). A Contribution to Optimum Design of Piled Rafts. *Géotechnique*, 48(3), 301-317.

- Jenck, O. (s.d.). Le renforcement des sols compressibles par inclusions rigides verticales. Modélisation physique et numérique.
- Jeong, S., Lee, J., & Lee, C. J. (s.d.). Slip effect at the pile–soil interface on dragload. *Computers and Geotechnics*, 31(2), 115-126.
- Jia, J. (2017). *Soil Dynamics and Foundation Modeling*. Offshore and Earthquake Engineering.
- Khanmohammadi, M., & Fakharian, K. (2018). Evaluation of Performance of Piled-Raft Foundations on Soft Clay: A Case Study. *Geomechanics and Engineering*, 14(1), 43-50.
- Lee, J., Kim, Y., & Jeong, S. (2010). Three-dimensional analysis of bearing behavior of piled raft on soft clay. *Computers and Geotechnics*, 37(1), 103-114.
- Leung, A. Y., & Klar, A. (2010). Theoretical Study on Pile Length Optimization of Pile Groups and Piled Rafts. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 319-330.
- Marr, W., Ramos, J. A., & William, L. T. (1982, Août). Criteria for settlement of tanks. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 108(8), 1017-1039.
- Nguyen, N.-T. (2008). *Modélisation du comportement des fondations profondes dans les argiles molles*. Thèse de doctorat, IP Grenoble, Laboratoire Sols, Solides, Structures - Risques, Grenoble.
- Onasch, C. (2000). *D2487–06 - Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. ASTM International.
- Palmer, S. C. (1992, Août). Structural effects of foundation tilt on storage tanks. *Journal of Process Mechanical Engineering*, 206(2), 83-92.
- Palmer, S. C. (1994, Février). Stresses in storage tanks caused by differential settlement. *Journal of Process Mechanical Engineering*, 208(1), 5-16.
- Poulos, H. G., & David, E. H. (1980). Pile foundation analysis and design. (p. 410). University of Sidney.
- Prakoso, W. A., & Kulhawy, F. H. (2001). Contribution to piled raft foundation design. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*.
- Randolph, O. R. (2004). Design Strategies for Piled Rafts Subjected to Nonuniform Vertical Loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(1), 1-13.
- Robertson, P. K., & Cabal, K. (2015). Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. *Gregg Drilling & Testing, Inc.*, 6.
- Rosenberg, P., & L. Journeaux, N. (1982). Settlement limitations for cylindrical steel storage tanks. *Canadian Geotechnical Journal*, 19, 232-238.
- Sanctis, L. d., Mandolini, A., Russo, G., & Viggiani, C. (2002). Some remarks on the optimum design of piled rafts. *Conference: International Deep Foundations Congress 2002*.
- Sheil, B. B., & McCaben, B. A. (2015). Numerical modelling of pile foundation angular distortion. *Soils and Foundations*, 55(3), pp. 614-625.
- Shooshpasha, I., Hasanzadeh, A., & Taghavi, A. (2013). Prediction of the axial bearing capacity of piles by SPT-based and numerical design methods. *International Journal of Geomate*.
- Skempton, A., & MacDonald, D. (1956). The allowable settlement of buildings. 727–784.
- Sluis, J., Besseling, F., & Stuurwold, P. (2014). Modelling of pile row in a 2D plane strain FE-analysis. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, 277-282.
- Sołowski, W. (2018). *Geo-E2010 - Advanced Soil Mechanics* L. Aalto university, Department of Civil Engineering.
- Subramanian, N. (2016). *Design of Steel Structures*. Oxford: Oxford University Press.
- Viggiani, C. (2000). Analysis and design of piled foundation. *First Arrigo Croce Lecture*. 1. *Rivista Italiana di Geotecnica*.

Yen, B. T. (2005). *Finite element study of oil tank foundation system*. National University of Singapore.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Exemple de réservoirs de stockage de grande dimension.	9
Figure 2 : Illustrations de cas réels de réservoirs avec tassement différentiel.	10
Figure 3 : Schéma d'un réservoir type	10
Figure 4 : Illustration d'une concentration de contraintes	11
Figure 5 : Illustrations de l'impact de tassement sous réservoir.	11
Figure 6 : Différentes configurations de fondations – Partie 1	14
Figure 7 : Différentes configurations de fondations – Partie 2	14
Figure 8 : Illustration de fondations profondes sur pieux et de fondations mixtes sur pieux	17
Figure 9 : Illustration d'une fondation mixte sur pieux	19
Figure 10 : Illustrations des paramètres d'une fondation sur pieux	19
Figure 11 : Illustration de la relation entre le nombre de rangées de pieux et le nombre de murs en anneaux	20
Figure 12 : Équivalence de géométrie	20
Figure 13 : Concept de pieux équivalent	23
Figure 14 : Équivalence de surface horizontale	23
Figure 15 : Mesures normalisées de tassement de cas historiques, regroupés en 3 profils types	25
Figure 16 : Profils de tassement normalisés en fonction du DeT et $Fmin$.	25
Figure 17 : Profils de tassement des cas historiques	26
Figure 18 : Influence du facteur de sécurité et du profil de tassement	26
Figure 19 : Illustrations de l'impact de tassement sous réservoir.	27
Figure 20 : Illustration d'une concentration de contraintes	27
Figure 21 : Illustrations d'un tassement sous réservoir avec fissuration de la fondation	28
Figure 22 : Effet du rapport de chargement du radier et de la capacité portante sur le tassement différentiel	30
Figure 23 : Influence du degré de mobilisation des pieux sur le tassement différentiel	31
Figure 24 : Illustration de radier a) de petite taille, b) de grande taille, flexible avec un groupe de pieux centrés	32
Figure 25 : Tassement différentiel en fonction du Kr et de nL	33
Figure 26 : Modèle de radier carré sur pieu de (Horikoshi & Randolph, 1998)	34
Figure 27 : Effet de l'espacement entre pieux sur le tassement différentiel	34
Figure 28 : Effet de l'espacement entre pieux sur le tassement différentiel	34
Figure 29 : Tassement différentiel, $Kr = 0,1$ et $0,01$ en fonction de AgA , de sd et LB	35
Figure 30 : Effet de la variation de longueur de pieu sur le tassement différentiel, a) en solution élastique, b) en solution non-linéaire	37
Figure 31 : Effet du rapport des aires agr sur le rapport de rigidité Kpr	37
Figure 32 : Effet du rapport de rigidité Sol - Pieu sur le tassement différentiel	38
Figure 33 : Influence de l'épaisseur de sol modélisée sur le tassement différentiel, $Kr = 0,1$	38
Figure 34 : Effet du coefficient de poisson du sol sur le tassement différentiel	39
Figure 35 : Géométrie du groupe de pieux et différentes notations de (Sheil & McCaben, 2015).	41
Figure 36 : Influence de l'interaction entre le radier et le sol sur la distorsion angulaire pour deux géométries de radier et deux types de fondations.	42

Figure 37 : Influence du rapport sd entre l'espacement entre pieux et le diamètre des pieux en fonction de la rigidité flexionnelle relative, Kr .	43
Figure 38 : Influence de la taille du groupe de pieux sur la distorsion angulaire en fonction de la rigidité flexionnelle relative, Kr .	44
Figure 39 : Influence du rapport L/D entre la longueur et le diamètre des pieux en fonction de la rigidité flexionnelle relative, Kr .	44
Figure 40 : Influence du rapport $E1E2$, sur la distorsion angulaire β en fonction de la rigidité flexionnelle relative, Kr , a) pour 9 pieux, b) pour 81 pieux.	45
Figure 41 : Effet de l'optimisation du groupe de pieux sur la distorsion angulaire, β ; pour $n=81$ pieux ; a) $\log Kr = 0$, b) $\log Kr = 2$.	46
Figure 42 : Surestimation de la résistance au cisaillement du modèle de Mohr-Coulomb.	48
Figure 43 : Courbe bilinéaire contrainte - déformation du modèle Mohr-Coulomb	51
Figure 44 : Courbe hyperbolique contrainte - déformation en chargement primaire	52
Figure 45 : Exemples de problème en modèle Plan et Axisymétrique	55
Figure 46 : Équivalence de surface horizontale	56
Figure 47 : Géométrie et propriété de matériaux du modèle de validation	58
Figure 48 : a) Comportement de l'interface Sol-Pieu b) Loi de frottement de Coulomb	59
Figure 49 : Illustration de la modélisation numérique en Plaxis de la validation	60
Figure 50 : Réservoirs de stockage et unité de décantation à Marshahr dans la région de Khuzestan, Iran	62
Figure 51 : Profils de tassement avec la profondeur	63
Figure 52 : Stratification simplifiée du sol de (Khanmohammadi & Fakharian, 2018)	63
Figure 53 : SPT - Détermination des paramètres de sol	65
Figure 54 : Modèles de radier sur pieux étudiés ; nombre de pieux 0, 16, 36, 64.	67
Figure 55 : Tassement en fonction du nombre de pieux et de leur longueur de (Khanmohammadi & Fakharian, 2018)	68
Figure 56 : Tassement différentiel en fonction du nombre de pieux et de leur longueur de (Khanmohammadi & Fakharian, 2018)	68
Figure 57 : Contribution à la capacité portante des pieux en fonction de la longueur et du nombre de pieux	68
Figure 58 : Tassements au centre en fonction du nombre de pieux n , Résultats Plaxis en modèle Axisymétrique	70
Figure 59 : Tassements différentiel en fonction du nombre de pieux n , Résultats Plaxis en modèle Axisymétrique	71
Figure 60 : Tassements au centre en fonction du nombre de pieux n , Résultats Plaxis en modèle axisymétrique et du document (Khanmohammadi & Fakharian, 2018)	71
Figure 61 : Tassements différentiel en fonction du nombre de pieux n , Résultats Plaxis en modèle axisymétrique et du document (Khanmohammadi & Fakharian, 2018)	72
Figure 62 : Illustration de la situation de référence d'une fondation mixte sur pieux	76
Figure 63 : Variation de tassement différentiel en fonction du rapport d'occupation de pieux agr ; $Krs = 0,001$.	78
Figure 64 : Variation de tassement différentiel en fonction de la longueur totale d'anneaux LtA ; $Krs = 0,001$.	78
Figure 65 : Variation de tassement différentiel en fonction de la longueur de pieux Lp ; $Krs = 0,001$.	79
Figure 66 : Variation de tassement différentiel normalisé en fonction de la longueur de pieux Lp ; $Krs = 0,001$.	80

Figure 67 : Variation de tassement différentiel en fonction de la longueur totale d'anneaux LtA ; $Krs = 0,001$.	80
Figure 68 : Variation de tassement différentiel en fonction a) du nombre d'anneaux, b) du rapport d'occupation agr; $sd = 3$ et 6 ; $Krs = 0,001$, Partie 1.	81
Figure 69 : Variation de tassement différentiel en fonction a) du nombre d'anneaux, b) du rapport d'occupation agr; $sd = 3$ et 6 ; $Krs = 0,001$, Partie 2.	82
Figure 70 : Illustration d'une fondation mixte avec pieux inclinés	82
Figure 71 : Variation de tassement différentiel en fonction de l'inclinaison des pieux agr = $0,98$; $Krs = 0,001$.	83
Figure 72 : Résultats numériques de variation de diamètre de pieux; Graphes individuels ; $Krs = 0,001$ $0,01$ $0,1$.	84
Figure 73 : Résultats numériques de variation de diamètre de pieux; $Krs = 0,001$ $0,01$ $0,1$.	85
Figure 74 : Résultats numériques de variation d'espacement entre pieux en fonction de la longueur totale d'anneaux, LtA ; $Krs = 0,001$ $0,01$ $0,1$; Partie 1.	85
Figure 75 : Résultats numériques de variation d'espacement entre pieux en fonction de la longueur totale d'anneaux, LtA ; $Krs = 0,001$ $0,01$ $0,1$; Partie 2.	86
Figure 76 : Illustration de fondations avec longueur de pieux multiple	87
Figure 77 : Schéma simplifié des 2 cas étudiées de variations de longueurs multiples de pieux	87
Figure 78 : Résultats numériques des 2 cas de variation de longueurs multiples ; $Krs = 0,001$.	88
Figure 79 : Résultats numériques de variation de longueurs multiples ; $Krs = 0,001$.	89
Figure 80 : Reprise de charges de fondations mixtes sur pieux ; $Krs = 0,1$ $0,01$ $0,001$	91
Figure 81 : Illustration d'une fondation profonde sur groupe de pieux	93
Figure 82 : Résultats numériques de tassement différentiel en fonction de la longueur des pieux, Lp ; $Krs = 0,001$ $0,01$ $0,1$; Fondation profonde sur groupe de pieux.	94
Figure 83 : Résultats numériques de tassement différentiel en fonction de la longueur totale d'anneaux, LtA ; $Krs = 0,001$ $0,01$ $0,1$; Fondation profonde sur groupe de pieux.	95
Figure 84 : Illustration de fondations profondes avec longueurs de pieux multiples	96
Figure 85 : Résultats numériques de variation de longueurs multiples en fondation profonde sur groupe de pieux ; $Krs = 0,001$.	96
Figure 86 : Comparaison des résultats numériques de Fondations profondes sur groupe de pieux et de fondations mixtes sur pieux ; tassement différentiel en fonction de la longueur des pieux, Lp ; $Krs = 0,001$ $0,01$ $0,1$.	97
Figure 87 : Stratigraphies de sol	101
Figure 88 : Profil de tassement de cas historiques a) satisfaisants b) en ruptures	115
Figure 89 : Tassement élastique d'une fondation rigide ou souple	116
Figure 90 : Méthode de Schmertman et Hartman	117

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Tassement moyen et différentiel d'un radier sans pieu chargé à 800 [MN]	33
Tableau 2 : Description des modèles de drainage	48
Tableau 3 : Paramètres de matériaux modélisés en modèle élastique linéaire.	54
Tableau 4 : Paramètres de matériaux modélisés en modèle élastique linéaire.	54
Tableau 5 : Paramètres de matériaux utilisés pour l'analyse numérique de validation	58
Tableau 6 : Résultats numériques de l'analyse de validation	60
Tableau 7 : Résultats analytiques de l'analyse de validation sans pieu	61
Tableau 8 : Paramètres de sol de (Khanmohammadi & Fakharian, 2018)	64
Tableau 9 : Paramètres modifiés des blocs de sol situés en pointe de pieux	64
Tableau 10 : Corrélation SPT-CPT	65
Tableau 11 : Comparaison du SPT et du tableau de la source	66
Tableau 12 : Géométrie et arrangements de pieu du modèle étudié de radier sur pieux	67
Tableau 13 : Paramètres de référence du béton de fondation	74
Tableau 14 : Paramètres de référence du sol	75
Tableau 15 : Description de la situation en terme de nombre d'anneaux, rapport d'occupation et longueur totale d'anneaux	78
Tableau 16 : Variation du nombre d'anneaux et rapport d'occupation correspondant	79
Tableau 17 : Correspondance entre le nombre d'anneaux et le rapport d'occupation correspondant pour $sd = 3$ et $sd = 6$.	81
Tableau 18 : Variation d'espacement entre pieux et de diamètre de pieux, à rapport $sd = 3$.	84
Tableau 19 : Correspondance entre la Rigidité flexionnelle relative du radier, K_{rs} , et le diamètre de la fondation, D .	84
Tableau 20 : Description du premier cas de variation de longueurs multiples.	87
Tableau 21 : Description du second cas de variation de longueurs multiples.	87
Tableau 22 : Description des cas de variation de longueur multiple en fondation profondes sur groupe de pieux	95
Tableau 23 : Informations des cas historiques de (D'Orazio & Duncan, 1987)	114

CHAPITRE 11 : ANNEXES

1 ANNEXE 1 : CAS HISTORIQUES

Certaines informations concernant les cas historiques détaillés par (D'Orazio & Duncan, 1987) et (Bell & Iwakiri, 1980) sont repris dans cette section.

Le Tableau 23 reprend le détail des cas historiques fourni par (D'Orazio & Duncan, 1987). Pour plus d'informations, les données sont complétées par (Bell & Iwakiri, 1980).

La Figure 88 illustre les profils de tassements mesurés des différents cas historiques en les séparant en cas satisfaisant et cas en rupture.

Tableau 23 : Informations des cas historiques de (D'Orazio & Duncan, 1987)

N°	tank	reference	roof type	Height	Diameter	q	description	Su	De	T(m)	De/T	Comments	Undrained Fmin	Comments	Pcen	Pmax	Pedge	Profile Shape	Tassement différentiel
1	T-2	Bell and Iwakiri (1980)	unknown	17,5	32	12,5	Clayey silt, peat	1.5-3.5	38	15	2,53	Ringwall	1,51	End of first test	0,62	0,62	0,25	A	0,37
2	T-2	Bell and Iwakiri (1980)	unknown	17,5	32	16,5	Clayey silt, peat	1.5-3.5	38	15	2,53	Ringwall	1,22	End of second test	0,8	0,8	0,48	A	0,32
3	T-GH1	Green and Hight (1975)	cone	12,8	14,6	12,8	Peat, clay	1.2-4.5	23,1	10	2,31	Reclaimed land	1,62	Ruptured	0,949	0,949	0,496	A	0,453
4	T-GH2	Green and Hight (1975)	cone	12,8	24,4	12,8	Peat, clay	1.2-4.5	23,1	10	2,31	Reclaimed land	1,62	Ruptured	1,46	1,46	0,732	A	0,728
5	T-1104	Bell and Iwakiri (1980)	dome	17,5	45,1	15	Silty clay, clayey silt		49,1	13	3,78	Preload, ringwall piles		Bottom plates, damaged	0,5	0,5	0,23	A	0,27
6	T-BC	Bell and Iwakiri (1980)	unknown	12,2	68,6	12	Silt, clay organics		76,6	17,5	4,38			-	0,55	0,55	0,28	A	0,27
7	T-GH3	Green and Hight (1975)	cone	12,8	17,1	12,8	Peat, clay	1.2-4.5	23,1	10	2,31	Reclaimed land	1,62	-	0,69	0,69	0,34	A	0,35
8	T-37	Garison and Fricano (1961)	cone	14,6	45,7	14,2	Silty, sandy clay	2.5-4.8	46,4	12	3,87		1,17	-	1,1	1,14	0,58	B	0,56
9	T-38	Carlson and Fricano (1961)	cone	14,6	45,7	14	Silty, sandy clay	2.5-4.8	46,5	12	3,88		1,18	-	1,35	1,44	0,9	B	0,54
10	T-271	Bell and Iwakiri (1980)	dome	23,7	52,3	23,7	Silty clay	4.0-8.0	55,8	10	5,58	Preload, sand drains	1,28	Rapid drainage	0,62	0,62	0,34	B	0,28
11	T-19	Bell and Iwakiri (1980)	cone	17,1	45,7	16	Clayey silt	1,3 average	49,7	8,5	5,85		0,48	Column problems relieved	0,65	0,65	0,29	B	0,36
12	T-270	Bell and Iwakiri (1980)	dome	23,7	52,3	23,5	Silty clay	4.0-8.0	55,8	9	6,2	Preload, sand drains	1,33	Ruptured in service	0,71	0,71	0,5	B	0,21
13	T-322	Bell and Iwakiri (1980)	floating	14,6	47,5	14,6	Clay, silty clay	2,5 average	54	6	9		1,18	-	0,68	0,68	0,33	B	0,35
14	T-206	Bell and Iwakiri (1980)	cone	14,6	53,3	8,5	Clay, sandy clay	1.8-2.7	57,3	6	9,55	Extended diameter pad	1,65	-	0,64	0,68	0,36	B	0,32
15	T-401	Bell and Iwakiri (1980)	floating	14,6	61,6	12,8	Clay, sandy clay	2,5 average	67,1	7	9,59		1,22	-	0,88	0,89	0,48	B	0,41
16	T-402	Bell and Iwakiri (1980)	floating	14,6	61,6	12,8	Clay, sandy clay	2,5 average	67,1	7	9,59		1,22	-	0,85	0,85	0,4	B	0,45
17	T-404	Bell and Iwakiri (1980)	floating	14,6	61,6	12,8	Clay, sandy clay	2,5 average	67,1	7	9,59		1,22	-	0,85	0,88	0,48	B	0,4
18	T-212	Bell and Iwakiri (1980)	cone	14,6	38,4	14,6	Clay, sandy silt	2,5 average	44,2	4,5	9,82		1,24	-	1,21	1,21	0,58	B	0,63
19	T-4352	Bell and Iwakiri (1980)	cone	14,6	46,6	14,5	Silty clay	1,5 average	49,6	8	6,2	sand drains	0,44	Rapid drainage, slow loading	0,75	1,1	0,56	C	0,54
20	T-4356	Bell and Iwakiri (1980)	cone	14,6	46,6	14,5	Silty clay	1,5 average	49,6	8	6,2	sand drains	0,44	Rapid drainage	0,75	0,99	0,58	C	0,41
21	Ancona	Jamiołkowski (1975)	floating	22	96,2	21	Gravelly silt, sandy clay	4.0-7.0	109,2	15	7,28	Overburden, compacted	1,55	Edge relieved	0,29	0,34	0,17	C	0,17
22	N-3000F	Penman and Watson (1967)	floating	16,5	39	15,7	Silty clay	0.8-2.3	40	4	10	thin sand layers	0,54	Rapid drainage	0,41	0,47	0,31	C	0,16
23	T-2101-FD	Penman and Watson (1967)	floating	16,5	56,6	16,5	Silty clay	0.8-2.3	57,6	5,5	10,47	thin sand layers	0,53	Rapid drainage	0,3	0,35	0,23	C	0,12
24	T-407	Bell and Iwakiri (1980)	floating	14,6	74,5	14,3	Silty clay	1.5-3.0	80	6	13,33		0,84	Drainage beneath edge	0,38	0,45	0,2	C	0,25
25	Shellhaw en	Nixon (1949)	unknown	9,1	6,7	8,2	clay	1,1	7,8	13,7	0,57		0,86	Shear failure	-	-	-	-	-
26	Quebec	Brown and Paterson (1964)	unknown	13,4	21,3	12,5	clay	1.0-3.0	25	10,7	2,34		1,02	Shear failure, tank rupture	-	3	-	-	-
27	Grange-mouth	Saurin (1949)	unknown	9,2	35,4	9,1	Silty clay	1	36	15,2	2,37		0,72	Shear failure	0,46	0,6	0,28	C	0,32
28	T-8	Bjerrum and Overland (1957)	unknown	12,2	25	11,2	Silty clay, clay	1.8-4.0	26	9	2,89	Ringwall	1,1	Shear failure	-	-	-	-	-
29	T-39	Carlson and Fricano (1961)	cone	14,6	45,7	14,6	Silty clay, sandy clay	1.8-9.3	52,7	16	3,29		0,96	Shear failure	2,1	2,84	1,89	C	0,95
30	T-1701	Bell and Iwakiri (1980)	cone	14,6	45,7	14,6	silt	0,6	48,7	3	16,23		0,44	Shear failure, tank rupture	-	0,26	-	± C	0,26
31	Isle of Grain	Cooling and Gibson (1955)	cone	7,6	44	5	clay	1.0-1.8	44,9	5	9		1,64		0,4	-	0,3	-	0,1

1.2 ILLUSTRATIONS DES PROFILS DE TASSEMENTS (BELL & IWAKIRI, 1980)

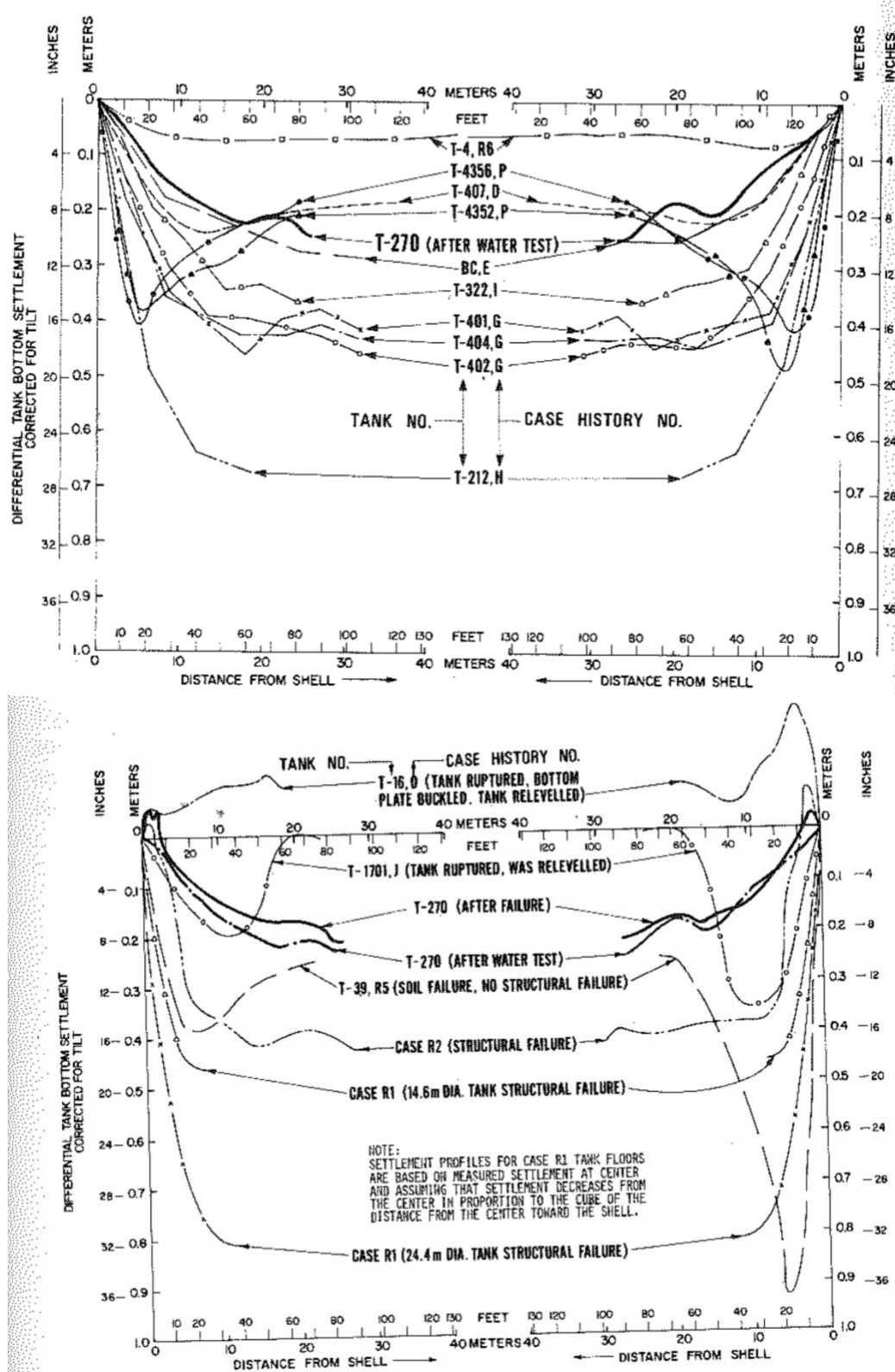


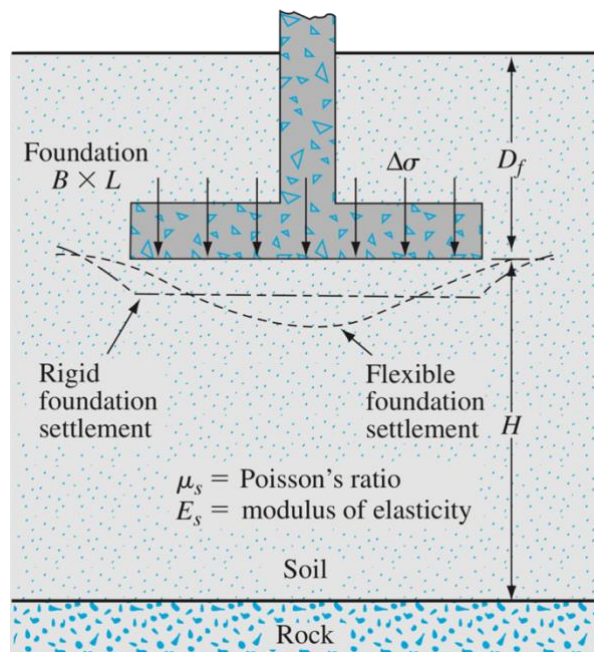
Figure 88 : Profil de tassement de cas historiques a) satisfaisants b) en ruptures

2 ANNEXE 2 : MÉTHODES ANALYTIQUES DE CALCUL DE TASSEMENT ÉLASTIQUE

2.1 MÉTHODE DE LA THÉORIE ÉLASTIQUE

Le tassement élastique est proportionnel au niveau de la charge. La grandeur du tassement élastique dépendra de la flexibilité de la fondation et du type de matériaux du sol. La méthode appliquée provient du livre « Principles of Geotechnical Engineering » (Braja M. Das, 2014). Une équivalence de géométrie est utilisée pour analyser une fondation circulaire avec un diamètre équivalent.

Elle est valable pour le sable et pour l'argile.



Le tassement élastique d'une fondation souple est calculé avec l'équation suivante :

$$S_e = \Delta\sigma \cdot (\alpha \beta') \cdot \frac{1 - \mu_s^2}{E_s} \cdot I_s I_f$$

Figure 89 : Tassement élastique d'une fondation rigide ou souple

© Cengage Learning 2014

Où :

$\Delta\sigma$: Pression nette appliquée sur la fondation

μ_s : Coefficient de Poisson du sol

E_s : Module d'élasticité moyen du sol sous la fondation, mesuré à partir de $z = 0$ jusqu'à $z = 5B$

B' : $= B/2$ pour le centre de la fondation
 $= B$ pour le bord de la fondation

I_s : Facteur de forme (Steinbrenner, 1934)

$$= F_1 + \frac{1 - 2\mu_s}{1 - \mu_s} \cdot F_2$$

$$F_1 = \frac{1}{\pi} \cdot (A_0 + A_1)$$

$$F_2 = \frac{n'}{2\pi} \cdot \tan^{-1} A_2$$

$$A_0 = m' \cdot \ln \frac{(1 + \sqrt{m'^2 + 1}) \sqrt{m'^2 + n'^2}}{m' (1 + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1})}$$

$$A_1 = \ln \frac{(m' + \sqrt{m'^2 + 1}) \sqrt{1 + n'^2}}{m' + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}}$$

$$A_2 = m' \cdot \frac{m'}{n' \cdot \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}}$$

I_f : Facteur de profondeur (Fox, 1948) = $f\left(\frac{D_f}{B}, \mu_s, \frac{L}{B}\right)$

α : Facteur dépendant de la localisation où est calculé le tassement

Au centre de la formation

$$\alpha = 4$$

$$m' = \frac{L}{B}$$

$$n' = \frac{H}{B/2}$$

Au bord de la fondation

$$\alpha = 1$$

$$m' = \frac{L}{B}$$

$$n' = \frac{H}{B}$$

Les valeurs de F_1 et F_2 dépendant de m' et n' et les valeurs du facteur I_f en fonction de $\frac{L}{B}$, $\frac{D_f}{B}$ et de μ_s et ne sont disponibles dans l'ouvrage « Principles of Geotechnical Engineering » (Braja M. Das, 2014).

Le tassement rigide peut être estimé à partir du tassement souple au centre de la fondation :

$$S_e(\text{rigide}) \approx 0,93 \cdot S_e(\text{flexible, centre})$$

Les réservoirs sont des structures flexibles et la transmission des charges vers leurs fondations peut être considérée comme uniformément distribuée.

Pour une charge uniformément répartie sur une surface circulaire sur un matériau homogène de profondeur infinie, la théorie élastique montre que le tassement au centre de la fondation est proche du double du tassement sur le bord. Mais, en pratique, on peut trouver des tassements dont le maximum s'écarte du centre, dépendant de l'épaisseur de la couche compressible, de la dimension de la fondation et de la non-homogénéité de la masse du sol. (Rosenberg & L. Journeaux, 1982)

2.2 MÉTHODE DE SCHMERTMAN ET HARTMAN

La méthode de Schmertman et Hartman de 1978 permet le calcul de tassement pour des fondation superficielle sur divers sols et stratifications.

L'expression du tassement élastique de cette méthode est la suivante :

$$S_e = C_1 C_2 (\bar{q} - q) \sum \left(\frac{I_{z,i}}{E_{s,i}} \right) \Delta z_i [m]$$

Où

- I_z : Facteur d'influence de la contrainte

Pour fondations circulaires ou carrées

$$I_z = 0,1 \text{ en } z = 0$$

$$I_z = 0,5 \text{ en } z = 0,5 B$$

$$I_z = 0 \text{ en } z = 2 B$$

Pour d'autres fondations tel que $\frac{L}{B} > 10$

$$I_z = 0,2 \text{ en } z = 0$$

$$I_z = 0,5 \text{ en } z = 0,5 B$$

$$I_z = 0 \text{ en } z = 4 B$$

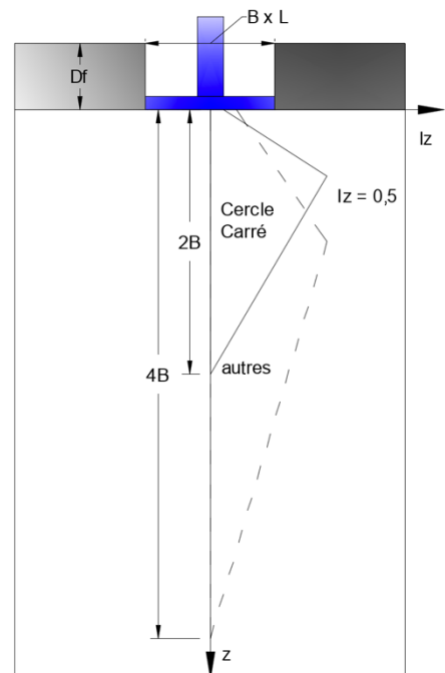


Figure 90 : Méthode de Schmertman et Hartman

La valeur de I_z doit être déterminée à mi-hauteur de chaque couche en générant un diagramme de valeur de I_z .

- C_1 : Facteur de correction de profondeur des fondations enfouies

$$C_1 = 1 - 0,5 \frac{q}{(\bar{q} - q)}$$

- C_2 : Facteur de correction pour tenir compte du fluage dans le sol

$$C_2 = 1 + 0,2 \log \left(\frac{t}{0,1} \right)$$

- t [année] : Temps
- L [m] : Longueur de la fondation
- B [m] : Largeur de la fondation
- E_s [MPa] : Module de Young élastique

$E_s = 2,5 \cdot q_c$: pour des fondations circulaires et carrées

$E_s = 3,5 \cdot q_c$: pour des fondations en semelles filantes

$E_s = 3,5 \cdot q_c$: pour des fondations

- q_c [kPa] : Résistance de pénétration au cône du sol
- $\bar{q}$ [kPa] : Contrainte uniformément répartie sur la surface de fondation
- $q = \gamma D_f$ [kPa] : Contrainte des terres au-dessus de la fondation
- D_f [m] : Profondeur de la fondation
- Δz [m] : Profondeur de calcul

3 ANNEXE 3 : RÉSULTATS DES ANALYSES NUMÉRIQUES EN FONDATIONS MIXTES

3.1 VARIATIONS DU NOMBRE DE PIEUX

Sol réf	Lp réf	dp réf	s ref	n variable	référence			
Krs=0,001 ; s=3d								
Nombre de pieux n	23	20	17	15	12	10	5	0
agr	0,98	0,73	0,52	0,4	0,25	0,16	0,03	0
nL	460	400	340	300	240	200	100	0
centre	0,0539	0,0564	0,0596	0,0650	0,0694	0,0723	0,0792	0,0905
bord	0,0385	0,0474	0,0538	0,0569	0,0602	0,0612	0,0656	0,0630
tassement différentiel	0,0153	0,0090	0,0058	0,0081	0,0093	0,0111	0,0136	0,0275
tassement / tassement réf radier	0,5577	0,3285	0,2121	0,2943	0,3368	0,4045	0,4951	1

Sol réf	Lp réf	dp réf	s= 2s réf	n variable			
Krs=0,001 ; s=6d							
attention hors du critère de équivalence série de pieux en mur							
Nombre de pieux n	19	17	15	11	9	5	0
n par coté	10	9	8	6	5	3	0
agr	0,66	0,52	0,4	0,2	0,13	0,03	0
nL	200	180	160	120	100	60	0
centre	0,0539	0,0565	0,0624	0,0690	0,0725	0,0788	0,0905
bord	0,0453	0,0502	0,0538	0,0586	0,0605	0,0648	0,0630
tassement différentiel	0,0085	0,0063	0,0085	0,0104	0,0120	0,0140	0,0275
tassement / tassement réf radier	0,3107	0,2288	0,3099	0,3780	0,4358	0,5093	1

3.2 VARIATIONS DE LA LONGUEUR DES PIEUX

Sol réf	L variable	dp réf	s ref	n =	15
Longueur de pieux	20	15	10	5	0
agr		0,4			
nL	300	225	150	75	0
centre	0,06500	0,00542	0,00564	0,00487	0,09045
bord	0,05693	0,00360	0,00280	0,00029	0,06296
tassement différentiel	0,00807	0,00181	0,00285	0,00458	0,02749
tassement / tassement réf radier	0,29356	0,06599	0,10349	0,16652	1
longueur relative	0,5	0,375	0,25	0,125	0

SOL RÉF	L VARIABLE	DP RÉF	S REF	N =	10
LONGUEUR DE PIEUX	20	15	10	5	0
AGR					0,16
NL	200	150	100	50	0
CENTRE	0,07227	0,00482	0,00976	0,01497	0,09045
BORD	0,06161	0,00082	0,00044	0,00035	0,06296
TASSEMENT DIFFÉRENTIEL	0,01066	0,00400	0,00932	0,01462	0,02749
TASSEMENT / TASSEMENT RÉF RADIER	0,38778	0,14568	0,33891	0,53179	1
LONGUEUR RELATIVE	0,5	0,375	0,25	0,125	0

SOL REF	L VARIABLE	DP REF	S REF	N =	20
LONGUEUR DE PIEUX	20	15	10	5	0
AGR	0,73				
NL	400	300	200	100	0
CENTRE	0,0566	0,0653	0,0056	0,0093	0,0905
BORD	0,0476	0,0567	0,0030	0,0052	0,0630
TASSEMENT DIFFERENTIEL	0,0090	0,0086	0,0026	0,0041	0,0275
TASSEMENT / TASSEMENT REF RADIER	0,3259	0,3128	0,0953	0,1484	1
LONGUEUR RELATIVE	0,5	0,375	0,25	0,125	0

SOL RÉF	L VARIABLE	DP RÉF	S REF	N =	23
LONGUEUR DE PIEUX	20	15	10	5	0
AGR	0,98				
NL	460	345	230	115	0
CENTRE	0,05385	0,06304	0,07145	0,07973	0,09045
BORD	0,03852	0,04775	0,05616	0,06437	0,06296
TASSEMENT DIFFÉRENTIEL	0,01533	0,01529	0,01529	0,01536	0,02749
TASSEMENT / TASSEMENT RÉF RADIER	0,55766	0,55620	0,55620	0,55875	1
LONGUEUR RELATIVE	0,5	0,375	0,25	0,125	0

3.3 VARIATIONS DE LONGUEURS MULTIPLES DES PIEUX

SOL RÉF	L VARIABLE	DP RÉF	S REF	N =	20	
	L1	15	L2	20	L3	Variable
	n1	10	n2	5	n3	5
L3	20	15	10	5	0	
AGR	0,73				0,4	
NL	350	325	300	275	250	
CENTRE	0,0566	0,0057	0,0055	0,0030	0,0650	
BORD	0,0476	0,0030	0,0021	0,0002	0,0569	
TASSEMENT DIFFÉRENTIEL	0,0090	0,0027	0,0034	0,0028	0,0081	
TASSEMENT / TASSEMENT RÉF RADIER	0,3259	0,0971	0,1227	0,1014	0,2936	

SOL RÉF	L VARIABLE	DP RÉF	S REF	N =	15	
	L1	15	L2	20	L3	Variable
	n1	5	n2	5	n3	5
L3	20	15	10	5	0	
AGR	0,73				0,4	
NL	275,0000	250,0000	225,0000	200,0000	175,0000	
CENTRE	0,0696	0,0696	0,0693	0,0675	0,0723	
BORD	0,0620	0,0621	0,0629	0,0623	0,0616	
TASSEMENT	0,0076	0,0075	0,0064	0,0052	0,0107	
DIFFÉRENTIEL						
TASSEMENT /	0,2754	0,2717	0,2328	0,1884	0,3878	
TASSEMENT RÉF						
RADIER						

3.4 VARIATIONS DE L'INCLINAISON DE PIEUX

	ANGLE VARIABLE	10	L	20,30853224
N/NREF	1	0,75	0,5	0,25
N =	23	15	8	0
AGR	0,98	0,3969	0,099225	0
NL	467,0962	304,6279836	162,4683	0
CENTRE	0,04347	0,005709	0,00546	0,002968
BORD	0,03382	0,00304	0,002086	0,00018
TASSEMENT DIFFÉRENTIEL	0,00965	0,002669	0,003374	0,002788
TASSEMENT / TASSEMENT RÉF	0,351037	0,097089851	0,122736	0,101418698
RADIER				

L	20	20,076	20,30	20,7055	21,283	23,094	28,2842	40
ANGLE	0	5	10	15	20	30	45	60
AGR	0,98							
NL	460	461,75	467,096	476,227	489,521	531,162	650,538	920
CENTRE	0,05385	0,04809	0,04347	0,03975	0,0368	0,03261	0,02918	0,02764
BORD	0,03852	0,03591	0,03382	0,03202	0,03063	0,02848	0,0266	0,02535
TASSEMENT	0,01533	0,01218	0,00965	0,00773	0,00617	0,00413	0,00258	0,00229
DIFFÉRENTIEL								
TASSEMENT /	0,557657	0,4430	0,351037	0,28119	0,22444	0,1502	0,09385	0,08330
TASSEMENT RÉF RADIER								
TAUX D'AMÉLIORATION	0	0,205479	0,370515	0,495759	0,59752	0,73059	0,83170	0,8506

3.5 VARIATIONS DE L'ESPACEMENT ET DU DIAMÈTRE DES PIEUX EN KRS =0,001

SOL RÉF	L VARIABLE	DP RÉF	S/D =3	S=0,9	D=0,3
LP	20	15	10	5	0
AGR	0,95				0,4
NL	460	345	230	115	0
CENTRE	0,05385	0,06304	0,07145	0,07973	0,09053
BORD	0,03839	0,04775	0,05622	0,06452	0,06309
TASSEMENT DIFFÉRENTIEL	0,01546	0,01529	0,01523	0,01521	0,02744
TASSEMENT / TASSEMENT RÉF RADIER	0,562386	0,556202255	0,55402	0,553292106	0,998181157

SOL RÉF	L VARIABLE	DP RÉF	S/D =3	S=1,5	D=0,5
LP	20	15	10	5	0
AGR	0,95				0,4
NL	280	210	140	70	0
CENTRE	0,05314	0,06234	0,07075	0,07876	0,09045
BORD	0,03937	0,04902	0,05799	0,0663	0,06277
TASSEMENT DIFFÉRENTIEL	0,01377	0,01332	0,01276	0,01246	0,02768
TASSEMENT / TASSEMENT RÉF RADIER	0,500909	0,484539833	0,464169	0,453255729	1,006911604

SOL RÉF	L VARIABLE	DP RÉF	S/D =3	S=3	D=1
LP	20	15	10	5	0
AGR	0,95				0,4
NL	140	105	70	35	0
CENTRE	0,05429	0,0635	0,0717	0,0784	0,09045
BORD	0,04453	0,0545	0,0633	0,0697	0,06277
TASSEMENT DIFFÉRENTIEL	0,00976	0,00901	0,00835	0,0087	0,02768
TASSEMENT / TASSEMENT RÉF RADIER	0,355038	0,32775	0,303747	0,31647	1,0069

3.6 VARIATIONS DE L'ESPACEMENT ET DU DIAMÈTRE DES PIEUX EN KRS =0,01

D=20	L VARIABLE	DP RÉF	S/D =3	S=0,9	0,3	N =	11
LP	20	15	10	5	0		
AGR	0,81						
NL	220	165	110	55	0		
CENTRE	0,02625	0,02982	0,03696	0,04461	0,05361		
BORD	0,02207	0,02529	0,03267	0,04091	0,04287		
TASSEMENT	0,00418	0,00453	0,00429	0,0037	0,01074		
DIFFÉRENTIEL							
TASSEMENT / TASSEMENT RÉF RADIÉ	0,152055	0,164787195	0,156057	0,134594398	0,390687523		

D=20	L VARIABLE	DP RÉF	S/D =3	S=1,5	0,5	N =	7
LP	20	15	10	5	0		
AGR	0,81						
NL	140	105	70	35	0		
CENTRE	0,02592	0,02942	0,03667	0,04417	0,05362		
BORD	0,02213	0,02541	0,03304	0,04104	0,04263		
TASSEMENT	0,00379	0,00401	0,00363	0,00313	0,01099		
DIFFÉRENTIEL							
TASSEMENT / TASSEMENT RÉF RADIÉ	0,137868	0,145871226	0,132048	0,113859585	0,399781739		

D=20	L VARIABLE	DP RÉF	S/D =3	S=3	1	N =	4
LP	20	15	10	5	0		
AGR	0,81						
NL	80	60	40	20	0		
CENTRE	0,02588	0,02914	0,03614	0,04416	0,05362		
BORD	0,02242	0,02551	0,03265	0,04091	0,04263		
TASSEMENT	0,00346	0,00363	0,00349	0,00325	0,01099		
DIFFÉRENTIEL							
TASSEMENT / TASSEMENT RÉF RADIÉ	0,125864	0,132048017	0,126955	0,118224809	0,399781739		

3.7 VARIATIONS DE L'ESPACEMENT ET DU DIAMÈTRE DES PIEUX EN KRS =0,1

D=10	L VARIABLE	DP RÉF	S/D =3	S=0,9	0,3	N =	6
LP	20	15	10	5	0		
AGR	0,81						
NL	120	90	60	30	0		
CENTRE	0,01073	0,01217	0,0143 8	0,0205	0,02843		
BORD	0,009616	0,0109	0,0129 5	0,01916	0,02613		
TASSEMENT DIFFÉRENTIEL	0,001114	0,00127	0,0014 3	0,00134	0,0023		
TASSEMENT / TASSEMENT RÉF RADIER	0,040524	0,0461986 18	0,0520 19	0,0487449 98	0,0836667 88		

D=10	L VARIABLE	DP RÉF	S/D =3	S=1,5	0,5	N =	4
LP	20	15	10	5	0		
AGR	0,81						
NL	80	60	40	20	0		
CENTRE	0,01069	0,01206	0,01417	0,02032	0,02843		
BORD	0,009677	0,01099	0,01298	0,01922	0,02613		
TASSEMENT DIFFÉRENTIEL	0,001013	0,00107	0,00119	0,0011	0,0023		
TASSEMENT / TASSEMENT RÉF RADIER	0,03685	0,038923245	0,043288	0,040014551	0,083666788		

D=10	L VARIABLE	DP RÉF	S/D =3	S=3	1	N =	2
LP	20	15	10	5	0		
AGR	0,36						
NL	40	30	20	10	0		
CENTRE	0,01129	0,01298	0,0163 3	0,02332	0,02843		
BORD	0,01098	0,01272	0,0159 4	0,02263	0,02613		
TASSEMENT DIFFÉRENTIEL	0,00031	0,00026	0,0003 9	0,00069	0,0023		
TASSEMENT / TASSEMENT RÉF RADIER	0,011277	0,009457 985	0,0141 87	0,025100 036	0,083666 788		

4 ANNEXE 4 : RÉSULTATS DES ANALYSES NUMÉRIQUES EN FONDATIONS PROFONDES SUR GROUPE DE PIEUX

Généralités pour tous les cas

- $\frac{s}{d} = 3$
- $d_p = d_{p-réf} = 0,3 [m]$
- $h = 0,5 [m]$
- sol de référence

4.1 VARIATION DE LA LONGUEUR DES PIEUX EN KRS =0,001

FP1	KR=	0,001	B=40	L VARIABLE	N = 23
LONGUEUR DE PIEUX	20	15	10	5	0
AGR	0,98				
NL	460	345	230	115	0
CENTRE	0,05487	4,14E-03	0,00708	0,009499	0,01725
BORD	0,03931	0,002229	0,003958	0,006427	0,01048
TASSEMENT	0,01556	0,001909	0,003122	0,003072	0,00677
DIFFÉRENTIEL					
TASSEMENT /	0,566024009	0,06944343	0,11356857	0,11174973	0,24627137
TASSEMENT RÉF RADIER					

4.2 VARIATION DE LA LONGUEUR DES PIEUX EN KRS =0,01

FP2	KR=	0,01	B=20	L VARIABLE	SOL RÉF	N = 11
LONGUEUR DE PIEUX	20	15	10	5	0	
AGR	0,98					
NL	220	165	110	55	0	
CENTRE	0,02684	1,17E-03	5,45E-03	0,01173	0,02561	
BORD	0,02303	0,0004277	0,003957	0,009369	0,0176	
TASSEMENT	0,00381	0,0007443	0,001496	0,002361	0,00801	
DIFFÉRENTIEL						
TASSEMENT /	0,138595853	0,0270753	0,0544197	0,0858857	0,29137868	
TASSEMENT RÉF RADIER						

4.3 VARIATION DE LA LONGUEUR DES PIEUX EN $KRS = 0,1$

FP3	KR=	0,1	B=10	L VARIABLE	SOL RÉF	N = 6
LONGUEUR DE PIEUX	20	15	10	5	0	
AGR	0,98					
NL	120	90	60	30	0	
CENTRE	0,01097	1,31E-03	1,35E-03	4,97E-03	0,02495	
BORD	0,01	0,0001684	0,001125	0,004669	0,02388	
TASSEMENT	0,00097	0,0011386	0,000226	0,000298	0,00107	
DIFFÉRENTIEL						
TASSEMENT /	0,0352855	0,0414187	0,00822117	0,01084031	0,03892324	
TASSEMENT RÉF RADIER						

4.4 VARIATION DE LONGUEURS MULTIPLES DES PIEUX

SOL RÉF	L VARIABLE	DP RÉF	S REF	N = 2	3	TASSEMENT					
	n1	6	n2	6	n	5	n4	6	Max	min	Dif
					3						
CAS 1	L1	5	L2	10	L3	15	L4	20	0,06238	0,03 894	0,02 344
CAS 2	L1	10	L2	10	L3	15	L4	20	0,06296	0,03 911	0,02 385
CAS 3	L1	15	L2	15	L3	15	L4	20	0,06432	0,03 959	0,02 473

