

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou
Faculté du génie de la construction
Département de génie civil



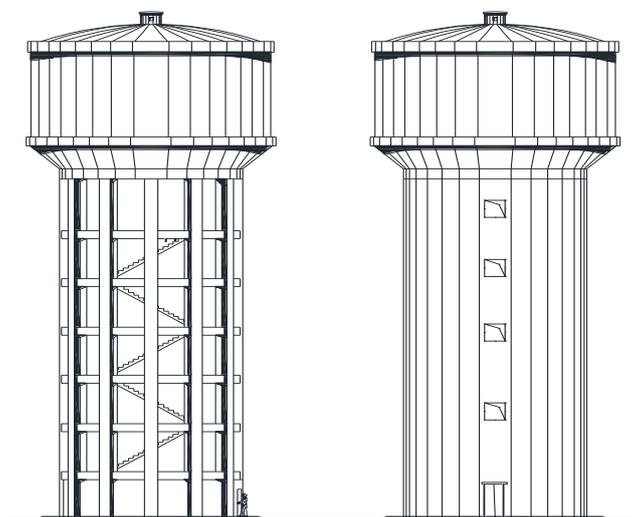
Mémoire de master

Spécialité : Génie civil

Option : constructions hydrauliques et aménagements

THEME :

*Contribution au choix du type de réservoir surélevé en fonction
du site d'implantation et de la zone*



Proposé et dirigé par :

Mr HAMMOUM Hocine

Présenté par :

- **KOUCHAH Karim**
- **MORSLI Sabrina**

Soutenu à l'UMM TO le : 29 juin 2014

SOMMAIRE :

	Page
Liste des figures	
Liste des tableaux.....	
Résumé.....	
Abstract	
Introduction générale	1
 Chapitre 1 : Synthèse bibliographique.	
Introduction	3
1.1. Choix du contreventement	3
1.2. Le Règlement Parasismique Algérien (RPA)	8
1.3. L'Eurocode 8.....	8
1.4. American Concrete Institute (ACI).....	9
1.5. Fascicule 74 « Construction des réservoirs en béton »	9
Conclusion	10
 Chapitre 2 : Etude au séisme des réservoirs surélevés.	
Introduction.....	11
2.1. Méthode de calcul	12
2.2. Evaluation de la force sismique	12
2.2.1. Calcul de l'accélération sismique « S_{ai} ».....	13
2.3. Effet hydrodynamique.....	18
2.3.1. Calcul de la masse passive M_i	19
2.3.2. Calcul de la masse active M_0	20
2.3.3. Calcul de la pulsation fondamental de vibration du liquide ω	20
2.3.4. Calcul des constantes de raideur « K_1 » et « K_0 ».....	20
2.3.5. Calcul des pulsations propres ω_1 et ω_2 du 1er et 2eme mode de vibration	21
2.3.6. Détermination des modes propres	23
2.4. Les déplacements verticaux des vagues.....	24
Conclusion	24

Chapitre 3 : Calcul hydrodynamique.

Introduction.....	25
3.1. Dimensions des deux réservoirs.....	26
3.2. Calcul du volume d'eau utile	27
3.3. Calcul du poids de l'ouvrage.....	28
3.3.1. Poids de la cuve	28
3.3.2. Poids du support	35
3.3.3. Calcul du poids du radier	36
3.4. Calcul du centre de gravité de la cuve par rapport au radier.....	37
3.5. Calcul hydrodynamique	39
3.5.1. Réservoir posé sur des pilotis	39
3.5.1.1. Zone de forte sismicité « III » (forte sismicité).....	45
a. Site très meuble "S4"	45
b. Site meuble "S3".....	47
c. Site ferme "S2"	48
d. Site rocheux "S1"	49
3.5.1.2. Zone sismique « IIb » (moyenne sismicité).....	50
a. Site très meuble "S4"	50
b. Site meuble "S3"	51
c. Site ferme "S2"	52
d. Site rocheux "S1"	53
3.5.1.3. Zone sismique « IIa » (moyenne sismicité)	54
a. Site très meuble "S4"	54
b. Site meuble "S3"	55
c. Site ferme "S2"	56
d. Site rocheux "S1"	57
3.5.1.4. Zone sismique « I » (faible sismicité).....	58
a. Site très meuble "S4"	58
b. Site meuble "S3"	59
c. Site ferme "S2"	60
d. Site rocheux "S1"	61
3.5.1.5. Récapitulatif des résultats des forces dues au séisme du réservoir sur pilotis ..	62
3.5.1.6. Calcul du point d'application des forces F_0 et F_1 par rapport au radier.....	63

3.5.2. Réservoir sur tour	63
3.5.2.1. Zone de forte sismicité « III » (forte sismicité).....	69
a. Site très meuble "S4"	69
b. Site meuble "S3"	71
c. Site ferme "S2"	72
d. Site rocheux "S1"	73
3.5.2.2. Zone sismique « IIb » (moyenne sismicité).....	74
a. Site très meuble "S4"	74
b. Site meuble "S3"	75
c. Site ferme "S2"	76
d. Site rocheux "S1"	77
3.5.2.3. Zone sismique « IIa » (moyenne sismicité)	78
a. Site très meuble "S4"	78
b. Site meuble "S3"	79
c. Site ferme "S2"	80
d. Site rocheux "S1"	81
3.5.2.4. Zone sismique « I » (faible sismicité).....	82
a. Site très meuble "S4"	82
b. Site meuble "S3"	83
c. Site ferme "S2"	84
d. Site rocheux "S1"	85
3.5.2.5. Récapitulatif des résultats des forces dues au séisme du réservoir sur tour	86
3.5.2.6. Calcul du point d'application des forces F0 et F1 par rapport au radier.....	87
Conclusion	87

Chapitre 4 : Discussion et interprétation des résultats.

Introduction	88
4.1. Calcul du facteur de sécurité au glissement	88
4.1.1. Effet du site d'implantation.	90
4.1.2. Effet de la zone sismique	92
4.1.3. Effet du contreventement.....	94
4.2. Calcul du facteur de sécurité au renversement.....	96
4.2.1. Effet du site d'implantation	98

4.2.2. Effet de la zone sismique	100
4.2.3. Effet de contreventement	102
4.3. Calcul des contraintes internes du support des deux réservoirs	104
4.3.1. Réservoir posé sur tour	104
4.3.2. Réservoir posé sur des pilotis	106
4.3.3. Vérification des contraintes admissible	108
4.3.3.1. Contrainte admissible du béton à la compression $\bar{\sigma}_{bc}$	108
4.3.3.2. Contrainte admissible du béton à la traction $\bar{\sigma}_{bt}$	116
4.4. Ferrailage du support des deux réservoirs.....	122
4.4.1. Réservoir posé sur tour	122
4.4.2. Réservoir posé sur des pilotis	126
4.5. Calcul du coût des aciers des deux réservoirs.....	128
4.5.1. Réservoir posé sur tour	128
4.5.2. Réservoir posé sur des pilotis	130
4.6. Calcul du coût du coffrage	131
4.6.1. Réservoir posé sur tour	131
4.6.2. Réservoir posé sur des pilotis	132
4.7. Calcul du montant total coffrage et aciers.....	132
4.7.1. Réservoir posé sur tour	132
4.7.2. Réservoir posé sur des pilotis	132
4.8. Discussion et interprétation des résultats du montant total.....	133
4.8.1. Comparaison du montant total (coffrage + acier) de la tour et celui des pilotis...	135
Conclusion	137
Conclusion générale	138

Liste des figures :

	Page
Figure 1.2 : Spectres de réponse correspondant à divers degrés d'amortissement.....	5
Figure 2.1 : Aperçu de type de ballotement pouvant avoir lieu dans un réservoir de liquide..... (Source : Ibrahim (2005)).....	12
Figure 2.2 : Modèle à deux masses pour les réservoirs surélevés proposées par Housner	18
Figure 2.3 : Modélisation du château d'eau	19
Figure 2.4 : Modélisation physique.....	20
Figure 2.5 : Modèle de calcul.....	20
Figure 3.1 : Dimensions de la cuve	27
Figure 3.2 : Dimensions de lanterneau.....	28
Figure 3.3 : Dimensions de la coupole supérieure	29
Figure 3.4 : Dimensions de la coupole inférieure	30
Figure 3.5 : Dimensions de la ceinture supérieure	31
Figure 3.6 : Dimensions de la ceinture intermédiaire	31
Figure 3.7 : Dimensions de la ceinture inférieure	32
Figure 3.8 : Dimensions du cylindre	33
Figure 3.9 : Dimensions du cône de réduction.....	33
Figure 3.10 : Dimensions de la cheminée	34
Figure 3.11 : Dimensions des poteaux	35
Figure 3.12 : Dimension des entretoises	35
Figure 3.13 : Dimensions de la tour	36

Figure 3.14 : Dimensions du radier	36
Figure 3.15 : Représentation d'un poteau dans le repère passant par son centre de gravité G....	41
Figure 4.16 : Représentation des modes propres du réservoir sur pilotis	43
Figure 3.17 : Représentation des forces sismique du réservoir sur pilotis.....	46
Figure 3.18 : Représentation des forces d'impulsion et d'oscillations maximale du réservoir .. posé sur des pilotis	62
Figure 4.19 : Représentation des modes propres du réservoir sur tour.....	67
Figure 3.20 : Représentation des forces sismique du réservoir sur tour	70
Figure 3.21 : Représentation des forces d'impulsion et d'oscillations maximale du réservoir posé sur tour	86
Figure 4.1 : Représentation des forces horizontales.....	88
Figure 4.2 : Variation du facteur de sécurité au glissement en fonction du site pour chaque.... zone sismique pour le réservoir sur tour	90
Figure 4.3 : Variation du facteur de sécurité au glissement en fonction du site pour chaque.... zone sismique pour le réservoir sur pilotis.....	90
Figure 4.4 : Pourcentage de variation du facteur de sécurité au glissement d'un site à une..... autre sur chaque zone sismique pour les deux réservoirs.....	91
Figure 4.5 : Variation du facteur de sécurité au glissement en fonction de la zone sismique pour chaque site d'implantation du réservoir sur tour.....	92
Figure 4.6 : Variation du facteur de sécurité au glissement en fonction de la zone sismique pour chaque site d'implantation du réservoir sur pilotis	92
Figure 4.7 : Pourcentage de variation du facteur de sécurité au glissement d'une zone	
sismique à une autre pour le réservoir sur tour	93
Figure 4.8 : Pourcentage de variation du facteur de sécurité au glissement d'une zone	
sismique à une autre pour le réservoir sur pilotis.....	93

Figure 4.9 : Variation du facteur de sécurité au glissement en fonction du site d'implantation . pour chaque zone sismique pour les deux réservoirs	94
Figure 4.10 : Rapport entre le facteur de sécurité de glissement de la tour et celui des pilotis ..	95
Figure 4.11 : Variation du facteur de sécurité au renversement en fonction du site..... d'implantation pour chaque zone sismique du réservoir sur tour	98
Figure 4.12 : Variation du facteur de sécurité au renversement en fonction du site..... d'implantation pour chaque zone sismique du réservoir sur pilotis	98
Figure 4.13 : Pourcentage de variation du facteur de sécurité au renversement d'un site à une autre sur chaque zone sismique pour les deux réservoirs	99
Figure 4.14 : Variation du facteur de sécurité au renversement en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique du réservoir sur tour	100
Figure 4.15 : Variation du facteur de sécurité au renversement en fonction du site..... d'implantation pour chaque zone sismique du réservoir sur pilotis	100
Figure 4.16 : Pourcentage de variation du facteur de sécurité au renversement d'une zone sismique à une autre pour le réservoir sur tour	101
Figure 4.17 : Pourcentage de variation du facteur de sécurité au renversement d'une zone sismique à une autre pour le réservoir sur pilotis	101
Figure 4.18 : Variation du facteur de sécurité au renversement en fonction du site..... d'implantation pour chaque zone sismique pour les deux réservoirs	102
Figure 4.19 : Rapport entre le facteur de sécurité au renversement de la tour et celui des..... pilotis.....	102
Figure 4.20 : Variation des contraintes internes de compression dans la tour en fonction du... site d'implantation pour chaque zone sismique	110
Figure 4.21 : Variation des contraintes internes de compression dans le poteau le plus sollicité en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique	110
Figure 4.22 : Pourcentage de variation des contraintes de compression d'un site à une autre ...	

sur chaque zone sismique pour les deux réservoirs.....	111
Figure 4.23 : Variation des contraintes internes de compression dans la tour en fonction de la zone sismique pour chaque site d'implantation.....	112
Figure 4.24 : Variation des contraintes internes de compression dans le poteau le plus sollicité en fonction de la zone sismique pour chaque site d'implantation.....	112
Figure 4.25 : Pourcentage de variation des contraintes de compression d'une zone sismique... à une autre pour le réservoir sur tour.....	113
Figure 4.26 : Pourcentage de variation des contraintes de compression d'une zone sismique... à une autre pour le réservoir sur des pilotis.....	113
Figure 4.27 : Variation des contraintes internes de compression en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique des deux réservoirs	114
Figure 4.28 : Rapport entre les contraintes de compression de la tour et celui des pilotis	115
Figure 4.29 : Variation des contraintes internes de traction dans la tour en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique	117
Figure 4.30 : Variation des contraintes internes de traction dans le poteau le plus sollicité en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique	117
Figure 4.31 : Variation des contraintes internes de traction dans la tour en fonction de la zone sismique pour chaque site d'implantation	118
Figure 4.32 : Variation des contraintes internes de traction dans le poteau le plus sollicité en fonction de la zone sismique pour chaque site d'implantation	118
Figure 4.33 : Pourcentage de variation des contraintes de traction d'une zone sismique à une . autre pour le réservoir sur tour	119
Figure 4.34 : Pourcentage de variation des contraintes de traction d'une zone sismique à une . autre pour le réservoir sur des pilotis	119
Figure 4.35 : Variation des contraintes internes de traction en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique des deux réservoirs.....	120

Figure 4.36 : Rapport entre les contraintes de traction de la tour et celle des pilotis	121
Figure 4.37 : Montant total coffrage est aciers pour réservoir sur tour.....	133
Figure 4.38 : Montant total coffrage et aciers pour réservoir sur pilotis.....	133
Figure 4.39 : Taux de croissance du montant total coffrage et acier pour le réservoir sur tour..	134
Figure 4.40 : Taux de croissance du montant total coffrage et acier pour le réservoir sur des... pilotis.....	134
Figure 4.41 : Montant total coffrage et aciers pour la tour et pilotis	135
Figure 4.42 : Variation du pourcentage des coûts (coffrage et aciers) de la tour ; pilotis	136

Liste des tableaux :

	Page
Tableau 2.1 : Valeurs du pourcentage d'amortissement critique ξ (%).....	14
Tableau 2.2 : Valeurs du coefficient de comportement R	14
Tableau 2.3 : Valeurs des pénalités P_q	17
Tableau 2.4 : Valeurs de T_1 et T_2	17
Tableau 2.5 : Coefficient d'accélération de zone A.....	17
Tableau 3.1 : Dimensions des deux réservoirs (sur tour et sur pilotis).....	26
Tableau 3.2 : Calcul du volume d'eau utile dans la cuve	27
Tableau 3.3 : Calcul poids des différents éléments de lanterneau	28
Tableau 3.4 : Calcul poids de la coupole supérieure	29
Tableau 3.5 : Calcul poids de la coupole inférieure.....	30
Tableau 3.6 : Calcul poids de la ceinture supérieure	31
Tableau 3.7 : Calcul Poids de la ceinture intermédiaire	32
Tableau 3.8 : Calcul Poids de la ceinture inférieure	32
Tableau 3.9 : Calcul Poids du cylindre	33
Tableau 3.10 : Calcul Poids du cône de réduction.....	34
Tableau 3.11 : Calcule poids de la cheminée.....	35
Tableau 3.12 : Valeurs de centre de gravité des éléments	37
Tableau 3.13 : Récapitulatif.....	38
Tableau 3.14 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone III, site S4 du réservoir posé sur des pilotis	46

Tableau 3.15 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone III, site S3 du réservoir posé sur des pilotis	47
Tableau 3.16 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone III, site S2 du réservoir posé sur des pilotis	48
Tableau 3.17 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone III, site S1 du réservoir posé sur des pilotis	49
Tableau 3.18 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIb, site S4 du réservoir posé sur des pilotis	50
Tableau 3.19 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIb, site S3 du réservoir posé sur des pilotis	51
Tableau 3.20 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIb, site S2 du réservoir posé sur des pilotis	52
Tableau 3.21 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIb, site S1 du réservoir posé sur des pilotis	53
Tableau 3.22 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIa, site S4 du réservoir posé sur des pilotis	54
Tableau 3.23 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIa, site S3 du réservoir posé sur des pilotis	55
Tableau 3.24 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIa, site S2 du réservoir posé sur des pilotis	56
Tableau 3.25 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIa, site S1 du réservoir posé sur des pilotis	57
Tableau 3.26 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone I, site S4 du réservoir posé sur des pilotis	58
Tableau 3.27 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone I, site S3 du réservoir posé sur des pilotis	59

Tableau 3.28 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone I, site S2 du réservoir posé sur des pilotis	60
Tableau 3.29 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone I, site S1 du réservoir posé sur des pilotis	61
Tableau 3.30 : forces d'impulsion en fonction du site et de la zone sismique pour le réservoir posé sur des pilotis	62
Tableau 3.31 : forces d'oscillations en fonction du site et de la zone sismique pour le réservoir posé sur des pilotis	62
Tableau 3.32 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone III, site S4 du réservoir posé tour	70
Tableau 3.33 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone III, site S3 du réservoir posé tour	71
Tableau 3.34 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone III, site S2 du réservoir posé tour	72
Tableau 3.35 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone III, site S1 du réservoir posé tour	73
Tableau 3.36 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIb, site S4 du réservoir posé tour	74
Tableau 3.37 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIb, site S3 du réservoir posé tour	75
Tableau 3.38 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIb, site S2 du réservoir posé tour	76
Tableau 3.39 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIb, site S1 du réservoir posé tour	77
Tableau 3.40 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIa, site S4 du réservoir posé tour	78

Tableau 3.41 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIa, site S3 du réservoir posé tour	79
Tableau 3.42 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIa, site S2 du réservoir posé tour	80
Tableau 3.43 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIa, site S1 du réservoir posé tour	81
Tableau 3.44 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone I, site S4 du réservoir posé tour	82
Tableau 3.45 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone I, site S3 du réservoir posé tour	83
Tableau 3.46 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone I, site S2 du réservoir posé tour	84
Tableau 3.47 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone I, site S1 du réservoir posé tour	85
Tableau 3.48 : forces d'impulsion en fonction du site et de la zone sismique pour le réservoir posé sur tour	86
Tableau 3.49 : forces d'oscillations en fonction du site et de la zone sismique pour le réservoir posé sur tour	86
Tableau 4.1 : Somme des forces horizontales pour les deux réservoirs	89
Tableau 4.2 : Facteurs de sécurité de glissement pour les deux réservoirs.....	89
Tableau 4.3 : Moments renversants M_r pour les deux réservoirs	96
Tableau 4.4 : Facteurs de sécurité de renversement F_s	97
Tableau 4.5 : Valeurs du centre de gravité des éléments	104
Tableau 4.6 : Moment fléchissant pour le réservoir sur tour	105
Tableau 4.7 : Contraintes de compression et de traction dans la tour.....	106

Tableau 4.8 : Moment fléchissant pour le réservoir sur pilotis.....	107
Tableau 4.9 : L'effort normal maximum dû au séisme P_{max} sur le poteau le plus sollicité .	107
Tableau 4.10 : L'effort normal de traction T en tonnes pour le réservoir sur pilotis.....	108
Tableau 4.11 : L'effort normal de compression N_c en tonnes pour le réservoir sur pilotis	108
Tableau 4.12 : Contraintes de compression et traction des pilotis.....	109
Tableau 4.13 : L'effort normal de traction T en tonnes pour le réservoir sur tour	122
Tableau 4.14 : Section des armatures longitudinales pour une bande de 1 mètre de la tour	123
Tableau 4.15 : Choix des sections d'armatures pour une bande de 1 mètre de la tour.....	124
Tableau 4.16 : Armatures longitudinales pour toute la tour	125
Tableau 4.17 : Armatures transversales pour la bande de un mètre	125
Tableau 4.18 : Armatures transversale pour toute la tour	126
Tableau 4.19 : Section d'armatures longitudinales du poteau le plus sollicité.....	126
Tableau 4.20 : Choix des sections d'armatures longitudinales du poteau le plus sollicité..	127
Tableau 4.21 : Sections d'armatures longitudinales pour tous les poteaux	127
Tableau 4.22 : Sections d'armatures transversales des poteaux	128
Tableau 4.23 : Volume des aciers longitudinaux de la tour.....	128
Tableau 4.24 : Volumes des aciers transversaux de la tour	129
Tableau 4.25 : Volume totale des aciers de la tour	129
Tableau 4.26 : Montant total des aciers pour la tour.....	130
Tableau 4.27 : Volumes des aciers longitudinaux pour les pilotis	130

Tableau 4.28 : volume total des aciers pour les pilotis	131
Tableau 4.29 : Montant total des aciers pour les pilotis	131
Tableau 4.30 : Montant total coffrage et aciers de la tour	132
Tableau 4.31 : Montant total coffrage et aciers des pilotis	132
Tableau 4.32 : Choix technique et choix économique du réservoir surélevé en fonction de la zone sismique	137
Tableau 5.1 : Choix technico-économique du réservoir surélevé en fonction de la zone... sismique.....	141

Dans les régions de forte sismicité et à forte densité de population, une rupture de réservoir suite à un tremblement de terre, peut causer d'énormes dommages et de grandes pertes en biens et en vies humaines. Par ailleurs, durant l'après séisme, il est primordial que les réservoirs d'eau potable soient préservés pour leur rôle crucial dans l'organisation des premiers secours.

La protection parasismique nécessite un choix judicieux du système de contreventement, en effet, l'efficacité du comportement parasismique est directement liée à la nature du système porteur. Un contreventement judicieux permet d'assurer la stabilité lors du séisme et de minimiser les coûts de la protection parasismique. Les ingénieurs dans les bureaux d'études sont confrontés justement à ce choix, dans quel cas il serait convenable d'opter pour un réservoir posé sur tour et dans quelle situation devons-nous opter pour un réservoir posé sur des pilotis ?

A travers une analyse hydrodynamique et de stabilité de deux types de réservoirs surélevés de même capacité (l'un posé sur pilotis et l'autre sur voile), nous avons pu aboutir à proposer directement le choix de contreventement adéquat pour chaque zone sismique. Ce qui est un grand pas dans le choix du type de contreventement pour les réservoirs surélevés.

In areas of high seismicity and high population density, a tank collapse caused by an earthquake, can cause important damage and great loss and human lives. Moreover, during the post earthquake, it is important that drinking water tanks are preserved for their crucial role in the organization of first aid.

Seismic protection requires a judicious choice of bracing system, in fact, the effectiveness of seismic behavior is directly linked to the nature of the support system, a wise bracing ensures stability during the earthquake and minimize costs seismic protection. Engineers in design offices are facing precisely to the judicious choice of the type of bracing, in which case it would be advisable to opt for a tank placed on tower and in what situation should we opt for a tank on columns ?

Through hydrodynamic analysis, and stability of both types of elevated tanks of the same capacity (one set on columns and one on tower), we could reach to offer choice of adequate bracing directly for each seismic zone. This is a big step in choosing the type of bracing for elevated tanks.

Dans les régions de forte sismicité et à forte densité de population, une rupture de réservoir suite à un tremblement de terre, peut causer d'énormes dommages et de grandes pertes en biens et en vies humaines. Par ailleurs, durant l'après séisme, il est primordial que les réservoirs d'eau potable soient préservés pour leur rôle crucial dans l'organisation des premiers secours, c'est pour cette raison que le Règlement Parasismique Algérien (RPA) classe les châteaux d'eau et réservoirs de grande à moyenne importance dans le groupe des ouvrages de grande importance 1B.

La protection parasismique nécessite un choix judicieux du système de contreventement, en effet, l'efficacité du comportement parasismique est directement liée à la nature du système porteur. Un contreventement judicieux permet d'assurer la stabilité lors du séisme et de minimiser les coûts de la protection parasismique. Les ingénieurs dans les bureaux d'études sont confrontés justement à ce choix. Dans quel cas il serait convenable d'opter pour un réservoir posé sur tour et dans quelle situation devons-nous opter pour un réservoir posé sur des pilotis ?

Nous tacherons à travers ce mémoire à proposer une aide à la décision aux ingénieurs dans les bureaux d'études qui sont confrontés à faire un choix pour le type de contreventement des réservoirs surélevés pour un site d'implantation et une zone sismique donnés,

La démarche à adopter pour résoudre ce problème est illustré en conclusion du chapitre 1.

Pour mener à terme ce travail, nous avons structuré le manuscrit en quatre chapitres illustrés ci-dessus :

Au premier chapitre, nous exposerons les études antérieures concernant le choix du type de contreventement pour le bâtiment, ainsi que les différents règlements parasismiques.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les différentes étapes de calcul des réservoirs surélevés vis-à-vis de l'action sismique.

Le troisième chapitre sera consacré au calcul hydrodynamique par la méthode citée au chapitre 2 pour les deux types de réservoirs surélevés, le calcul se fera pour les quatre zones sismiques et les différents sols d'implantation pour but d'estimer l'effort dû au séisme.

Dans le dernier chapitre, nous passons à la discussion et l'interprétation des résultats obtenus dans le chapitre précédent pour aboutir au choix du type de réservoir surélevé.

Introduction générale

A la fin de ce travail, nous aboutirons au choix du type de réservoir surélevé en fonction du site d'implantation et de la zone sismique, en souhaitant qu'avec cette contribution, nous pouvons répondre aux préoccupations des ingénieurs dans les bureaux d'études concernant le choix du type de réservoir surélevé convenable pour chaque site et zone sismique.

Introduction :

A défaut de prédire le séisme, la protection des vies et des biens nécessite de concevoir et de construire parasismique. Les règlements de construction en zone sismique donnent les paramètres sismiques, les règles de calcul et les dispositions constructives à adopter pour un comportement sécuritaire lors d'un tremblement de terre. L'obtention d'une structure parasismique nécessite un contreventement efficace, ce dernier est celui qui permet de résister le mieux aux sollicitations sismiques horizontales et verticales.

Ce chapitre a pour but de présenter le contexte général dans lequel s'inscrit le projet de recherche, c'est alors que nous le consacrons à la littérature autour des mots clés suivants : interaction sol-structure, résonance, comportement sismique, choix du réservoir surélevé.

1.1. Choix du contreventement :

Selon **Milan ZACEK**, en l'absence de préoccupations parasismiques, l'ingénieur a souvent le choix entre les systèmes porteurs pour un bâtiment, chaque système porteur présente un degré de rigidité différent, donnant lieu à un amortissement et à une période propre d'oscillation également différente, Sous des charges statiques, ces facteurs n'ont pratiquement aucune importance. En revanche pendant les secousses sismiques, ils influencent favorablement ou défavorablement le comportement de la structure.

Le système porteur est généralement choisi en fonction des divers critères : hauteur de la construction, savoir-faire des entreprises locales ou des constructeurs individuels, disponibilité des matériaux, prix de revient, etc...

En zone sismique, la sismicité de la région et la nature du sol sont des critères essentiels, du moins pour les constructions d'une certaine importance, car une structure qui convient parfaitement pour une zone asismique peut s'avérer incapable de résister à des secousses répétées.

Il ajoute aussi que, pour éviter un effet de résonance avec le sol, les structures flexibles (portiques sans remplissage rigide par exemple) qui ont une longue période propre, ne doivent pas être utilisées sur les sols meubles. La résonance entraîne une amplification considérable des accélérations et, par conséquent, des déformations très importantes, parfois irréversibles, ainsi que la destruction d'éléments non structuraux.

Les constructions flexibles, ne devraient être édifiées que sur les sols durs et fermes. Leurs éléments non structuraux doivent être conçus de manière à tolérer sans dommage les

déformations de la structure principale. Dans le cas d'un bâtiment élevé, il peut être nécessaire de réduire la flexibilité de la structure en rapprochant les poteaux, en augmentant leur section ou par un système de contreventement.

En présence de sol meubles, le recours à des systèmes rigides est impératif (structures en voiles de béton armé, ossatures contreventées par triangulation, etc...). Hormis les constructions en maçonnerie traditionnelle non chaînée et le système en portiques de béton armé comportant des remplissages en maçonnerie, des constructions rigides montrent en général un comportement satisfaisant même sur les sols durs, malgré une amplification des accélérations due à la similitude de leurs périodes propres avec celle du sol.

Par ailleurs, **M.ZACEK** a souligné que, le principe de non-résonance entre le bâtiment et le sol pour éviter l'amplification de l'accélération impose que la période propre de vibration du bâtiment doit être différente de celle du sol, il est donc préférable de construire une structure souple sur un sol dur et inversement une structure rigide sur un sol mou (sauf en cas d'utilisation d'isolateurs). Par exemple une tour flexible de plusieurs dizaines d'étages convient très bien sur un sol rocheux.

L'ingénieur sait évaluer si la construction amplifie les secousses du sol ou non (en se mettant « en résonance ») grâce à l'outil « spectre de réponse du site », et évaluer les niveaux d'accélération possibles dans le bâtiment. Il peut alors calculer les forces qui agiront sur le bâtiment en cas de fortes secousses.

Les accélérations, « en réponse » au séisme, de la structure conditionnent les forces d'inertie qui vont s'appliquer à la structure et auxquelles elle devra résister. La mise en résonance de la structure avec le sol provoque l'amplification du mouvement sismique par la structure, donc des accélérations qu'elle reçoit du sol. Le spectre de réponse d'un site est un outil qui permet d'évaluer cette possible amplification avant le séisme.

La représentation graphique d'un spectre de réponse est construite point par point en faisant varier la fréquence d'un oscillateur à un degré de liberté et en reportant cette fréquence en abscisse et le maximum temporel de la réponse à une sollicitation sismique en ordonnée. On obtient ainsi un spectre de réponse pour un amortissement fixé. Les spectres de réponse élastiques sont très utilisés en ingénierie parasismique.

La période propre d'un bâtiment courant peut être déterminée approximativement en prenant 0.1 s par niveau, prenant l'exemple d'amplification et d'atténuation des accélérations

de deux bâtiments fondés sur un sol dur, le bâtiment A à deux étages et rez-de-chaussée, possède donc une période propre de $T = 0.3$ s, et le bâtiment B à 14 étages et rez-de-chaussée avec une période propre de $T = 1.5$ s.

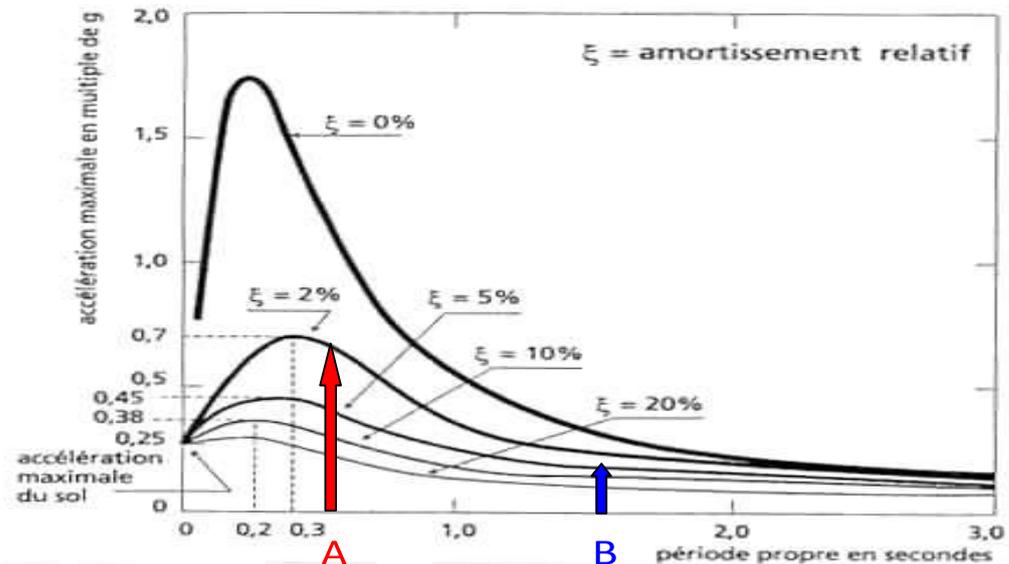


Figure 1.2 : Spectres de réponse correspondant à divers degrés d'amortissement.

Le bâtiment A ($T = 0,3$ s) amplifie les secousses, le bâtiment B ($T = 1,5$ s) les atténue.

Pour éviter la résonance, il convient donc de rechercher, pour le bâtiment, une période propre (des périodes) aussi différente(s) que possible de la (des) période(s) dominante(s) du sol. On peut considérer que sur sols meubles, on devrait opter pour des structures rigides et sur sols fermes ou rocheux pour des structures flexibles (portiques sans murs de remplissage par exemple). Mais il est beaucoup plus judicieux de comparer les périodes du bâtiment et du sol et, si elles sont proches, de les éloigner en intervenant sur la conception de l'ouvrage.

La résonance s'obtient lorsque la fréquence de l'excitation est quasi égale à la fréquence de vibration propre de la structure. Conséquence, la structure entre en harmonie avec l'excitation et vibre. Si la vibration est très courte, la structure pourra se stabiliser du fait de son propre amortissement. Mais par contre si la vibration persiste, à la même fréquence, l'amplitude de vibration aura tendance à augmenter jusqu'à destruction. Ce qu'il faut impérativement éviter en structure.

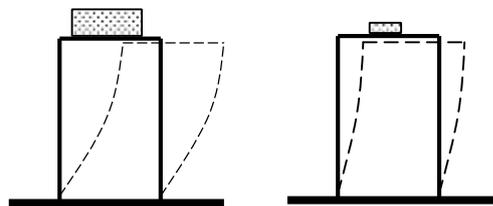
En général, ce sont les premiers modes qui sont les plus importants, pour la simple raison qu'ils donnent les amplitudes les plus importantes donc les premiers modes sont les plus significatifs. Ce sont ces modes qui doivent avoir des fréquences aussi éloignées que possible des fréquences de vibrations sismique.

Pour expliquer Paramètres déterminant la période propre d'un oscillateur simple, **Patricia Balandier** a fait une petite expérience.

L'observation de paires de maquettes (caractérisées comme des oscillateurs simples : quatre poteaux semblables et masse rassemblée dans le plancher infiniment rigide au regard des poteaux, un degré de liberté) oscillant librement après application d'une force en translation permet de mettre aisément en évidence les paramètres de la période propre d'oscillation. On utilise des paires de maquettes semblables en faisant varier un seul paramètre. On déplace leur « plancher » de sa position d'origine, on relâche et on peut mesurer (au moins comparer visuellement) la période d'oscillation de chacune.

1° Expérience :

Masses différentes

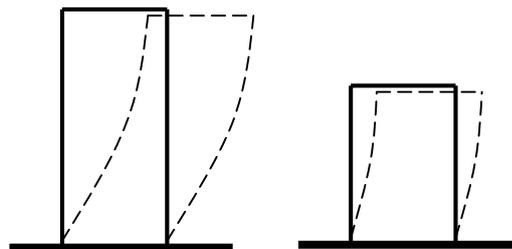


Les deux maquettes sont semblables : même hauteur de poteaux, même section de poteaux, même matériau des poteaux, même type de liaisons (encastremets), mais la masse fixée sur le plancher diffère.

On observe que la maquette dont la masse est plus importante a une période propre d'oscillation plus longue.

2° Expérience :

Hauteurs différentes



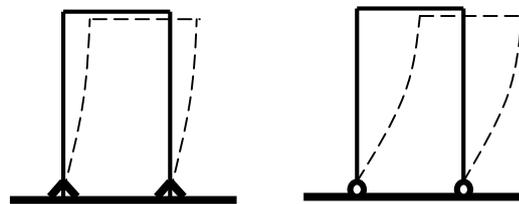
Les deux maquettes sont semblables : même section de poteaux, même matériau des poteaux, même type de liaisons (encastremets), même masse sur le plancher, mais la longueur des poteaux diffère.

On observe que la maquette dont les poteaux sont plus élancés a une période propre d'oscillation plus longue.

3° Expérience :**Sections différentes**

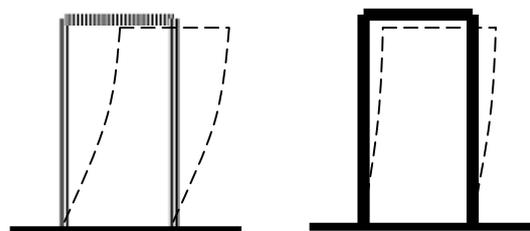
Les deux maquettes sont semblables : même hauteur de poteaux, même matériau des poteaux, même type de liaisons (encastremements), même masse sur le plancher, mais la section des poteaux diffère.

On observe que la maquette dont la section des poteaux est moindre (moindre inertie) a une période propre d'oscillation plus longue.

4° Expérience :**Liaisons au support différentes.**

Les deux maquettes sont semblables : même hauteur de poteaux, même section de poteaux, même matériau des poteaux, même masse sur le plancher, mais le type de liaisons en pied diffère.

On observe que la maquette articulée en pied a une période propre d'oscillation plus longue que la maquette encastree en pied.

5° Expérience :**Matériaux différents**

Les deux maquettes sont semblables : même hauteur de poteaux, même section de poteaux, même type de liaisons (encastremements), même masse sur le plancher mais le matériau des poteaux diffère.

On observe que la maquette dont matériau à un module de déformation moins élevé a une période propre d'oscillation plus longue.

La première expérience démontre que la période propre d'oscillation croît avec les masses mises en mouvement. Les quatre autres expériences montrent que la période propre d'oscillation décroît avec la raideur.

Or le projet architectural va conditionner ces paramètres. Si le programme le permet, le concepteur pourra opter pour un mode constructif et des élancements qui lui permettront « d'éloigner » la construction des périodes dominantes du sol (structures rigides sur sols souples, riches en basses fréquences et structures flexibles sur sols rigides, riches en hautes fréquences).

1.2. Le Règlement Parasismique Algérien (RPA) :

Le RPA classe les châteaux d'eau et réservoirs de grande à moyenne importance dans le groupe 1B (ouvrages de grande importance), c'est-à-dire des ouvrages publics d'intérêt national ou ayant une importance socio-culturelle et économique certaine, et classe les réservoirs surélevés comme des systèmes à pendule inverse. C'est un système où 50% ou plus de la masse est concentrée dans le tiers supérieur de la structure c'est le cas par exemple d'un château d'eau sur pilotis ou d'un réservoir d'eau cylindrique ou torique proéminent sur jupe cylindrique ou conique plus resserrée.

Malgré la révision et les actualisations du RPA à plusieurs reprises (RPA 81, RPA 88, RPA 99 et RPA 2003), les ouvrages hydrauliques en général et les réservoirs de stockage en particulier ne sont pas abordés par le RPA.

Pour tenir compte de l'effet hydrodynamique de l'eau, l'ingénieur civil est conduit à recourir à une approche basée sur des règlements étrangers, pour la conception et le calcul de ces ouvrages, par exemple l'Eurocode 8, ces normes fournissent des formules pour le dimensionnement parasismique des réservoirs et donne des méthodes simplifiées permettant de réaliser une analyse sismique.

1.3. L'Eurocode 8 :

C'est la norme Européenne pour le dimensionnement parasismique des structures du génie civil. Elle est constituée de six parties, la partie 4 traite du dimensionnement parasismique des silos, réservoirs et canalisations. Les réservoirs considérés sont des réservoirs cylindriques et rectangulaires à base fixe ou flexible, les réservoirs à support élèves sont également traités.

La réponse et la stabilité des réservoirs soumis à des actions sismiques sévères, peuvent impliquer des phénomènes d'interaction sol-structure-fluide plutôt complexes qui ne peuvent être réduits facilement à des procédés de dimensionnement simplifiés, Par ailleurs, l'eurocode 8 suggère de modéliser le liquide du réservoir par le moyen d'un système mécanique équivalent où la masse du liquide est divisée en une masse d'impulsion et une autre masse d'oscillation.

1.4. American Concrete Institute (ACI) :

L'ACI 350.3 est l'une des normes de l'American Concrete Institute (ACI) qui concerne le dimensionnement parasismique des réservoirs rectangulaires et circulaires, en béton, fixés au sol et sur supports élevés. La seconde norme parasismique de l'ACI, l'ACI 371 fournit des recommandations pour l'estimation des efforts sismiques des réservoirs élevés à support en béton.

La norme ACI 350.3 se base sur les modèles de Housner (1963) avec les modifications de Wozniak et Mitchell (1978). Les paramètres des modes impulsifs et convectifs sont évalués à partir de modèles rigides.

L'ACI 350.3 évalue les caractéristiques impulsives et convectives des réservoirs flexibles à l'aide des modèles de réservoirs rigides. Les réservoirs sont traités de manière pseudo-flexible.

1.5. Fascicule 74 « Construction des réservoirs en béton » :

Le fascicule 74 du cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux passés au nom de l'Etat du ministère Français de l'équipement, des transports et du logement, traitant de la construction des réservoirs en béton, et plus généralement des ouvrages en béton, de stockage et de transport de l'eau. Il peut s'appliquer aussi à certains ouvrages de stockage de certains liquides tels que : eaux usées ou polluées, eaux salines, lisier, etc. à l'exclusion des hydrocarbures ou des produits chimiques. Le fascicule 74 énonce que la justification de la tenue au séisme devra prendre en compte les actions dynamiques réciproques qui se développent entre le fluide et la cuve qui le contient, c'est au fait l'effet hydrodynamique.

Pour les méthodes de calcul, le fascicule 74 nous renvoie à une série de normes homologuées, publiées par l'AFNOR (Association française de normalisation), concernant les produits, les travaux et les essais relatifs à la réalisation de tels ouvrages. Les normes actuellement en vigueur sont récapitulées dans l'annexe A qui, par son caractère contractuel, rend ces normes applicables aux marchés faisant référence au présent fascicule.

Une attention toute particulière doit être portée à l'étanchéité des ouvrages qui en conditionne les performances. La conception et la réalisation de celle-ci doivent répondre à des critères rigoureux, en fonction de l'objectif recherché, de la nature du support et du liquide stocké. Une place importante est faite dans le fascicule à tout ce qui touche à la conception des ouvrages et en particulier au choix des paramètres adaptés à ce type d'ouvrage pour utiliser les règles de

calcul définies dans le BAEL et le BPEL, afin que la structure réponde à la spécificité des ouvrages concernés liée au stockage des liquides.

Conclusion :

Les ingénieurs de bureaux d'études spécialisés dans la conception des réservoirs surélevés se heurtent à une question majeure, lors du choix du type de contreventement. Dans quelle situation, il est plus avantageux d'opter pour un réservoir surélevé posé sur pilotis et dans quelle situation, il serait plus intéressant d'opter pour un réservoir posé sur tour.

Deux aspects doivent être considérés dans la réponse à cette question. D'abord la considération technique, en passant en revue le niveau de sécurité de l'ouvrage au glissement et au renversement ainsi que la vérification des contraintes internes du support. Puis la considération économique, en estimant quel est le niveau d'investissement à consentir pour la réalisation de l'ouvrage. Le problème alors ainsi posé nous amène à tenter à travers cette contribution à trouver le juste milieu pour ainsi aider les ingénieurs dans leur choix du type de contreventement en fonction des zones sismique et le type de sol d'implantation de l'ouvrage.

La démarche retenue pour atteindre l'objectif de notre projet est la suivante :

- On prendra deux réservoirs surélevés de même capacité de 1000 m^3 avec une cuve et un radier identique mais des supports différents, un est posé sur des pilotis (12 poteaux) et l'autre sur une tour cylindrique, qui sont dimensionnés à l'état limite de service (ELS) sous charge verticale.
- Nous effectuons pour chaque réservoir, un calcul hydrodynamique vis-à-vis de l'action sismique par la méthode dynamique d'analyse modale spectrale du RPA 99 modifiée 2003 pour en déduire les forces dues au séisme pour chaque zone sismique et site d'implantation.
- Nous Calculons des facteurs de sécurité de glissement et de renversement ainsi que les contraintes internes du support provoqués par l'action sismique de chaque réservoir.
- Puis, nous ferons un calcul du prix de réalisation des deux ouvrages.
- Ensuite nous comparons la sécurité au glissement et au renversement de chaque réservoir au niveau de chaque zone sismique et site d'implantation, le tous en prenons compte du coût de réalisation.
- Pour au final, arriver à associer un type de réservoir surélevé pour chaque zone et site d'implantation.

Introduction :

Les réservoirs surélevés sont considérés comme structures lourdes dont la plus grande portion du poids est concentrée dans la partie supérieure à une hauteur donnée. Dans les régions de forte sismicité et à forte densité de population, une rupture de réservoir suite à un tremblement de terre, peut causer d'énormes dommages et de grandes pertes en biens et en vies humaines. A cet effet, beaucoup d'études portant sur leur comportement dynamique font l'objet de plusieurs travaux de recherche ayant pour but l'amélioration de leurs conceptions et leurs résistances vis-à-vis de fortes excitations sismiques.

L'un des premiers à avoir fourni une solution à ce problème fut **Westergaard (1933)** en déterminant les pressions hydrodynamiques sur un barrage poids rectangulaire rigide soumis à une accélération horizontale à l'aide d'une méthode analytique simplifiée utilisant des masses ajoutées d'eau. En ce qui concerne le comportement dynamique des réservoirs de stockage, les pionniers en ce domaine, furent **Hoskin et Jacobsen (1934)** qui, en se basant sur le travail de Westergaard, conduisirent des études théoriques et expérimentales pour évaluer les pressions hydrodynamiques développées dans les réservoirs rectangulaires soumis à une excitation sismique. L'un des premiers chercheurs à s'être intéressé aux châteaux d'eau, **Ruge (1938)**, étudia de manière expérimentale les effets d'un séisme sur des réservoirs surélevés, et mit en évidence le couplage entre le fluide et le système réservoir-support élevé. Par la suite, **Jacobsen (1949)** et **Jacobsen et Ayre (1951)** étudièrent, de manière expérimentale et analytique, la réponse dynamique de réservoirs cylindriques rigides. **Werner et Sundquist (1949)** étendirent le travail de Jacobsen aux réservoirs de forme rectangulaires, semi-circulaires, triangulaires et sphériques. **Graham et Rodriguez (1952)** fournirent une analyse détaillée des pressions hydrodynamiques convectives, liées au ballotement du fluide, et impulsives dans les réservoirs rectangulaires. Vers la fin des années 1950 et le début des années 1960, **Housner** publia deux travaux **Housner (1957)** et **Housner (1963)** dans lesquels il formula la méthode analytique simplifiée encore employée de nos jours par les ingénieurs de la pratique.

Pour le calcul hydrodynamique, nous utilisons la méthode développée par **Hammoum** inspirée du modèle hydrodynamique de **Housner** auquel il a adapté le spectre de réponse du **RPA**.

Par ailleurs, dans les réservoirs partiellement remplis, l'excitation sismique met une partie du fluide en mouvement ; ce qui conduit à la formation de vagues en surface, entraînant la naissance de contraintes sur les parois, c'est pour cela qu'au niveau de ce chapitre on illustre les différentes étapes de calcul des réservoirs surélevés vis-à-vis de l'action sismique.

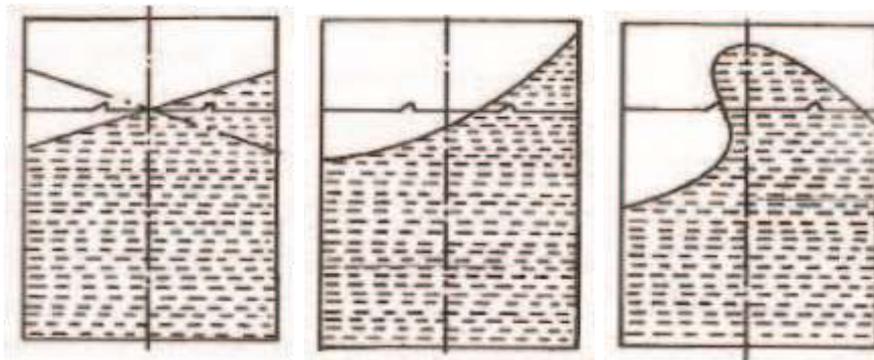


Figure 2.1 : Aperçu de type de ballotement pouvant avoir lieu dans un réservoir de liquide.
(Source : Ibrahim (2005))

2.1. Méthode de calcul :

Le choix de la méthode de calcul et la modélisation de la structure doivent avoir pour objectif de reproduire au mieux le comportement réel de la structure.

D'après le (RPA.99 modifié 2003) le calcul des forces sismiques peut être mené suivant trois méthodes :

- La méthode statique équivalente.
- La méthode dynamique d'analyse modale spectrale.
- La méthode d'analyse par accélérogrammes.

2.2. Evaluation de la force sismique :

- *application de la méthode dynamique d'analyse modale spectrale.*

- *hypothèses de calcul :*

- Les masses sont supposées concentrées au niveau des nœuds principaux.
- Seul, les déplacements horizontaux des nœuds sont pris en compte

- *calcul de la force sismique :*

Le règlement parasismique (RPA.99 modifié 2003) permet sous certaine condition le calcul de la structure par la méthode pseudo dynamique qui consiste à considérer la structure comme étant soumise à un effort tranchant qui est fonction de plusieurs paramètres.

La force sismique latérale pour un niveau « k » et un mode « i » elle est donnée par la formule suivante :

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \cdot \gamma_i \cdot M_k \cdot a_{ik}$$

Avec :

S_{ai} : Accélération du sol au mode « i ».

M_k : Masse au niveau « k ».

a_{ik} : L'amplitude au niveau « k » au mode « i ».

« i » : indice désignant le numéro du mode propre.

« k » : indice désignant le numéro de masse.

γ_i : Coefficient de distribution au mode « i » qui est donnée par la formule suivant :

$$\gamma_i = \frac{\sum_{k=1}^n M_k \cdot a_{ki}}{\sum_{k=1}^n M_k \cdot a_{ki}^2}$$

2.2.1. Calcul de l'accélération sismique « S_{ai} » :

L'accélération S_{ai} imposée au réservoir, compte tenu de son interaction avec le sol, est donnée par le règlement parasismique algérien RPA en fonction de la zone sismique et d'autres paramètres, coefficient d'accélération de zone « A », du facteur de correction d'amortissement « η », de la période fondamentale de la structure « T », le facteur de qualité « Q » et coefficient de comportement « R », est représentée par le spectre de réponse de calcul donné par la relation suivante :

$$\frac{S_{ai}}{g} = \begin{cases} 1.25A \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5\eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R} \right) & T > 3.0s \end{cases}$$

- **Facteur de correction d'amortissement « η » :**

η est un facteur de correction d'amortissement donné par la formule :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{(2 + \xi)}} \geq 0.7$$

Où $\xi(\%)$ est le pourcentage d'amortissement critique fonction du matériau constitutif, du type de structure et de l'importance des remplissages.

Tableau 2.1 : Valeurs du pourcentage d'amortissement critique ξ (%).

Remplissage	Portiques		Voiles ou murs
	Béton armé	Acier	Béton armé/maçonnerie
Léger	6	4	10
Dense	7	5	

- **Coefficient de comportement global de la structure « R » :**

Sa valeur unique est donnée par le tableau « x » en fonction du système de contreventement, En cas d'utilisation de systèmes de contreventement différents dans les deux directions considérées il y a lieu d'adopter pour le coefficient R la valeur la plus petite.

Tableau 2.2 : Valeurs du coefficient de comportement R.

Cat	Description du système de contreventement	Valeur de R
A	Béton armé	
1a	Portiques autostables sans remplissages en maçonnerie rigide	5
1b	Portiques autostables avec remplissages en maçonnerie rigide	3,5
2	Voiles porteurs	3,5
3	Noyau	3,5
4a	Mixte portiques/voiles avec interaction	5
4b	Portiques contreventés par des voiles	4
5	Console verticale à masses réparties	2
6	Pendule inverse	2

<u>B</u>	<u>Acier</u>	
7	Portiques autostables ductiles	6
8	Portiques autostables ordinaires	4
9a	Ossature contreventée par palées triangulées en X	4
9b	Ossature contreventée par palées triangulées en V	3
10a	Mixte portiques/palées triangulées en X	5
10b	Mixte portiques/palées triangulées en V	4
11	Portiques en console verticale	2
<u>C</u>	<u>Maçonnerie</u>	
12	Maçonnerie porteuse chaînée	2,5
<u>D</u>	<u>Autres systèmes</u>	
13	Ossature métallique contreventée par diaphragme	2
14	Ossature métallique contreventée par noyau en béton armé	3
15	Ossature métallique contreventée par voiles en béton armé	3,5
16	Ossature métallique avec contreventement mixte comportant un noyau en béton armé et palées ou portiques métalliques en façades	4
17	Systèmes comportant des transparences (étages souples)	2

- **Facteur de qualité « Q » :**

Le facteur de qualité de la structure est fonction de :

- la redondance et de la géométrie des éléments qui la constituent
- la régularité en plan et en élévation
- la qualité du contrôle de la construction

La valeur de Q est déterminée par la formule :

$$Q = 1 + \sum_{1}^{6} P_q$$

P_q est la pénalité à retenir selon que le critère de qualité " **est satisfait ou non**". Sa valeur est donnée au tableau « x ».

- *Les critères de qualité « q » à vérifier sont :*
- **Conditions minimales sur les files de contreventement**
 - système de portiques : chaque file de portique doit comporter à tous les niveaux, au moins trois
(03) travées dont le rapport des portées n'excède pas 1,5. Les travées de portique peuvent être constituées de voiles de contreventement.
 - système de voiles : chaque file de voiles doit comporter à tous les niveaux, au moins un (01) trumeau ayant un rapport "hauteur d'étage sur largeur" inférieur ou égal à 0,67 ou bien deux (02) trumeaux ayant un rapport "hauteur d'étage sur largeur" inférieur ou égal à 1,0. Ces trumeaux doivent s'élever sur toute la hauteur de l'étage et ne doivent avoir aucune ouverture ou perforation qui puisse réduire de manière significative leur résistance ou leur rigidité.
- **Redondance en plan**
 - Chaque étage devra avoir, en plan, au moins quatre (04) files de portiques et/ou de voiles dans la direction des forces latérales appliquées.
 - Ces files de contreventement devront être disposées symétriquement autant que possible avec un rapport entre valeurs maximale et minimale d'espacement ne dépassant pas 1,5.
- **Régularité en plan**
 - La structure est classée régulière en plan.
- **Régularité en élévation**
 - La structure est classée régulière en élévation.
- **Contrôle de la qualité des matériaux**
 - Des essais systématiques sur les matériaux mis en œuvre doivent être réalisés par l'entreprise.
- **Contrôle de la qualité de l'exécution**
 - Il est prévu contractuellement une mission de suivi des travaux sur chantier. Cette mission doit comprendre notamment une supervision des essais effectués sur les matériaux.

Tableau 2.3 : Valeurs des pénalités P_q .

Critère q	P_q	
	Observé	Non-observé
1. Conditions minimales sur les files de contreventement	0	0,05
2. Redondance en plan	0	0,05
3. Régularité en plan	0	0,05
4. Régularité en élévation	0	0,05
5. Contrôle de la qualité des matériaux	0	0,05
6. Contrôle de la qualité de l'exécution	0	0,10

- *Périodes caractéristiques :*

T_1 , T_2 sont des périodes caractéristiques associées à la catégorie du site.

Tableau 2.4 : Valeurs de T_1 et T_2 .

Site	S_1	S_2	S_3	S_4
	Site rocheux	Site ferme	Site meuble	Site très meuble
T_1 (sec)	0,15	0,15	0,15	0,15
T_2 (sec)	0,30	0,40	0,50	0,70

- *Coefficient d'accélération de zone « A » :*

Le coefficient d'accélération de zone A, est fonction de la zone sismique et du groupe d'usage de l'ouvrage. Le Règlement Parasismique Algérien (RPA99-modifié 2003) classe les châteaux d'eau et réservoirs de grande à moyenne importance dans le groupe 1B (ouvrages de grande importance).

Tableau 2.5 : Coefficient d'accélération de zone A.

Groupe	Zone sismique			
	I	IIa	IIb	III
	Sismicité faible	sismicité moyenne	sismicité moyenne	sismicité élevée
1B	0,12	0,20	0,25	0,30

2.3. Effet hydrodynamique :

Lors du dimensionnement parasismique de structures telles que les réservoirs, l'évaluation des forces hydrodynamiques est une étape cruciale.

La méthode analytique de **Housner** permet d'estimer la réponse d'un liquide dans des réservoirs rectangulaires ou cylindriques rigides, excités de manière sismique. Cette méthode utilise la décomposition de l'action du liquide à une action passive provoquant des efforts d'impulsion et une action active provoquant des efforts d'oscillation.

- Les efforts d'impulsion proviennent du fait qu'une partie de la masse du liquide, dite masse passive, réagit par inertie à la translation des parois du réservoir. Son système mécanique équivalent est obtenu en considérant une masse « M_i » liée rigidement au réservoir à une hauteur « h_i » telle qu'elle exerce sur les parois, les mêmes efforts horizontaux que la masse d'eau équivalente.

- Les efforts d'oscillations proviennent du fait qu'une autre partie de la masse du fluide, dite masse active, se met en mouvement d'oscillation sous l'action du séisme. Son équivalent mécanique s'obtient en considérant une masse « M_0 » retenue par des ressorts de raideurs « K_0 » à un niveau « h_0 », dont les oscillations horizontales exercent les mêmes efforts vibratoires que la masse active du liquide.

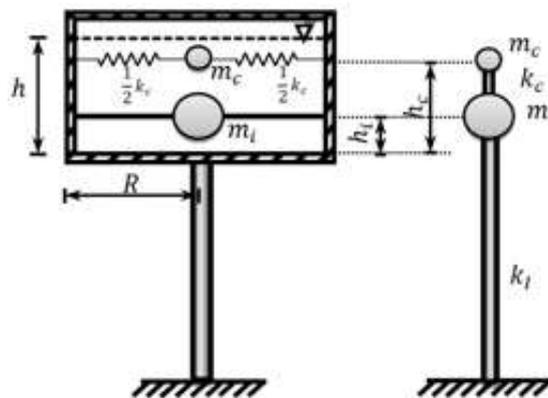


Figure 2.2 : Modèle à deux masses pour les réservoirs surélevés proposées par Housner.

En résumé, le modèle adopté pour le château d'eau (Figure III.2.3), la masse totale d'eau « M_e » peut être décomposée en une masse active « M_0 » relié rigidement par une tige de raideur « K_1 », forme un couplage directe avec « M_1 » qui est relié au sol par une tige présentant le support de la structure et de constante de rappelle « K_0 », le système est donc a deux degré de liberté (2ddl), la masse « M_1 » est donnée par la formule suivant :

$$M_1 = M_i + M_c + \frac{33}{140} M_{\text{tour}}$$

Avec :

M_i : La masse inerte (passive) ;

M_e : la masse totale de la cuve ;

M_{tour} : la masse totale de la cuve ;

$\frac{33}{140}$: Coefficient de Rayleigh.

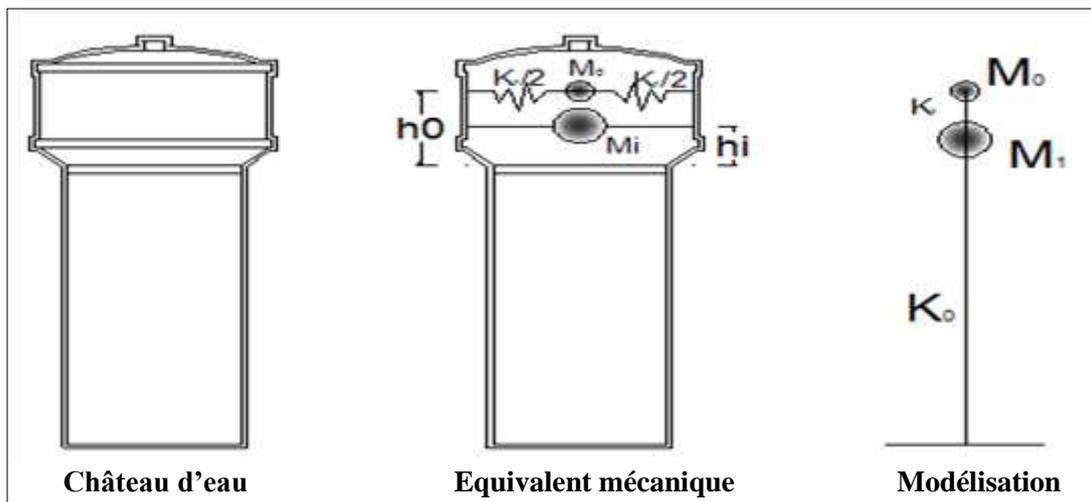


Figure 2.3 : Modélisation du château d'eau.

Les valeurs de M_0 , M_i , h_i et h_0 , ne dépendent que de la géométrie de la cuve ils peuvent être calculé par les relations mise au point par Housner.

2.3.1. Calcul de la masse passive M_i : (masse inerte)

$$M_i = M_e \cdot \frac{th\left(\frac{\sqrt{3}R}{H_e}\right)}{\left(\frac{\sqrt{3}.R}{H_e}\right)}$$

Avec :

M_i : La masse inerte (passive) ;

M_e : La masse de l'eau ;

R : Rayon intérieur de la cuve ;

H_e : Hauteur d'eau dans la cuve.

Le niveau d'application h_i des pressions d'impulsion par rapport au radier est exprimé par :

$$h_i = \frac{3}{8} H_e$$

2.3.2. Calcul de la masse active M_0 : (masse oscillante)

$$M_0 = M_e \cdot 0.318 \cdot \frac{R}{H_e} \cdot \text{th} \left(1.84 \cdot \frac{H_e}{R} \right)$$

M_0 : La masse active (oscillante)

Le niveau d'application **h₀** des pressions d'oscillation par rapport au radier est donné par :

$$h_0 = H_e \left[1 - \frac{1}{\alpha \cdot \text{th} \alpha} + \frac{1}{\alpha \cdot \text{sh} \alpha} \right]$$

Avec : $\alpha = \sqrt{\frac{5}{2}} \times \frac{H_e}{R}$

2.3.3. Calcul de la pulsation fondamental de vibration du liquide ω :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\omega_0^2 = \frac{g}{R} \left[\sqrt{\frac{27}{8}} \cdot \text{th} \left(\sqrt{\frac{27}{8}} \cdot \frac{H_e}{R} \right) \right]$$

2.3.4. Calcul des constantes de raideur « K_1 » et « K_0 » :

➤ **Calcul de la raideur de couplage ($M_0 - M_1$) K_1 :**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$K_1 = M_0 \times \omega_0^2$$

➤ **Calcul de la raideur du support K_0 :**

D'après le **DTU.PS 69**, suggère d'utiliser la méthode de **Raylet**, pour une masse concentré au sommet d'une console de section constante et de masse non négligeable ; la période du premier mode de vibration est donnée par la relation suivante :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{P' L^3}{3g \cdot E \cdot I}} = 2\pi \sqrt{\frac{M_t}{K_0}}$$

$$K_0 = \frac{3 \cdot g \cdot E \cdot I \cdot M_t}{P' \cdot L^3}$$

Avec :

$$P' = \left(p + \frac{33}{140} M_{tour} \right) \times g$$

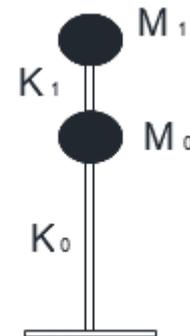


Figure 2.4 : Modélisation physique.

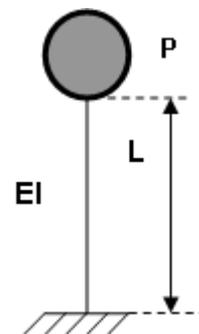


Figure 2.5 : Modèle de calcul.

Où :

P : poids de la masse concentré $P = M_{tot} = M_e + M_c$

L : hauteur du support ;

I : moment d'inertie de la section transversale de la tour ;

E : module de déformation longitudinale instantanée du béton armé.

D'après de le BAEL 91 :

$$E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}}$$

2.3.5. Calcul des pulsations propres ω_1 et ω_2 du 1er et 2eme mode de vibration :

Le système est à deux degré de liberté (2ddl), les équations d'équilibre peuvent être formulées sous forme matricielle.

Le mouvement est défini par l'équation suivante :

$$\{F_I(t)\} + \{F_a(t)\} + \{F_e(t)\} = \{F(t)\}$$

$\{F_I(t)\}$: Vecteur des forces d'inerties.

$$\{F_I(t)\} = [M]\{\ddot{x}(t)\}$$

$\{F_a(t)\}$: Vecteur des forces d'amortissement

$$\{F_a(t)\} = [C]\{\dot{x}(t)\}$$

$\{F_e(t)\}$: Vecteur des forces élastique

$$\{F_e(t)\} = [K]\{x(t)\}$$

$\{F(t)\}$: Vecteurs des forces extérieurs

Dans notre cas l'amortissement est supposé nul et comme on se limite uniquement à la détermination des modes propres de vibration nous aurons à faire uniquement à la matrice $[M]$ et $[K]$, nous supposons que le mouvement est de type harmonique décrit sous la forme :

$$\{x(t)\} = \{a\} \sin(\omega t + \emptyset)$$

Le système étant a oscillation libre c'est-à-dire pas de chargement extérieur « $\{F(t)\} = \{0\}$ »

L'équation du mouvement s'écrit alors :

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\}$$

Puisque :

$$\{\ddot{x}(t)\} = \frac{d^2}{dx^2} \{x(t)\} = -\{a\} \omega^2 \sin(\omega t + \emptyset) = -\omega^2 \{x(t)\}$$

L'équation se réécrit alors :

$$-[M]\omega^2\{x(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\}$$

$$([K] - \omega^2 [M])\{x(t)\} = \{0\}$$

La solution évidente est la solution triviale $\{x(t)\} = \{0\}$, cette solution correspond à la position initiale non déformée de réservoir. Comme la structure oscille donc se déforme à un instant « t » donné elle aura une déformation $\{x(t)\} \neq \{0\}$.

Pour que le système admette une solution non nulle il faut que son déterminant soit nul c'est-à-dire :

$$|[K] - \omega^2 [M]| = 0$$

$[K]$ et $[M]$ sont des matrices carrées (2×2) :

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{00} & K_{01} \\ K_{10} & K_{11} \end{bmatrix}, \quad [M] = \begin{bmatrix} M_0 & 0 \\ 0 & M_1 \end{bmatrix}$$

D'où :

$$\left| \begin{bmatrix} K_{00} & K_{01} \\ K_{10} & K_{11} \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M_0 & 0 \\ 0 & M_1 \end{bmatrix} \right| = 0$$

$$\left| \begin{bmatrix} K_{00} - \omega^2 M_0 & K_{01} \\ K_{10} & K_{11} - \omega^2 M_1 \end{bmatrix} \right| = 0$$

Le déterminant est :

$$(K_{00} - \omega^2 M_0)(K_{11} - \omega^2 M_1) - K_{01} \cdot K_{10} = 0$$

La résolution de cette dernière équation nous donne les pulsations de vibration des deux modes principaux, ils sont données par :

$$\omega_{1;2}^2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{K_{00}}{M_0} + \frac{K_{11}}{M_1} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{K_{00}}{M_0} + \frac{K_{11}}{M_1} \right)^2 + 4 \left(\frac{K_{01} K_{10}}{M_0 M_1} \right)} \right]$$

Avec :

$$K_{00} = K_1$$

$$K_{11} = K_0 + K_1$$

$$K_{10} = K_{01} = -K_1$$

Connaissant les pulsations des modes propres ω_1 et ω_2 nous déterminons les périodes des deux

modes principaux : $T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1}$; $T_2 = \frac{2\pi}{\omega_2}$

Le système présente autant de degrés de liberté que de modes propres.

2.3.6. Détermination des modes propres :

$$\text{Pour : } \omega_1 \rightarrow \{a\}_1 = \begin{Bmatrix} a_{10} \\ a_{11} \end{Bmatrix} \quad ; \quad \omega_2 \rightarrow \{a\}_2 = \begin{Bmatrix} a_{20} \\ a_{21} \end{Bmatrix}$$

Ceci revient à résoudre l'équation :

$$([K] - \omega^2 [M])\{a\} = \{0\}$$

Pour le mode « i », nous avons :

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{a\}_i = \{0\}$$

$$\text{D'où : } \begin{bmatrix} K_{00} - \omega_i^2 M_0 & K_{01} \\ K_{10} & K_{11} - \omega_i^2 M_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_{i0} \\ a_{i1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Qui s'écrit alors :

$$\begin{cases} (K_{00} - \omega_i^2 M_0)a_{i0} + K_{01}a_{i1} = 0 \dots\dots\dots(1) \\ K_{10}a_{i0} + (K_{11} - \omega_i^2 M_1)a_{i1} = 0 \dots\dots\dots(2) \end{cases}$$

Si on résout le système comme étant un système de Cramer la solution sera obtenus

$$a_{i0} = a_{i1} = 0$$

Or comme mode propre correspond à une position déformé, la solution doit être différente de zéro.

Pour cela on donne une valeur arbitraire à une inconnue et on calcul l'autre, cette valeur est généralement égale à l'unité « 1 ».

Nous proposons : $a_{i0} = 1$

De l'équation (1), nous tirons :

$$a_{i1} = -\frac{K_{00} - \omega_i^2 M_0}{K_{01}} a_{i0}$$

2.4. Les déplacements verticaux des vagues :

Pour les réservoirs cylindriques, la hauteur des vagues est donnée par la relation suivante :

$$d_{\max;i} = \frac{0.408 \times R}{\left[\frac{g}{\omega_i \times \theta_{0i} \times R} - 1 \right] \times \text{th} \left(1.84 \times \frac{h}{R} \right)}$$

Avec : θ dépend de l'amplitude de vibration, donc du mode (i)

$$\theta_{0i} = 1,53 \left(\frac{X_{0i} - X_{1i}}{R} \right) \text{th} \left(1,84 \frac{h}{R} \right)$$

Les flèches $\{X\}_i$ sont données par la formule:

$$\begin{cases} X_{0i} = \gamma_i \frac{S_{ai}}{\omega_i^2} \\ X_{1i} = X_{0i} \frac{a_{1i}}{a_{0i}} \end{cases}$$

Conclusion :

Nous venons de présenter les différentes étapes de calcul des réservoirs surélevés vis-à-vis de l'action sismique par la méthode dynamique d'analyse modale spectrale.

Cette étude nous permet d'évaluer l'effet hydrodynamique dû à l'action du liquide sur les parois du réservoir.

Ainsi, le calcul et l'évaluation des efforts dus à l'action hydrodynamique sur les réservoirs seront élaborés sur la base de cette étude, et ça fera l'objet du chapitre suivant.

Introduction :

Les tremblements de terres sont inévitables. Tous les ans, il se produit plusieurs séismes destructeurs, la seule protection réellement efficace est la construction parasismique.

Lors du dimensionnement parasismique de structures telles que les réservoirs, l'évaluation des forces hydrodynamiques est une étape cruciale, par ailleurs, dans les réservoirs partiellement remplis, l'excitation met une partie du fluide en mouvement ce qui conduit à la formation des vague en surface.

Les relations empiriques proposées par le règlement parasismique algérien (RPA 99 modifié 2003) sont applicables uniquement aux bâtiments.

Pour cela, on utilise l'approche développée par Housner adaptée au spectre de réponse du RPA cité dans le chapitre 2, dans laquelle l'action du liquide est décomposé en une action passive provoquant des efforts d'impulsion et une action active provoquant des efforts d'oscillation.

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer les forces sismiques pour les deux réservoirs surélevé (tour, pilotis), pour toutes les zones sismiques et les sites d'implantation, pour cela, nous procéderons d'abord par le calcul du poids des éléments constituant cet ouvrage.

3.1. Dimensions des deux réservoirs :

Les deux réservoirs on la même cuve et de même radier ;

Tableau 3.1 : Dimensions des deux réservoirs (sur tour et sur pilotis).

Cuve	Coupole inférieure	Diamètre : 9.40 m Epaisseur : 0.20 m Flèche : 1.00 m Rayon de courbure : 11.55 m
	Coupole supérieure	Diamètre : 14.00 m Epaisseur : 0.12 m Flèche : 2.5 m Rayon de courbure : 17.51 m
	Cheminé	Diamètre extérieur : 1.60 m Diamètre intérieur : 1.20 m Hauteur : 7.30 m Epaisseur : 0.20 m
	Cylindre	Diamètre extérieur : 14.00 m Diamètre intérieur : 14.40 m Hauteur : 6.35 m Epaisseur : 0.20 m
	Cône de réduction	Diamètre inférieure intérieur : 13.50 m Diamètre supérieure intérieur : 10.00 m Hauteur : 1.75 m Epaisseur : 0.35 m
support	Pilotis (poteaux)	Diamètre extérieur : 11.00 m Diamètre intérieur : 09.10 m Coté : 0.80*0.8 m Hauteur : 24.6 m
	Tour	Diamètre extérieur : 11.00 m Diamètre intérieur : 10.56 m Epaisseur : 0.25 m Hauteur : 24.6 m
Radier		Diamètre : 22.00 m Hauteur : 1.50 m

3.2. Calcul du volume d'eau utile :

Les dimensions de la cuve sont les suivantes :

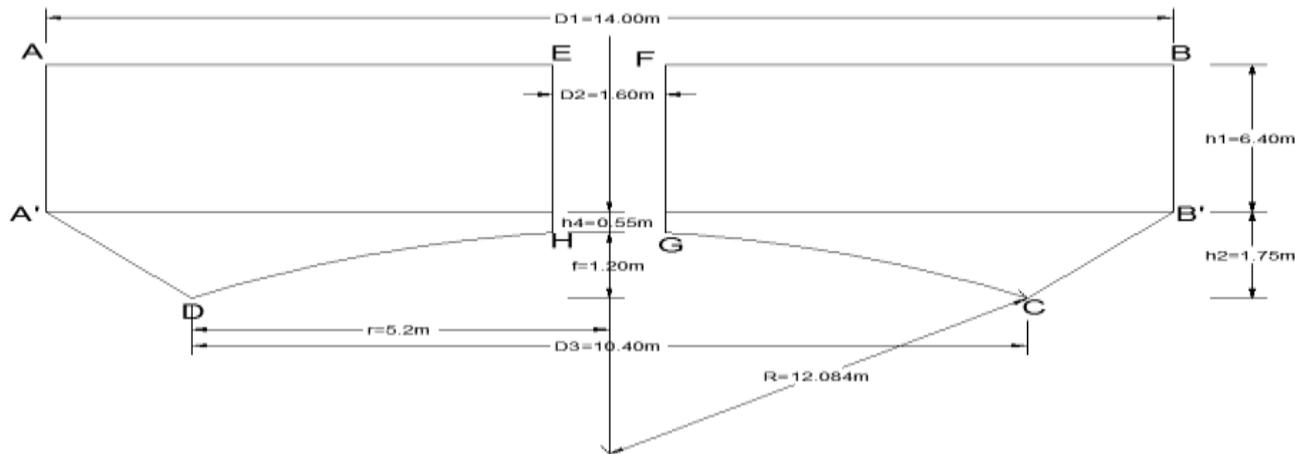


Figure 3.1 : Dimensions de la cuve.

Le volume d'eau dans la cuve est :

$$V_{\text{eau}} = V_1 + V_2 - V_3 - V_4$$

Soit :

V_1 : volume du tronc de cône A'B'CD ;

V_2 : volume de cylindre ABB'A' ;

V_3 : volume de la calotte sphérique DHGC ;

V_4 : volume de la cheminée EFGH.

Tableau 3.2 : Calcul du volume d'eau utile dans la cuve.

Désignations	Formules	Volumes (m ³)
Tronc de cône A'B'CD $D_1 = 14 \text{ m}$ $D_3 = 10.4 \text{ m}$ $h_2 = 1.75 \text{ m}$	$V_1 = \frac{\pi h_2}{12} (D_1^2 + D_3^2 + D_1 D_3)$	205.95
cylindre ABB'A $D_1 = 14 \text{ m}$ $h_1 = 6.4 \text{ m}$	$V_2 = \frac{\pi D_1^2}{4} \times h_1$	984.71
Calotte sphérique $f = 1.2 \text{ m}$ $r = 5.2 \text{ m}$ $R = 12.084 \text{ m}$	$V_3 = \frac{\pi}{3} f^3 (3R - f)$	63.39
cheminée EFGH $D_2 = 1.6 \text{ m}$ $h_1 = 6.4 \text{ m}$ $h_4 = 0.55 \text{ m}$	$V_4 = \frac{\pi D_2^2}{4} (h_1 + h_4)$	13.97
Total	$V_{\text{eau}} = V_1 + V_2 - V_3 - V_4$	1113.30

3.3. Calcul du poids de l'ouvrage :

3.3.1. Poids de la cuve :

➤ Poids du lanterneau :

Poids volumique du béton : $\gamma_b=2,5 \text{ t/m}^3$

Poids volumique de l'eau : $\gamma_e=1 \text{ t/m}^3$

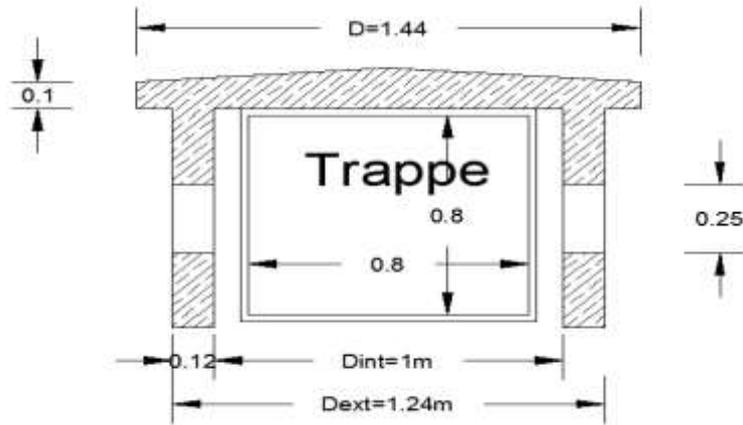
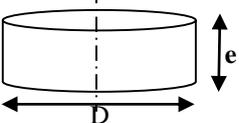
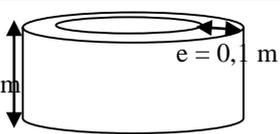
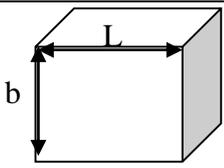
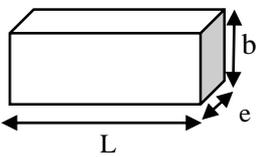


Figure 3.2 : Dimensions de lanterneau.

Tableau 3.3 : Calcul du poids des différents éléments de lanterneau.

Éléments	Formules du poids	Poids (t)
Dalle circulaire au-dessus du voile $e = 0,1 \text{ m}$ $D = 1,44 \text{ m}$ 	$P_1 = \frac{\pi D^2}{4} \times e \times \gamma_b$	0.407
Voile cylindrique $D_{ext}=1,24 \text{ m}$ $D_{int}= 1 \text{ m}$ $H=0,8 \text{ m}$ 	$P_2 = \frac{\pi}{4} (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \times H \times \gamma_b$	0.844
La trape $L = 0,8 \text{ m}$ $b = 0,8 \text{ m}$ $e = 0,1 \text{ m}$ 	$P_3 = L \times b \times e \times \gamma_b$	0.160
4 fenêtres $e = 0,12 \text{ m}$ $L = 0,4 \text{ m}$ $b = 0,4 \text{ m}$ 	$P_4 = 4 \times (L \times b \times e \times \gamma_b)$	0.192
Etanchéité pour la dalle circulaire du lanterneau $D_{ext} = 1,44 \text{ m}$ $\gamma_{et} = 0,07 \text{ t/m}^2$	$P_5 = \frac{\pi D^2}{4} \times \gamma_{et}$	0.114
Etanchéité extérieure du voile cylindrique $D = 1,24 \text{ m}$ $H = 0,8 \text{ m}$ $\gamma_{et}=0,018 \text{ t/m}^2$	$P_6 = \frac{\pi D_{ext}}{2} \times H \times \gamma_{et}$	0.028
Total	$P = P_1 + P_2 - P_3 - P_4 + P_5 + P_6$	1.041

➤ Poids de la coupole supérieure :

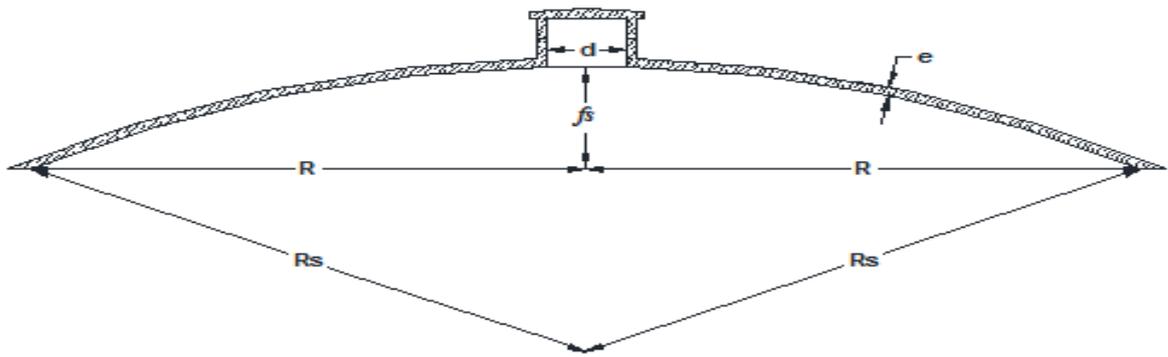


Figure 3.3 : Dimensions de la coupole supérieure.

La coupole est caractérisée par :

- Son rayon parallèle : $R = 7 \text{ m}$
- Sa flèche : $f = R_s - \sqrt{R_s^2 - R^2}$

$f = 0,104.D$ avec : $D = 14,00 \text{ m}$

$f = 1,456 \text{ m}$

$f = 1,46 \text{ m}$

- Son rayon sphérique R_s :

$$R_s = \frac{f_s^2 + R^2}{2f_s} = 17,555m$$

$R_s = 17.555 \text{ m}$

- Son épaisseur : $e = 0,12m$,

$$\gamma_b = 2,5 \text{ t/m}^3$$

Tableau 3.4 : Calcul du poids de la coupole supérieure.

Désignations	Formules	Poids (t)
La coupole pleine $R_s = 17,555 \text{ m}$ $e = 0,12 \text{ m}$ $f_s = 1,46 \text{ m}$	$P_1 = (2 \times \pi \times R_s \times f_s \times e) \gamma_b$	48.27
Ouverture de lanterneau $d = 1 \text{ m}$	$P_2 = \frac{\pi d^2}{4} e \gamma_b$	0.24
Etanchéité $R_s = 17,555 \text{ m}$ $f_s = 1,46 \text{ m}$ $d = 1,24 \text{ m}$ $\gamma_{et} = 0.07t / m^2$	$P_3 = (2 \pi R_s f_s - \frac{\pi d^2}{4}) \gamma_{et}$	11.18
Total	$P = P_1 - P_2 + P_3$	59.21

➤ Poids de la coupole inférieure :

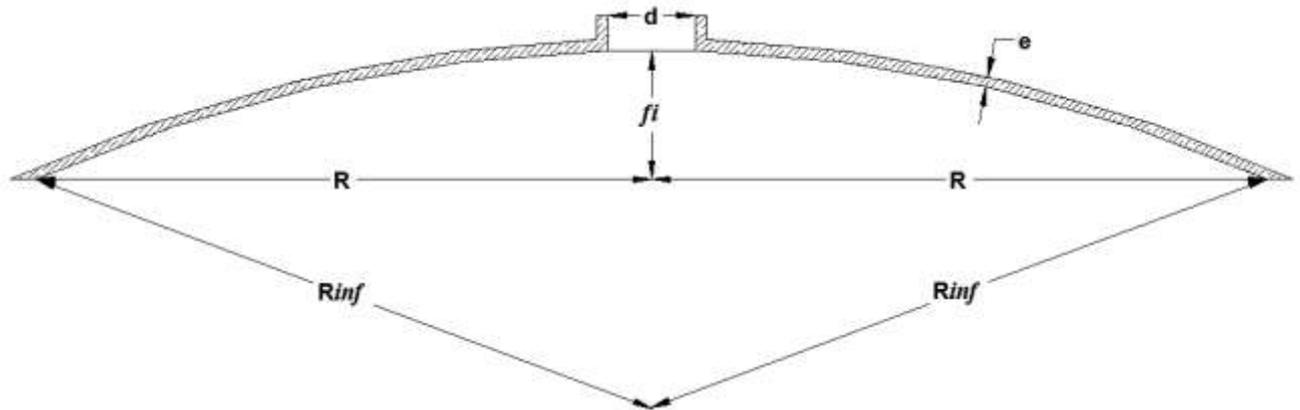


Figure 3.4 : Dimensions de la coupole inférieure.

$f_{inf} = 0,104 D$ Avec : $D = 9,4 \text{ m}$; $f_{inf} = 0,977 \text{ m}$

$f_{inf} = 1 \text{ m}$

$$f_{inf} = R_{inf} - \sqrt{R_{inf}^2 - R^2}$$

$$R_{inf} = \frac{f_{inf}^2 + R^2}{2f_{inf}}$$

Avec : $R = 4,7 \text{ m}$; $R_{inf} = 11,55 \text{ m}$

Tableau 3.5 : Calcul du poids de la coupole inférieure.

Désignations	Formules	Poids (t)
La coupole pleine $R_{inf} = 11,55 \text{ m}$ $e = 0,20 \text{ m}$ $f_{inf} = 1 \text{ m}$	$P_1 = (2 \pi R_{inf} \times f_{inf} \times e) \gamma_b$	36.25
Ouverture de la cheminée $d = 1,2 \text{ m}$ $e = 0,20 \text{ m}$	$P_2 = \frac{\pi d^2}{4} \times e \gamma_b$	0.565
Etanchéité $R_{inf} = 11,55 \text{ m}$ $f_{inf} = 1 \text{ m}$ $d = 1,2 \text{ m}$ $\gamma_{et} = 0,018 \text{ t/m}^2$	$P_3 = (2 \pi R_{inf} f_{inf} - \frac{\pi d^2}{4}) \gamma_{et}$	1.285
Total	$P = P_1 - P_2 + P_3$	36.97

➤ Poids de la ceinture supérieure :

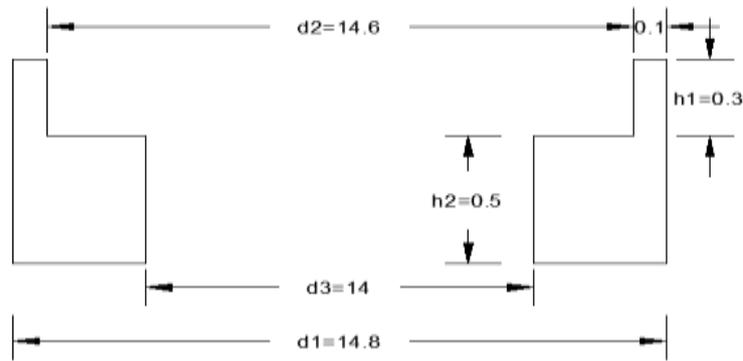


Figure 3.5 : Dimensions de la ceinture supérieure.

Tableau 3.6 : Calcul du poids de la ceinture supérieure.

Éléments	Formules	Poids (t)
<p>Elément 1</p> <p>$d_1 = 14.8 \text{ m}$ $d_2 = 14.6 \text{ m}$ $h_1 = 0.3 \text{ m}$ $\gamma_b = 2.5 \text{ t/m}^3$</p>	$P_1 = \frac{\pi}{4} \gamma_b \times h_1 \times (d_1^2 - d_2^2)$	3.46
<p>Element 2</p> <p>$d_1 = 14.8 \text{ m}$ $d_3 = 14 \text{ m}$ $h_2 = 0.5 \text{ m}$ $\gamma_b = 2.5 \text{ t/m}^3$</p>	$P_2 = \frac{\pi}{4} \gamma_b \times h_2 \times (d_1^2 - d_3^2)$	22.61
<p>Etanchéité</p> <p>$\gamma_{et} = 0.07 \text{ t/m}^2$ $h_2 = 0.5 \text{ m}$ $r = 7 \text{ m}$</p>	$P_3 = 2 \pi r h_2 \gamma_{et}$	1.54
Total	$P_t = P_1 + P_2 + P_3$	27.61

➤ Poids de la ceinture intermédiaire :

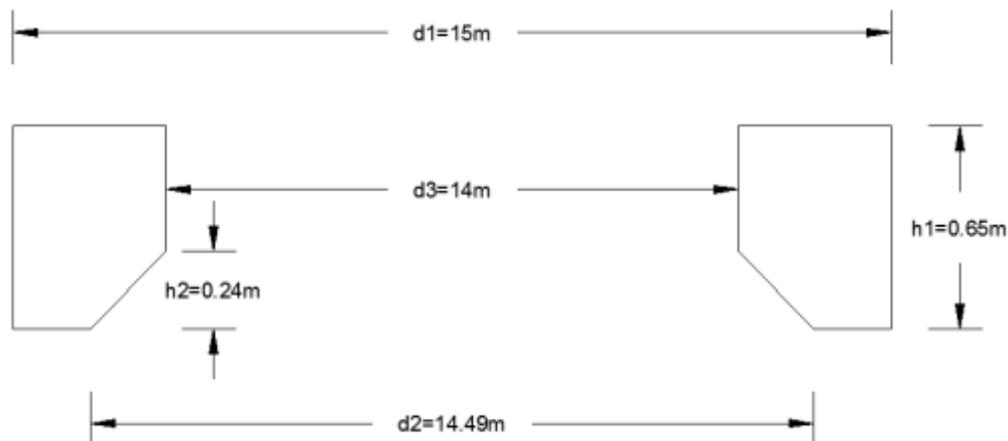


Figure 3.6 : Dimensions de la ceinture intermédiaire.

Tableau 3.7 : Calcul du Poids de la ceinture intermédiaire.

Éléments	Formules	Poids (t)
Elément 1 $d_1 = 15 \text{ m}$ $d_3 = 14 \text{ m}$ $h_1 = 0,65 \text{ m}$ $\gamma_b = 2,5 \text{ t/m}^3$	$P_1 = \frac{\pi}{4} \gamma_b \times h_1 \times (d_1^2 - d_3^2)$	36.99
Elément 2 $d_1 = 15 \text{ m}$ $d_2 = 14 \text{ m}$ $h_2 = 0,24 \text{ m}$ $\gamma_b = 2,5 \text{ t/m}^3$	$P_2 = \frac{\pi}{4} \gamma_b \times h_2 \times (d_1^2 - d_2^2) \times 0,5$	3.28
Etanchéité $\gamma_{et} = 0,07 \text{ t/m}^2$ $h = h_1 - h_2 = 0,41 \text{ m}$ $r = 7 \text{ m}$	$P_3 = 2 \pi r h \gamma_{et}$	1.26
Total	$P_t = P_1 - P_2 + P_3$	34.97

➤ Poids de la ceinture inférieure :

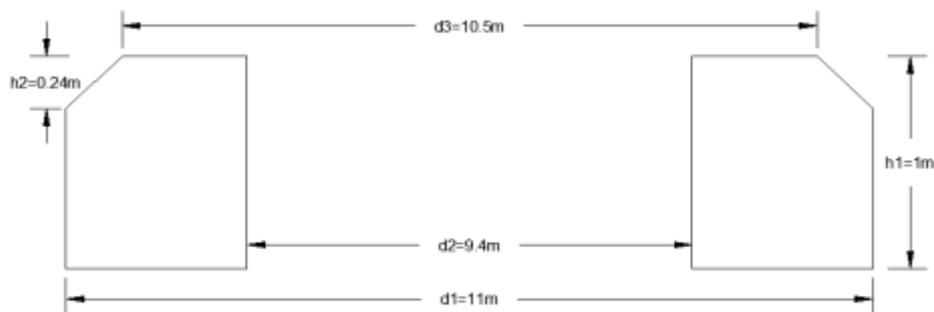


Figure 3.7 : Dimensions de la ceinture inférieure.

Tableau 3.8 : Calcul du Poids de la ceinture inférieure.

Éléments	Formules	Poids (t)
Elément 1 $d_1 = 11 \text{ m}$ $d_2 = 9.4 \text{ m}$ $h_1 = 1 \text{ m}$ $\gamma_b = 2,5 \text{ t/m}^3$	$P_1 = \frac{\pi}{4} \gamma_b \times h_1 \times (d_1^2 - d_2^2)$	64.06
Elément 2 $d_1 = 11 \text{ m}$ $d_3 = 10,5 \text{ m}$ $h_2 = 0.24 \text{ m}$ $\gamma_b = 2,5 \text{ t/m}^3$	$P_2 = \frac{\pi}{4} \gamma_b \times h_2 \times (d_1^2 - d_3^2) \times 0,5$	2.53
Etanchéité $\gamma_{et} = 0,07 \text{ t/m}^2$ $h_1 = 1 \text{ m}$ $d_2 = 9.4 \text{ m}$	$P_3 = \pi \times d_2 \times h_1 \times \gamma_{et}$	2.07
Total	$P_t = P_1 - P_2 + P_3$	63.60

➤ Poids du cylindre :

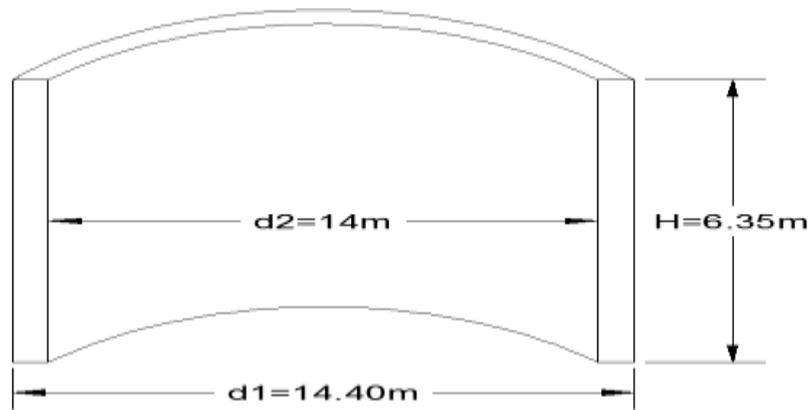


Figure 3.8 : Dimensions du cylindre.

Tableau 3.9 : Calcul du Poids du cylindre.

Eléments	Formules	Poids (t)
Elément 1 $d_1 = 14.40\text{ m}$ $d_2 = 14\text{ m}$ $H = 6.35\text{ m}$ $\gamma_b = 2,5$	$P_1 = \frac{\pi}{4} \gamma_b \times H \times (d_1^2 - d_2^2)$	141.57
Etanchéité $\gamma_{et} = 0,07\text{ t/m}^2$ $H = 6.35\text{ m}$ $d_2 = 14\text{ m}$	$P_3 = \pi d_2 H \gamma_{et}$	19.54
Total	$P_t = P_1 + P_2$	161.11

➤ Poids du cône de réduction :

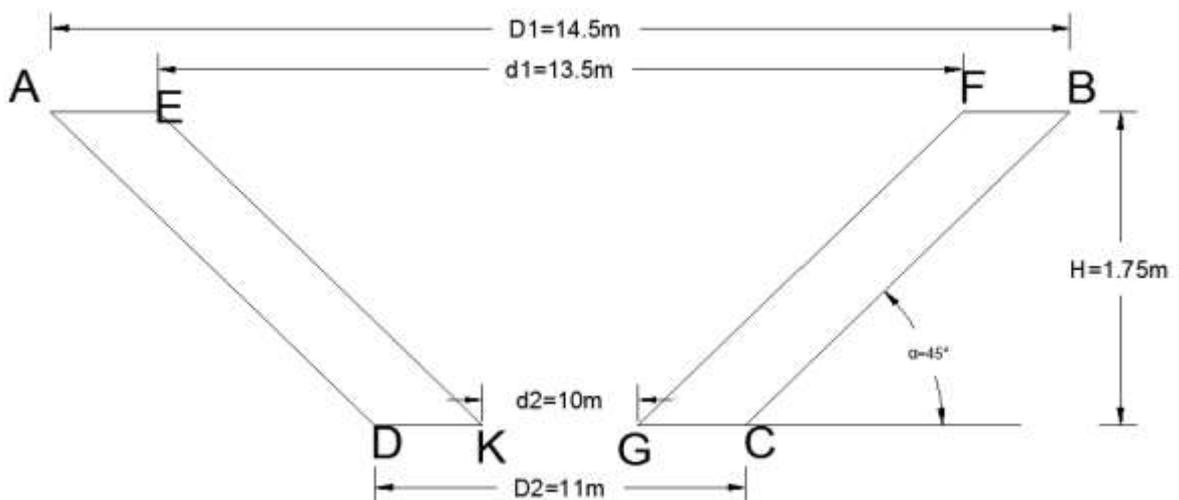


Figure 3.9 : Dimensions du cône de réduction.

Tableau 3.10 : Calcul du Poids du cône de réduction.

Désignations	Formules	Poids (t)
Cône plein $D_1 = 14,50 \text{ m}$ $D_2 = 11,00 \text{ m}$ $H = 1,75 \text{ m}$ $\gamma_b = 2,5 \text{ t/m}^3$	$P_1 = \frac{\pi}{12} (D_1^2 + D_2^2 + d_1 D_1) \times \gamma_b \times H$	561.81
Cône vide $d_1 = 13,50 \text{ m}$ $d_2 = 10,00 \text{ m}$ $H = 1,75 \text{ m}$ $\gamma_b = 2,5 \text{ t/m}^3$	$P_2 = \frac{\pi}{12} (D_1^2 + D_2^2 + d_1 D_1) \times \gamma_b \times H$	477.66
Etanchéité intérieure $\gamma_{et} = 0.07 \text{ t/m}^2$ $\alpha = 45^\circ$	$P_{et.int} = \frac{\pi(d_1^2 - d_2^2)}{4 \sin \alpha} \gamma_{et}$	6.39
Etanchéité extérieure $\gamma_{et} = 0.018 \text{ t/m}^2$ $\alpha = 45^\circ$	$P_{et.ext} = \frac{\pi(D_1^2 - D_2^2)}{4 \sin \alpha} \gamma_{et}$	1.78
Total	$P = P_1 - P_2 + P_{et.ext} + P_{et.int}$	92.32

➤ *Poids de la cheminée :*

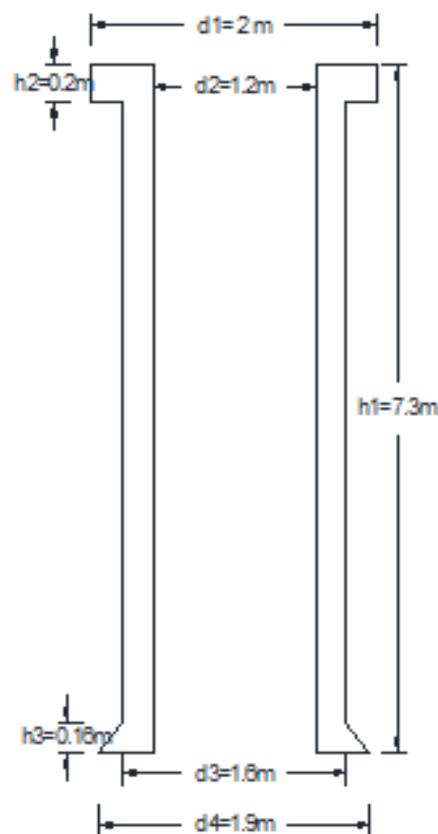


Figure 3.10 : Dimensions de la cheminée.

Tableau 3.11 : Calcul du poids de la cheminée.

Désignations	Formules	Poids (t)
Elément 1 $d_3 = 1,6 \text{ m}$ $d_2 = 1,2 \text{ m}$ $h_1 = 7,3 \text{ m}$ $\gamma_b = 2,5 \text{ t/m}^3$	$P_1 = \frac{\pi}{4} \gamma_b \times h_1 \times (d_3^2 - d_2^2)$	16.05
Elément 2 $d_1 = 2 \text{ m}$ $d_3 = 1,6 \text{ m}$ $h_2 = 0.2 \text{ m}$ $\gamma_b = 2,5 \text{ t/m}^3$	$P_2 = \frac{\pi}{4} \gamma_b \times h_2 \times (d_1^2 - d_3^2)$	0.57
Elément 3 $h_3 = 0.16 \text{ m}$ $d_3 = 1,6 \text{ m}$ $d_4 = 1,9 \text{ m}$	$P_3 = \frac{\pi}{4} \gamma_b \times h_3 \times (d_4^2 - d_3^2) \times 0.5$	0.16
l'étanchéité $\gamma_{et} = 0.07 \text{ t/m}^2$ $R = 0.8 \text{ m}$ $h = 7 \text{ m}$	$P_{et} = 2 \times \pi \times R \times h \times \gamma_{et}$	2.46
Totale	$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_{et}$	19.24

3.3.2. Poids du support :

➤ Réservoir posé sur des pilotis :

- Poids des poteaux :

$b = 0.8 \text{ m}$

$L = 0.8 \text{ m}$

$H = 24.6 \text{ m}$

$\gamma_b = 2,5 \text{ t/m}^3$

On a : 12 poteaux

$P_1 = (L \times b \times H \times \gamma_b) \times 12$

$P_1 = 472.32 \text{ t}$

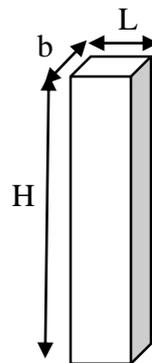


Figure 3.11 : Dimensions des poteaux.

- Poids des entretoises :

$b = 0.5 \text{ m}$

$L = 2 \text{ h} = 0.6 \text{ m}$

On a : 72 entretoises

$P_2 = (L \times b \times h \times \gamma_b) \times 72$

$P_2 = 108.00 \text{ t}$

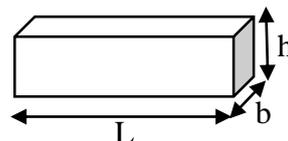


Figure 3.12 : Dimension des entretoises

Poids total du fut : $P = P_1 + P_2 = 472.32 + 108$

$P = 580.32 \text{ t}$

➤ **Réservoir posé sur une tour cylindrique :**

Pour pouvoir comparer les deux réservoirs, nous prendrons la section transversale de la tour cylindrique égale à la section transversale des 12 poteaux.

La section transversale des 12 poteaux est donnée par la relation suivante :

$$A_p = 12 * b * h$$

b et h coté des poteaux, b = h = 0.80 m

$$\text{Et } A_p = 12 \times 0.8 \times 0.8 = 7.68 \text{ m}^2$$

La section de la tour est :

$$A_t = A_p = \pi \times (R_{ext}^2 - R_{int}^2) \Rightarrow R_{int} = \sqrt{R_{ext}^2 - \frac{A_p}{\pi}}$$

Nous avons : $R_{ext} = 5.50 \text{ m}$ d'où : $R_{int} = 5.27 \text{ m}$

L'épaisseur de la paroi de la tour est :

$$R_{ext} - R_{int} = 0.23 \text{ m}$$

Nous adoptons : $e = 0.25 \text{ m}$

- Poids de la tour :

$$P_{tour} = \pi \times H \times \gamma_b \times (R_{ext}^2 - R_{int}^2)$$

$$P_{tour} = 519.25 \text{ t}$$

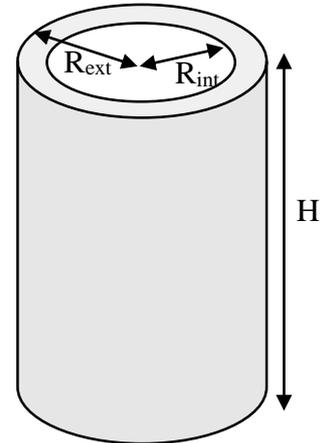


Figure 3.13 : Dimensions de la tour.

3.3.3. Calcul du poids du radier :

Les dimensions du radier sont les suivantes :

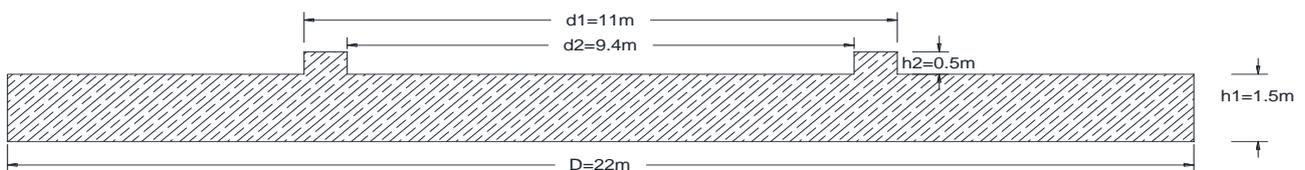


Figure 3.14 : Dimensions du radier.

$$D = 22 \text{ m}$$

$$H_1 = 1.5 \text{ m}$$

$$H_2 = 0.5 \text{ m}$$

$$d_1 = 11 \text{ m}$$

$$d_2 = 9.4 \text{ m}$$

$$P_1 = \frac{\pi D^2}{4} \times H_1 \times \gamma_b ; \quad P_1 = 1424,775 \text{ t}$$

$$P_2 = \frac{\pi}{4} \times H_2 \times \gamma_b \times (d_1^2 - d_2^2) ; \quad P_2 = 32,028 \text{ t}$$

Poids total du radier :

$$P = P_1 + P_2 = 1424,775 + 32,028 ; \quad P = 1456,803 \text{ t}$$

3.4. Calcul du centre de gravité de la cuve par rapport au radier :

Z_i = centre de gravité de l'élément "i" considéré par rapport au radier.

P_i = poids de l'élément "i"

Le centre de gravité de la cuve par rapport au radier est donné par la formule suivante :

$$Z_r = \frac{\sum P_i \times Z_i}{\sum P_i}$$

Tableau 3.12 : Valeurs du centre de gravité des éléments.

N°	Elément	Zi [m]	Pi [t]
1	Dalle circulaire du lanterneau	39.00	0.25
2	Voile cylindrique du lanterneau	38.57	0.65
3	Coupole supérieure	37.08	59.21
4	ceinture supérieure	36.40	27.61
5	cylindre	32.92	161.11
6	cheminée	32.25	19.24
7	ceinture intermédiaire	29.41	34.97
8	cône de réduction	28.44	92.32
9	ceinture inférieure	27.08	63.60
10	coupole inférieure	27.93	36.97
		$\sum P_i \times Z_i$	495.93 [tm]
		$\sum P_i$	15 568.60 [t]

D'où le centre de gravité de la cuve par rapport au radier est :

$$Z_r = \frac{495.93}{15\,568.60} ; Z_r = \mathbf{31.39\ m}$$

Tableau 3.13 : Récapitulatif.

Elément		Poids (t)
Lanterneau		1.041
Coupole supérieure		59.21
Coupole inférieure		36.97
Ceinture supérieure		27.61
Ceinture intermédiaire		34.97
Ceinture inférieure		63.60
Cylindre		161.11
Cône de réduction		92.32
Cheminée		19.24
Fût	pilotis	580.32
	Tour cylindrique	519.25
Eau		1113.30
Poids du radier		1456.80
Poids de la cuve		496.07
pilotis	Poids total vide	2533.19
	Poids total plein	3646.49
Tour cylindrique	Poids total vide	2472.12
	Poids total plein	3953.66

3.5. Calcul hydrodynamique :

3.5.1. Réservoir posé sur des pilotis :

Données :

Masse de la cuve : $M_c = 496.07 \text{ t}$

Masse du fut : $M_{\text{pilotis}} = 580.32 \text{ t}$

Rayon de la cuve : $R = 7.00 \text{ m}$

Masse de l'eau dans la cuve : $M_e = 1113.30 \text{ t}$

Hauteur de la tour : $L = 24.60 \text{ m}$

➤ *Calcul de la hauteur d'eau de la cuve cylindrique équivalente H_e :*

Le réservoir équivalent et le réservoir réel ont la même capacité.

$$V_c = \pi R^2 H_e ; H_e = \frac{V_c}{\pi R^2}$$

V_c : Volume d'eau dans la cuve.

$$V_c = 1113.30 \text{ m}^3$$

$$H_e = \frac{1113.30}{\pi \times 7.00^2} ; H_e = 7.23 \text{ m}$$

➤ *Calcul de la masse inerte M_i :*

$$M_i = M_e \frac{\text{th}\left(\sqrt{3} \frac{R}{H_e}\right)}{\left(\sqrt{3} \frac{R}{H_e}\right)}$$

$$M_i = 1113.30 \times \frac{\text{th} \times \left(\sqrt{3} \times \frac{7.00}{7.23}\right)}{\sqrt{3} \times \frac{7.00}{7.23}} ;$$

$$M_i = 619.19 \text{ t}$$

➤ *Calcul de la hauteur h_i :*

$$h_i = \frac{3}{8} \times H_e$$

$$h_i = \frac{3}{8} \times 7.23$$

$$h_i = 2.71 \text{ m}$$

➤ *Calcul de la masse M_1 :*

$$M_1 = M_i + M_c + \frac{33}{140} \times M_{\text{pilotis}}$$

$$M_1 = 619.19 + 496.07 + \frac{33}{140} \times 580.32$$

$$M_1 = 1\,252.05 \text{ t}$$

➤ *Calcul de la masse M_0 :*

$$M_0 = M_e \times 0.318 \times \frac{R}{He} \times \text{th} \left(1.84 \times \frac{He}{R} \right)$$

$$M_0 = 1113.30 \times 0.318 \times \frac{7.00}{7.23} \text{th} \left(1.84 \frac{7.23}{7.00} \right)$$

$$\mathbf{M_0 = 327.70 t}$$

➤ *Calcul de h_0 :*

$$h_0 = He \times \left[1 - \frac{1}{\alpha \times \text{th}\alpha} + \frac{1}{\alpha \times \text{sh}\alpha} \right]$$

Avec :

$$\alpha = \sqrt{\frac{5}{2}} \times \frac{He}{R} \quad ; \quad \alpha = \sqrt{\frac{5}{2}} \times \frac{7.23}{7.00}$$

$$\alpha = 1.634$$

Alors ;

$$h_0 = 7.23 \times \left[1 - \frac{1}{1.634 \times \text{th}(1.634)} + \frac{1}{1.634 \times \text{sh}(1.634)} \right]$$

$$\mathbf{h_0 = 4.25 m}$$

➤ *Calcul de la raideur de couplage ($M_0 - M_i$) K_1 :*

$$K_1 = M_0 \times \omega_0^2$$

Calcul de la pulsation fondamentale de vibration du liquide ω_0 :

$$\omega_0^2 = \frac{g}{R} \sqrt{\frac{27}{8}} \text{th} \left(\sqrt{\frac{27}{8}} \times \frac{He}{R} \right)$$

g : l'accélération de la pesanteur ; $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

$$\omega_0^2 = \frac{9.81}{7.00} \times \sqrt{\frac{27}{8}} \times \text{th} \left(\sqrt{\frac{27}{8}} \times \frac{7.23}{7.00} \right)$$

$$\mathbf{\omega_0^2 = 2.46 \text{ (rd/s)}^2}$$

D'où :

$$K_1 = 327.70 \times 2.46$$

$$\mathbf{K_1 = 806.63 \text{ KN/m}}$$

➤ *Calcul de la raideur du support K_0 :*

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{P' L^3}{3 \cdot g \cdot EI}} = 2\pi \sqrt{\frac{M_t}{K_0}} ;$$

$$K_0 = \frac{3 \cdot g \cdot EI \cdot M_t}{P' \cdot L^3}$$

Avec ; $P = M_t = M_c + M_e$

$$P = M_t = 496.07 + 1113.30 = \mathbf{1609.37 \text{ t}}$$

$$P' = \left(P + \frac{33}{140} M_{\text{pilotis}} \right) \times g$$

$$P' = \left(1609.37 + \frac{33}{140} 580.32 \right) \times 9.81$$

$$\mathbf{P' = 17\,129.84 \text{ t}}$$

- *Module de Young :*

$$E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}} = 11000 \sqrt[3]{25} ; \quad (f_{c28} = 25 \text{ MPa})$$

$$\mathbf{E_{ij} = 32\,164\,195.12 \text{ KN/m}^2}$$

- *Inertie des pilotis :*

$$\mathbf{I = 100.29 \text{ m}^3} \quad (*)$$

(*) Ce calcul a été établi conformément au programme Excel mis au point par Melle **Linda Tabellout**.

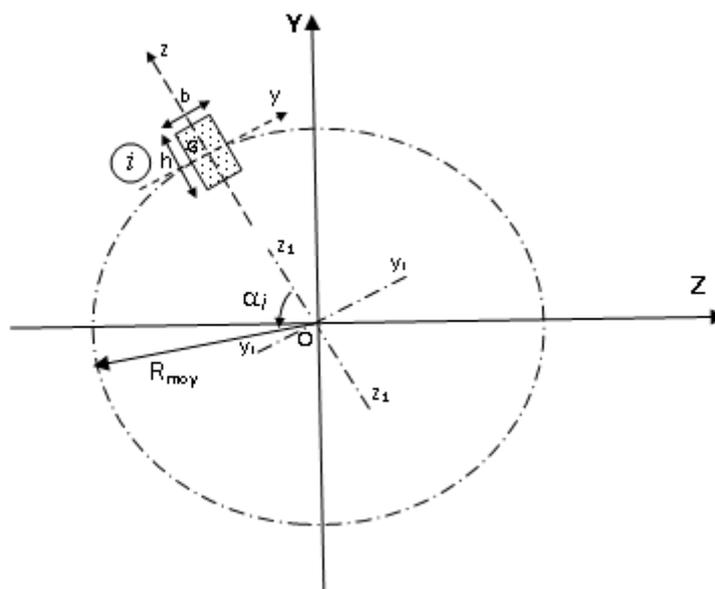


Figure 3.15 : Représentation d'un poteau dans le repère passant par son centre de gravité G.

$$\text{Par rapport à l'axe } O_Z : I_Z = n \left(\frac{I_{z_1}^i + I_{y_1}^i}{2} \right) + \left(\frac{I_{z_1}^i - I_{y_1}^i}{2} \right) \sum_{i=1}^n \cos 2\alpha_i$$

$$\text{Par rapport à l'axe } O_Y : I_Y = n \left(\frac{I_{z_1}^i + I_{y_1}^i}{2} \right) - \left(\frac{I_{z_1}^i - I_{y_1}^i}{2} \right) \sum_{i=1}^n \cos 2\alpha_i$$

$I_Y; I_Z$: Moments d'inertie par rapport aux repère global ($O_Y; O_Z$)

$I_{y_1}; I_{z_1}$: Moment d'inertie par rapport aux axes ($O_{y_1}; O_{z_1}$) en effectuant un changement de repère (théorème d'HUGENS).

Le lecteur intéressé par plus de détail est invité à consulter le mémoire de fin d'études de Master Académique option structures intitulé : « Recherche des axes principaux pour les moments d'inertie d'un réservoir surélevé en support pilotis »

- La raideur K_0 :

$$K_0 = \frac{3 g E I M_t}{P' l^3}$$

$$K_0 = \frac{3 \times 9.81 \times 32\,164\,195.12 \times 100.29 \times 1609.37}{17129.84 \times (24.60)^3}$$

$$K_0 = 599\,126.06 \text{ KN/m}$$

➤ Calcul de la pulsation des modes propres ω_I et ω_{II} du 1^{er} et 2^{eme} mode de vibration :

$$K_{00} = K_1 = 806.63 \text{ KN/m}$$

$$K_{11} = K_0 + K_1 = 599\,932.69 \text{ KN/m}$$

$$K_{01} = K_{10} = -K_1 = -806.63 \text{ KN/m}$$

$$\omega_{I,II}^2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{K_{00}}{M_0} + \frac{K_{11}}{M_1} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{K_{00}}{M_0} - \frac{K_{11}}{M_1} \right)^2 - 4 \times \left(\frac{K_{01} \times K_{10}}{M_0 \times M_1} \right)} \right]$$

$$\omega_{I,II}^2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{806.69}{327.70} + \frac{599\,932.69}{1252.05} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{806.629}{327.70} - \frac{599\,932.69}{1252.048} \right)^2 - 4 \left(\frac{806.63^2}{327.70 \times 1252.048} \right)} \right]$$

$$\omega_1^2 = 2.458 \text{ (rd/s)}^2$$

$$\omega_1 = 1.568 \text{ rd/s}$$

$$\omega_{II}^2 = 479.164 \text{ (rd/s)}^2$$

$$\omega_{II} = 21.890 \text{ rd/s}$$

➤ *Calcul des périodes propres :*

$$T_I = \frac{2\pi}{\omega_I}; \quad T_I = \frac{2 \times 3.14}{1.568} = 4.01 \text{ s}$$

$$T_I = 4.01 \text{ s}$$

$$T_{II} = \frac{2\pi}{\omega_{II}}; \quad T_{II} = \frac{2 \times 3.14}{21.890} = 0.29 \text{ s}$$

$$T_{II} = 0.29 \text{ s}$$

➤ *Calcul des modes propres :*

• **Mode I :**

$$a_{I0} = 1$$

$$a_{I1} = - \frac{K_{00} - \omega_I^2 M_0}{K_{01}} \times a_{I0}$$

$$a_{I1} = - \frac{806.63 - 2.46 \times 327.70}{-806.63} \times 1$$

$$a_{I1} = 1.35 \times 10^{-3}$$

• **Mode II :**

$$a_{II0} = 1$$

$$a_{II1} = - \frac{K_{00} - \omega_{II}^2 \times M_0}{K_{01}} \times a_{II0}$$

$$a_{II1} = - \frac{806.63 - 479.16 \times 327.70}{-806.63} \times 1$$

$$a_{II1} = -193.67$$

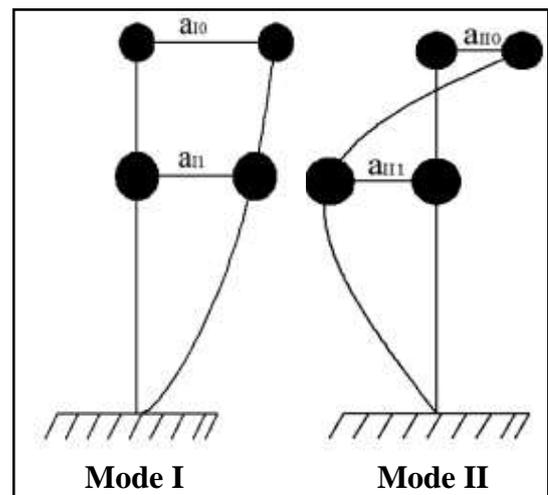


Figure 4.16 : Représentation des modes propres du réservoir sur pilotis.

➤ *Calcul du coefficient de distribution :*

$$\gamma_i = \frac{\sum M_k \times a_{ik}}{\sum M_k \times a_{ik}^2}$$

• **Mode I :**

$$\gamma_I = \frac{M_0 \times a_{I0} + M_1 \times a_{I1}}{M_0 \times a_{I0}^2 + M_1 \times a_{I1}^2}$$

$$\gamma_I = \frac{327.70 \times 1 + 1252.05 \times 1.35 \times 10^{-3}}{327.70 \times (1)^2 + 1252.048 \times (1.35 \times 10^{-3})^2}$$

$$\gamma_I = 1.005$$

• **Mode II :**

$$\gamma_{II} = \frac{M_0 \times a_{II0} + M_1 \times a_{II1}}{M_0 \times a_{II0}^2 + M_1 \times a_{II1}^2}$$

$$\gamma_{II} = \frac{327.70 \times 1 + 1252.05 \times (-193.67)}{327.700 \times (1)^2 + 1252.05 \times (-193.67)^2}$$

$$\gamma_{II} = -5.16 \times 10^{-3}$$

➤ *Coefficient de comportement R :*

Le réservoir surélevé est considéré comme un pendule inverse où plus de 50% de sa masse est concentrée dans le tiers supérieur de la structure, le coefficient de comportement R est pris égale à 2 (RPA 99 modifié 2003).

$$R = 2$$

➤ *Facteur de correction d'amortissement η :*

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{(2 + \xi)}} \geq 0.7$$

Où : ξ (%) est le pourcentage d'amortissement critique, donné en fonction du matériau constitutif, du type de structure et de l'importance des remplissages.

Dans ce cas :(réservoir sur pilotis)

$$\xi = 6\% \quad ; \quad \eta = 0.935$$

➤ **Facteur de qualité Q :**

$$Q = 1 + \sum_{q=1}^6 P_q$$

P_q : est la pénalité à retenir selon que le critère de qualité Q "est observé ou non".

La redondance en plan et la condition minimale sur les files de contreventement n'ont pas été observées, d'où le facteur de qualité :

- Sa valeur est donnée :

$$\sum_{q=1}^6 P_q = 0,1 \quad ; \quad Q = 1,1$$

3.5.1.1. Zone sismique « III » : (forte sismicité)

Coefficient d'accélération de zone : **$A = 0.30$**

a. Site très meuble "S4" :

Les périodes caractéristiques associées au Site « S4 » sont :

$$T_1 = 0,15 \text{ s et } T_2 = 0,70 \text{ s.}$$

➤ **Calcul de l'accélération S_{aI}/g :**

- **Mode I :**

$$T_1 = 4.01 \text{ s} > 3.0 \text{ s} \quad ; \quad \frac{S_{aI}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aI}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.30) \left(\frac{0.70}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.01}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aI}}{g} = 0.113$$

- **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.29 \text{ s} \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.30) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 0.482$$

➤ *Calcul des forces sismiques pour les deux modes :*

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.14 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone III, site S4 du réservoir posé sur des pilotis.

Les modes	F _{0i} (t)	F _{1i} (t)
I	37.19	0.19
II	-0.82	603.07

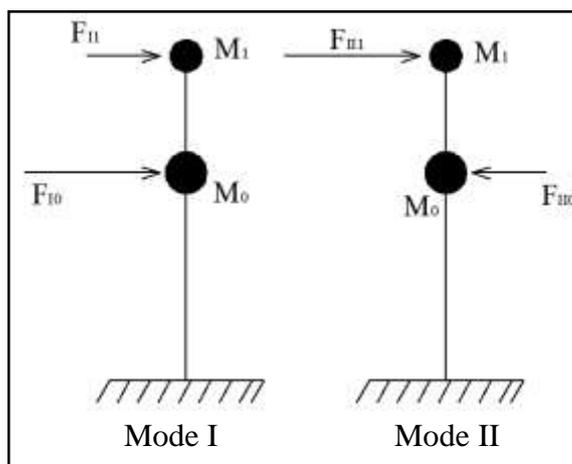


Figure 3.17 : Représentation des forces sismique du réservoir sur pilotis.

➤ *Evaluation de la sollicitation maximale résultante :*

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(37.19)^2 + (-0.82)^2} \quad ; \quad F_0 = 37.20 \text{ t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.19)^2 + (603.07)^2} \quad ; \quad F_1 = 603.07 \text{ t}$$

b. Site meuble "S3" : (Zone III)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S3 » est : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,50$ s.

➤ **Calcul de l'accélération S_{ai}/g :**• **Mode I :**

$$T_I = 4.01s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.30) \left(\frac{0.50}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.01}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = \mathbf{0.090}$$

• **Mode II :**

$$T_I \leq T_{II} = 0.29s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aiI}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aiI}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.30) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aiI}}{g} = \mathbf{0.482}$$

➤ **Calcul des forces sismiques pour les deux modes :**

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.15 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone III, site S3 du réservoir posé sur des pilotis.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	29.72	0.15
II	-0.82	603.07

➤ **Evaluation de la sollicitation maximale résultante :**

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(29.72)^2 + (-0.82)^2} \quad ; \quad F_0 = \mathbf{29.73 \text{ t}}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.15)^2 + (603.07)^2} \quad ; \quad F_1 = \mathbf{603.07 \text{ t}}$$

c. Site ferme "S2" : (Zone III)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S2 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,40$ s.

➤ *Calcul de l'accélération S_{al}/g :*• **Mode I :**

$$T_1 = 4.01s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{al}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{al}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.30) \left(\frac{0.40}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.01}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{al}}{g} = \mathbf{0.078}$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.29s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{all}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{all}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.30) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{all}}{g} = \mathbf{0.482}$$

➤ *Calcul des forces sismiques pour les deux modes :*

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.16 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone III, site S2 du réservoir posé sur des pilotis.

Les modes	F _{0i} (t)	F _{1i} (t)
I	25.61	0.13
II	-0.82	603.07

➤ *Evaluation de la sollicitation maximale résultante :*

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(25.61)^2 + (-0.82)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_0 = 25.63 \text{ t}}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.13)^2 + (603.07)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_1 = 603.07 \text{ t}}$$

d. Site rocheux "S1" : (Zone III)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S2 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,30$ s.

➤ **Calcul de l'accélération S_{al}/g :**• **Mode I :**

$$T_1 = 4.01s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{al}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{al}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.30) \left(\frac{0.30}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.01}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right) ;$$

$$\frac{S_{al}}{g} = 0.064$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.29s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{all}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{all}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.30) \left(\frac{1.1}{2}\right) ;$$

$$\frac{S_{all}}{g} = 0.482$$

➤ **Calcul des forces sismiques pour les deux modes :**

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.17 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone III, site S1 du réservoir posé sur des pilotis.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	21.14	0.11
II	-0.82	603.07

➤ **Evaluation de la sollicitation maximale résultante :**

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(21.14)^2 + (-0.82)^2} \quad ; \quad F_0 = 25.63 \text{ t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.11)^2 + (603.07)^2} \quad ; \quad F_1 = 603.07 \text{ t}$$

3.5.1.2. Zone sismique « IIb » : (moyenne sismicité)

Coefficient d'accélération de zone : $A = 0.25$

a. Site très meuble "S4" :

Les périodes caractéristiques associées au Site « S4 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,70$ s.

➤ Calcul de l'accélération S_{ai}/g :

• Mode I :

$$T_I = 4.01s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.25) \left(\frac{0.70}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.01}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aI}}{g} = 0.094$$

• Mode II :

$$T_1 \leq T_{II} = 0.29s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.25) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 0.402$$

➤ Calcul des forces sismiques pour les deux modes :

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.18 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIb, site S4 du réservoir posé sur des pilotis.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	31.00	0.16
II	-0.68	502.56

➤ Evaluation de la sollicitation maximale résultante :

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(31.00)^2 + (-0.68)^2} \quad ; \quad F_0 = 31.01 \text{ t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.16)^2 + (502.56)^2} \quad ; \quad F_1 = 502.56 \text{ t}$$

b. Site meuble "S3" : (Zone IIb)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S3 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,50$ s.

➤ **Calcul de l'accélération S_{ai}/g :**• **Mode I :**

$$T_I = 4.01s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.25) \left(\frac{0.50}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.01}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 0.075$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.29s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.25) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 0.402$$

➤ **Calcul des forces sismiques pour les deux modes :**

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.19 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIb, site S3 du réservoir posé sur des pilotis.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	24.77	0.13
II	-0.68	502.56

➤ **Evaluation de la sollicitation maximale résultante :**

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(24.77)^2 + (-0.68)^2} \quad ; \quad F_0 = 24.78 \text{ t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.13)^2 + (502.56)^2} \quad ; \quad F_1 = 502.56 \text{ t}$$

c. Site ferme "S2" : (Zone IIb)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S2 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,40$ s.

➤ *Calcul de l'accélération S_{al}/g :*• **Mode I :**

$$T_1 = 4.01s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{al}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{al}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.25) \left(\frac{0.40}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.01}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{al}}{g} = \mathbf{0.065}$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.29s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{all}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{all}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.25) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{all}}{g} = \mathbf{0.402}$$

➤ *Calcul des forces sismiques pour les deux modes :*

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.20 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIb, site S2 du réservoir posé sur des pilotis.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	21.34	0.11
II	-0.68	502.56

➤ *Evaluation de la sollicitation maximale résultante :*

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(21.34)^2 + (-0.68)^2} \quad ; \quad F_0 = \mathbf{21.35 \text{ t}}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.11)^2 + (502.56)^2} \quad ; \quad F_1 = \mathbf{502.56 \text{ t}}$$

d. Site rocheux "S1" : (Zone IIb)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S1 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,30$ s.

➤ **Calcul de l'accélération S_{ai}/g :**• **Mode I :**

$$T_I = 4.01s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.25) \left(\frac{0.30}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.01}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = \mathbf{0.053}$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.29s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.25) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = \mathbf{0.402}$$

➤ **Calcul des forces sismiques pour les deux modes :**

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.21 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIb, site S1 du réservoir posé sur des pilotis.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	17.62	0.09
II	-0.68	502.56

➤ **Evaluation de la sollicitation maximale résultante :**

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(17.62)^2 + (-0.68)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_0 = 17.63 \text{ t}}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.09)^2 + (502.56)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_1 = 502.56 \text{ t}}$$

3.5.1.3. Zone sismique « IIa » : (moyenne sismicité)

Coefficient d'accélération de zone : $A = 0.20$

a. Site très meuble "S4" :

Les périodes caractéristiques associées au Site « S4 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,70$ s.

➤ Calcul de l'accélération S_{ai}/g :

• Mode I :

$$T_1 = 4.01s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{al}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{al}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.20) \left(\frac{0.70}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.01}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aI}}{g} = 0.075$$

• Mode II :

$$T_1 \leq T_{II} = 0.29s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.20) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 0.322$$

➤ Calcul des forces sismiques pour les deux modes :

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.22 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIa, site S4 du réservoir posé sur des pilotis.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	24.80	0.13
II	-0.54	402.05

➤ Evaluation de la sollicitation maximale résultante :

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(24.80)^2 + (-0.54)^2} \quad ; \quad F_0 = 24.80 \text{ t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.13)^2 + (402.05)^2} \quad ; \quad F_1 = 402.05 \text{ t}$$

b. Site meuble "S3" : (Zone IIa)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S3 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,50$ s.

➤ **Calcul de l'accélération S_{ai}/g :**• **Mode I :**

$$T_1 = 4.01s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.20) \left(\frac{0.50}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.01}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aI}}{g} = 0.060$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.29s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.20) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 0.322$$

➤ **Calcul des forces sismiques pour les deux modes :**

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.23 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIa, site S3 du réservoir posé sur des pilotis.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	19.81	0.10
II	-0.54	402.05

➤ **Evaluation de la sollicitation maximale résultante :**

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(19.81)^2 + (-0.54)^2} \quad ; \quad F_0 = 19.82 \text{ t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.10)^2 + (402.05)^2} \quad ; \quad F_1 = 402.05 \text{ t}$$

c. Site ferme "S2" : (Zone IIa)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S2 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,40$ s.

➤ *Calcul de l'accélération S_{ai}/g :*• **Mode I :**

$$T_1 = 4.01s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.20) \left(\frac{0.40}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.01}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aI}}{g} = 0.052$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.29s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.20) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 0.322$$

➤ *Calcul des forces sismiques pour les deux modes :*

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.24 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIa, site S2 du réservoir posé sur des pilotis.

Les modes	F _{0i} (t)	F _{1i} (t)
I	17.07	0.09
II	-0.54	402.05

➤ *Evaluation de la sollicitation maximale résultante :*

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(17.07)^2 + (-0.54)^2} \quad ; \quad F_0 = 17.08 \text{ t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.09)^2 + (402.05)^2} \quad ; \quad F_1 = 402.05 \text{ t}$$

d. Site rocheux "S1" : (Zone IIa)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S1 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,30$ s.

➤ **Calcul de l'accélération S_{ai}/g :**• **Mode I :**

$$T_1 = 4.01s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.20) \left(\frac{0.30}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.01}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aI}}{g} = 0.043$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.29s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.20) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 0.322$$

➤ **Calcul des forces sismiques pour les deux modes :**

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.25 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIa, site S1 du réservoir posé sur des pilotis.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	14.10	0.07
II	-0.54	402.05

➤ **Evaluation de la sollicitation maximale résultante :**

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(14.10)^2 + (-0.54)^2} \quad ; \quad F_0 = 14.11 \text{ t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.07)^2 + (402.05)^2} \quad ; \quad F_1 = 402.05 \text{ t}$$

3.5.1.4. Zone sismique « I » : (faible sismicité)

Coefficient d'accélération de zone : $A = 0.12$

a. Site très meuble "S4" :

Les périodes caractéristiques associées au Site « S4 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,70$ s.

➤ *Calcul de l'accélération S_{ai}/g :*

- **Mode I :**

$$T_1 = 4.01s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.12) \left(\frac{0.70}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.01}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aI}}{g} = 0.045$$

- **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.29s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.12) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 0.193$$

➤ *Calcul des forces sismiques pour les deux modes :*

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.26 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone I, site S4 du réservoir posé sur des pilotis.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	14.88	0.08
II	-0.33	241.23

➤ *Evaluation de la sollicitation maximale résultante :*

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(14.88)^2 + (-0.33)^2} \quad ; \quad F_0 = 14.88 \text{ t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.08)^2 + (241.23)^2} \quad ; \quad F_1 = 241.23 \text{ t}$$

b. Site meuble "S3" : (Zone I)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S3 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,50$ s.

➤ *Calcul de l'accélération S_{ai}/g :*• **Mode I :**

$$T_1 = 4.01s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.12) \left(\frac{0.50}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.01}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aI}}{g} = 0.036$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.29s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.12) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 0.193$$

➤ *Calcul des forces sismiques pour les deux modes :*

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.27 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone I, site S3 du réservoir posé sur des pilotis.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	11.89	0.06
II	-0.33	241.23

➤ *Evaluation de la sollicitation maximale résultante :*

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(11.89)^2 + (-0.33)^2} \quad ; \quad F_0 = 11.89 \text{ t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.06)^2 + (241.23)^2} \quad ; \quad F_1 = 241.23 \text{ t}$$

c. Site ferme "S2" : (Zone I)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S2 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,40$ s.

➤ *Calcul de l'accélération S_{ai}/g :*• **Mode I :**

$$T_I = 4.01s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.12) \left(\frac{0.40}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.01}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = \mathbf{0.031}$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.29s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.12) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = \mathbf{0.193}$$

➤ *Calcul des forces sismiques pour les deux modes :*

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.28 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone I, site S2 du réservoir posé sur des pilotis.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	10.24	0.05
II	-0.33	241.23

➤ *Evaluation de la sollicitation maximale résultante :*

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(10.24)^2 + (-0.33)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_0 = 10.25 \text{ t}}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.05)^2 + (241.23)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_1 = 241.23 \text{ t}}$$

d. Site rocheux "S1" : (Zone I)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S1 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,30$ s.

➤ **Calcul de l'accélération S_{ai}/g :**• **Mode I :**

$$T_I = 4.01s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.12) \left(\frac{0.30}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.01}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = \mathbf{0.026}$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.29s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.935(1.25 \times 0.12) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = \mathbf{0.193}$$

➤ **Calcul des forces sismiques pour les deux modes :**

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.29 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone I, site S1 du réservoir posé sur des pilotis.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	8.46	0.04
II	-0.33	241.23

➤ **Evaluation de la sollicitation maximale résultante :**

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(8.46)^2 + (-0.33)^2} \quad ; \quad ; \quad \mathbf{F_0 = 8.46 t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.04)^2 + (241.23)^2} \quad ; \quad ; \quad \mathbf{F_1 = 241.23 t}$$

3.5.1.5. Récapitulatif des résultats des forces dues au séisme du réservoir sur pilotis :

➤ *Les forces d'impulsion : (action passive)*

Tableau 3.30 : forces d'impulsion en fonction du site et de la zone sismique pour le réservoir posé sur des pilotis.

Zones Sismiques \ Sites	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	F ₁ (t)	F ₁ (t)	F ₁ (t)	F ₁ (t)
Zone I Faible sismicité	241.23	241.23	241.23	241.23
Zone IIa Moyenne sismicité	402.05	402.05	402.05	402.05
Zone IIb Moyenne sismicité	502.56	502.56	502.56	502.56
Zone III Forte sismicité	603.07	603.07	603.07	603.07

➤ *Les forces d'oscillations : (action active)*

Tableau 3.31 : forces d'oscillations en fonction du site et de la zone sismique pour le réservoir posé sur des pilotis.

Zone Sismique \ Sites	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	F ₀ (t)	F ₀ (t)	F ₀ (t)	F ₀ (t)
Zone I Faible sismicité	8.46	10.25	11.89	14.88
Zone IIa Moyenne sismicité	14.11	17.08	19.82	24.80
Zone IIb Moyenne sismicité	17.63	21.35	24.78	31.00
Zone III Forte sismicité	21.16	25.63	29.73	37.20

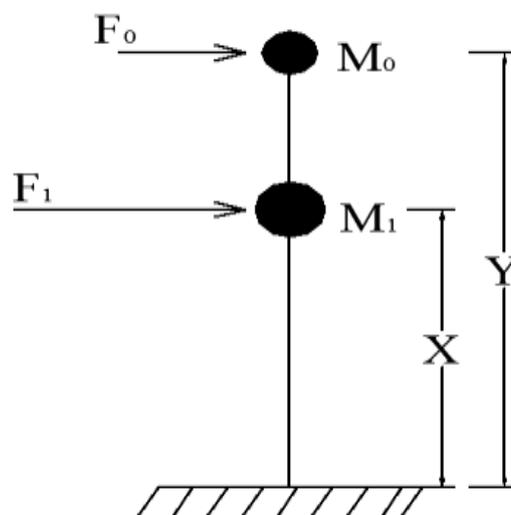


Figure 3.18 : Représentation des forces d'impulsion et d'oscillations maximales du réservoir posé sur des pilotis.

3.5.1.6. Calcul du point d'application des forces F_0 et F_1 par rapport au radier :

Le point d'application de la force F_1 est à une distance X par rapport au radier :

$$X = \frac{\sum M_i x_i}{\sum M_i}$$

$$X = \frac{M_c(Z_r) + M_i(L + h_i) + \frac{33}{140} M_{\text{pilotis}}(L - 0.5 \frac{33}{140} L)}{M_c + M_i + \frac{33}{140} M_{\text{pilotis}}}$$

$$X = \frac{496.07 \times 31.39 + 619.19(26.6 + 2.71) + \frac{33}{140} 580.32 (26.6 - 0.5 \frac{33}{140} 26.6)}{496.07 + 619.19 + \frac{33}{140} 580.32}$$

$$\mathbf{X = 29.50 \text{ m}}$$

Le point d'application de la force F_0 est à une distance Y par rapport au radier :

$$Y = L \times h_0 \quad ; \quad Y = 26.6 \times 4.25$$

$$\mathbf{Y = 30.85 \text{ m}}$$

3.5.2. Réservoir sur tour :

Données :

Masse de la cuve : $M_c = 496.07 \text{ t}$

Masse de la tour : $M_t = 519.25 \text{ t}$

Rayon de la cuve : $R = 7.00 \text{ m}$

Masse de l'eau dans la cuve : $M_e = 1113.30 \text{ t}$

Hauteur de la tour : $L = 24.60 \text{ m}$

➤ *Calcul de la hauteur d'eau de la cuve cylindrique équivalente H_e :*

Le réservoir équivalent et le réservoir réel ont la même capacité.

$$V_c = \pi R^2 H_e \quad ; \quad H_e = \frac{V_c}{\pi R^2}$$

V_c : Volume d'eau dans la cuve.

$$V_c = 1113.30 \text{ m}^3$$

$$H_e = \frac{1113.30}{\pi \times 7.00^2} \quad ; \quad \mathbf{H_e = 7.23 \text{ m}}$$

- *Calcul de la masse inerte M_i :*

$$M_i = M_e \frac{\text{th}\left(\sqrt{3} \frac{R}{He}\right)}{\left(\sqrt{3} \frac{R}{He}\right)} ;$$

$$M_i = 1113.30 \times \frac{\text{th} \times \left(\sqrt{3} \times \frac{7.00}{7.23}\right)}{\sqrt{3} \times \frac{7.00}{7.23}} ;$$

$$\mathbf{M_i = 619.19 t}$$

- *Calcul de la hauteur h_i :*

$$h_i = \frac{3}{8} \times He$$

$$h_i = \frac{3}{8} \times 7.23$$

$$\mathbf{h_i = 2.71 m}$$

- *Calcul de la masse M_1 :*

$$M_1 = M_i + M_c + \frac{33}{140} \times M_{\text{tour}}$$

$$M_1 = 619.19 + 496.07 + \frac{33}{140} \times 519.25$$

$$\mathbf{M_1 = 1\ 237.65 t}$$

- *Calcul de la masse M_0 :*

$$M_0 = M_e \times 0.318 \times \frac{R}{He} \times \text{th}\left(1.84 \times \frac{He}{R}\right)$$

$$M_0 = 1113.30 \times 0.318 \times \frac{7.00}{7.23} \text{th}\left(1.84 \times \frac{7.232}{7.00}\right)$$

$$\mathbf{M_0 = 327.70 t}$$

- *Calcul de h_0 :*

$$h_0 = He \times \left[1 - \frac{1}{\alpha \times \text{th}\alpha} + \frac{1}{\alpha \times \text{sh}\alpha}\right]$$

Avec :

$$\alpha = \sqrt{\frac{5}{2}} \times \frac{He}{R} \quad ; \quad \alpha = \sqrt{\frac{5}{2}} \times \frac{7.23}{7.00}$$

$$\alpha = 1.634$$

Alors ;

$$h_0 = 7.23 \left[1 - \frac{1}{1.634 \times \text{th}(1.634)} + \frac{1}{1.634 \times \text{sh}(1.634)} \right]$$

$$h_0 = 4.25 \text{ m}$$

➤ *Calcul de la raideur de couplage ($M_0 - M_i$) K_1 :*

$$K_1 = M_0 \times \omega_0^2$$

Calcul de la pulsation fondamentale de vibration du liquide ω_0 :

$$\omega_0^2 = \frac{g}{R} \sqrt{\frac{27}{8}} \text{th} \left(\sqrt{\frac{27}{8}} \times \frac{H_e}{R} \right)$$

g : l'accélération de la pesanteur ; $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

$$\omega_0^2 = \frac{9.81}{7.00} \times \sqrt{\frac{27}{8}} \times \text{th} \left(\sqrt{\frac{27}{8}} \times \frac{7.23}{7.00} \right)$$

$$\omega_0^2 = 2.46 \text{ (rd/s)}^2$$

D'où :

$$K_1 = 327.70 \times 2.46$$

$$K_1 = 806.63 \text{ KN/m}$$

➤ *Calcul de la raideur du support K_0 :*

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{P' L^3}{3.6 EI}} = 2\pi \sqrt{\frac{M_t}{K_0}} ;$$

$$K_0 = \frac{3.6 EI M_t}{P' L^3}$$

Avec :

$$P = M_t = M_c + M_e$$

$$P = M_t = 496.07 + 1113.30 = 1609.37 \text{ t}$$

$$P' = \left(P + \frac{33}{140} M_{tour} \right) \times g$$

$$P' = \left(1609.37 + \frac{33}{140} 519.25 \right) \times 9.81$$

$$P' = 16988.61 \text{ t}$$

- Module de Young :

$$E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}} = 11000 \sqrt[3]{25} \quad (f_{c28} = 25 \text{ MPa})$$

$$E_{ij} = \mathbf{32\ 164\ 195.12 \text{ KN/m}^2}$$

- Inertie de la tour :

$$I = \frac{\pi}{4} (R_{\text{ext}}^4 - R_{\text{int}}^4)$$

R_{ext} : Rayon extérieur de la tour cylindrique ; $R_{\text{ext}} = 5.5 \text{ m}$

R_{int} : Rayon intérieur de la tour cylindrique ; $R_{\text{int}} = 5.25 \text{ m}$

$$I = \frac{\pi}{4} (5.5^2 - 5.25^2) \quad ; \quad \mathbf{I = 121.97 \text{ m}^4}$$

- La raideur : K_0

$$K_0 = \frac{3 g EI M_t}{P' l^3}$$

$$K_0 = \frac{3 \times 9.81 \times 32164195.12 \times 121.97 \times 1609.37}{16\ 988.61 \times (24.60)^3}$$

$$\mathbf{K_0 = 734\ 675.86 \text{ KN/m}}$$

➤ Calcul de la pulsation des modes propres ω_I et ω_{II} du 1^{er} et 2^{eme} mode de vibration :

$$K_{00} = K_1 = 806.63 \text{ KN/m}$$

$$K_{11} = K_0 + K_1 = 735\ 482.49 \text{ KN/m}$$

$$K_{01} = K_{10} = -K_1 = -806.63 \text{ KN/m}$$

$$\omega_{I,II}^2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{K_{00}}{M_0} + \frac{K_{11}}{M_1} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{K_{00}}{M_0} - \frac{K_{11}}{M_1} \right)^2 - 4 \times \left(\frac{K_{01} \times K_{10}}{M_0 \times M_1} \right)} \right]$$

$$\omega_{I,II}^2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{806.69}{327.70} + \frac{735\ 482.49}{1\ 237.65} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{806.629}{327.70} - \frac{735\ 482.49}{1\ 237.65} \right)^2 - 4 \left(\frac{806.63^2}{327.70 \times 1\ 237.65} \right)} \right]$$

$$\omega_I^2 = \mathbf{2.464 \text{ (rd/s)}^2}$$

$$\omega_I = \mathbf{1.570 \text{ rd/s}}$$

$$\omega_{II}^2 = \mathbf{594.253 \text{ (rd/s)}^2}$$

$$\omega_{II} = \mathbf{24.377 \text{ rd/s}}$$

➤ *Calcul des périodes :*

$$T_I = \frac{2\pi}{\omega_I} ; \quad T_I = \frac{2 \times 3.14}{1.570} = 4.00 \text{ s}$$

$$T_I = 4.00 \text{ s}$$

$$T_{II} = \frac{2\pi}{\omega_{II}} ; \quad T_{II} = \frac{2 \times 3.14}{24.377} = 0.26 \text{ s}$$

$$T_{II} = 0.26 \text{ s}$$

➤ *Calcul des modes propres :*

• **Mode I :**

$$a_{I0} = 1$$

$$a_{I1} = - \frac{K_{00} - \omega_I^2 M_0}{K_{01}} \times a_{I0}$$

$$a_{I1} = - \frac{806.63 - 2.464 \times 327.70}{-806.63} \times 1$$

$$a_{I1} = 1.10 \times 10^{-3}$$

• **Mode II :**

$$a_{II0} = 1$$

$$a_{II1} = - \frac{K_{00} - \omega_{II}^2 \times M_0}{K_{01}} \times a_{II0}$$

$$a_{II1} = - \frac{806.63 - 594.25 \times 327.70}{-806.63} \times 1$$

$$a_{II1} = -240.42$$

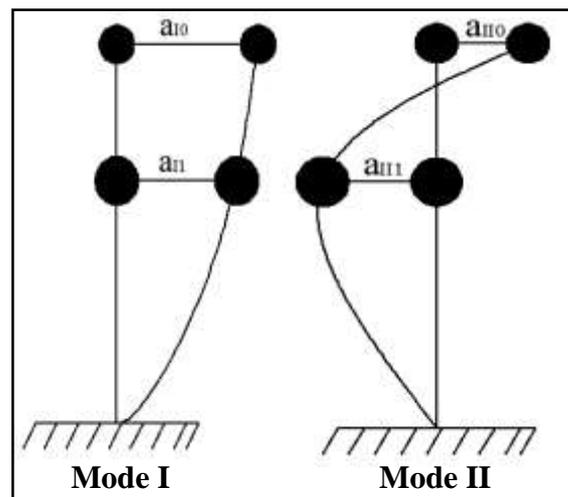


Figure 4.19 : Représentation des modes propres du réservoir sur tour.

➤ *Calcul du coefficient de distribution :*

$$\gamma_I = \frac{\sum M_k \times a_{ik}}{\sum M_k \times a_{ik}^2}$$

• **Mode I :**

$$\gamma_I = \frac{M_0 \times a_{I0} + M_1 \times a_{I1}}{M_0 \times a_{I0}^2 + M_1 \times a_{I1}^2}$$

$$\gamma_I = \frac{327.70 \times 1 + 1237.65 \times 1.10 \times 10^{-3}}{327.70 \times (1)^2 + 1237.65 \times (1.10 \times 10^{-3})^2}$$

$$\gamma_I = \mathbf{1.0042}$$

• **Mode II :**

$$\gamma_{II} = \frac{M_0 \times a_{II0} + M_1 \times a_{II1}}{M_0 \times a_{II0}^2 + M_1 \times a_{II1}^2}$$

$$\gamma_{II} = \frac{327.70 \times 1 + 1237.65 \times (-240.42)}{327.70 \times (1)^2 + 1237.65 \times (-240.42)^2}$$

$$\gamma_{II} = \mathbf{-4.15 \times 10^{-3}}$$

➤ *Coefficient de comportement R :*

Le réservoir surélevé est considéré comme un Pendule inverse où plus de 50% de sa masse est concentrée dans le tiers supérieur de la structure, le coefficient de comportement R est pris égale à 2 (RPA 99 modifié 2003).

$$\mathbf{R = 2}$$

➤ *Facteur de correction d'amortissement η :*

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{(2 + \xi)}} \geq 0.7$$

Où : ξ (%) est le pourcentage d'amortissement critique, donné en fonction du matériau constitutif, du type de structure et de l'importance des remplissages.

Dans ce cas : (réservoir sur pilotis)

$$\xi = 10\% \quad ; \quad \eta = \mathbf{0.764}$$

➤ **Facteur de qualité Q :**

$$Q = 1 + \sum_1^6 P_q$$

P_q : est la pénalité à retenir selon que le critère de qualité Q "est observé ou non".

La redondance en plan et la condition minimale sur les files de contreventement n'ont pas été observées, d'où le facteur de qualité ;

- Sa valeur est donnée :

$$\sum_{q=1}^6 P_q = 0,1 \quad ; \quad Q = 1,1$$

3.5.2.1. Zone sismique « III » : (forte sismicité)

Coefficient d'accélération de zone : $A = 0.30$

a. Site très meuble "S4" :

Les périodes caractéristiques associées au Site « S4 » sont :

$$T_1 = 0,15 \text{ s et } T_2 = 0,70 \text{ s.}$$

➤ **Calcul de l'accélération S_{al}/g :**

- **Mode I :**

$$T_1 = 4.00\text{s} > 3.0\text{s} \quad ; \quad \frac{S_{al}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{al}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.30) \left(\frac{0.70}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.00}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{al}}{g} = 0.0924$$

- **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.26\text{s} \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{all}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{all}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.30) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{all}}{g} = 0.394$$

➤ *Calcul des forces sismiques pour les deux modes :*

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.32 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone III, site S4 du réservoir posé tour.

Les modes	F _{0i} (t)	F _{1i} (t)
I	30.40	0.13
II	-0.54	486.87

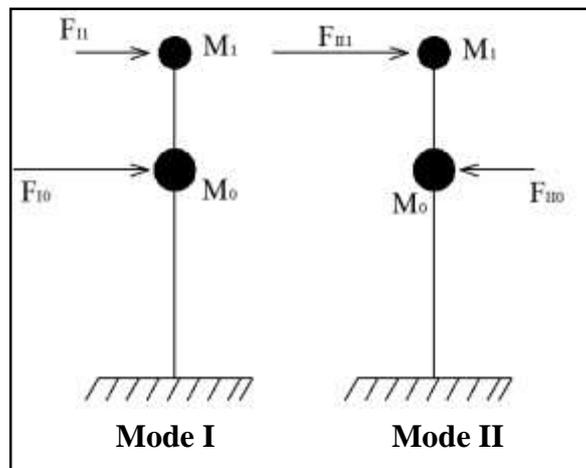


Figure 3.20 : représentation des forces sismique du réservoir sur tour.

➤ *Evaluation de la sollicitation maximale résultante :*

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(30.40)^2 + (-0.54)^2} ; \quad F_0 = 30.41 \text{ t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.13)^2 + (486.87)^2} ; \quad F_1 = 486.87 \text{ t}$$

b. Site meuble "S3" : (Zone III)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S3 » est : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,50$ s.

➤ **Calcul de l'accélération S_{ai}/g :**• **Mode I :**

$$T_1 = 4.01s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.30) \left(\frac{0.50}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.00}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = \mathbf{0.074}$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.26s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{all}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{all}}{g} = 2.5 \times 0.764 (1.25 \times 0.30) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{all}}{g} = \mathbf{0.394}$$

➤ **Calcul des forces sismiques pour les deux modes :**

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.33 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone III, site S3 du réservoir posé tour.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	24.29	0.10
II	-0.54	486.87

➤ **Evaluation de la sollicitation maximale résultante :**

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(24.29)^2 + (-0.54)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_0 = 24.30 t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.10)^2 + (486.87)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_1 = 486.87 t}$$

c. Site ferme "S2" : (Zone III)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S2 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,40$ s.

➤ *Calcul de l'accélération S_{ai}/g :*• **Mode I :**

$$T_1 = 4.00s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.30) \left(\frac{0.40}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.00}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = \mathbf{0.064}$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.26s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.30) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = \mathbf{0.394}$$

➤ *Calcul des forces sismiques pour les deux modes :*

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.34 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone III, site S2 du réservoir posé tour.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	20.93	0.09
II	-0.54	486.87

➤ *Evaluation de la sollicitation maximale résultante :*

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(20.93)^2 + (-0.54)^2} \quad ; \quad F_0 = \mathbf{20.94t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.09)^2 + (486.87)^2} \quad ; \quad F_1 = \mathbf{486.87 t}$$

d. Site rocheux "S1" : (Zone III)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S2 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,30$ s.

➤ **Calcul de l'accélération S_{ai}/g :**• **Mode I :**

$$T_1 = 4.00s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.30) \left(\frac{0.30}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.00}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = \mathbf{0.053}$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.26s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.30) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = \mathbf{0.394}$$

➤ **Calcul des forces sismiques pour les deux modes :**

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.35 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone III, site S1 du réservoir posé tour.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	17.28	0.07
II	-0.54	486.87

➤ **Evaluation de la sollicitation maximale résultante :**

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(17.28)^2 + (-0.54)^2} \quad ; \quad F_0 = \mathbf{17.29 \text{ t}}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.07)^2 + (486.87)^2} \quad ; \quad F_1 = \mathbf{486.87 \text{ t}}$$

3.5.2.2. Zone sismique « IIb » : (moyenne sismicité)

Coefficient d'accélération de zone : $A = 0.25$

a. Site très meuble "S4" :

Les périodes caractéristiques associées au Site « S4 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,70$ s.

➤ Calcul de l'accélération S_{ai}/g :

• Mode I :

$$T_1 = 4.00s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.25) \left(\frac{0.70}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.00}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aI}}{g} = 0.077$$

• Mode II :

$$T_1 \leq T_{II} = 0.26s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.25) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 0.328$$

➤ Calcul des forces sismiques pour les deux modes :

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.36 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIb, site S4 du réservoir posé tour.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	25.33	0.11
II	-0.45	405.72

➤ Evaluation de la sollicitation maximale résultante :

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(25.33)^2 + (-0.45)^2} \quad ; \quad F_0 = 25.34 \text{ t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.11)^2 + (405.72)^2} \quad ; \quad F_1 = 405.72 \text{ t}$$

b. Site meuble "S3" : (Zone IIb)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S3 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,50$ s.

➤ *Calcul de l'accélération S_{ai}/g :*• **Mode I :**

$$T_1 = 4.00s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.25) \left(\frac{0.50}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.00}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = \mathbf{0.062}$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.26s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aii}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aii}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.25) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aii}}{g} = \mathbf{0.328}$$

➤ *Calcul des forces sismiques pour les deux modes :*

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.37 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIb, site S3 du réservoir posé tour.

Les modes	F _{0i} (t)	F _{1i} (t)
I	20.24	0.08
II	-0.45	405.72

➤ *Evaluation de la sollicitation maximale résultante :*

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(20.24)^2 + (-0.45)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_0 = 20.25 \text{ t}}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.08)^2 + (405.72)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_1 = 405.72 \text{ t}}$$

c. Site ferme "S2" : (Zone IIb)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S2 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,40$ s.

➤ *Calcul de l'accélération S_{ai}/g :*• **Mode I :**

$$T_1 = 4.00s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.25) \left(\frac{0.40}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.00}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = \mathbf{0.053}$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.26s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aiI}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aiI}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.25) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aiI}}{g} = \mathbf{0.328}$$

➤ *Calcul des forces sismiques pour les deux modes :*

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.38 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIb, site S2 du réservoir posé tour.

Les modes	F _{0i} (t)	F _{1i} (t)
I	17.45	0.07
II	-0.45	405.72

➤ *Evaluation de la sollicitation maximale résultante :*

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(17.45)^2 + (-0.45)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_0 = 17.45 t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.07)^2 + (405.72)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_1 = 405.72 t}$$

d. Site rocheux "S1" : (Zone IIb)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S1 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,30$ s.

➤ **Calcul de l'accélération S_{al}/g :**• **Mode I :**

$$T_1 = 4.00s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{al}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{al}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.25) \left(\frac{0.30}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.00}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{al}}{g} = \mathbf{0.044}$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.26s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{all}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{all}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.25) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{all}}{g} = \mathbf{0.328}$$

➤ **Calculs des forces sismiques pour les deux modes :**

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.39 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIb, site S1 du réservoir posé tour.

Les modes	F _{0i} (t)	F _{1i} (t)
I	14.40	0.06
II	-0.45	405.72

➤ **Evaluation de la sollicitation maximale résultante :**

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(14.40)^2 + (-0.45)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_0 = 14.41 \text{ t}}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.06)^2 + (405.72)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_1 = 405.72 \text{ t}}$$

3.5.2.3. Zone sismique « IIa » : (moyenne sismicité)

Coefficient d'accélération de zone : $A = 0.20$

a. Site très meuble "S4" :

Les périodes caractéristiques associées au Site « S4 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,70$ s.

➤ Calcul de l'accélération S_{ai}/g :

• Mode I :

$$T_1 = 4.00s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.20) \left(\frac{0.70}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.00}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 0.062$$

• Mode II :

$$T_1 \leq T_{II} = 0.26s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aiI}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aiI}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.20) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aiI}}{g} = 0.263$$

➤ Calcul des forces sismiques pour les deux modes :

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.40 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIa, site S4 du réservoir posé tour.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	20.27	0.08
II	-0.36	324.58

➤ Evaluation de la sollicitation maximale résultante :

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(20.27)^2 + (-0.36)^2} \quad ; \quad F_0 = 20.27 \text{ t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.08)^2 + (324.58)^2} \quad ; \quad F_1 = 324.58 \text{ t}$$

b. Site meuble "S3" : (Zone IIa)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S3 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,50$ s.

➤ **Calcul de l'accélération S_{ai}/g :**• **Mode I :**

$$T_I = 4.00s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.20) \left(\frac{0.50}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.00}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aI}}{g} = 0.049$$

• **Mode II :**

$$T_I \leq T_{II} = 0.26s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.20) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 0.263$$

➤ **Calcul des forces sismiques pour les deux modes :**

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.41 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIa, site S3 du réservoir posé tour.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	16.19	0.07
II	-0.36	324.58

➤ **Evaluation de la sollicitation maximale résultante :**

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(16.19)^2 + (-0.36)^2} \quad ; \quad F_0 = 16.20 \text{ t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.07)^2 + (324.58)^2} \quad ; \quad F_1 = 324.58 \text{ t}$$

c. Site ferme "S2" : (Zone IIa)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S2 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,40$ s.

➤ *Calcul de l'accélération S_{ai}/g :*• **Mode I :**

$$T_1 = 4.00s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.20) \left(\frac{0.40}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.00}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aI}}{g} = 0.042$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.26s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.20) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 0.263$$

➤ *Calcul des forces sismiques pour les deux modes :*

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.42 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIa, site S2 du réservoir posé tour.

Les modes	F _{0i} (t)	F _{1i} (t)
I	13.96	0.06
II	-0.36	324.58

➤ *Evaluation de la sollicitation maximale résultante :*

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(13.96)^2 + (-0.36)^2} \quad ; \quad F_0 = 13.96 \text{ t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.06)^2 + (324.58)^2} \quad ; \quad F_1 = 324.58 \text{ t}$$

d. Site rocheux "S1" : (Zone IIa)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S1 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,30$ s.

➤ **Calcul de l'accélération S_{ai}/g :**• **Mode I :**

$$T_I = 4.00s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.20) \left(\frac{0.30}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.00}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aI}}{g} = 0.035$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.26s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.20) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 0.263$$

➤ **Calcul des forces sismiques pour les deux modes :**

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.43 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone IIa, site S1 du réservoir posé tour.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	11.52	0.05
II	-0.36	324.58

➤ **Evaluation de la sollicitation maximale résultante :**

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(11.52)^2 + (-0.36)^2} \quad ; \quad F_0 = 11.53 \text{ t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.05)^2 + (324.58)^2} \quad ; \quad F_1 = 324.58 \text{ t}$$

3.5.2.4. Zone sismique « I » : (faible sismicité)

Coefficient d'accélération de zone : $A = 0.12$

a. Site très meuble "S4" :

Les périodes caractéristiques associées au Site « S4 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,70$ s.

➤ Calcul de l'accélération S_{ai}/g :

• Mode I :

$$T_I = 4.00s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.12) \left(\frac{0.70}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.00}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aI}}{g} = 0.037$$

• Mode II :

$$T_I \leq T_{II} = 0.26s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.12) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 0.158$$

➤ Calcul des forces sismiques pour les deux modes :

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.44 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone I, site S4 du réservoir posé tour.

Les modes	F _{0i} (t)	F _{1i} (t)
I	12.16	0.05
II	-0.21	194.75

➤ Evaluation de la sollicitation maximale résultante :

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(12.16)^2 + (-0.21)^2} \quad ; \quad F_0 = 12.16 \text{ t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.05)^2 + (194.75)^2} \quad ; \quad F_1 = 194.75 \text{ t}$$

b. Site meuble "S3" : (Zone I)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S3 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,50$ s.

➤ **Calcul de l'accélération S_{ai}/g :**• **Mode I :**

$$T_I = 4.00s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.12) \left(\frac{0.50}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.00}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = \mathbf{0.030}$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.26s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.12) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = \mathbf{0.158}$$

➤ **Calcul des forces sismiques pour les deux modes :**

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.45 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone I, site S3 du réservoir posé tour.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	9.72	0.04
II	-0.21	194.75

➤ **Evaluation de la sollicitation maximale résultante :**

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(9.72)^2 + (-0.21)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_0 = 9.72 \text{ t}}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.04)^2 + (194.75)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_1 = 194.75 \text{ t}}$$

c. Site ferme "S2" : (Zone I)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S2 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,40$ s.

➤ *Calcul de l'accélération S_{ai}/g :*• **Mode I :**

$$T_I = 4.00s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.12) \left(\frac{0.40}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.00}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = \mathbf{0.025}$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.26s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.12) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = \mathbf{0.158}$$

➤ *Calcul des forces sismiques pour les deux modes :*

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.46 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone I, site S2 du réservoir posé tour.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	8.37	0.03
II	-0.21	194.75

➤ *Evaluation de la sollicitation maximale résultante :*

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(8.37)^2 + (-0.21)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_0 = 8.38 t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.03)^2 + (194.75)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_1 = 194.75 t}$$

d. Site rocheux "S1" : (Zone I)

Les périodes caractéristiques associées au Site « S1 » sont : $T_1 = 0,15$ s et $T_2 = 0,30$ s.

➤ **Calcul de l'accélération S_{ai}/g :**• **Mode I :**

$$T_I = 4.00s > 3.0s \quad ; \quad \frac{S_{ai}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.12) \left(\frac{0.30}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{4.00}\right)^{5/3} \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{ai}}{g} = \mathbf{0.021}$$

• **Mode II :**

$$T_1 \leq T_{II} = 0.26s \leq T_2 \quad ; \quad \frac{S_{aII}}{g} = 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) ;$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = 2.5 \times 0.764(1.25 \times 0.12) \left(\frac{1.1}{2}\right)$$

$$\frac{S_{aII}}{g} = \mathbf{0.158}$$

➤ **Calcul des forces sismiques pour les deux modes :**

$$F_{ki} = \frac{S_{ai}}{g} \times \gamma_i \times M_k \times a_{ik}$$

Tableau 3.47 : Forces dues au séisme pour les deux modes en zone I, site S1 du réservoir posé tour.

Les modes	F_{0i} (t)	F_{1i} (t)
I	6.91	0.03
II	-0.21	194.75

➤ **Evaluation de la sollicitation maximale résultante :**

La force sismique résultante au niveau de la masse M_k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ki}^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0I}^2 + F_{0II}^2} = \sqrt{(6.91)^2 + (-0.21)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_0 = 6.92 t}$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1I}^2 + F_{1II}^2} = \sqrt{(0.03)^2 + (194.75)^2} \quad ; \quad \mathbf{F_1 = 194.75 t}$$

3.5.2.5. Récapitulatif des résultats des forces dues au séisme du réservoir sur tour :

➤ *Les forces d'impulsion : (action passive)*

Tableau 3.48 : forces d'impulsion en fonction du site et de la zone sismique pour le réservoir posé sur tour.

Sites Zones Sismiques	Site rocheux S1	Site ferme S2	Site meuble S3	Site très meuble S4
	F ₁ (t)	F ₁ (t)	F ₁ (t)	F ₁ (t)
Zone I Faible sismicité	194.75	194.75	194.75	194.75
Zone IIa Moyenne sismicité	324.58	324.58	324.58	324.58
Zone IIb Moyenne sismicité	405.72	405.72	405.72	405.72
Zone III Forte sismicité	486.87	486.87	486.87	486.87

➤ *Les forces d'oscillation : (action active)*

Tableau 3.49 : forces d'oscillation en fonction du site et de la zone sismique pour le réservoir posé sur tour.

Sites Zones Sismiques	Site rocheux S1	Site ferme S2	Site meuble S3	Site très meuble S4
	F ₀ (t)	F ₀ (t)	F ₀ (t)	F ₀ (t)
Zone I Faible sismicité	6.92	8.38	9.72	12.16
Zone IIa Moyenne sismicité	11.53	13.96	16.20	20.27
Zone IIb Moyenne sismicité	14.41	17.45	20.25	25.34
Zone III Forte sismicité	17.29	20.94	24.30	30.41

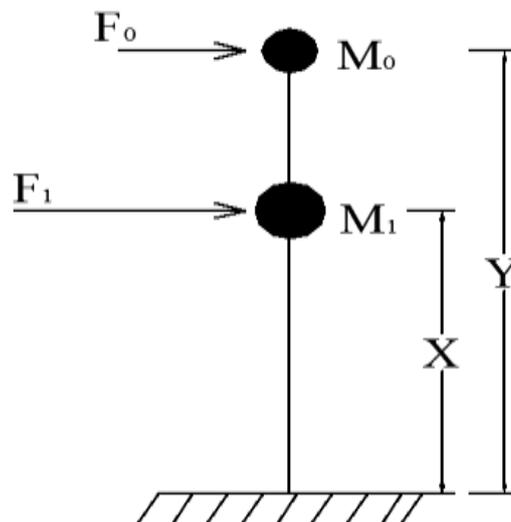


Figure 3.21 : Représentation des forces d'impulsion et d'oscillation maximales du réservoir posé sur tour.

3.5.2.6. Calcul du point d'application des forces F_0 et F_1 par rapport au radier :

Le point d'application de la force F_1 est à une distance X par rapport au radier :

$$X = \frac{\sum M_i x_i}{\sum M_i}$$

$$X = \frac{M_c(Z_r) + M_i(L + h_i) + \frac{33}{140} M_{\text{tour}}(L - 0.5 \frac{33}{140} L)}{M_c + M_i + \frac{33}{140} M_{\text{tour}}}$$

$$X = \frac{496.07 \times 31.39 + 619.19(26.6 + 2.71) + \frac{33}{140} 519.25 (26.6 - 0.5 \frac{33}{140} 26.6)}{496.07 + 619.19 + \frac{33}{140} 519.25}$$

$$\mathbf{X = 29.57 \text{ m}}$$

Le point d'application de la force F_0 est à une distance Y par rapport au radier :

$$Y = L \times h_0 \quad ; \quad Y = 26.6 \times 4.25$$

$$\mathbf{Y = 30.85 \text{ m}}$$

Conclusion :

Durant ce chapitre, nous avons évalué les efforts dues à l'action sismique pour les deux types de réservoir surélevé (tour et pilotis) avec la méthode hydrodynamique de HOUSNER et en adoptant le spectre de réponse du RPA et cela en passant d'abord par le calcul du poids des éléments de l'ouvrage.

Le résultat obtenu des efforts sismiques et leurs points d'application seront exploités pour le calcul des facteurs de sécurité lors du chapitre suivant.

Introduction :

Ce chapitre sera consacré à la discussion et l'interprétation des résultats, tenant compte de deux aspects techniques et économiques. Pour l'aspect technique, nous serons appelé à vérifier l'ouvrage au glissement par le calcul du coefficient de sécurité du glissement F_g , vérifier l'ouvrage au renversement par le calcul du coefficient du renversement F_s , et vérifier les contraintes internes développées sur le support, ces vérifications seront menées pour les deux types de réservoirs dans chaque zone sismique et pour chaque type de sol.

Quant à l'aspect économique, nous aurons à estimer le coût du coffrage et des aciers des deux supports (tour et pilotis) du fait que les deux ouvrages possèdent une cuve et un radier identiques, l'étude économique va départager éventuellement les choix techniques.

A la fin de ce chapitre, nous aboutirons au choix du type de contreventement qui convient pour chaque zone sismique et site d'implantation en fonction des différentes vérifications de stabilité.

4.1. Calcul du facteur de sécurité au glissement :

➤ Calcul des forces verticales F_v :

$$F_v = N_s = \sum P_i$$

- Réservoir posé sur tour : $F_v = N_s = 3\,585.42\text{ t}$
- Réservoir posé sur des pilotis : $F_v = N_s = 3\,646.49\text{ t}$

➤ Calcul des forces horizontales F_h :

La force horizontale est la somme des efforts dus au séisme :

$$F_h = F_0 + F_1$$

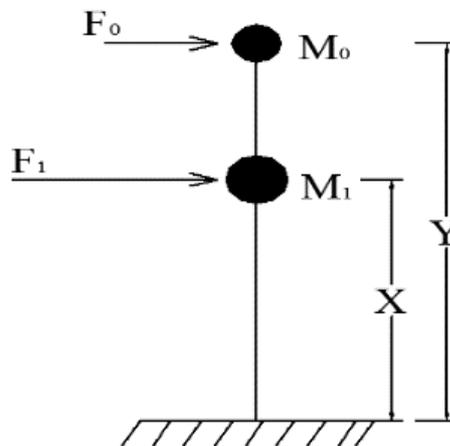


Figure 4.1 : Représentation des forces horizontales.

La somme des forces horizontale pour chaque réservoir est donnée dans le tableau ci-dessus :

Tableau 4.1 : Somme des forces horizontales pour les deux réservoirs.

Sites Zone Sismique	Site rocheux S ₁		Site ferme S ₂		Site meuble S ₃		Site très meuble S ₄	
	Tour F _h [t]	pilotis F _h [t]	Tour F _h [t]	pilotis F _h [t]	Tour F _h [t]	pilotis F _h [t]	Tour F _h [t]	pilotis F _h [t]
Zone I Faible sismicité	201.66	249.83	203.12	251.62	204.47	253.26	206.91	256.24
Zone IIa Moyenne sismicité	336.10	416.39	338.54	419.36	340.78	422.10	344.85	427.07
Zone IIb Moyenne sismicité	420.13	520.49	423.17	524.21	425.97	527.62	431.06	533.84
Zone III Forte sismicité	504.16	624.59	507.81	629.05	511.17	633.15	517.27	640.60

➤ **Facteur de sécurité au glissement :**

Le facteur de sécurité du glissement F_g, doit vérifier l'inégalité suivantes :

$$F_g = \frac{F_v}{F_h} \geq 1.5$$

Le tableau suivant donne les différents facteurs de sécurité du glissement pour les deux réservoirs :

Tableau 4.2 : Facteurs de sécurité du glissement pour les deux réservoirs.

Sites Zone Sismique	Site rocheux S ₁		Site ferme S ₂		Site meuble S ₃		Site très meuble S ₄	
	Tour F _g	Pilotis F _g	Tour F _g	Pilotis F _g	Tour F _g	Pilotis F _g	Tour F _g	Pilotis F _g
Zone I Faible sismicité	17.78	14.60	17.65	14.49	17.54	14.40	17.33	14.23
Zone IIa Moyenne sismicité	10.67	8.76	10.59	8.70	10.52	8.64	10.40	8.54
Zone IIb Moyenne sismicité	8.53	7.01	8.47	6.96	8.42	6.91	8.32	6.83
Zone III Forte sismicité	7.11	5.84	7.06	5.80	7.01	5.76	6.93	5.69

4.1.1. Effet du site d'implantation :

Nous donnerons ci-après la variation du facteur de sécurité au glissement en fonction du site d'implantation pour les quatre zones sismiques pour le réservoir posé sur tour (Figure 4.2), et le réservoir posé sur des pilotis (Figure 4.3), puis nous représentons le pourcentage de variation du facteur de sécurité au glissement d'un site à un autre (Figure 4.4).

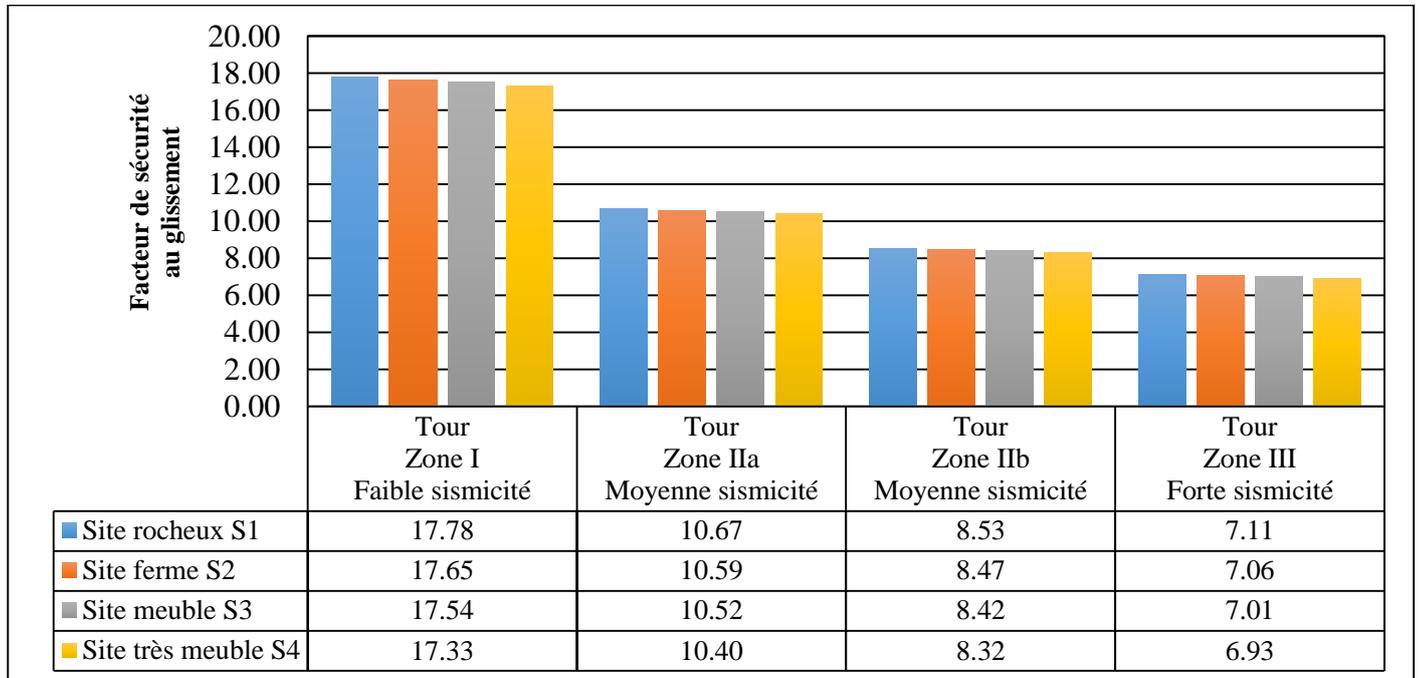


Figure 4.2 : Variation du facteur de sécurité au glissement en fonction du site pour chaque zone sismique pour le réservoir sur tour.

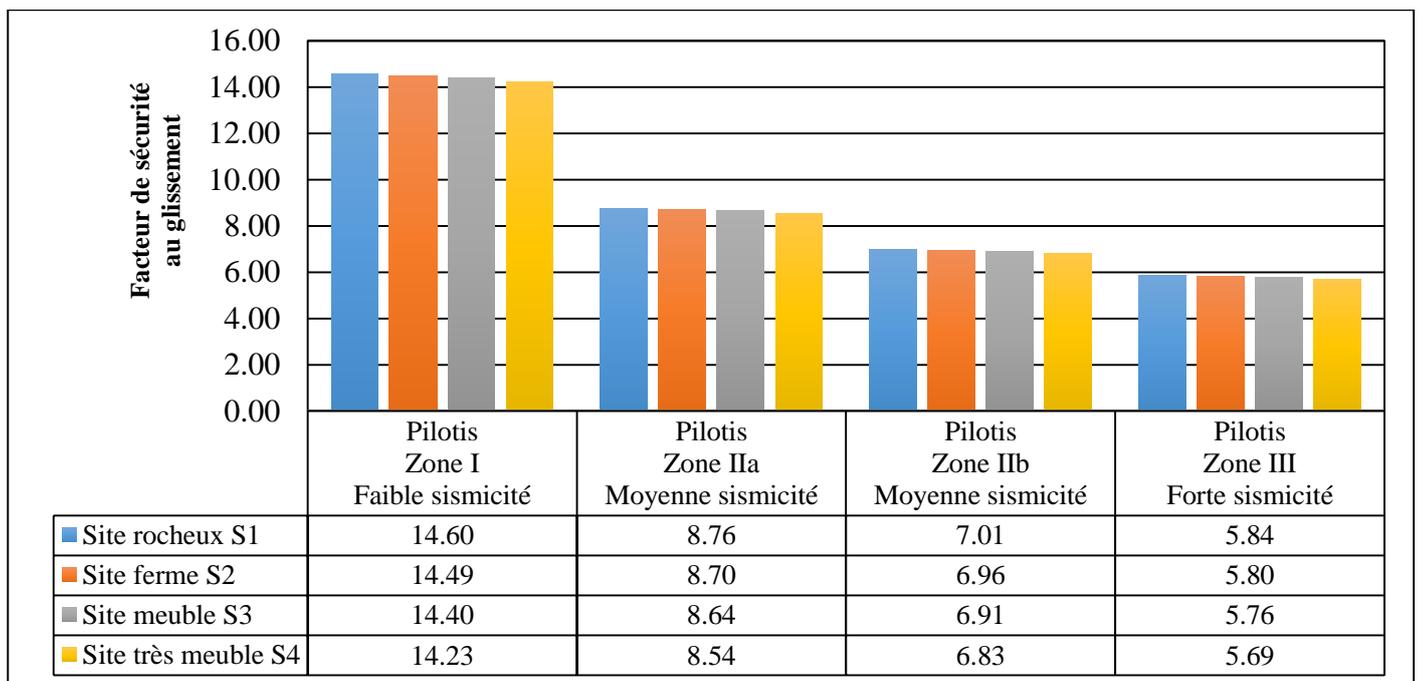


Figure 4.3 : Variation du facteur de sécurité au glissement en fonction du site pour chaque zone sismique pour le réservoir sur pilotis.

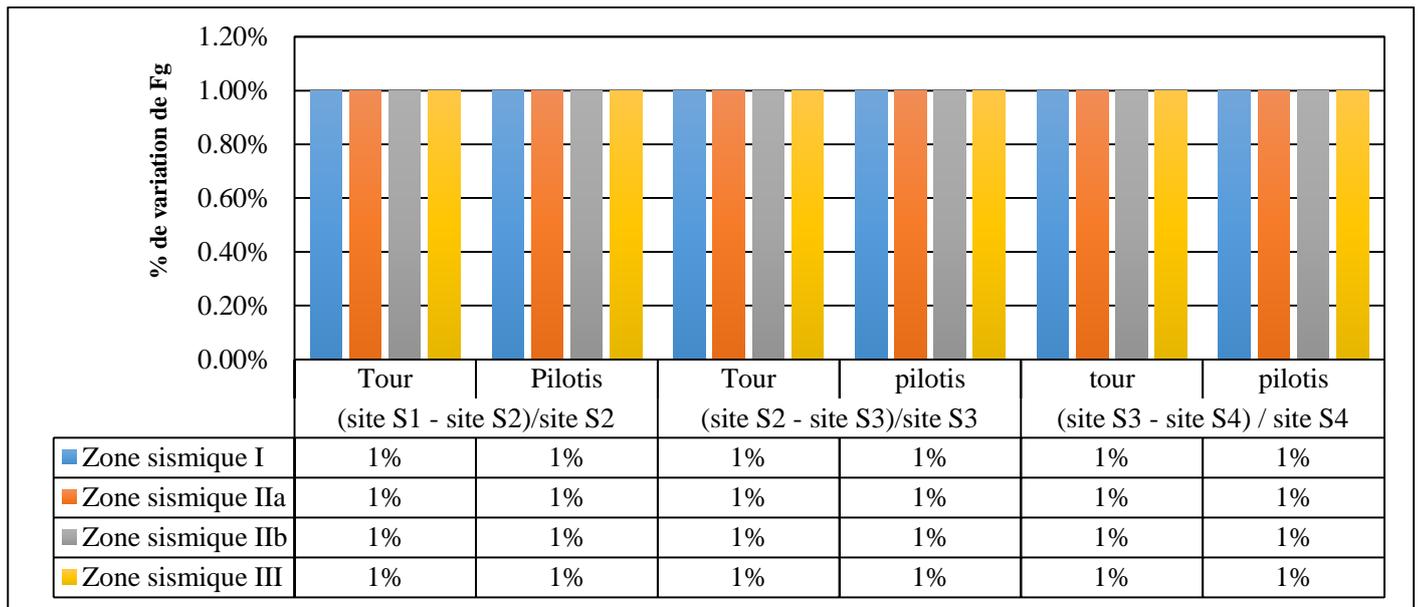


Figure 4.4 : Pourcentage de variation du facteur de sécurité au glissement d'un site à un autre sur chaque zone sismique pour les deux réservoirs.

La variation du facteur de sécurité vis-à-vis du glissement en fonction du site d'implantation reste inchangée pour une zone sismique donnée pour les deux réservoirs surélevés (tour et pilotis) comme nous le constatons sur la figure 4.2 et 4.3.

D'après la figure 4.4, nous remarquons que la variation du facteur de sécurité au glissement pour les deux réservoirs d'un site à un autre pour chaque zone sismique est constante et est de l'ordre de 1% seulement.

A cet effet, nous pouvons conclure qu'il n'y a pas d'effet de site pour une zone sismique donnée.

4.1.2. Effet de la zone sismique :

Nous donnerons ci-après la variation du facteur de sécurité au glissement en fonction de la zone sismique pour les quatre sites d'implantation du réservoir posé sur tour (Figure 4.5), réservoir posé sur des pilotis (Figure 4.6), puis nous représentons le pourcentage de variation du facteur de sécurité au glissement d'une zone à une autre du réservoir posé sur tour (Figure 4.7) et du réservoir posé sur des pilotis (Figure 4.8).

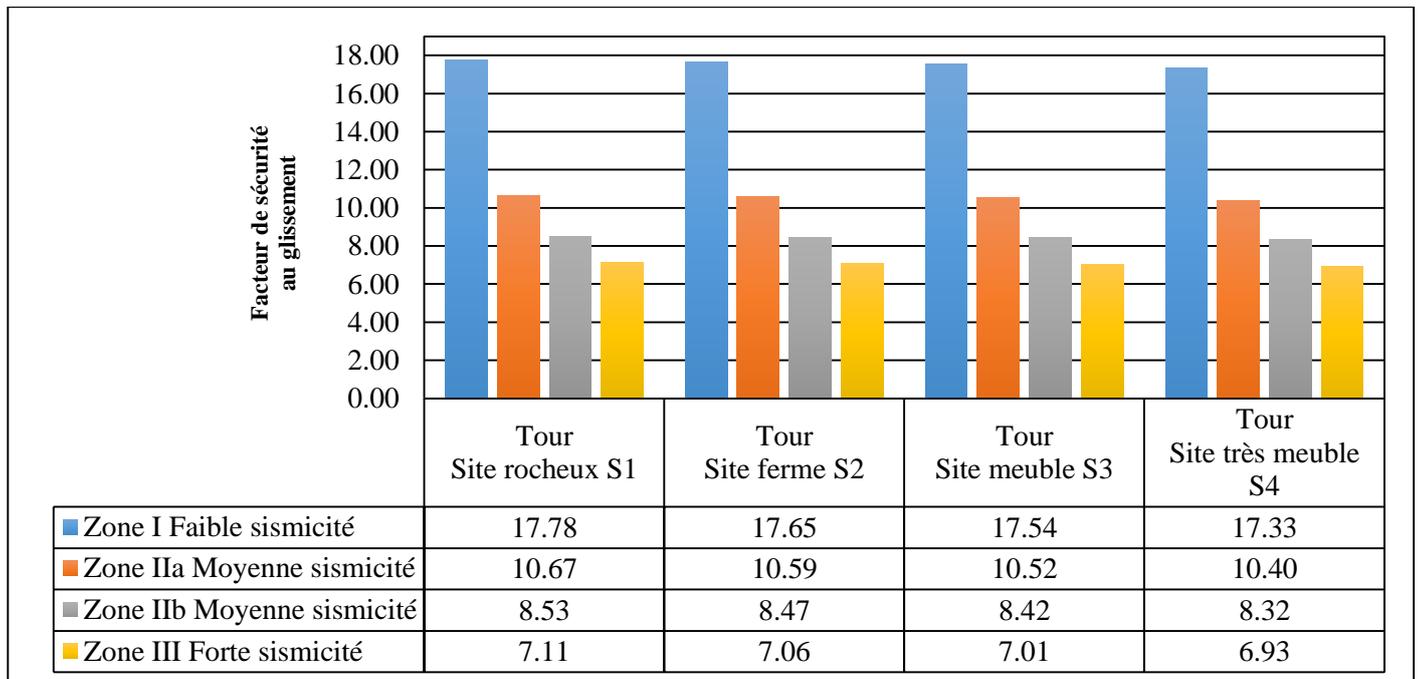


Figure 4.5 : Variation du facteur de sécurité au glissement en fonction de la zone sismique pour chaque site d'implantation du réservoir sur tour.

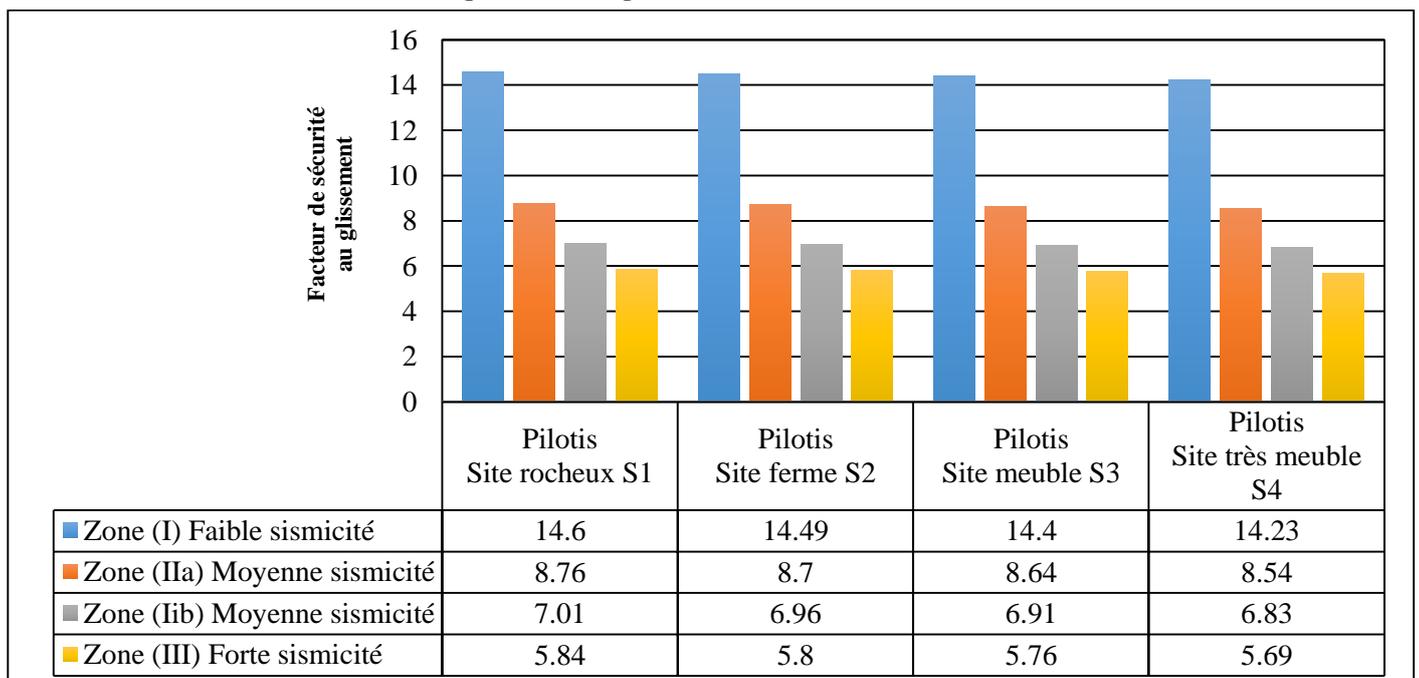


Figure 4.6 : Variation du facteur de sécurité au glissement en fonction de la zone sismique pour chaque site d'implantation du réservoir sur pilotis.

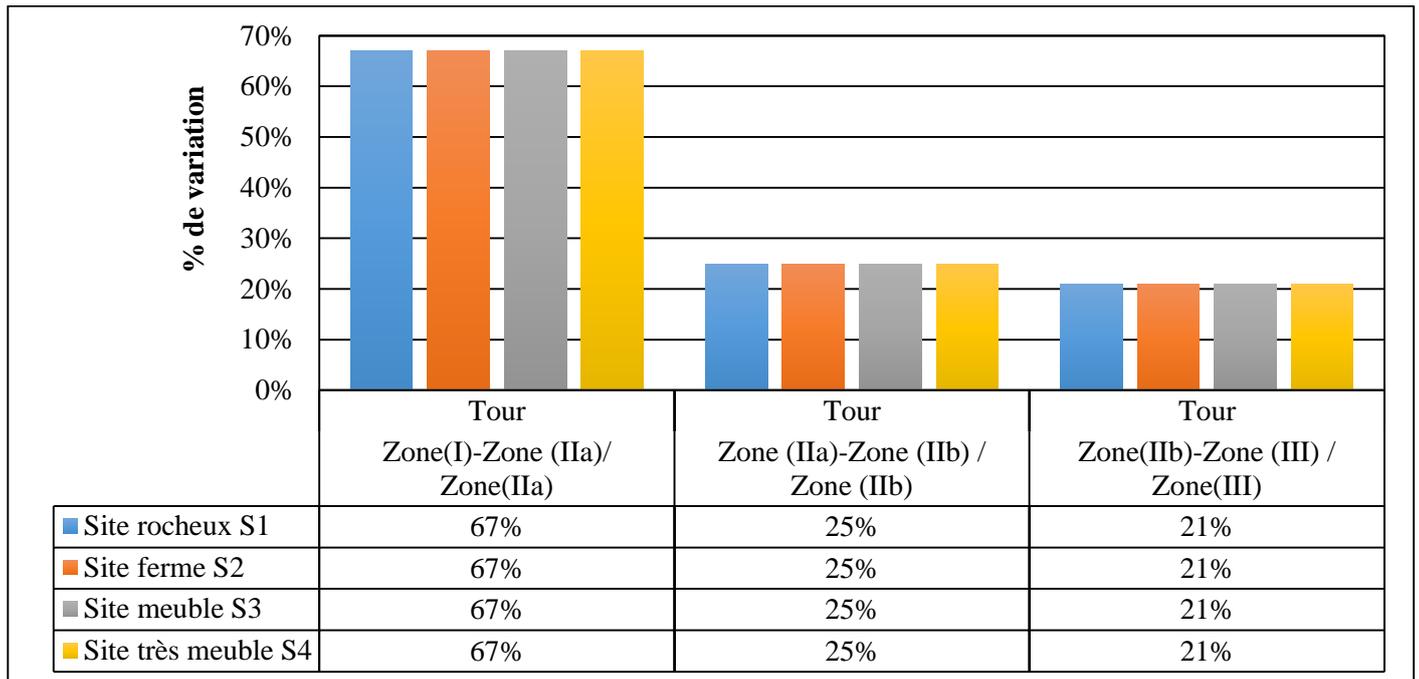


Figure 4.7 : Pourcentage de variation du facteur de sécurité au glissement d'une zone sismique à une autre pour le réservoir sur tour.

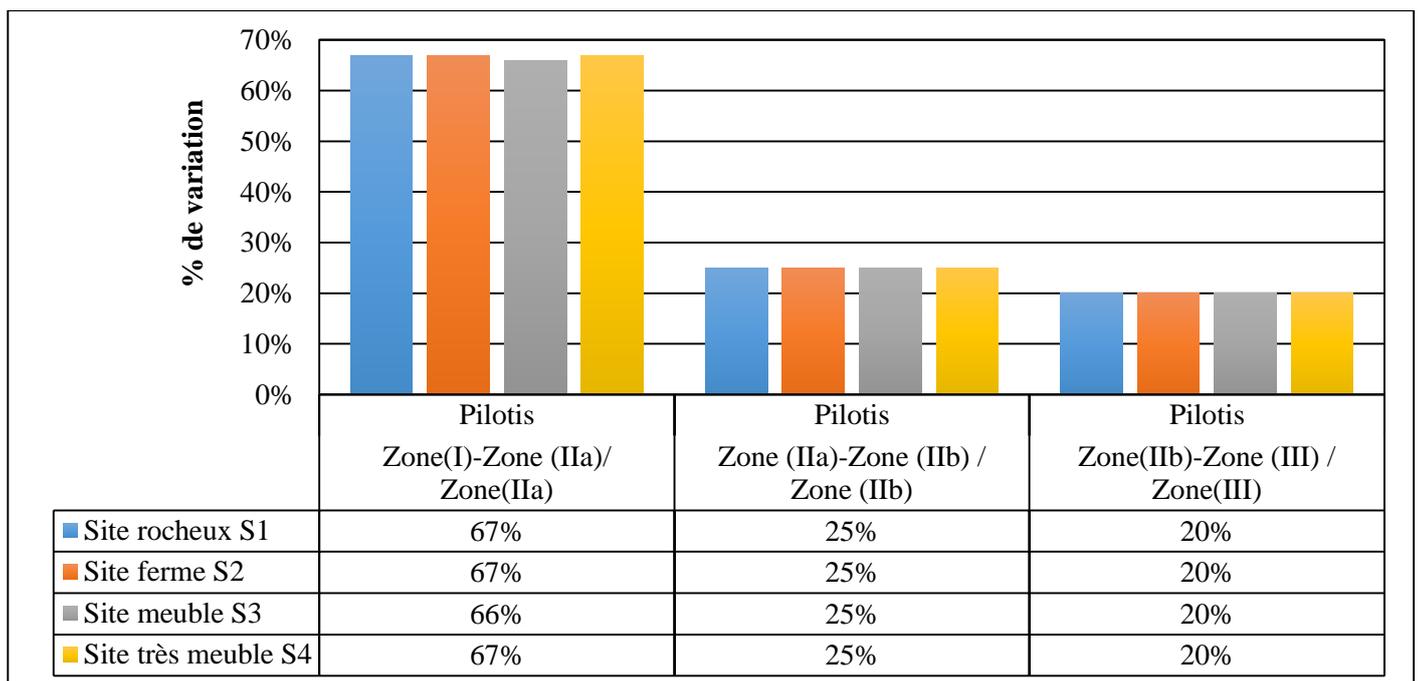


Figure 4.8 : Pourcentage de variation du facteur de sécurité au glissement d'une zone sismique à une autre pour le réservoir sur pilotis.

Nous remarquons que pour un même type de réservoir et même sol d'implantation, l'effet de la zone sismique est considérable, le facteur de sécurité au glissement diminue progressivement d'une zone de faible à forte sismicité, (Figures 4.5 et 4.6).

Par ailleurs, cette variation est d'autant plus importante entre la zone (I) et (IIa), de l'ordre de 67%, alors qu'elle est de 25% entre la zone (IIa) et (IIb) et près de 21% entre la zone (IIb) et (III) pour les deux réservoirs. (Figures 4.7 et 4.8).

Comme nous pouvons le voir aussi, cette variation du facteur de sécurité au glissement n'est pas uniforme pour toutes les zones sismiques, en effet, elle diminue progressivement de la zone (IIa) à (III) et décroît brusquement en passant de la zone (I) à (IIa).

Nous pouvons conclure que l'effet de la zone sismique est important, la sismicité de la zone doit être prise en compte lors du choix du type de réservoir surélevé.

4.1.3. Effet du contreventement :

Nous représentons la variation du facteur de sécurité au glissement en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique pour les deux réservoirs (Figure 4.9) ainsi que le rapport entre le facteur de sécurité de glissement de la tour et celui des pilotis (Figure 4.10).

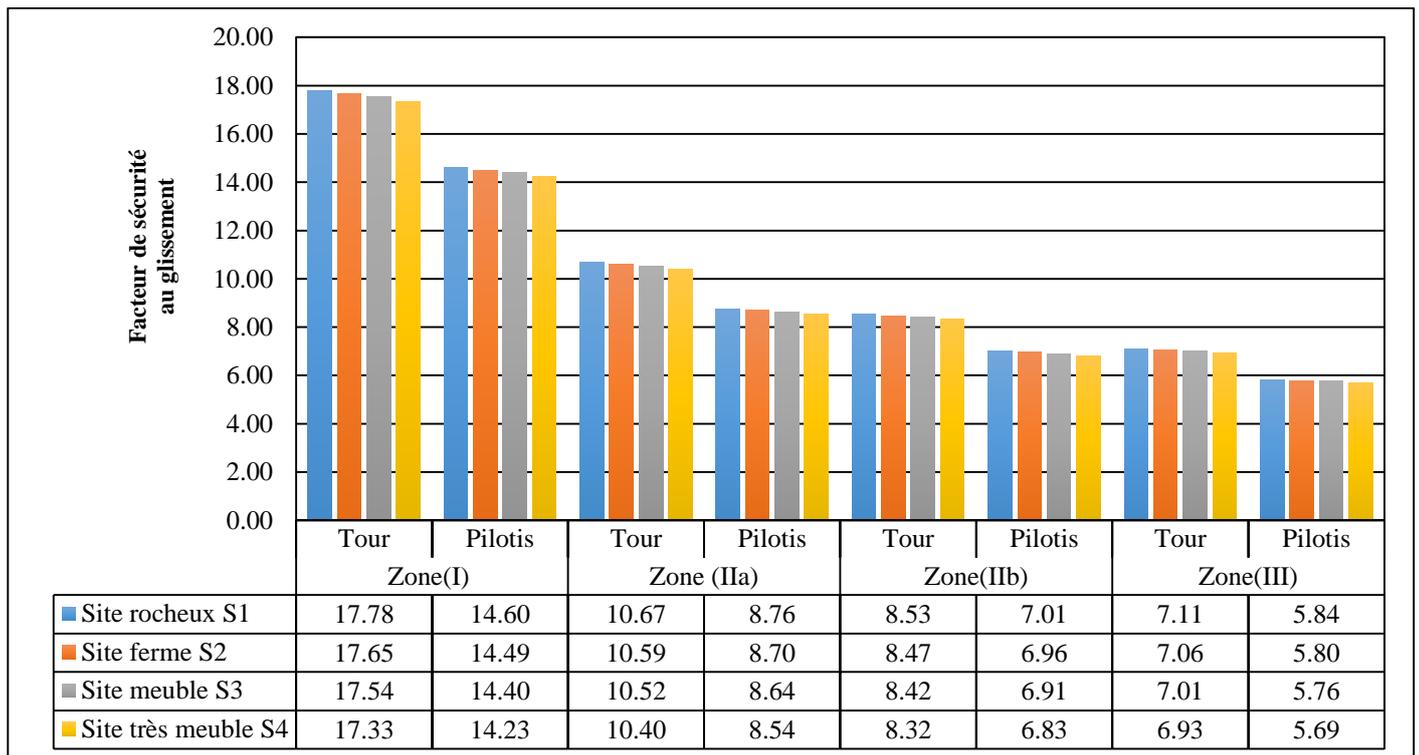


Figure 4.9 : Variation du facteur de sécurité au glissement en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique pour les deux réservoirs.

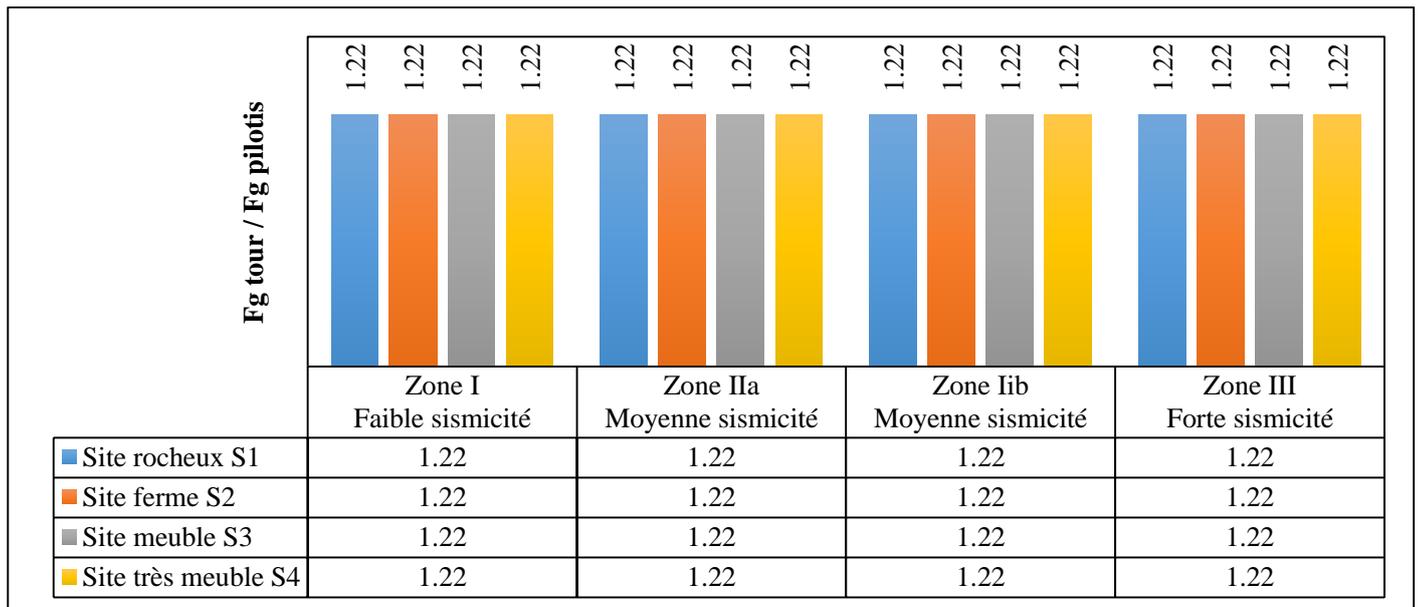


Figure 4.10 : Rapport entre le facteur de sécurité du glissement de la tour et celui des pilotis.

La stabilité au glissement est largement vérifiée pour les deux réservoirs ($F_g > 1.5$), et le réservoir posé sur tour présente un facteur de sécurité au glissement plus important que le réservoir posé sur des pilotis dans toutes les zones sismiques et les types de sol comme le montre la figure 4.9.

Par ailleurs, le rapport entre les facteurs de sécurité de la tour et des pilotis ($F_{Stour}/F_{Spilotis}$) reste toujours constant près de 1.22 quel que soit la zone sismique et le sol d'implantation (Figure 4.10).

- **En résumé :**

Après vérification des facteurs de sécurité vis-à-vis du glissement, nous avons aboutis aux résultats suivants :

- Il n'y a pas d'effet de site pour une zone sismique donnée relativement au glissement.
- L'effet de la zone sismique est considérable.
- La stabilité au glissement est vérifiée pour les deux types de réservoir quel que soit la zone sismique.
- Le rapport entre le facteur de sécurité au glissement de la tour et des pilotis ($F_{g_{tour}}/F_{g_{pilotis}}$) reste constant quel que soit la zone sismique et le sol d'implantation.

Pour le choix de type de réservoir surélevé en fonction du facteur de sécurité au glissement, vu qu'il n'y a pas d'effet du site d'implantation, que l'effet de la zone sismique est considérable, et comme la stabilité au glissement est vérifiée pour les deux types de réservoir quel que soit la zone sismique, les deux types de réservoir conviennent.

4.2. Calcul du facteur de sécurité au renversement :

➤ Calcul du moment stabilisant M_s :

Il est donné par la formule suivante :

$$M_s = N_s \times R_{\text{rad}}$$

R_{rad} : rayon du radier, Les deux réservoirs on le même radier avec : $R_{\text{rad}} = 11.00$ m

N_s : poids total de l'ouvrage plein.

➤ Réservoir sur pilotis :

$$N_s = 3\,646.49 \text{ t} ; M_s = 3\,646.49 \times 11.00 ; M_s = \mathbf{40\,111.43 \text{ tm}}$$

➤ Réservoir sur tour :

$$N_s = 3\,585.42 \text{ t} ; M_s = 3\,585.42 \times 11.00 ; M_s = \mathbf{39\,439.62 \text{ tm}}$$

➤ Calcul du moment renversant M_r :

Il est donné par la formule suivant :

$$M_r = F_1 * X + F_0 * Y$$

Avec :

F_0 : Forces d'oscillations ; [Chapitre 3]

F_1 : Forces d'impulsion ; [Chapitre 3]

X : Point d'application de la force F_1 par rapport au radier ; [Chapitre 3]

Y : Point d'application de la force F_0 par rapport au radier. [Chapitre 3]

Les moments renversant M_r [tm] pour chaque zone sismique et chaque site pour les deux réservoirs sont représentés dans le tableau 4.3 :

Tableau 4.3 : Moments renversant M_r pour les deux réservoirs.

Sites Zone sismique	Site rocheux S1		Site ferme S2		Site meuble S3		Site très meuble S4	
	Tour M_r [tm]	Pilotis M_r [tm]	Tour M_r [tm]	Pilotis M_r [tm]	Tour M_r [tm]	Pilotis M_r [tm]	Tour M_r [tm]	Pilotis M_r [tm]
Zone I Faible sismicité	5 933.1	7 376.8	5 978.2	7 431.9	6 019.6	7 482.6	6 095.0	7 574.8
Zone IIa Moyenne sismicité	9 888.5	12 294.7	9 963.6	12 386.6	10 032.7	12 471.0	10 158.3	12 624.7
Zone IIb Moyenne sismicité	12 360.6	15 368.3	12 454.5	15 483.2	12 540.8	15 588.8	12 697.9	15 780.9
Zone III Forte sismicité	14 929.1	18 442.0	15 041.7	18 579.8	15 145.3	18 706.5	15 333.7	18 937.0

➤ **Facteur de sécurité au renversement :**

Le facteur de sécurité au renversement F_s est défini comme étant le rapport entre le moment stabilisant M_s et le moment renversant M_r .

$$F_s = \frac{M_s}{M_r}$$

Il est donné en fonction des classes de qualité du système de contreventement : [Slimani D, 2013]

- **Classe A** : dans cette classe, on trouve les réservoirs présentant un coefficient de sécurité F_s supérieur à 3. Autrement dit le moment stabilisant est largement supérieur au moment de renversement et donc les réservoirs présentent une bonne résistance à l'effort sismique.
- **Classe B** : on y trouve les réservoirs dont le coefficient F_s est compris entre 1,5 et 3. Donc la résistance à la force sismique est moyenne.
- **Classe C** : dans cette catégorie les réservoirs présentent un coefficient de sécurité F_s inférieur à 1,5. Les structures de cette classe présente une mauvaise tenue au séisme.

Nous adoptons un facteur de sécurité F_s égale à **2,5**.

Le tableau suivant donne les différents facteurs de sécurité de renversement pour les deux réservoirs :

Tableau 4.4 : Facteurs de sécurité de renversement F_s .

Sites Zone Sismique	Site rocheux S_1		Site ferme S_2		Site meuble S_3		Site très meuble S_4	
	Tour F_s	Pilotis F_s	Tour F_s	Pilotis F_s	Tour F_s	Pilotis F_s	Tour F_s	Pilotis F_s
Zone I Faible sismicité	6.65	5.44	6.60	5.40	6.55	5.36	6.47	5.30
Zone IIa Moyenne sismicité	3.99	3.26	3.96	3.24	3.93	3.22	3.88	3.18
Zone IIb Moyenne sismicité	3.19	2.61	3.17	2.59	3.14	2.57	3.11	2.54
Zone III Forte sismicité	2.64	2.18	2.62	2.16	2.60	2.14	2.57	2.12

4.2.1. Effet du site d'implantation :

Nous donnerons ci-après la variation du facteur de sécurité au renversement en fonction du site d'implantation pour les quatre zones sismiques du réservoir posé sur tour (Figure 4.11), réservoir posé sur des pilotis (Figure 4.12), puis nous représentons le pourcentage de variation du facteur de sécurité au glissement d'un site à un autre (Figure 4.13).

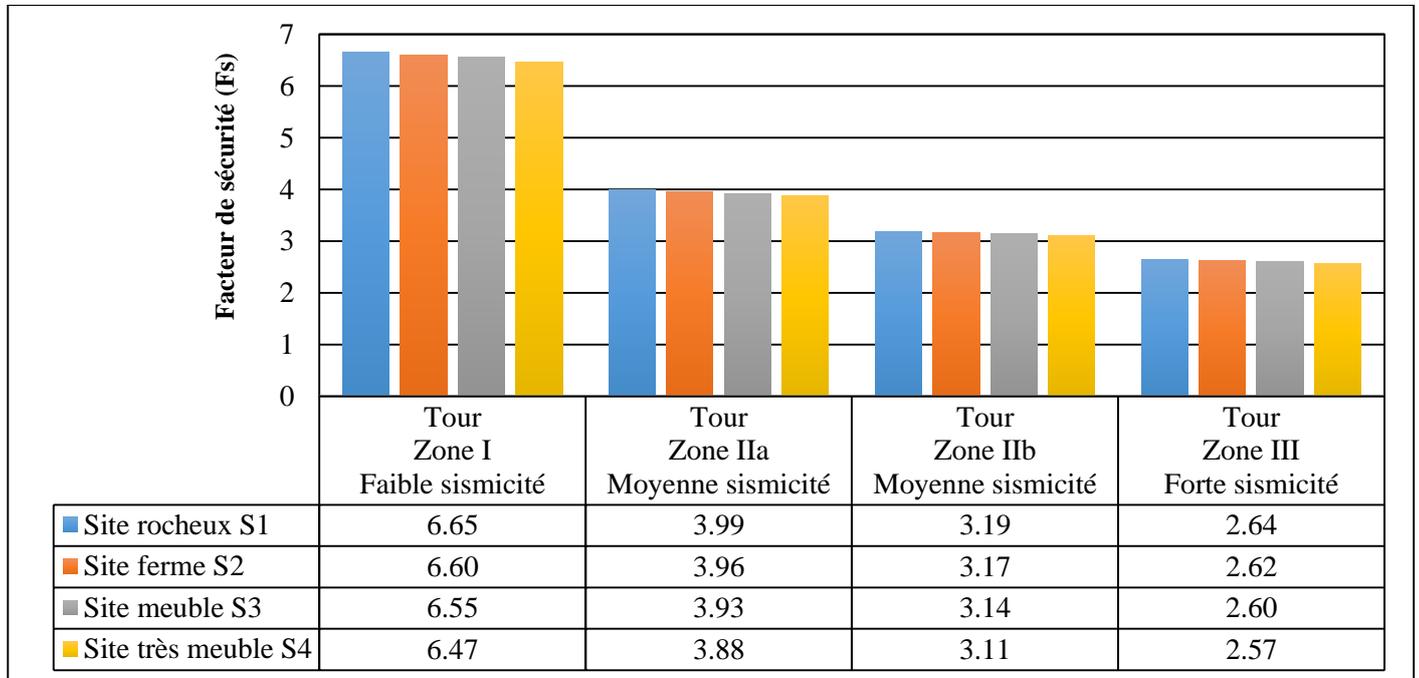


Figure 4.11 : Variation du facteur de sécurité au renversement en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique du réservoir sur tour.

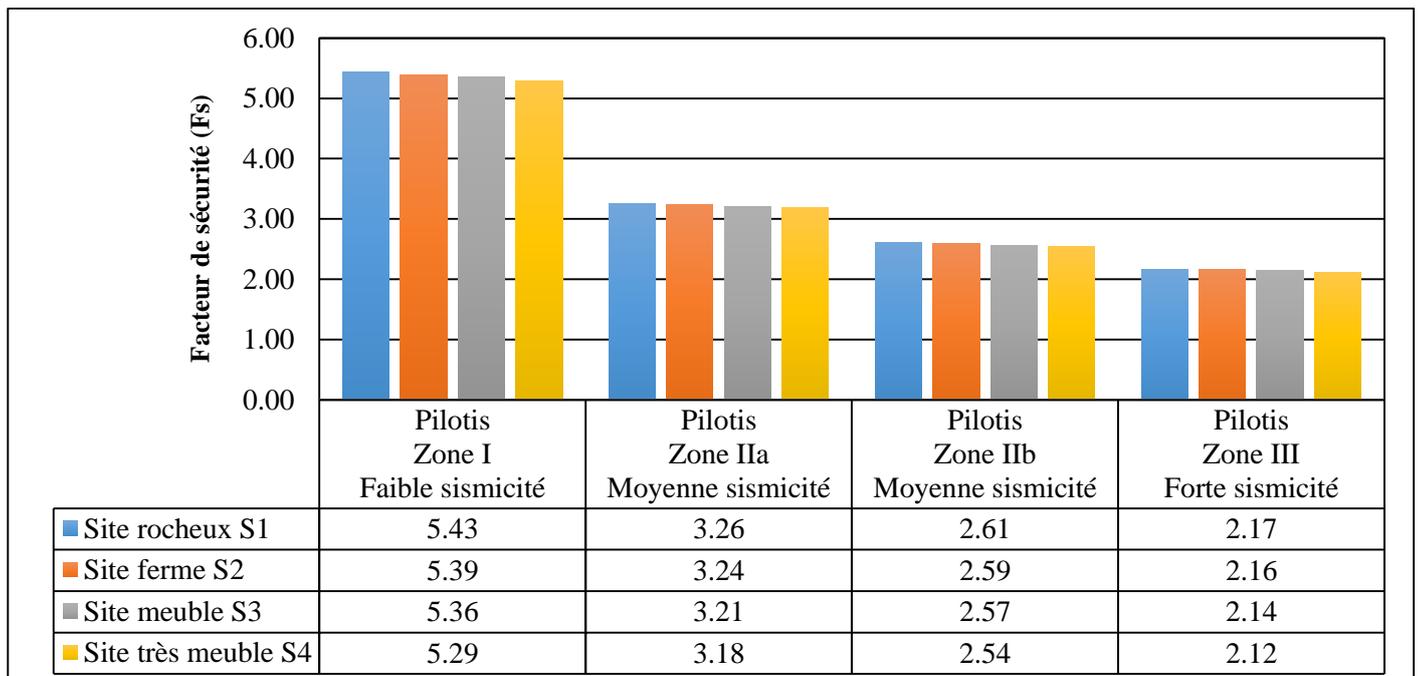


Figure 4.12 : Variation du facteur de sécurité au renversement en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique du réservoir sur pilotis.

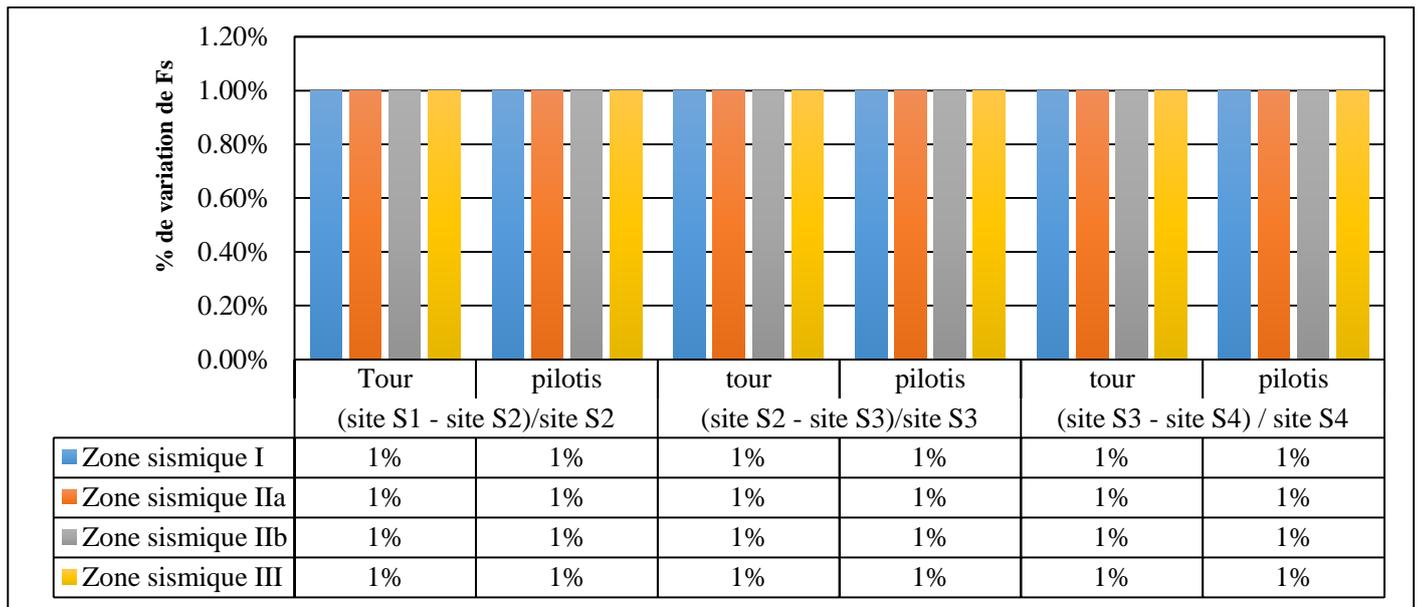


Figure 4.13 : Pourcentage de variation du facteur de sécurité au renversement d'un site à un autre sur chaque zone sismique pour les deux réservoirs.

L'évolution du facteur de sécurité au renversement F_s , en fonction du site d'implantation est invariable pour une même zone sismique pour les deux types de réservoirs, (Figure 4.11 et 4.12).

Comme nous pouvons le constater, le pourcentage de variation d'un site à un autre pour toutes les zones sismiques des deux réservoirs est de l'ordre de 1% seulement (Figure 4.13).

A cet effet, nous concluons que pour le facteur de sécurité au renversement, l'effet du site d'implantation est insignifiant pour une zone sismique donnée pour les deux réservoirs, tous comme le facteur de sécurité au glissement déjà cité au paravent, pour cela. Nous n'allons pas tenir compte de l'effet du site d'implantation.

4.2.2. Effet de la zone sismique :

Nous donnerons ci-après la variation du facteur de sécurité au renversement en fonction de la zone sismique pour les quatre sites d'implantation du réservoir posé sur tour (Figure 4.14), réservoir posé sur des pilotis (Figure 4.15), puis nous représentons le pourcentage de variation du facteur de sécurité au glissement d'une zone à une autre du réservoir posé sur tour (Figure 4.16) et du réservoir posé sur des pilotis (Figure 4.17).

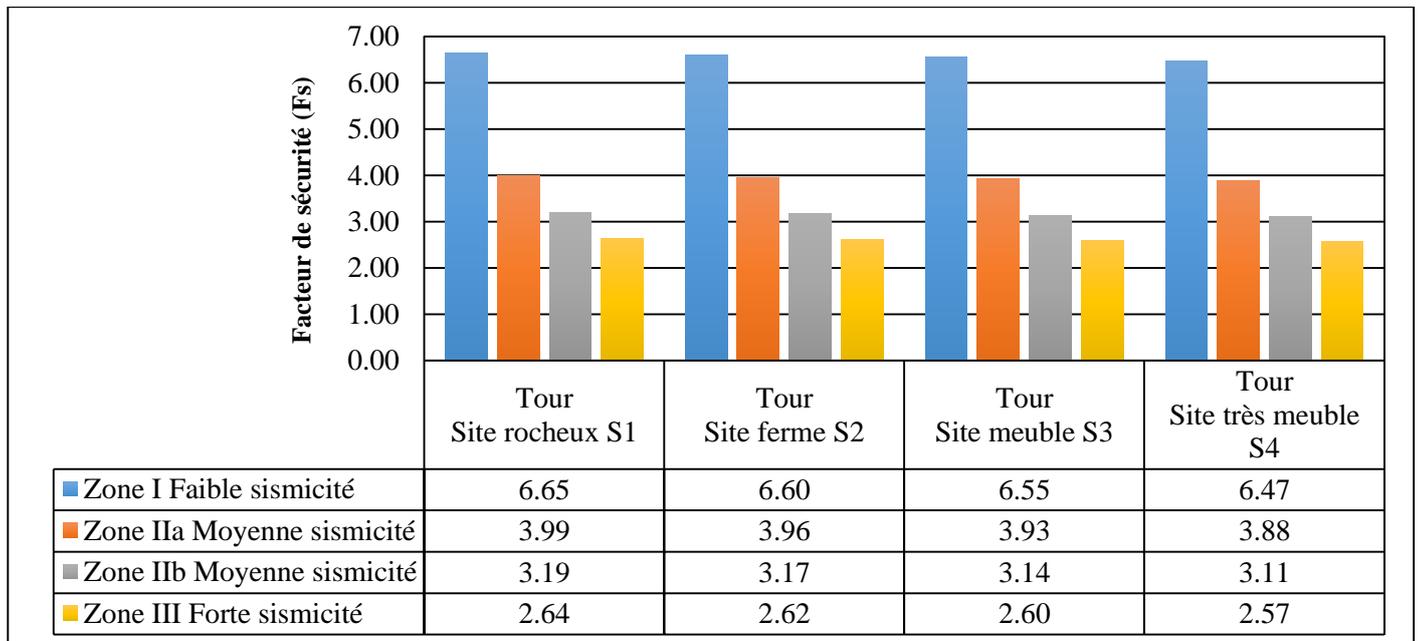


Figure 4.14 : Variation du facteur de sécurité au renversement en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique du réservoir sur tour.

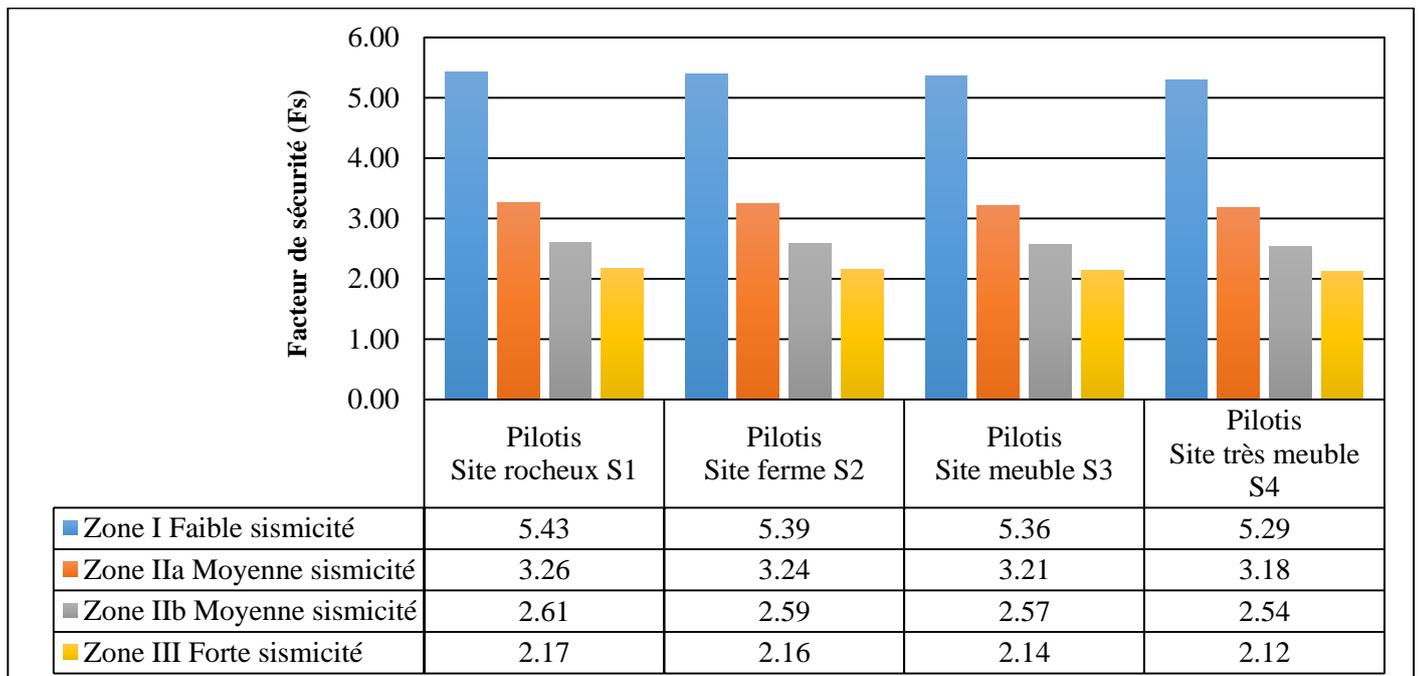


Figure 4.15 : Variation du facteur de sécurité au renversement en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique du réservoir sur pilotis.

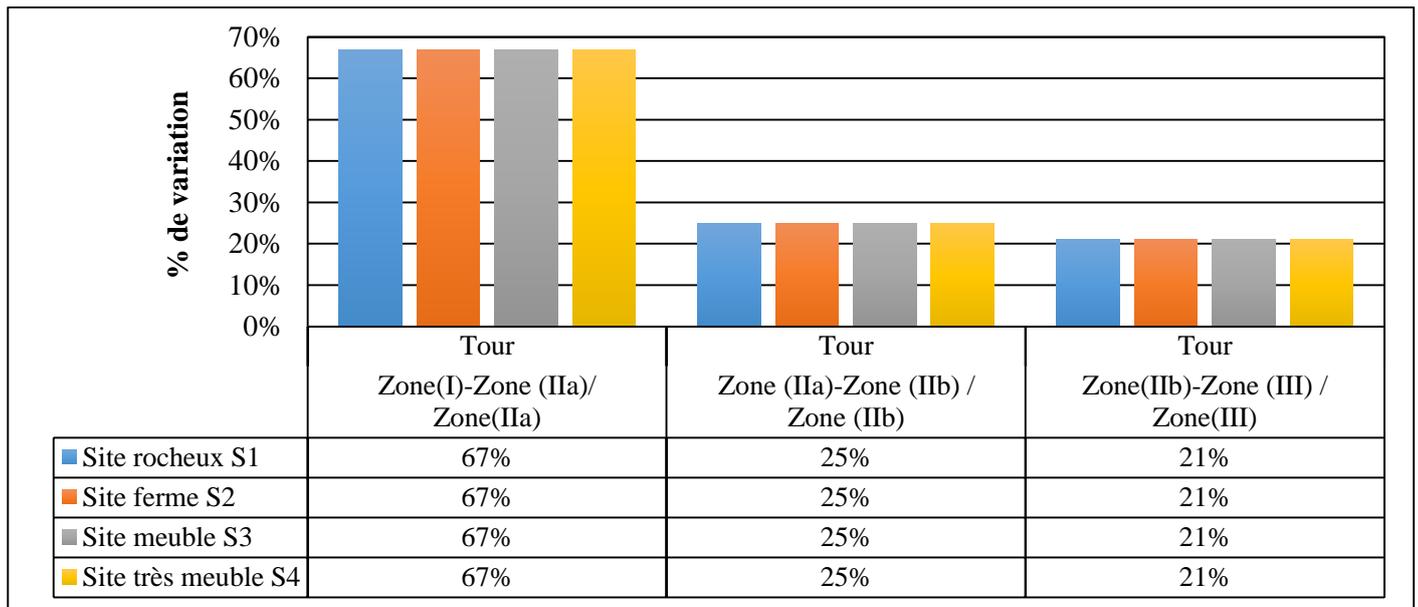


Figure 4.16 : Pourcentage de variation du facteur de sécurité au renversement d'une zone sismique à une autre pour le réservoir sur tour.

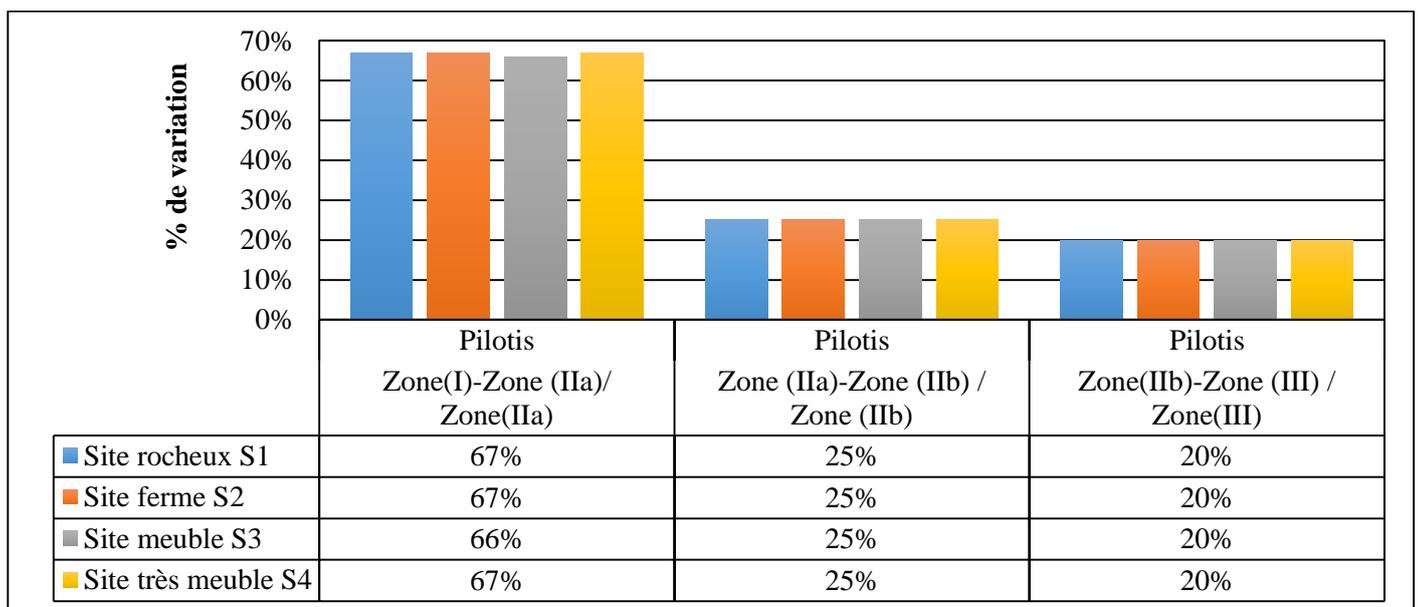


Figure 4.17 : Pourcentage de variation du facteur de sécurité au renversement d'une zone sismique à une autre pour le réservoir sur pilotis.

Nous remarquons que pour un même site et même type de contreventement, l'effet de zone est considérable, le facteur de sécurité diminue progressivement d'une zone de plus faible à plus forte sismicité.

Comme nous pouvons le voir sur les tableaux 4.16 et 4.17, cette variation du facteur de sécurité au renversement n'est pas uniforme pour toutes les zones sismiques car elle est brusquement décroissante entre la zone I et la zone IIa (de l'ordre de 67%), alors qu'elle diminue progressivement pour les autres zones, de 25% entre les zones IIa et IIb, près de 21% entre les zones IIb et III.

Nous pouvons conclure que l'effet de la zone sismique est considérable.

4.2.3. Effet du contreventement :

Nous représentons la variation du facteur de sécurité au renversement en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique pour les deux réservoirs (Figure 4.18) ainsi que le rapport entre le facteur de sécurité de glissement de la tour et celui des pilotis (Figure 4.19).

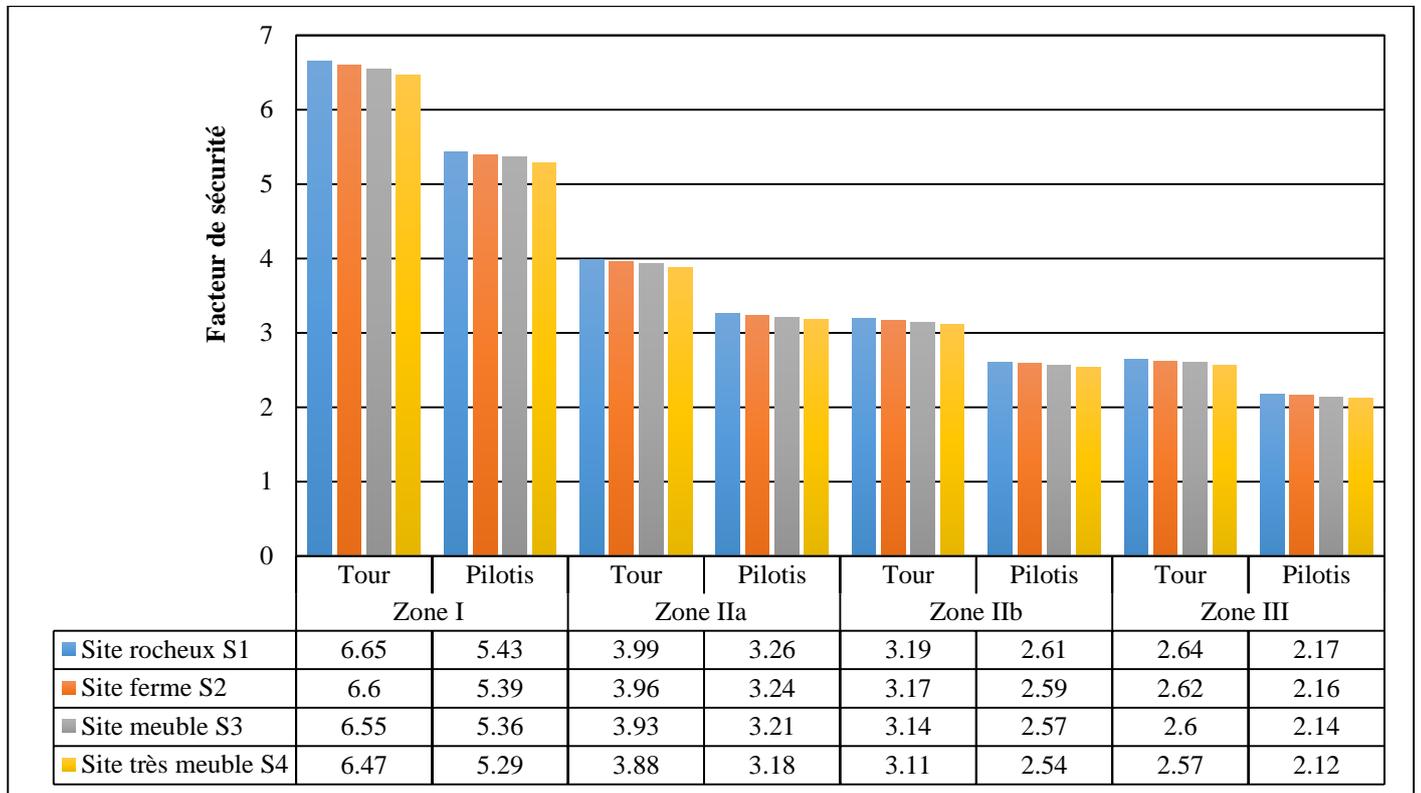


Figure 4.18 : Variation du facteur de sécurité au renversement en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique pour les deux réservoirs.

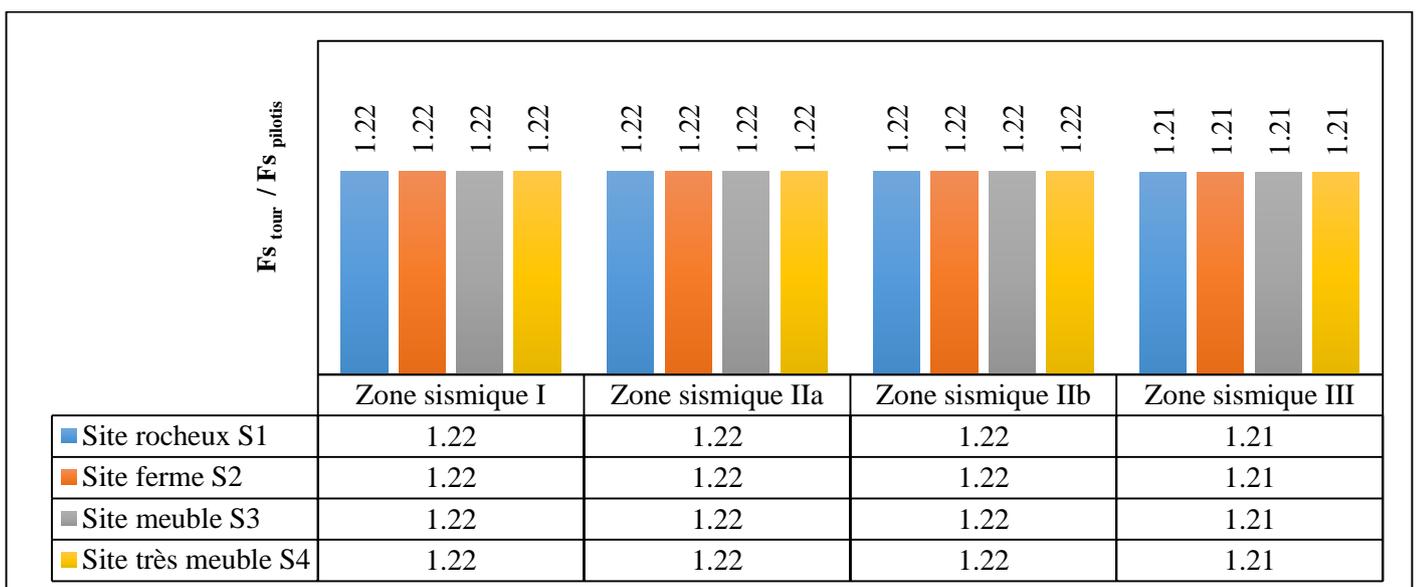


Figure 4.19 : Rapport entre le facteur de sécurité au renversement de la tour et celui des pilotis.

Le réservoir posé sur tour présente un facteur de sécurité au renversement plus important que le réservoir posé sur des pilotis dans toutes les zones sismiques et les types de sol comme le montre la figure 4.18.

Le rapport entre les facteurs de sécurité au renversement des deux réservoirs ($F_{Stour}/F_{Spilotis}$) reste toujours constant de l'ordre de 1.22 quel que soit la zone sismique ou le sol d'implantation (Figure 4.19).

Par ailleurs, pour la stabilité vis-à-vis du renversement, nous constatons que le réservoir posé sur tour est stable pour toutes les zones sismiques ($F_s > 2.5$). Quant au réservoir posé sur des pilotis, il présente une stabilité suffisante en zones I et IIa, par contre, pour les deux autres zones, il y a risque de renversement en zone IIb ($F_s \approx 2.5$) et la stabilité n'est pas atteinte en zone III ($F_s < 2.5$).

• **En résumé :**

Après la vérification de la stabilité des deux ouvrages vis-à-vis du renversement, nous avons aboutis aux résultats suivants :

- il n'y a pas d'effet de site pour une zone sismique donnée.
- L'effet de la zone sismique est considérable.
- Le rapport entre le facteur de sécurité au renversement de la tour et des pilotis ($F_{Stour}/F_{Spilotis}$) reste constant quel que soit la zone sismique et le sol d'implantation.
- Pour le réservoir posé sur tour la stabilité au renversement est vérifiée quel que soit la zone sismique.
- Pour le réservoir posé sur des pilotis la stabilité au renversement est vérifiée en zone I et IIa, et présente un risque au renversement en zone IIb (tangent à la valeur limite 2.5), la stabilité n'est pas atteinte en zone III (forte sismicité).

Ce qui nous amène à faire le choix suivant :

- En zone I et IIa, l'ingénieur peut opter pour les deux types de réservoirs surélevés.
- En zone IIb, le réservoir posé sur tour est plus confortable vis-à-vis du renversement.
- En zone III, l'ingénieur doit opter pour le réservoir posé sur tour.

4.3. Calcul des contraintes internes du support des deux réservoirs :

4.3.1. Réservoir posé sur tour :

➤ *Calcul du moment fléchissant M_f :*

Il est donné par la formule suivante : $M_f = F_1 * x + F_0 * y$

Avec :

F_0 : Forces d'oscillations ; [Chapitre 3]

F_1 : Forces d'impulsion ; [Chapitre 3]

x : Point d'application de la force F_1 par rapport au sol ;

y : Point d'application de la force F_0 par rapport au sol.

- Calcul des points d'application des force (x et y) :

- Centre de gravité de la cuve par rapport au sol :

Z_i = centre de gravité de l'élément "i" considéré par rapport au sol.

P_i = poids de l'élément "i"

Le centre de gravité de la cuve par rapport au sol est donné par la formule suivante Z_s :

$$Z_s = \frac{\sum P_i \times Z_i}{\sum P_i}$$

Tableau 4.5 : Valeurs de centre de gravité des éléments.

N°	Élément	Zi(m)	Pi (t)
1	Dalle circulaire du lanterneau	37.00	0.25
2	Voile cylindrique du lanterneau	36.57	0.65
3	Coupole supérieure	35.08	59.21
4	ceinture supérieure	34.40	27.61
5	cylindre	30.92	161.11
6	cheminée	30.25	19.24
7	ceinture intermédiaire	27.41	34.97
8	cône de réduction	26.44	92.32
9	ceinture inférieure	25.08	63.60
10	coupole inférieure	25.93	36.97
		$\sum P_i \times Z_i$	495.93
		$\sum P_i$	14 576.75

D'où le centre de gravité de la cuve par rapport au sol est :

$$Z_s = \frac{495.93}{14\ 576.75} ; Z_s = 29.39 \text{ m}$$

Le point d'application de la force F_1 est à une distance (x) par rapport au sol :

$$x = \frac{\sum M_i x_i}{\sum M_i}$$

$$x = \frac{M_C(Z_s) + M_i(L + h_i) + \frac{33}{140} M_{\text{tour}}(L - 0.5 \frac{33}{140} L)}{M_C + M_i + \frac{33}{140} M_{\text{tour}}}$$

$$x = \frac{496.07 \times 29.39 + 619.19(24.6 + 2.71) + \frac{33}{140} 519.25 (24.6 - 0.5 \frac{33}{140} 24.6)}{496.07 + 619.19 + \frac{33}{140} 519.25}$$

$$x = 27.59 \text{ m}$$

Le point d'application de la force F_0 est à une distance (y) par rapport au radier :

$$y = L \times h_0 ; \quad y = 24.6 \times 4.25$$

$$y = 28.85 \text{ m}$$

D'où :

Le moment fléchissant pour le réservoir sur tour est donné sur le (tableau 4.6) :

Tableau 4.6 : Moment fléchissant pour le réservoir sur tour.

Sites Zone Sismique	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	Tour $M_f[t*m]$	Tour $M_f[t*m]$	Tour $M_f[t*m]$	Tour $M_f[t*m]$
Zone I Faible sismicité	5 572.83	5 614.98	5 653.72	5 724.20
Zone IIa Moyenne sismicité	9 288.05	9 358.30	9 422.86	9 540.34
Zone IIb Moyenne sismicité	11 610.07	11 697.87	11 778.58	11 925.42
Zone III Forte sismicité	13 932.08	14 037.45	14 134.30	14 310.50

➤ **Calcul des contraintes du réservoir sur tour :**

Les contraintes de traction et de compression exercées sur la paroi de la tour sont données par la formule suivante :

$$\sigma_{c;t} = \frac{N_s}{A} \pm \frac{M_f}{I} v$$

N_s : effort normal (poids total de la structure sans le radier) ; $N_s = M_{tot} = M_c + M_{eau} + M_{tour}$

$$N_s = 496.07 + 1113.30 + 519.25 = 2128.62 \text{ t} ; N_s = \mathbf{2128.62 \text{ t}}$$

A : Air de la section transversale de la tour ; $A = \pi(R_{ext}^2 - R_{int}^2)$

$$A = \pi(5.5^2 - 5.25^2) = 8.44 \text{ m}^2 ; A = \mathbf{8.44 \text{ m}^2}$$

I : inertie de la tour ; $I = \mathbf{121.97 \text{ m}^4}$

v : la fibre la plus éloignée de la tour, $v = R_{ext} = \mathbf{5.5 \text{ m}}$

D'où :

La contrainte de compression et de traction dans la tour pour chaque zone sismique et sur chaque site d'implantation est donnée dans tableau 4.7 : (σ_t : contrainte de traction, σ_c : contrainte de compression).

Tableau 4.7 : Contraintes de compression et de traction dans la tour.

Sites Zone Sismique	Site rocheux S ₁		Site ferme S ₂		Site meuble S ₃		Site très meuble S ₄	
	σ_t [t/m ²]	σ_c [t/m ²]						
Zone I Faible sismicité	0.81	503.42	-1.09	505.32	-2.84	507.07	-6.01	510.24
Zone IIa Moyenne sismicité	-166.72	670.95	-169.89	674.12	-172.80	677.03	-178.10	682.33
Zone IIb Moyenne sismicité	-271.43	775.66	-275.39	779.62	-279.03	783.26	-285.65	789.89
Zone III Forte sismicité	-376.14	880.37	-380.90	885.13	-385.26	889.49	-393.21	897.44

4.3.2. Réservoir posé sur des pilotis :

➤ *Calcul du moment fléchissant M_f :*

Il est donné par la formule suivante : $M_f = F_1 * x + F_0 * y$

- *Calcul des points d'application des forces sismique (x et y) :*

Le point d'application de la force F_1 est à une distance (x) par rapport au sol :

$$X = \frac{\sum M_i x_i}{\sum M_i}$$

$$x = \frac{M_c(Z_s) + M_i(L + h_i) + \frac{33}{140} M_{pilotis}(L - 0.5 \frac{33}{140} L)}{M_c + M_i + \frac{33}{140} M_{pilotis}}$$

$$x = \frac{496.07 \times 29.39 + 619.19(24.6 + 2.71) + \frac{33}{140} 580.32 (24.6 - 0.5 \frac{33}{140} 24.6)}{496.07 + 619.19 + \frac{33}{140} 580.32}$$

$$x = 27.52 \text{ m}$$

Le point d'application de la force F_0 est à une distance (y) par rapport au radier :

$$y = L \times h_0 ; \quad y = 24.6 \times 4.25$$

$$y = 28.85 \text{ m}$$

D'où :

Le moment fléchissant pour le réservoir posé sur pilotis est donné dans le (tableau 4.8) :

Tableau 4.8 : Moment fléchissant pour le réservoir sur pilotis.

Zone Sismique \ Sites	Site rocheux S1	Site ferme S2	Site meuble S3	Site très meuble S4
	tour M_f [tm]	tour M_f [tm]	tour M_f [tm]	tour M_f [tm]
Zone I Faible sismicité	6 883.63	6 935.18	6 982.57	7 068.80
Zone IIa Moyenne sismicité	11 472.72	11 558.64	11 637.62	11 781.33
Zone IIb Moyenne sismicité	14 340.90	14 448.30	14 547.03	14 726.66
Zone III Forte sismicité	17 209.08	17 337.96	17 456.44	17 672.00

➤ **Calcul de l'effort maximal dû au séisme P_{max} du poteau le plus sollicité :**

L'effort maximal dû au séisme P_{max} pour un seul poteau est donné par la formule suivante :

$$P_{max} = \frac{M_f}{6R_{moy}} \quad [\text{Calcul des Ouvrages en Béton Armé, M.BELAZOUGUI, 1996}]$$

R_{moy} : Rayon moyen ; $R_{moy} = 5.1 \text{ m}$

Tableau 4.9 : L'effort normal maximal dû au séisme P_{max} sur le poteau le plus sollicité.

Zone Sismique \ Sites	Site rocheux S1	Site ferme S2	Site meuble S3	Site très meuble S4
	P_{max} [t]	P_{max} [t]	P_{max} [t]	P_{max} [t]
Zone I Faible sismicité	224.96	226.64	228.19	231.01
Zone IIa Moyenne sismicité	374.93	377.73	380.31	385.01
Zone IIb Moyenne sismicité	468.66	472.17	475.39	481.26
Zone III Forte sismicité	562.39	566.60	570.47	577.52

➤ **Calcul de l'effort normal de traction pour le réservoir sur pilotis :**

Les efforts normaux de traction T pour un seul poteau sont donnés dans le (tableau 4.10) par la formule suivante :

$$T = \frac{N_s}{12} - P_{\max}$$

N_s : effort normal (poids total de la structure sans le radier) ; $N_s = 2128.62 \text{ t}$

Tableau 4.10 : L'effort normal de traction T en tonnes pour le réservoir sur pilotis.

Sites Zone Sismique	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	T [t]	T [t]	T [t]	T [t]
Zone I Faible sismicité	-42.48	-44.17	-45.71	-48.53
Zone IIa Moyenne sismicité	-192.45	-195.26	-197.84	-202.54
Zone IIb Moyenne sismicité	-286.18	-289.69	-292.92	-298.79
Zone III Forte sismicité	-379.91	-384.13	-388.00	-395.04

➤ **Calcul de l'effort normal de compression N_c :**

Les efforts normaux de compressions N_c pour un seul poteau sont donnés dans le (tableau 4.11) et calculés par la formule suivante :

$$N_c = \frac{N_s}{12} + P_{\max}$$

Tableau 4.11 : L'effort normal de compression N_c en tonnes pour le réservoir sur pilotis.

Sites Zone Sismique	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	N_c [t]	N_c [t]	N_c [t]	N_c [t]
Zone I Faible sismicité	407.43	409.11	410.66	413.48
Zone IIa Moyenne sismicité	557.40	560.21	562.79	567.49
Zone IIb Moyenne sismicité	651.13	654.64	657.87	663.74
Zone III Forte sismicité	744.86	749.07	752.95	759.99

➤ *Calcul des contraintes de traction et de compression du poteau le plus sollicité σ_t , σ_c :*

Elles sont données par les formules suivantes :

$$\sigma_t = \frac{T}{A} \quad ; \quad \sigma_c = \frac{N_c}{A}$$

Avec :

A : Section d'un seul poteau ;

$$A = 0.8 \times 0.8 = 0.64 \text{ m}^2$$

Tableau 4.12 : Contrainte de compression et de traction des pilotis.

Sites Zone Sismique	Site rocheux S ₁		Site ferme S ₂		Site meuble S ₃		Site très meuble S ₄	
	σ_t [t/m ²]	σ_c [t/m ²]						
Zone I Faible sismicité	-66.38	636.61	-69.01	639.24	-71.43	641.66	-75.83	646.06
Zone IIa Moyenne sismicité	-300.71	870.94	-305.09	875.32	-309.13	879.36	-316.46	886.70
Zone IIb Moyenne sismicité	-447.16	1017.39	-452.64	1022.88	-457.69	1027.92	-466.86	1037.09
Zone III Forte sismicité	-593.62	1163.85	-600.20	1170.43	-606.25	1176.48	-617.25	1187.49

4.3.3. Vérification des contraintes admissible :

4.3.3.1. Contrainte admissible du béton à la compression $\bar{\sigma}_{bc}$:

$$\sigma_c \leq \bar{\sigma}_{bc} = 0.6 \times f_{cj}$$

f_{cj} : résistance du béton à la compression à j jours ; $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$

$$D'où : \bar{\sigma}_{bc} = 0.6 \times 25 = 15 \text{ MPa} \quad ; \quad \bar{\sigma}_{bc} = 1\,500 \text{ t/m}^2$$

- Effet du site d'implantation :

Dans ce qui suit nous représentons la variation des contraintes internes de compression en fonction du site d'implantation pour les quatre zones sismiques pour le réservoir posé sur tour (Figure 4.20), et le réservoir posé sur des pilotis (Figure 4.21), puis nous représentons le pourcentage de variation des contraintes internes de compression d'un site à un autre (Figure 4.22).

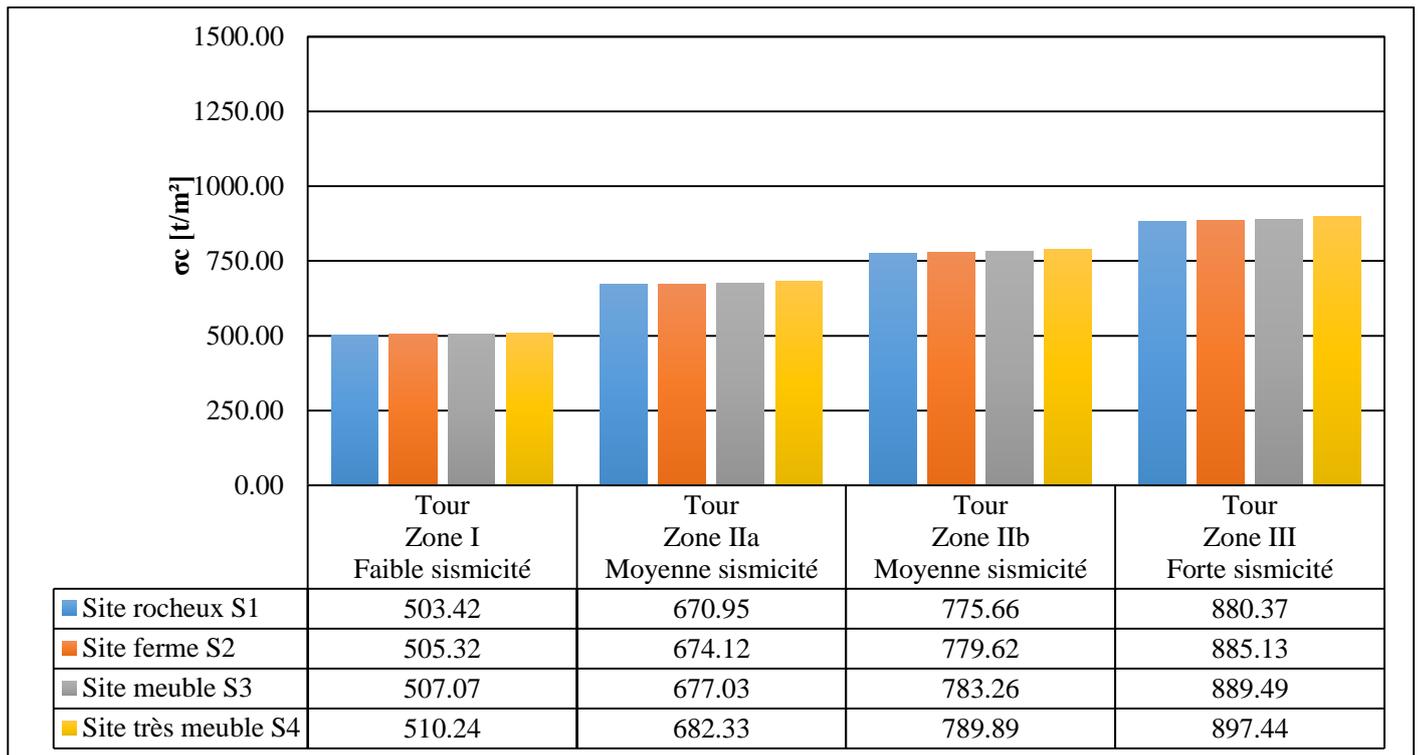


Figure 4.20 : Variation des contraintes internes de compression dans la tour en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique.

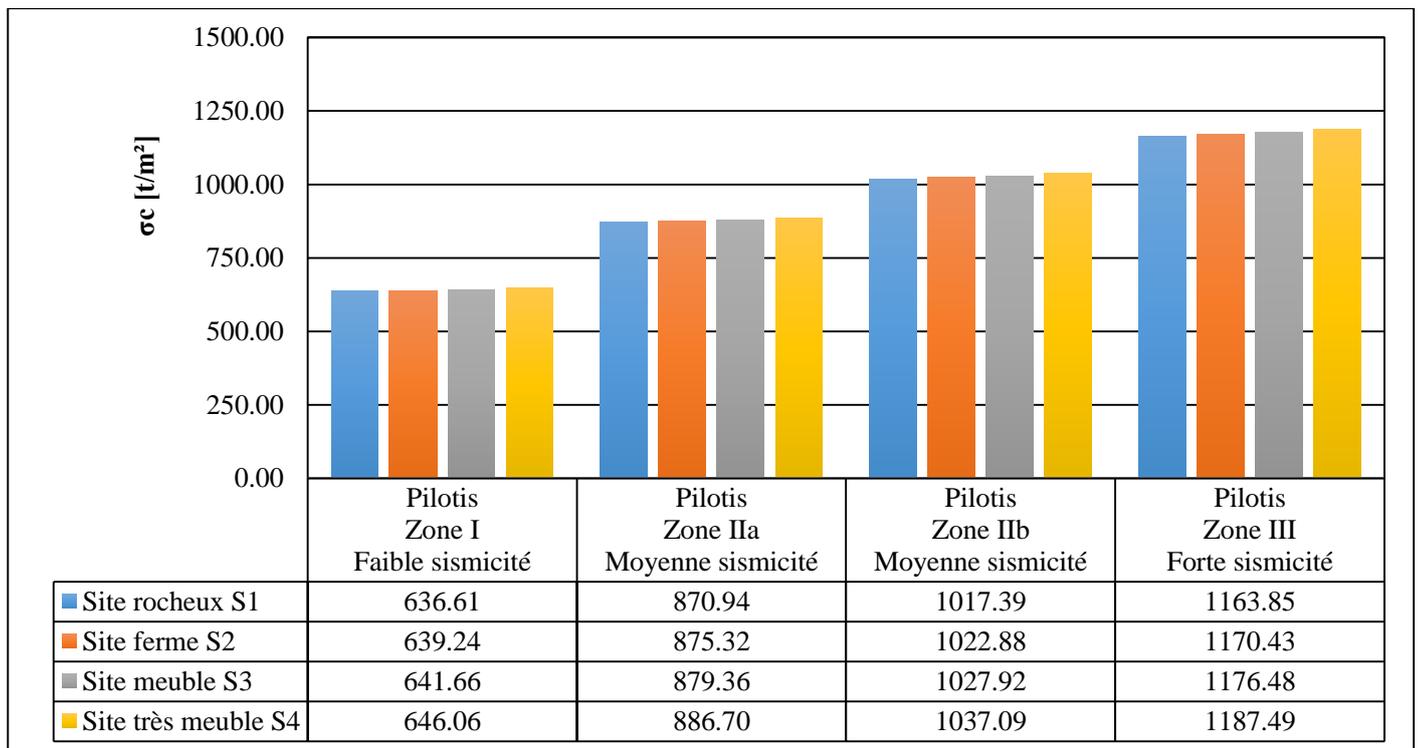


Figure 4.21 : Variation des contraintes internes de compression dans le poteau le plus sollicité en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique.

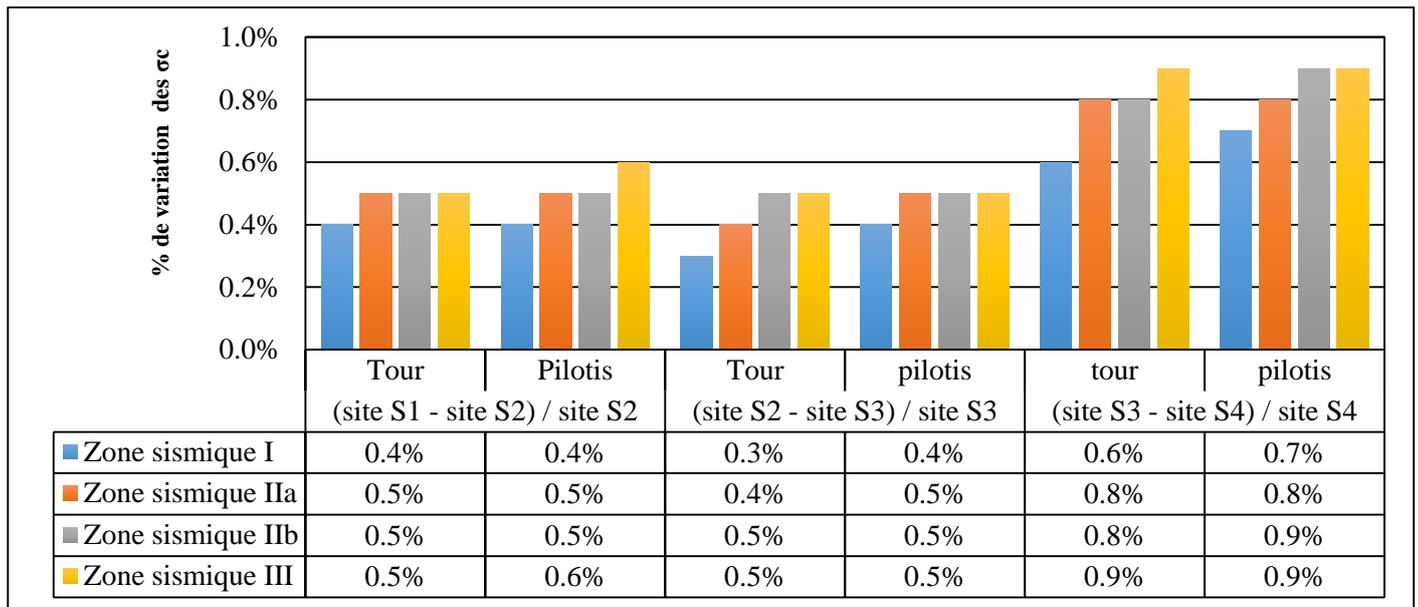


Figure 4.22 : Pourcentage de variation des contraintes de compression d'un site à un autre sur chaque zone sismique pour les deux réservoirs.

De la figure 4.20, nous constatons que la variation des contraintes internes de compression dans la tour quel que soit la nature du site d'implantation reste constante pour une même zone sismique.

Le même constat peut être fait pour la variation des contraintes internes de compression exercées sur le poteau le plus sollicité comme le montre la figure 4.21.

D'après la figure 4.22, nous remarquons que la variation des contraintes de compression pour le réservoir posé sur tour et le réservoir posé sur des pilotis implantés sur différents sols reste inférieure à 1%.

Nous pouvons conclure pour un même type de réservoir l'effet du site est négligeable pour une zone sismique donné.

- Effet de la zone sismique :

Dans ce qui suit, nous représentons la variation des contraintes internes de compression en fonction de la zone sismique pour les quatre sites d'implantation du réservoir posé sur tour (Figure 4.23), réservoir posé sur des pilotis (Figure 4.24), puis nous représentons le pourcentage de variation des contraintes internes de compression d'une zone à une autre du réservoir posé sur tour (Figure 4.25) et du réservoir posé sur des pilotis (Figure 4.26).

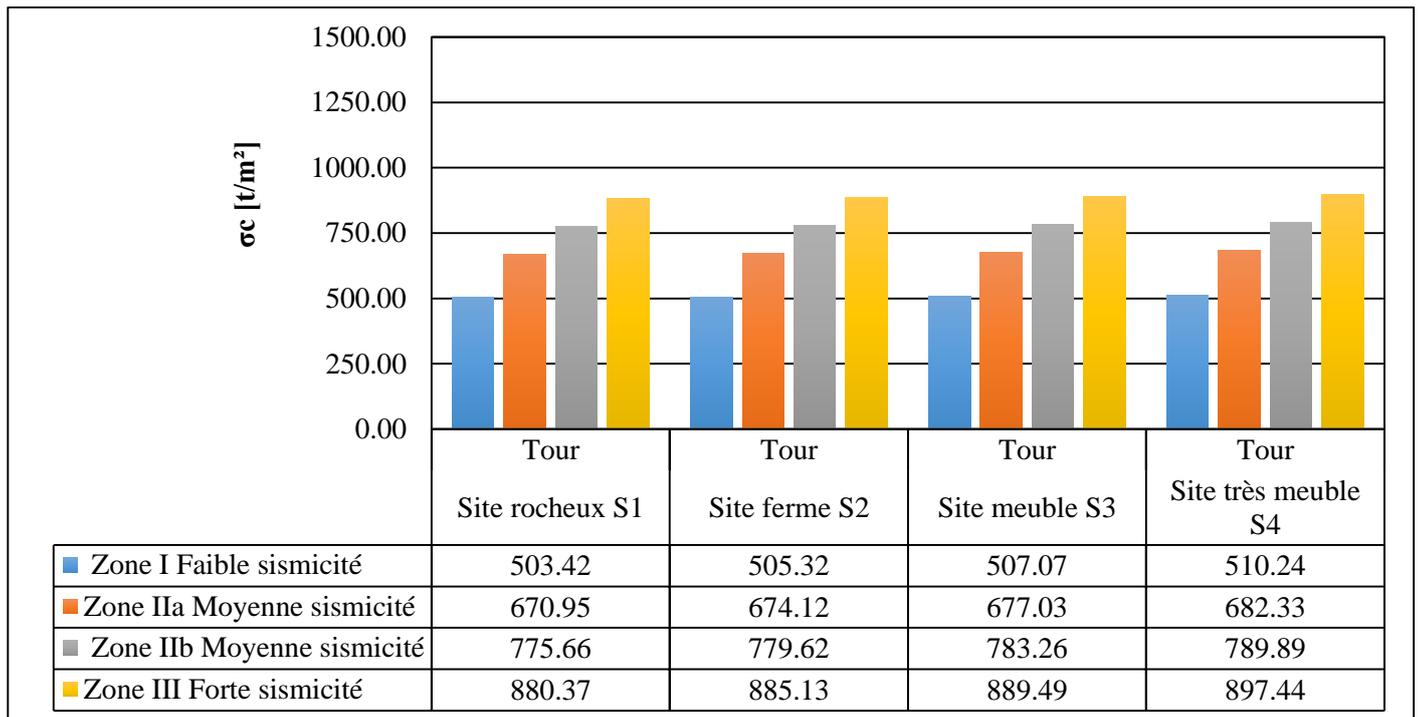


Figure 4.23 : Variation des contraintes internes de compression dans la tour en fonction de la zone sismique pour chaque site d'implantation.

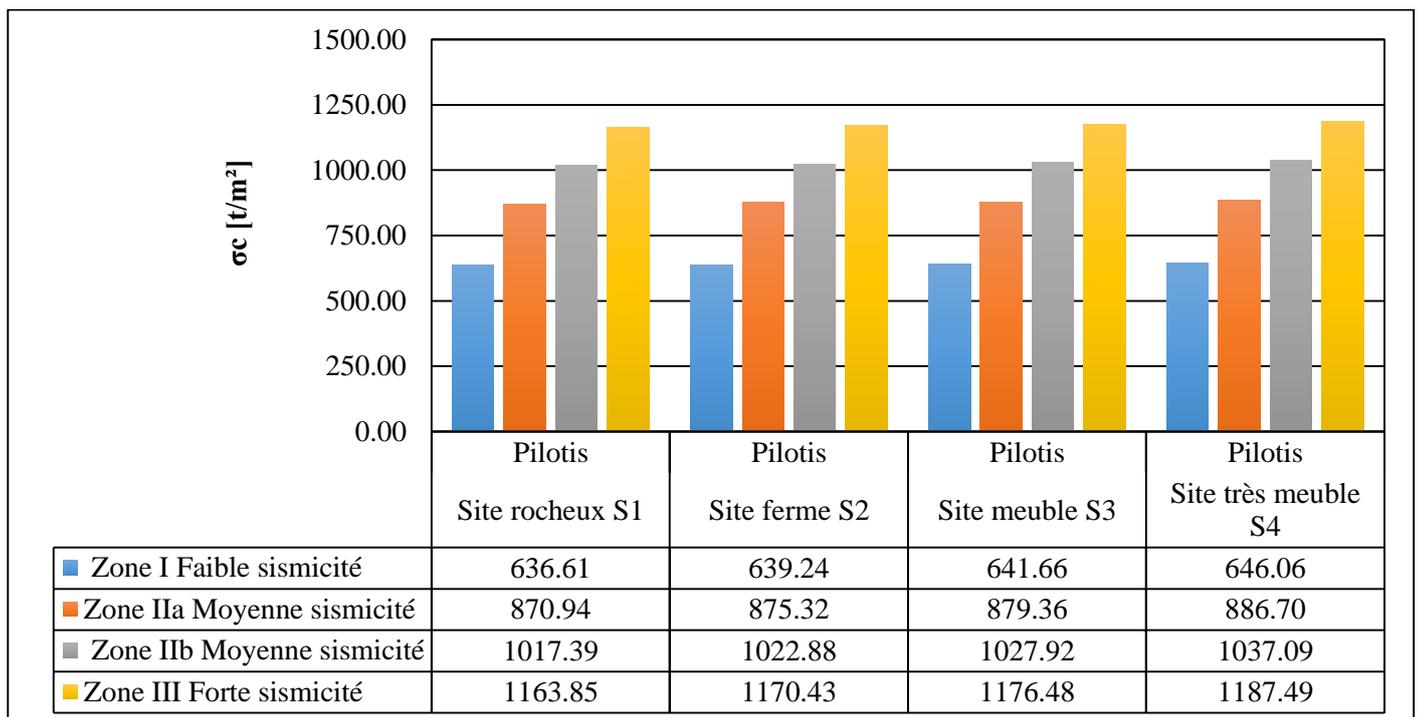


Figure 4.24 : Variation des contraintes internes de compression dans le poteau le plus sollicité en fonction de la zone sismique pour chaque site d'implantation.

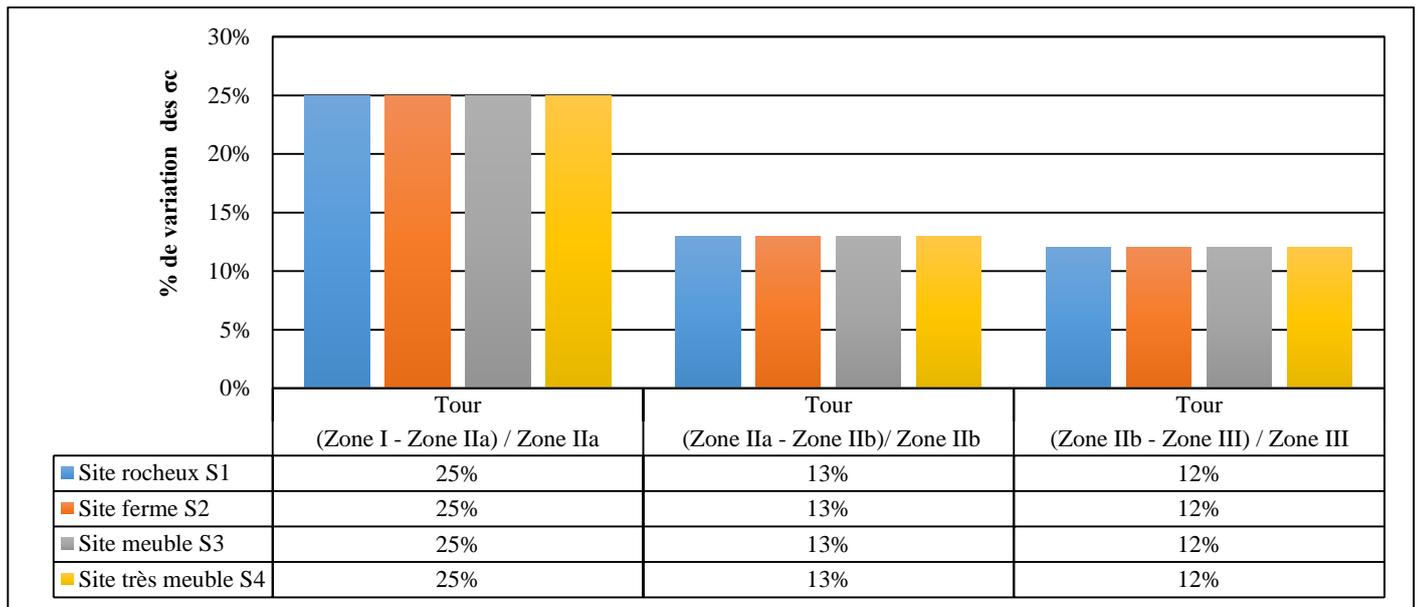


Figure 4.25 : Pourcentage de variation des contraintes de compression d'une zone sismique à une autre pour le réservoir sur tour.

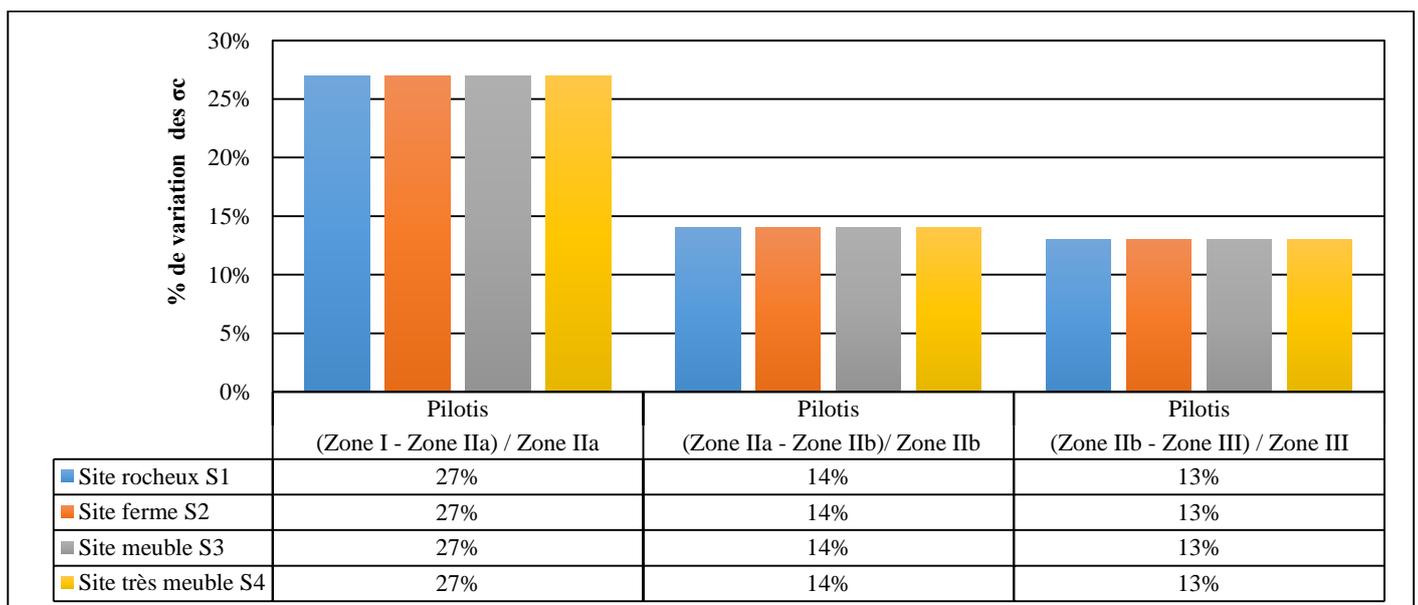


Figure 4.26 : Pourcentage de variation des contraintes de compression d'une zone sismique à une autre pour le réservoir sur des pilotis.

Les contraintes internes de compression dans la tour varient considérablement en fonction de la zone sismique d'une façon croissante de la zone de plus faible à plus forte sismicité, comme le montre la figure 4.23. Le même constat peut être fait pour les contraintes internes de compression dans le poteau le plus sollicité (Figure 4.24).

Par ailleurs, cette variation est d'autant plus importante entre la zone I et IIa, elle est de l'ordre de 25% pour la tour et 27% pour le poteau le plus sollicité, alors qu'elle varie de 12 à 13% de la zone IIa à la zone III pour la tour et de 13 à 14% pour le poteau le plus sollicité (Figures 4.25 et 4.26).

Comme nous pouvons le constater aussi, cette variation des contraintes internes de compression n'est pas uniforme pour toutes les zones sismiques, en effet, elle diminue graduellement de la zone IIa à III et brusquement de la zone I à IIa.

Nous pouvons conclure que l'effet de la zone sismique sur la variation des contraintes internes de compression est considérable.

- **Effet du contreventement :**

Dans ce qui suit, nous représentons la variation des contraintes internes de compression en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique pour les deux réservoirs (Figure 4.27) ainsi que le rapport entre les contraintes internes de compression des pilotis et celui de la tour (Figure 4.28).

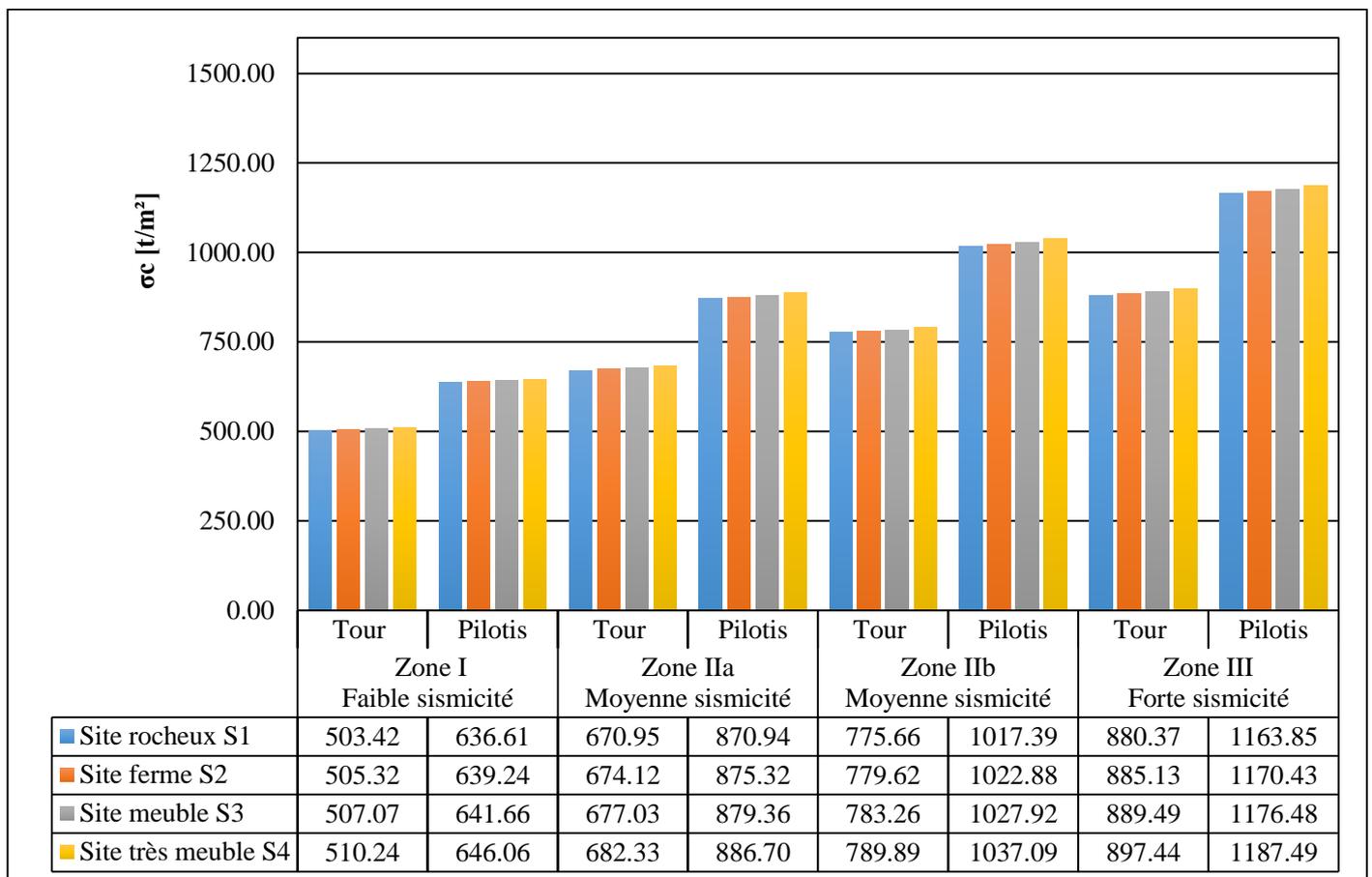


Figure 4.27 : Variation des contraintes internes de compression en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique pour les deux réservoirs.

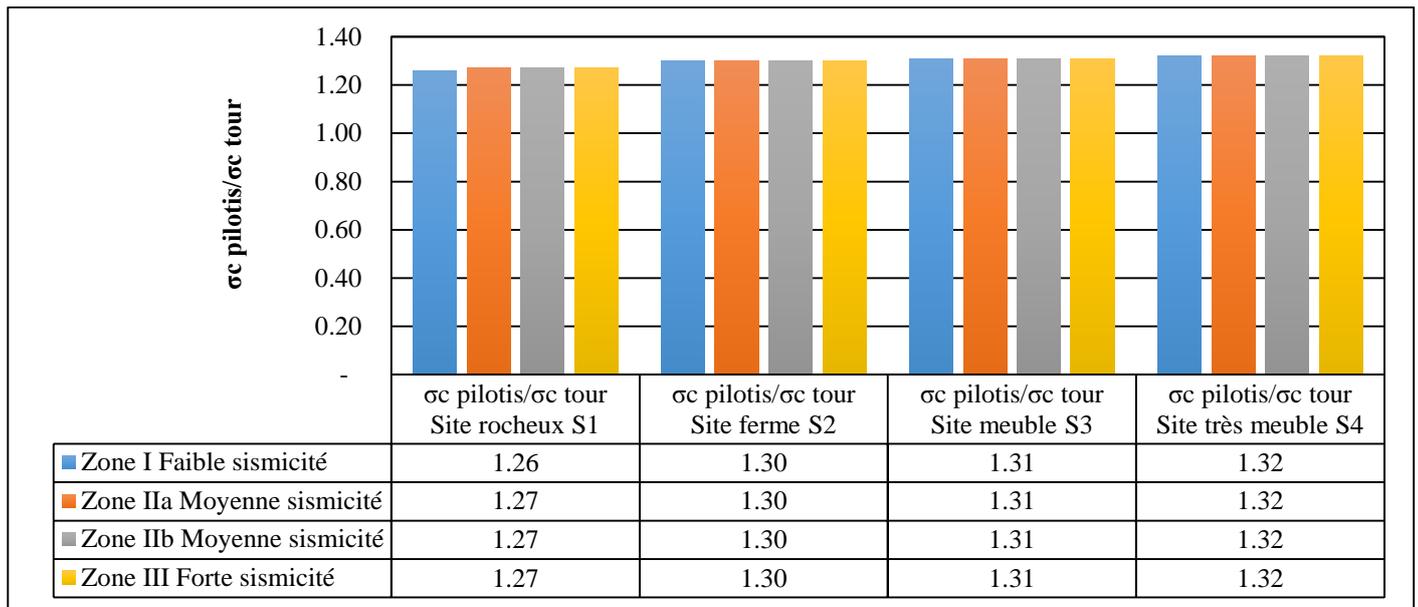


Figure 4.28 : Rapport entre les contraintes de compression de la tour et celui des pilotis.

Les contraintes internes de compression exercées sur les deux supports pour les différentes zones sismiques et sols d'implantation, sont largement vérifiées $\sigma_c \leq \bar{\sigma}_{bc} = 1500 \text{ t/m}^2$ (Figure 4.27).

Comme nous le remarquons aussi sur la figure 4.27, la contrainte de compression exercée sur le poteau le plus sollicité est plus importante que celle exercée sur la tour. Par ailleurs, le rapport des contraintes internes de compression entre le poteau le plus sollicité et la tour ($\sigma_{c_{pilotis}}/\sigma_{c_{tour}}$) est constant et est de l'ordre de 1.30 comme le montre la figure 4.28.

• **En résumé :**

Après vérification des contraintes internes de compression, nous avons aboutis aux résultats suivants :

- Il n y a pas d'effet de site pour une zone sismique donnée relativement à la compression.
- L'effet de la zone sismique est considérable.
- Les contraintes exercées sur le poteau le plus sollicité sont plus importantes que celles exercées sur la tour.
- Les contraintes internes de compression exercées sur les deux supports pour les différentes zones sismiques et sols d'implantation, sont largement vérifiées ($\sigma_c \leq \bar{\sigma}_{bc} = 1500 \text{ t/m}^2$).
- le rapport des contraintes internes de compression entre le poteau le plus sollicité et la tour ($\sigma_{c_{pilotis}}/\sigma_{c_{tour}}$) est constant quel que soit la zone sismique et le sol d'implantation.

Concernant le choix du type de réservoir surélevé vis-à-vis des contraintes internes de compression, étant donné, que les deux types de réservoir (tour ; pilotis) ont des contraintes de compression largement vérifiées, pour rester dans une plage de contrainte assez confortable, nous faisons travailler le béton dans l'intervalle du tiers central de la contrainte limite comprises entre 500 et 1 000 t/m², ce qui nous amène à faire le choix suivant :

- En zone I, le réservoir posé sur pilotis est plus approprié.
- En zone IIa, les deux types de réservoirs conviennent.
- En zone IIb et III, nous optons pour le réservoir posé sur tour.

4.3.3.2. *Contrainte admissible du béton à la traction $\bar{\sigma}_{bt}$:*

Les contraintes de traction du béton dans les sections entièrement tendues et celles développées sur la face mouillée des parois, calculées vis-à-vis de l'état-limite de service et en section homogénéisée, ne peuvent excéder la valeur :

$$\sigma_t \leq \bar{\sigma}_{bt} = 1.1 \times \theta \times f_{t28} \quad ; (\text{Fascicule 74, Construction des réservoirs en béton})$$

Avec :

$\theta = 1$ dans le cas de la traction simple.

f_{t28} : la résistance du béton à la traction à 28 jours ; elle est donnée par la formule suivantes :

$$f_{t28} = 0.6 + 0.06f_{c28}$$

f_{c28} : la résistance du béton à la compression à 28 jours ; $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$

D'où : $f_{t28} = 2.1 \text{ MPa}$

Finalemnt : $\bar{\sigma}_{bt} = 1.32 \text{ MPa}$; $\bar{\sigma}_{bt} = 132 \text{ t/m}^2$

- *Effet de site d'implantation :*

Dans ce qui suit nous représentons la variation des contraintes internes de traction en fonction du site d'implantation pour les quatre zones sismiques pour le réservoir posé sur tour (Figure 4.29), et le réservoir posé sur des pilotis (Figure 4.30).

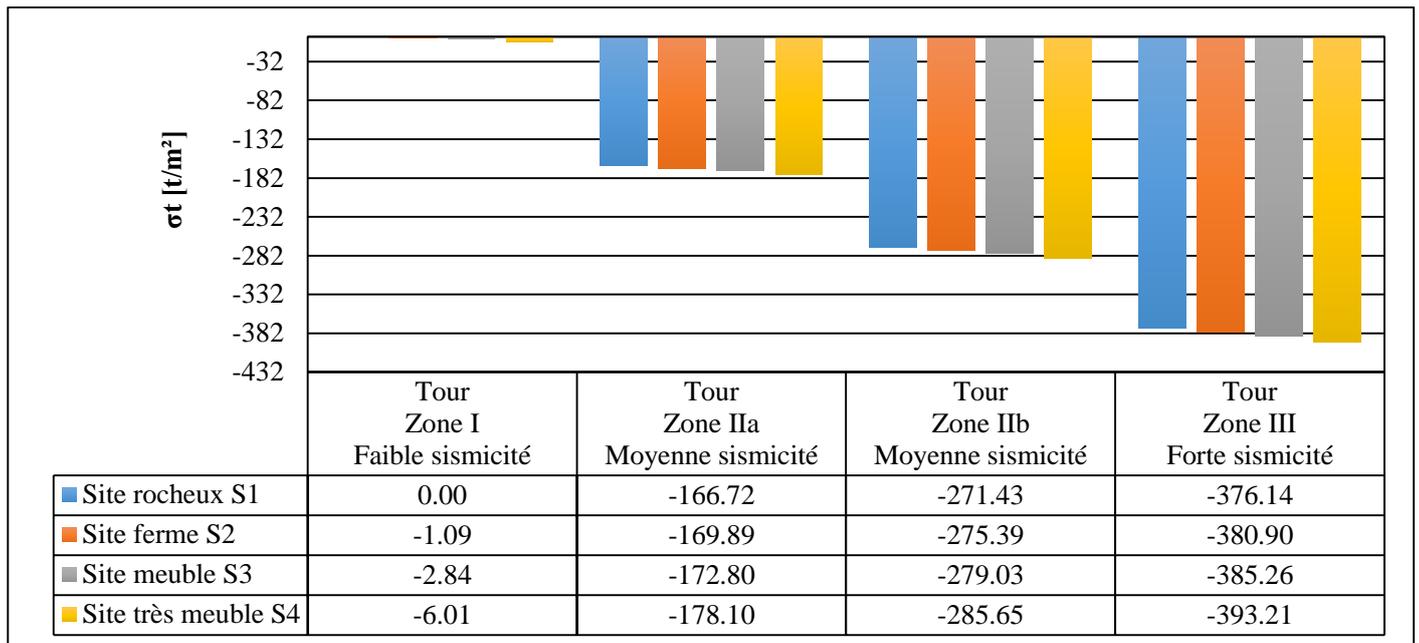


Figure 4.29 : Variation des contraintes internes de traction dans la tour en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique.

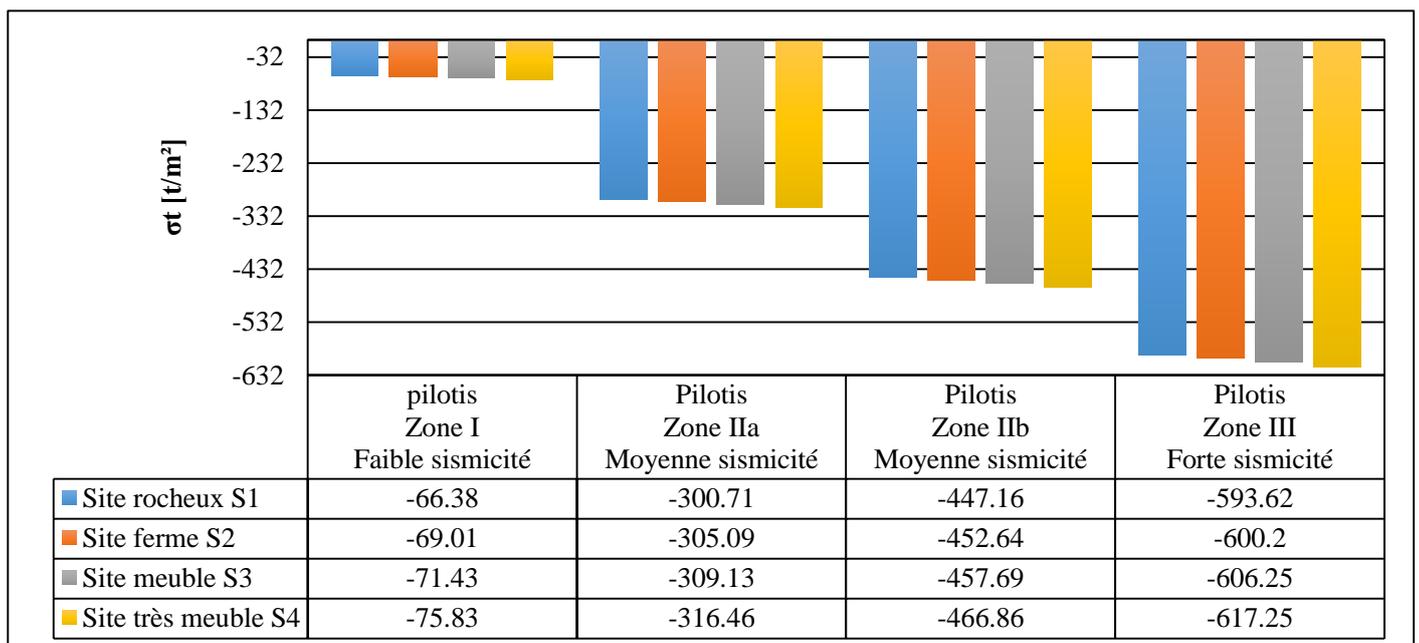


Figure 4.30 : Variation des contraintes internes de traction dans le poteau le plus sollicité en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique.

Les contraintes internes de traction exercées sur les deux supports, sont invariables en fonction du site d'implantation pour une zone sismique donnée, comme le montre les figures 4.29 et 4.30.

Nous retrouvons le même constat fait au paravent pour les contraintes internes de compression pour l'effet du site d'implantation qui se répète pour les contraintes internes de traction, où l'effet de site est négligeable.

- **Effet de zone sismique :**

Dans ce qui suit, nous représentons la variation des contraintes internes de traction en fonction de la zone sismique pour les quatre sites d'implantation du réservoir posé sur tour (Figure 4.31), réservoir posé sur des pilotis (Figure 4.32), puis nous représentons le pourcentage de variation des contraintes internes de traction d'une zone à une autre pour le réservoir posé sur tour (Figure 4.33) et le réservoir posé sur des pilotis (Figure 4.34).

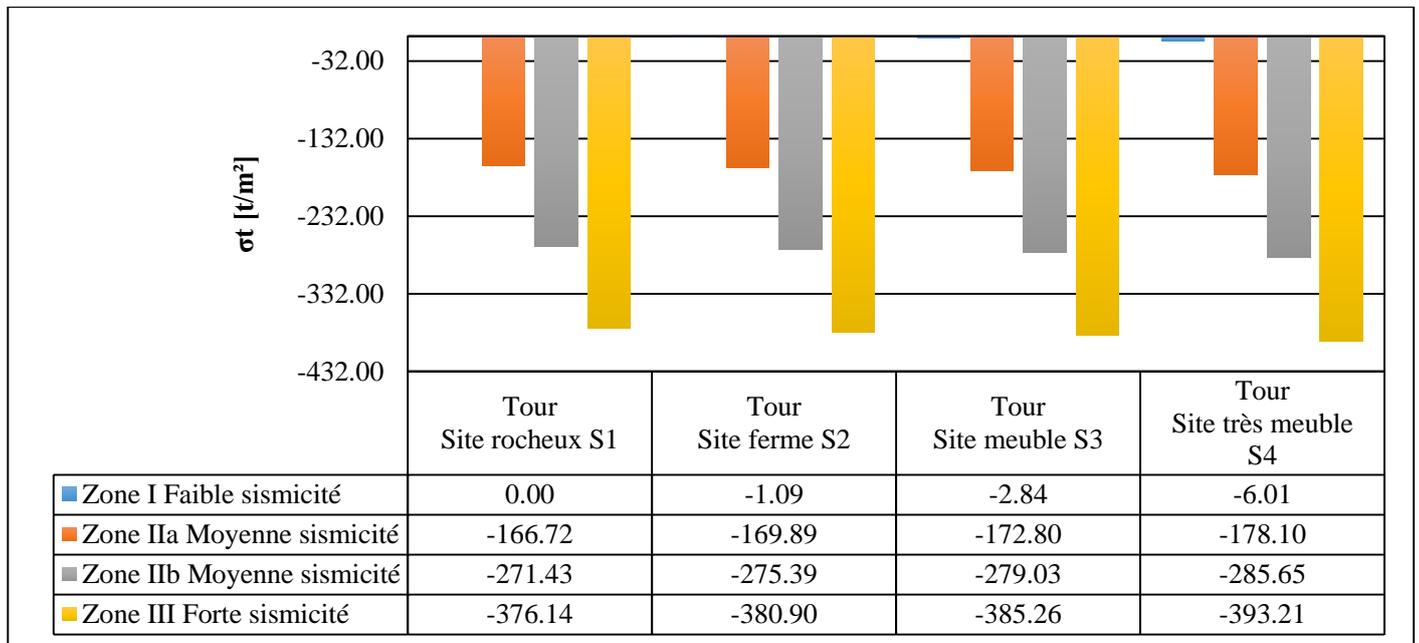


Figure 4.31 : Variation des contraintes internes de traction dans la tour en fonction de la zone sismique pour chaque site d'implantation

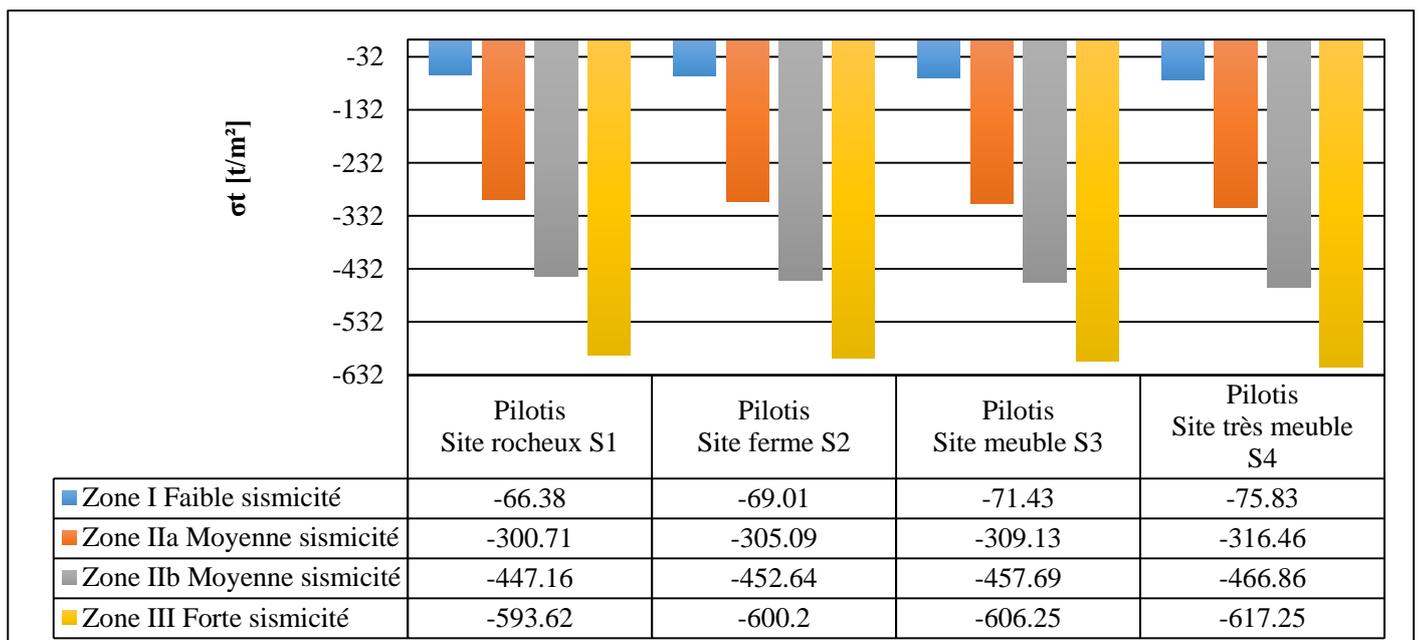


Figure 4.32 : Variation des contraintes internes de traction dans le poteau le plus sollicité en fonction de la zone sismique pour chaque site d'implantation.

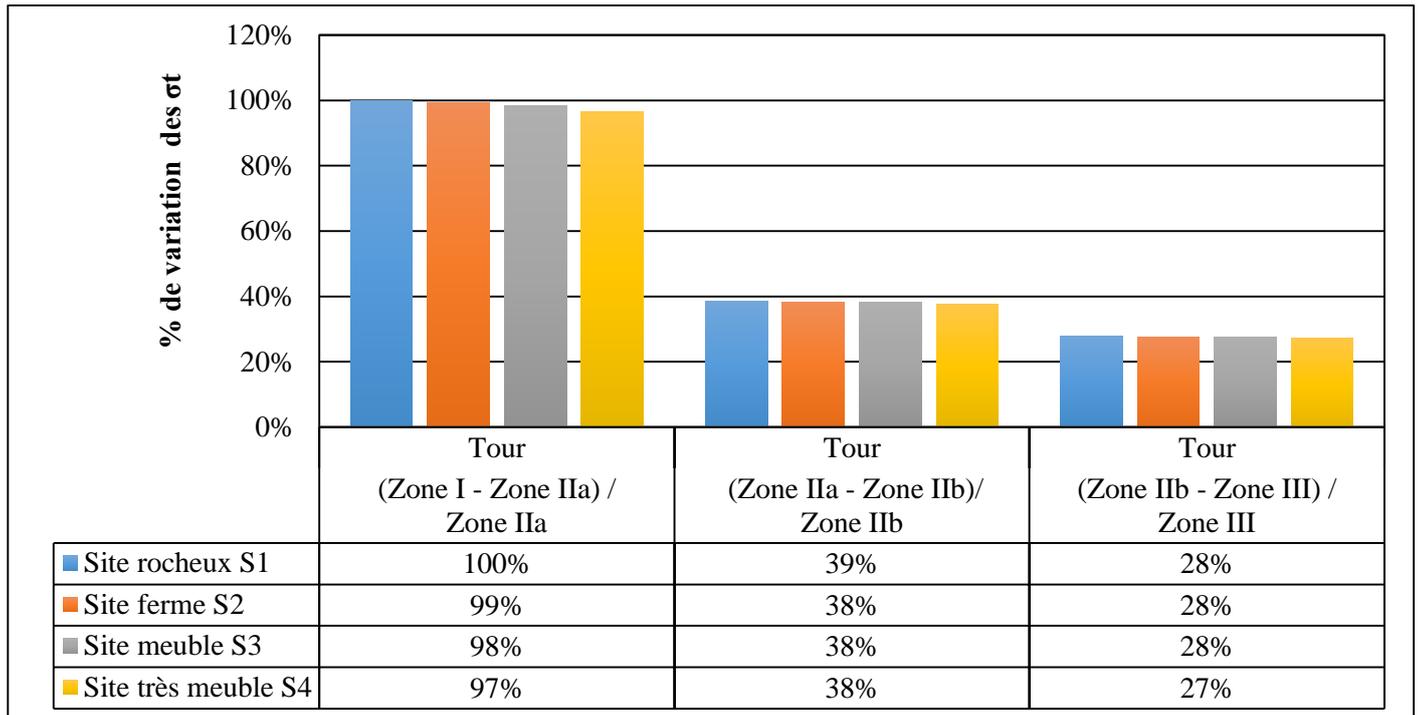


Figure 4.33 : Pourcentage de variation des contraintes de traction d'une zone sismique à une autre pour le réservoir sur tour.

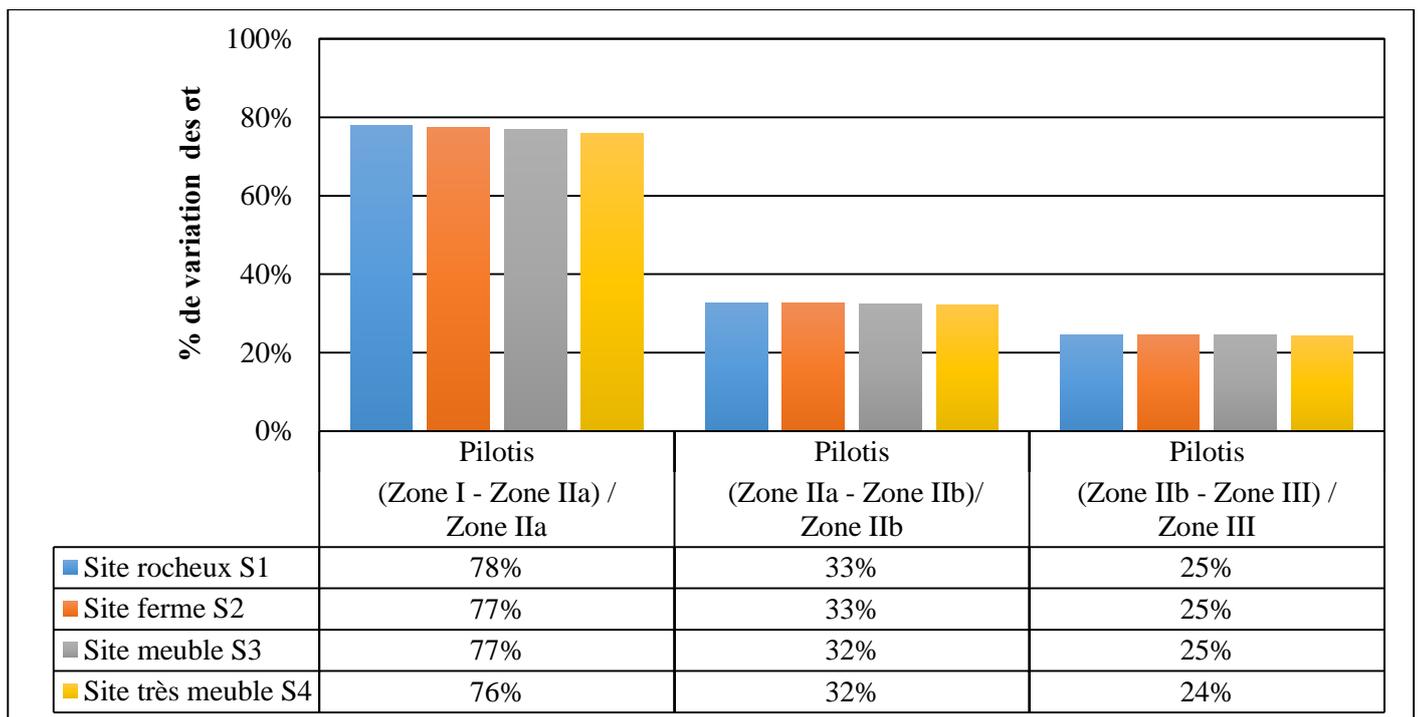


Figure 4.34 : Pourcentage de variation des contraintes de traction d'une zone sismique à une autre pour le réservoir sur des pilotis.

Les contraintes internes de traction varient progressivement de manière croissante d'une zone de faible à forte sismicité, pour un site donné. Et c'est le même constat pour les deux supports. (Figure 4.31 et 4.32).

Par ailleurs, la variation des contraintes internes de traction exercées sur les deux supports, n'est pas uniforme pour les différentes zones sismiques, en effet, elle est brusquement décroissante entre la zone I et IIa, (variation de l'ordre 99% pour la tour, et de 77% pour le poteau le plus sollicité), et diminue progressivement allant de la zone IIa à III (38 à 28% pour la tour, et de 33 à 25% pour le poteau le plus sollicité). (Voir figures 4.33 et 4.34).

Nous pouvons conclure que l'effet de la zone sismique, contrairement à l'effet du site d'implantation, est considérable.

- **Effet du contreventement :**

Dans ce qui suit, nous représentons la variation des contraintes internes de traction en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique pour les deux réservoirs (Figure 4.35) ainsi que le rapport entre les contraintes internes de traction des pilotis et celui de la tour (Figure 4.36).

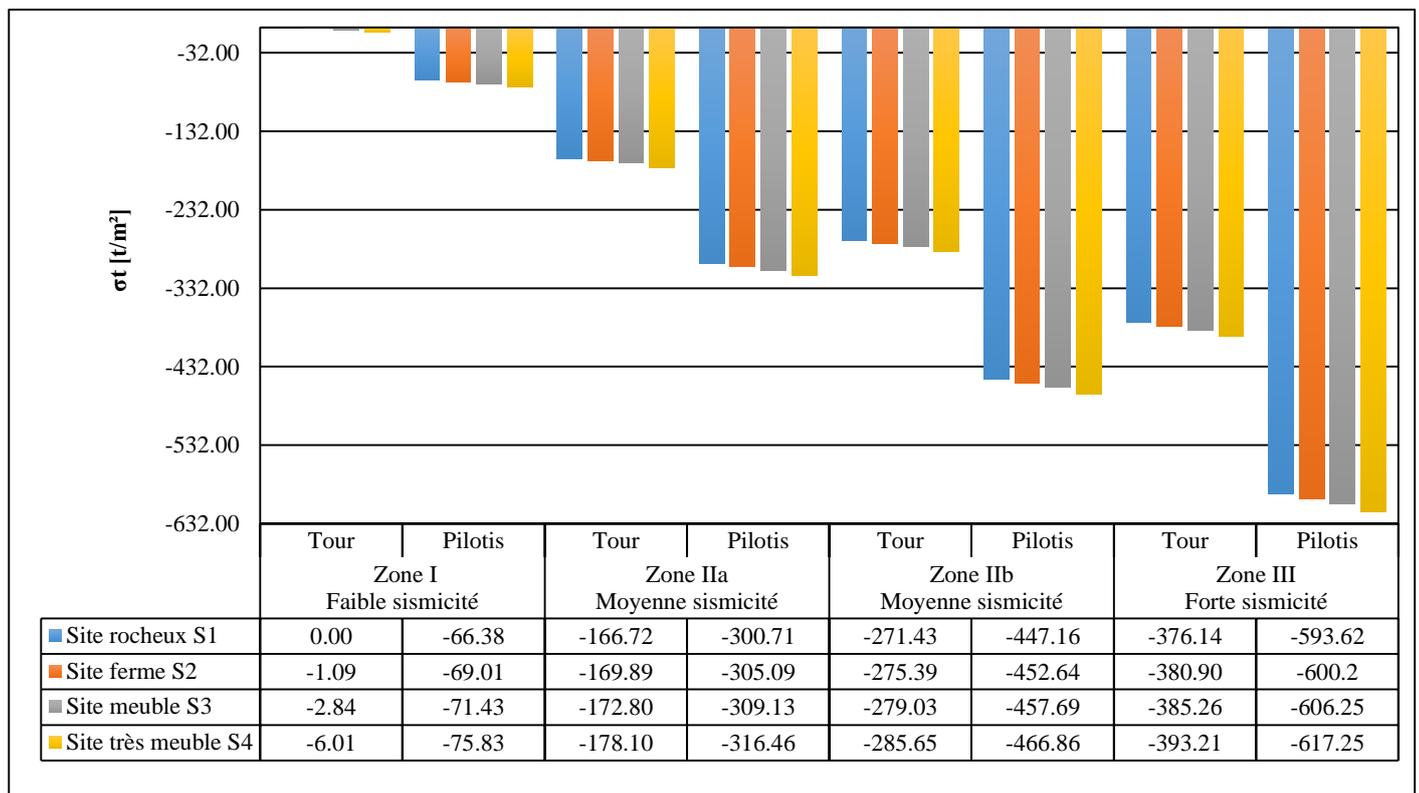


Figure 4.35 : Variation des contraintes internes de traction en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique des deux réservoirs.

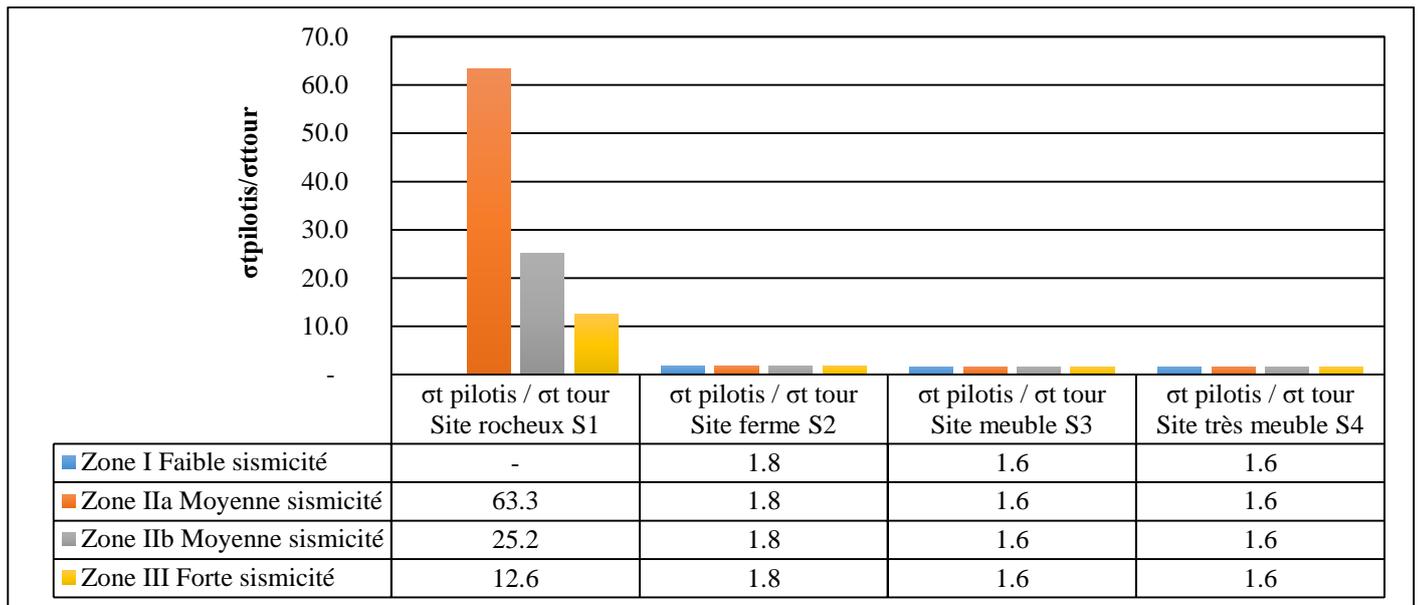


Figure 4.36 : Rapport entre les contraintes de traction de la tour et celles des pilotis.

Les contraintes internes exercées sur le poteau le plus sollicité sont plus importante que celles appliquées sur la tour. (Figure 4.35)

Par ailleurs, le rapport des contraintes internes de traction entre le poteau le plus sollicité et la tour ($\sigma_{t_{\text{pilotis}}} / \sigma_{t_{\text{tour}}}$), est constant pour les sites d'implantation S2, S3, et S4 sur les différentes zones sismiques, il est de l'ordre de 1.6 pour les sites S3 et S4, et de 1.8 pour le site S2. Par contre, pour le site S1, il est décroissant en fonction de la sismicité de la zone, il est de 63.3 pour la zone IIa, 25.2 pour la zone IIb, et de 12.6 pour la zone III. (Figure 4.36).

Un autre résultat remarquable dans la figure 4.35, est que les contraintes internes de traction exercées sur les deux supports sont vérifiées uniquement en zone I ($\sigma_t < \bar{\sigma}_{bt} = 132 \text{ t/m}^2$), contrairement aux autres zones sismiques (zones IIa, IIb, et III), les contraintes internes de traction sont supérieures à la contrainte limite de traction, ce qui signifie, que ces contraintes de traction dans le béton seront reprises par des aciers.

- **En résumé :**

Après vérification des contraintes internes de traction, nous avons aboutis aux résultats suivants :

- Il n y a pas d'effet de site pour une zone sismique donnée.
- L'effet de la zone sismique est considérable.
- Les contraintes internes de traction exercées sur le poteau le plus sollicité sont plus importantes que celles exercées sur la tour.

- Les contraintes internes de traction sont vérifiées uniquement en zone I pour les deux réservoirs.
- En zone IIa, IIb, et III les contraintes internes de traction sont supérieures à la contrainte limite de traction

Au vu de ces résultats et pour maintenir une contrainte de traction modérée nous retiendrons ce qui suit :

- En zone IIa, IIb, et III, il est préférable d'opter pour un réservoir sur tour pour se rapprocher de la contrainte limite de traction $\bar{\sigma}_{bt} = 132 \text{ t/m}^2$.
- En zone I, les contraintes de traction sont vérifiées $\sigma_t < \bar{\sigma}_{bt}$ pour les deux réservoirs, on peut opter pour les deux.

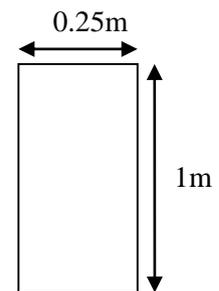
4.4. Ferrailage du support des deux réservoirs :

4.4.1. Réservoir posé sur tour :

➤ *Calcul de l'effort normal de traction :*

Considérons une bande de (1m) de longueur, la section (S) est donc égale à :

$$S = 0.25 \times 1 = 0.25 \text{ m}^2 ; \mathbf{S = 0.25 \text{ m}^2}$$



Les efforts normaux de traction sont donnés dans (tableau 4.13) par la formule suivante :

$$\mathbf{T = \sigma_t \times S}$$

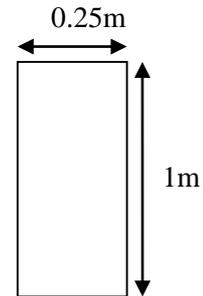
Tableau 4.13 : L'effort normal de traction T en tonnes pour le réservoir sur tour.

Zone Sismique \ Sites	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	T [t/ml]	T [t/ml]	T [t/ml]	T [t/ml]
Zone I Faible sismicité	0.00	0.27	0.71	1.50
Zone IIa Moyenne sismicité	41.68	42.47	43.20	44.53
Zone IIb Moyenne sismicité	67.86	68.85	69.76	71.41
Zone III Forte sismicité	94.04	95.22	96.32	98.30

➤ *Calcul des sections d'armatures longitudinales pour la bande de un mètre :*

La section d'armatures de la bande de 1 m est donnée par la formule suivante :

$$\text{A l'ELS : } A_{S_{long}} \geq \frac{T}{\bar{\sigma}_{st}}$$



$\bar{\sigma}_{st}$: Contrainte limite à la traction des armatures.

Nous travaillons en FP (fissuration préjudiciable) :

$$\bar{\sigma}_{st} = \min \left[\frac{2}{3} f_e ; \max \left(\frac{f_e}{2} ; 110 \sqrt{\eta \cdot f_{t28}} \right) \right] ; [\text{DTU BAEL 91}]$$

f_{t28} : la résistance du béton à la traction à 28 jours ; elle est donnée par la formule suivante :

$$f_{t28} = 0.6 + 0.06 f_{c28}$$

f_{c28} : la résistance du béton à la compression à 28 jours ; $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$

D'où : $f_{t28} = 2.1 \text{ MPa}$

η : Coefficient de fissuration ; $\eta = 1.6$

L'acier utilisé est de nuance FeE.400 ; $f_e = 400 \text{ MPa}$

Finalement la contrainte limite est :

$$\bar{\sigma}_{st} = \min \left[\frac{2}{3} 400 ; \max \left(\frac{400}{2} ; 110 \sqrt{1.6 \times 2.1} \right) \right]$$

$$\bar{\sigma}_{st} = \min [266.667 ; \max(200 ; 201.63)]$$

$$\bar{\sigma}_{st} = 201.63 \text{ MPa}$$

Finalement les sections d'armatures longitudinales pour la bande de 1 mètre de la tour pour toutes les zones sismiques et sur chaque site sont données dans le tableau 4.14 :

Tableau 4.14 : Section d'armatures longitudinales pour une bande de 1 mètre pour la tour.

Sites Zone Sismique	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	A _{Slong} [cm ² /ml]			
Zone I Faible sismicité	0.00	0.13	0.34	0.73
Zone IIa Moyenne sismicité	20.28	20.66	21.02	21.66
Zone IIb Moyenne sismicité	33.01	33.50	33.94	34.74
Zone III Forte sismicité	45.75	46.33	46.86	47.83

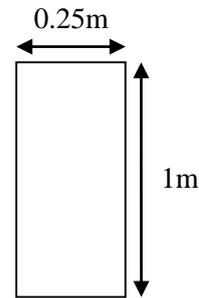
➤ *Calcul des armatures minimales longitudinales pour la bande de un mètre :*

$$\text{Condition de non fragilité : } A_{\min} \geq S \frac{ft_{28}}{fe}$$

S : la section de la bande considérée : $S = 0.25 \text{ m}^2$

L'application numérique nous donne :

$$A_{\min} \geq 0.25 \frac{2.1}{400} ; A_{\min} \geq 13.13 \text{ cm}^2$$



➤ *Choix des sections d'armatures longitudinales pour la bande de un mètre :*

$$A_s = \max (A_{S\text{long}} ; A_{\min})$$

Tableau 4.15 : *Choix des sections d'armatures pour une bande de 1 mètre pour la tour.*

Zone Sismique \ Sites	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	As [cm ² /ml]	As [cm ² /ml]	As [cm ² /ml]	As [cm ² /ml]
Zone I Faible sismicité	13.13	13.13	13.13	13.13
Zone IIa Moyenne sismicité	20.28	20.66	21.02	21.66
Zone IIb Moyenne sismicité	33.01	33.50	33.94	34.74
Zone III Forte sismicité	45.75	46.33	46.86	47.83

➤ *Calcul des sections d'armatures longitudinales pour toute la tour :*

Les sections des armatures longitudinales pour toute la tour sont données par la formule suivante :

$$A_{S\text{long}}^{\text{totale}} = A_s \times P_{\text{moy}}$$

Le périmètre moyen de la tour est : $P_{\text{moy}} = \pi \times D_{\text{moy}}$

D_{moy} : Diamètre moyen de la tour ; $D_{\text{moy}} = 10.75 \text{ m}$

D'où : $P_{\text{moy}} = 33.77 \text{ m}$

Tableau 4.16 : Armatures longitudinales pour toute la tour.

Sites Zone Sismique	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	A _{Slong} ^{totale} [cm ²]			
Zone I Faible sismicité	443.26	443.26	443.26	443.26
Zone IIa Moyenne sismicité	684.86	697.87	709.83	731.59
Zone IIb Moyenne sismicité	1114.99	1131.25	1146.20	1173.40
Zone III Forte sismicité	1545.11	1564.63	1582.75	1615.21

➤ *Calcul des sections d'armatures transversales pour la bande de un mètre :*

Les armatures transversales pour la bande de 1 mètre sont données par la formule suivante :

$$A_{\text{tran}} = \frac{1}{3} A_s$$

Tableau 4.17 : Armatures transversales pour la bande de un mètre.

Sites Zone Sismique	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	A _{tran} [cm ² /ml]			
Zone I Faible sismicité	4.38	4.38	4.38	4.38
Zone IIa Moyenne sismicité	6.76	6.89	7.01	7.22
Zone IIb Moyenne sismicité	11.00	11.17	11.31	11.58
Zone III Forte sismicité	15.25	15.44	15.62	15.94

➤ *Calcul des sections d'armatures transversales pour toute la tour :*

Elles sont données par la formule suivante :

$$A_{\text{tran}}^{\text{totale}} = A_{\text{tran}} \times L$$

L : longueur de la tour ; L = 24.6 m

Tableau 4.18 : Armatures transversales pour toute la tour.

Zone Sismique \ Sites	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	A _{tran} ^{totale} [cm ²]			
Zone I Faible sismicité	107.63	107.63	107.63	107.63
Zone IIa Moyenne sismicité	166.29	169.45	172.35	177.63
Zone IIb Moyenne sismicité	270.72	274.67	278.30	284.91
Zone III Forte sismicité	375.16	379.90	384.25	392.18

4.4.2. Réservoir posé sur des pilotis :

➤ Calcul de la section des armatures longitudinales du poteau le plus sollicité :

$$\text{A l'ELS : } A_{s_{long}} \geq \frac{T}{\bar{\sigma}_{st}}$$

$\bar{\sigma}_{st}$: Contrainte limite à la traction des armatures (fissuration préjudiciable) ;

$$\bar{\sigma}_{st} = 201.63 \text{ MPa}$$

T : effort normal de traction du poteau le plus sollicité.

Les résultats sont consignés dans le tableau 4.19 :

Tableau 4.19 : Section d'armatures longitudinales du poteau le plus sollicité.

Zone Sismique \ Sites	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	A _{Slong} [cm ²]			
Zone I Faible sismicité	20.67	21.49	22.24	23.61
Zone IIa Moyenne sismicité	93.63	95.00	96.25	98.54
Zone IIb Moyenne sismicité	139.24	140.94	142.51	145.37
Zone III Forte sismicité	184.84	186.89	188.77	192.20

➤ Calcul des armatures minimales longitudinales du poteau le plus sollicité :

$$\text{Condition de non fragilité : } A_{\min} \geq S \frac{f_{t28}}{f_e}$$

S : la section du poteau ; S = 0.64 m²

L'application numérique nous donne :

$$A_{\min} \geq 0,64 \cdot \frac{2,1}{400} ; A_{\min} \geq 33.60 \text{ cm}^2$$

➤ *Choix des sections d'armatures longitudinales du poteau le plus sollicité :*

$$A_s = \max (A_{S_{\text{long}}} ; A_{\min})$$

Tableau 4.20 : Choix des section d'armatures longitudinales du poteau le plus sollicité.

Zone Sismique	Sites			
	Site rocheux S ₁ A _s [cm ²]	Site ferme S ₂ A _s [cm ²]	Site meuble S ₃ A _s [cm ²]	Site très meuble S ₄ A _s [cm ²]
Zone I Faible sismicité	33.60	33.60	33.60	33.60
Zone IIa Moyenne sismicité	93.63	95.00	96.25	98.54
Zone IIb Moyenne sismicité	139.24	140.94	142.51	145.37
Zone III Forte sismicité	184.84	186.89	188.77	192.20

➤ *Calcul des sections d'armatures longitudinales pour tous les poteaux :*

Le ferrailage des poteaux est calculé comme suit :

$$A_{S_{\text{long}}}^{\text{totale}} = A_{S_{\text{long}}} \times 12$$

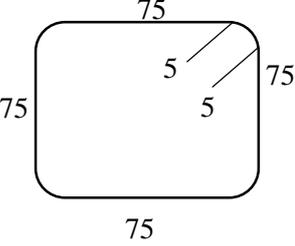
Les résultats sont consignés dans le tableau 4.21 :

Tableau 4.21 : Sections d'armatures longitudinales pour tous les poteaux.

Zone Sismique	Sites			
	Site rocheux S ₁ A _{S_{long}} ^{totale} [cm ²]	Site ferme S ₂ A _{S_{long}} ^{totale} [cm ²]	Site meuble S ₃ A _{S_{long}} ^{totale} [cm ²]	Site très meuble S ₄ A _{S_{long}} ^{totale} [cm ²]
Zone I Faible sismicité	403.20	403.20	403.20	403.20
Zone IIa Moyenne sismicité	1 123.59	1 139.99	1 155.05	1 182.47
Zone IIb Moyenne sismicité	1 670.83	1 691.32	1 710.15	1 744.43
Zone III Forte sismicité	2 218.06	2 242.65	2 265.25	2 306.38

➤ *Calcul des sections d'armatures transversales des poteaux :*

Tableau 4.22 : Sections d'armatures transversales des poteaux.

N°	Section de la barre	L.U [m]	Nombre	L.total[m]	Ø [mm]	A _{tran} [cm ²]	V _{tran} [m ³]
1		3.10	1968.00	6100.80	10.00	0.78	0.48

4.5. Calcul du coût des aciers des deux réservoirs :

4.5.1. Réservoir posé sur tour :

Le montant des aciers est défini par la formule suivante : **montant = Pu × γ_a × V_{tot}**

Pu : prix unitaire des aciers ; **Pu = 180 DA/Kg** ;

γ_a : poids volumiques des aciers : **γ_a = 7850 Kg/m³** ;

V_{tot} : volume total des aciers ; **V_{tot} = V_{long} + V_{tran}** ;

V_{long} : volume des aciers longitudinaux, (m³) ;

V_{tran} : volume des aciers transversaux, (m³).

➤ *Calcul des volumes des aciers longitudinaux de la tour V_{long} [m³] :*

Les volumes des aciers longitudinaux sont calculés comme suit :

$$V_{\text{long}} = A_{\text{Slong}}^{\text{totale}} \times 10^{-4} \times L$$

Les résultats des volumes des aciers longitudinaux sont consignés dans le tableau 4.23

Tableau 4.23 : Volume des aciers longitudinaux de la tour.

Sites Zone Sismique	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	V _{long} [m ³]			
Zone I Faible sismicité	1.09	1.09	1.09	1.09
Zone IIa Moyenne sismicité	1.68	1.72	1.75	1.80
Zone IIb Moyenne sismicité	2.74	2.78	2.82	2.89
Zone III Forte sismicité	3.80	3.85	3.89	3.97

➤ *Calcul des volumes des aciers transversaux de la tour V_{tran} [m³] :*

Les volumes des aciers transversaux sont calculés comme suit :

$$V_{tran} = A_{tran}^{totale} \times 10^{-4} \times L$$

Les résultats des volumes des aciers transversaux sont consignés dans le tableau 4.24

Tableau 4.24 : Volumes des aciers transversaux de la tour.

Zone Sismique \ Sites	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	V_{tran} [m ³]			
Zone I Faible sismicité	0.26	0.26	0.26	0.26
Zone IIa Moyenne sismicité	0.41	0.42	0.42	0.44
Zone IIb Moyenne sismicité	0.67	0.68	0.68	0.70
Zone III Forte sismicité	0.92	0.93	0.95	0.96

➤ *Calcul du volume total des aciers pour la tour V_{tot} [m³] :*

C'est la somme des volumes des aciers longitudinaux et les volumes des aciers transversaux :

$$V_{tot} = V_{tran} + V_{long}$$

Les résultats sont consignés dans le tableau 4.25

Tableau 4.25 : Volume total des aciers de la tour.

Zone Sismique \ Sites	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	V_{tot} [m ³]			
Zone I Faible sismicité	1.35	1.35	1.35	1.35
Zone IIa Moyenne sismicité	2.09	2.14	2.17	2.24
Zone IIb Moyenne sismicité	3.41	3.46	3.50	3.59
Zone III Forte sismicité	4.72	4.78	4.84	4.93

Finalement le montant total des aciers pour la tour est donné dans tableau 4.26 :

Tableau 4.26 : Montant total des aciers pour la tour.

Zone Sismique \ Sites	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	(DA)	(DA)	(DA)	(DA)
Zone I Faible sismicité	1 914 862.07	1 914 862.07	1 914 862.07	1 914 862.07
Zone IIa Moyenne sismicité	2 958 579.90	3 014 789.41	3 066 456.72	3 160 459.65
Zone IIb Moyenne sismicité	4 816 694.36	4 886 956.26	4 951 540.38	5 069 044.04
Zone III Forte sismicité	6 674 808.82	6 759 123.10	6 836 624.05	6 977 628.44

4.5.2. Réservoir posé sur des pilotis :

Le montant des aciers est défini par la formule suivante : $\text{montant} = P_u \times \gamma_a \times V_{\text{tot}}$

P_u : prix unitaire des aciers ; $P_u = 180 \text{ DA/Kg}$;

γ_a : poids volumiques des aciers : $\gamma_a = 7850 \text{ Kg/m}^3$;

V_{tot} : volume total des aciers ; $V_{\text{tot}} = V_{\text{long}} + V_{\text{tran}}$;

V_{long} : volume des aciers longitudinaux, (m^3) ;

V_{tran} : volume des aciers transversaux, $V_{\text{tran}} = 0.48 \text{ m}^3$.

➤ *Calcul des volumes des aciers longitudinaux des 12 poteaux V_{long} [m^3] :*

Les volumes des aciers longitudinaux sont calculés comme suit :

$$V_{\text{long}} = A_{\text{S}_{\text{long}}}^{\text{totale}} \times 10^{-4} \times L$$

Les résultats des volumes des aciers longitudinaux sont consignés dans le tableau 4.27 :

Tableau 4.27 : Volumes des aciers longitudinaux pour les pilotis.

Zone Sismique \ Sites	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	V_{long} [m^3]			
Zone I Faible sismicité	0.99	0.99	0.99	0.99
Zone IIa Moyenne sismicité	2.76	2.80	2.84	2.91
Zone IIb Moyenne sismicité	4.11	4.16	4.21	4.29
Zone III Forte sismicité	5.46	5.52	5.57	5.67

➤ *Calcul du volume total des aciers des 12 poteaux :*

C'est la somme des volumes des aciers longitudinaux et les volumes des aciers transversaux :

$$V_{\text{tot}} = V_{\text{tran}} + V_{\text{long}}$$

Les résultats sont consignés dans le tableau 4.28 :

Tableau 4.28 : Volume total des aciers pour les pilotis.

Zone Sismique	Sites			
	Site rocheux S ₁ V _{tot} [m ³]	Site ferme S ₂ V _{tot} [m ³]	Site meuble S ₃ V _{tot} [m ³]	Site très meuble S ₄ V _{tot} [m ³]
Zone I Faible sismicité	1.47	1.47	1.47	1.47
Zone IIa Moyenne sismicité	3.24	3.28	3.32	3.39
Zone IIb Moyenne sismicité	4.59	4.64	4.69	4.77
Zone III Forte sismicité	5.94	6.00	6.05	6.15

Finalement le montant total des aciers pour les pilotis est donné dans tableau 4.29 :

Tableau 4.29 : Montant total des aciers pour les pilotis.

Zone Sismique	Sites			
	Site rocheux S ₁ (DA)	Site ferme S ₂ (DA)	Site meuble S ₃ (DA)	Site très meuble S ₄ (DA)
Zone I Faible sismicité	2 073 908.71	2 073 908.71	2 073 908.71	2 073 908.71
Zone IIa Moyenne sismicité	4 577 977.21	4 634 959.94	4 687 341.23	4 782 647.76
Zone IIb Moyenne sismicité	6 480 150.99	6 551 379.40	6 616 856.02	6 735 989.17
Zone III Forte sismicité	8 382 324.76	8 467 798.86	8 546 370.80	8 689 330.59

4.6. Calcul du coût du coffrage :

4.6.1. Réservoir posé sur tour :

➤ *Coffrage cylindrique :*

Nous prenons comme prix unitaire par mètre carré : **1100 DA/m²**

Calcul de la surface du coffrage :

$$\text{Surface du cylindre intérieur} : S_{\text{int}} = 2\pi \times R_{\text{int}} \times L = 2\pi \times 5.25 \times 24.6 = 811.062 \text{ m}^2$$

$$\text{Surface du cylindre extérieur} : S_{\text{ext}} = 2\pi \times R_{\text{ext}} \times L = 2\pi \times 5.5 \times 24.6 = 849.684 \text{ m}^2$$

$$\text{La surface totale est} : S_{\text{tot}} = S_{\text{int}} + S_{\text{ext}} = 1660.746 \text{ m}^2$$

$$\text{D'où le montant total du coffrage de la tour est} : \text{Prix} = S_{\text{tot}} \times 1100 = \mathbf{1\ 826\ 820.6\ DA}$$

4.6.2. Réservoir posé sur des pilotis :

➤ Coffrage plan :

Nous prenons comme prix unitaire par mètre carré : **650 DA/m²**

Calcul de la surface du coffrage :

$$\text{Surface des poteaux : } S_{\text{pot}} = [(b+h) 2 \times L] \times 12 = [(0.8+0.8)2 \times 24.6] \times 12 = 944.64 \text{ m}^2$$

$$\text{Surface des entretoises : } S_{\text{ent}} = [(b+2h) \times L] \times 72 = [(0.5+2 \times 0.6) \times 2] \times 72 = 244.8 \text{ m}^2$$

$$\text{La surface totale est : } S_{\text{tot}} = S_{\text{pot}} + S_{\text{ent}} = 944.64 + 244.8 = 1189.44 \text{ m}^2$$

D'où le montant total du coffrage des pilotis est de : Prix = $S_{\text{tot}} \times 650 = 773136 \text{ DA}$

4.7. Calcul du montant total coffrage et aciers :

4.7.1. Réservoir posé sur tour :

Les montants totales coffrage et aciers de la tour sont consignés dans le tableau 4.30 :

Tableau 4.30 : Montant total coffrage et aciers de la tour.

Sites Zone Sismique	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	(DA)	(DA)	(DA)	(DA)
Zone I Faible sismicité	3 741 682.67	3 741 682.67	3 741 682.67	3 741 682.67
Zone IIa Moyenne sismicité	4 785 400.50	4 841 610.01	4 893 277.32	4 987 280.25
Zone IIb Moyenne sismicité	6 643 514.96	6 713 776.86	6 778 360.98	6 895 864.64
Zone III Forte sismicité	8 501 629.42	8 585 943.70	8 663 444.65	8 804 449.04

4.7.2. Réservoir posé sur des pilotis :

Les montants totales coffrage et aciers des pilotis sont consignés dans le tableau 4.31 :

Tableau 4.31 : Montant total coffrage et aciers des pilotis.

Sites Zone Sismique	Site rocheux S ₁	Site ferme S ₂	Site meuble S ₃	Site très meuble S ₄
	(DA)	(DA)	(DA)	(DA)
Zone I Faible sismicité	2 847 044.71	2 847 044.71	2 847 044.71	2 847 044.71
Zone IIa Moyenne sismicité	5 351 113.21	5 408 095.94	5 460 477.23	5 555 783.76
Zone IIb Moyenne sismicité	7 253 286.99	7 324 515.40	7 389 992.02	7 509 125.17
Zone III Forte sismicité	9 155 460.76	9 240 934.86	9 319 506.80	9 462 466.59

4.8. discussion et interprétation des résultats du montant total :

Dans ce qui suit nous représentons la variation du montant du coffrage et des aciers en fonction du site d'implantation pour les quatre zones sismiques pour le réservoir posé sur tour (Figure 4.37), et le réservoir posé sur des pilotis (Figure 4.38), puis nous représentons le pourcentage de variation du montant coffrage et aciers d'une zone à une autre pour le réservoir posé sur tour (Figure 4.39) et pour le réservoir posé sur des pilotis (Figure 4.40).

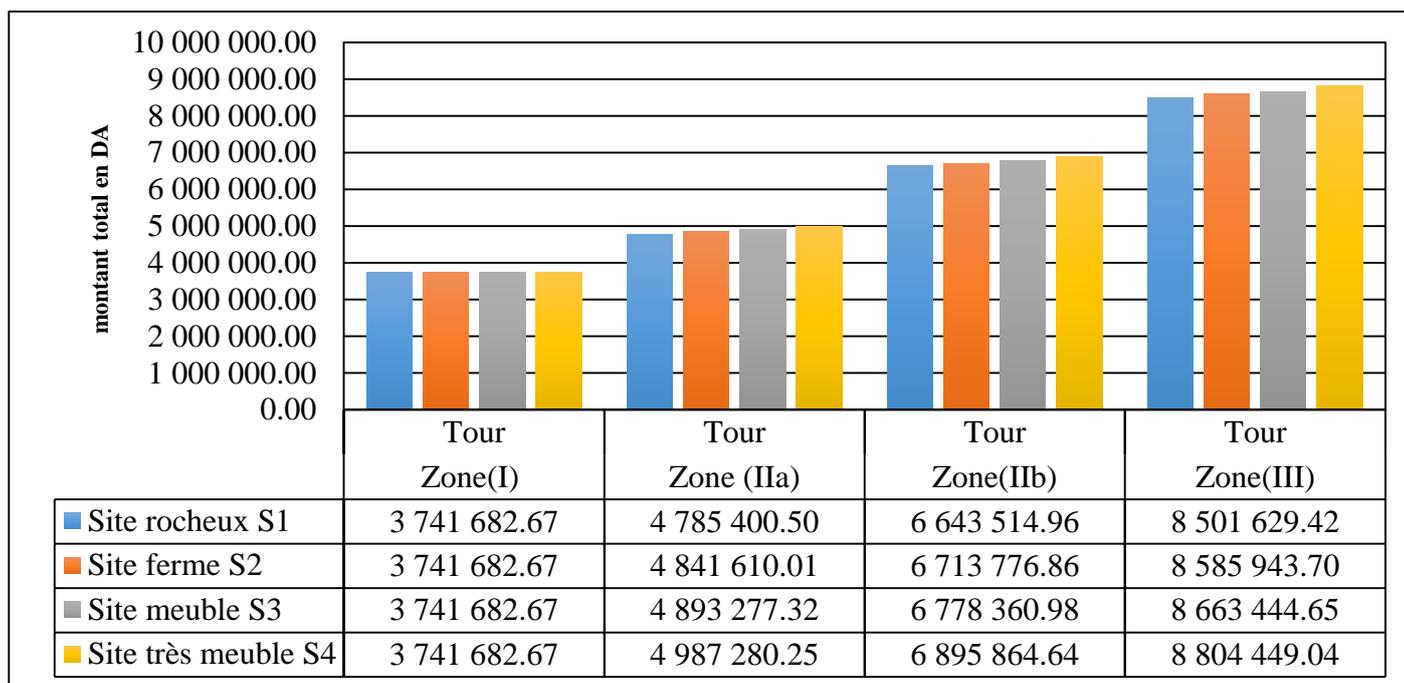


Figure 4.37 : Montant total coffrage et aciers pour réservoir sur tour.

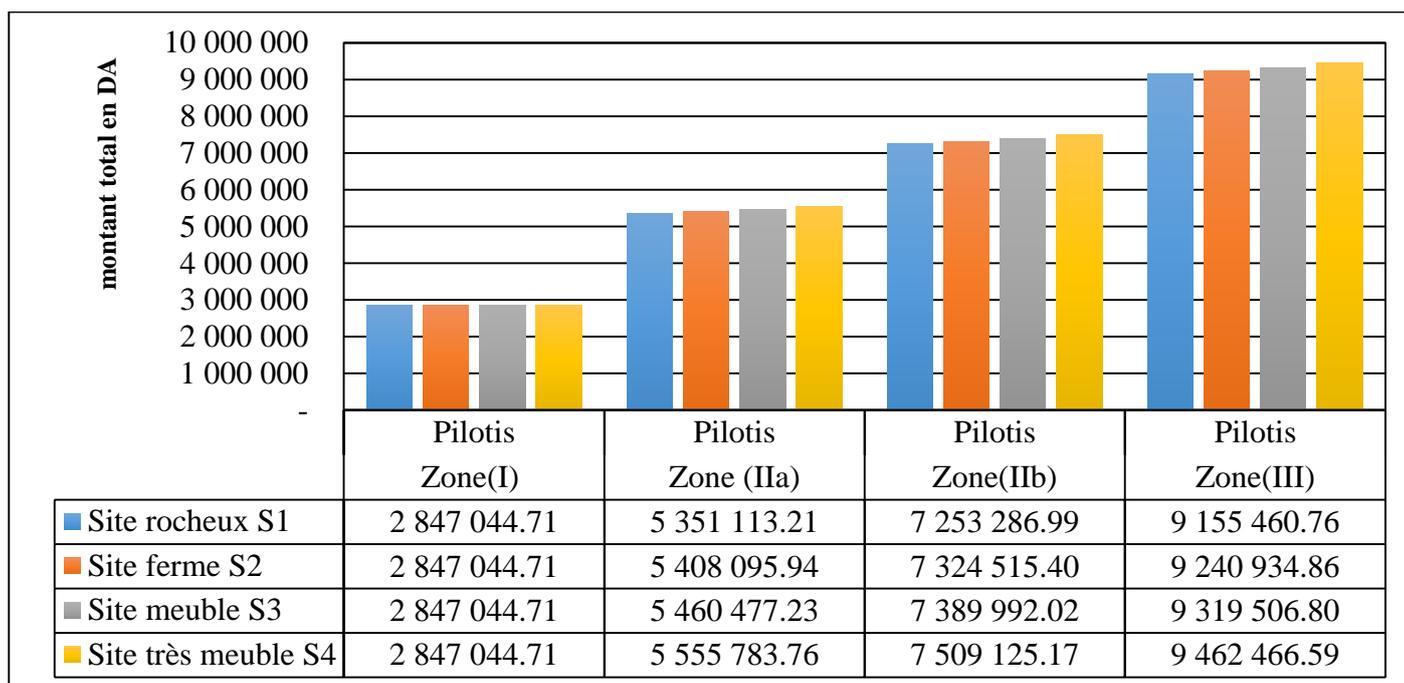


Figure 4.38 : Montant total coffrage et aciers pour réservoir sur pilotis.

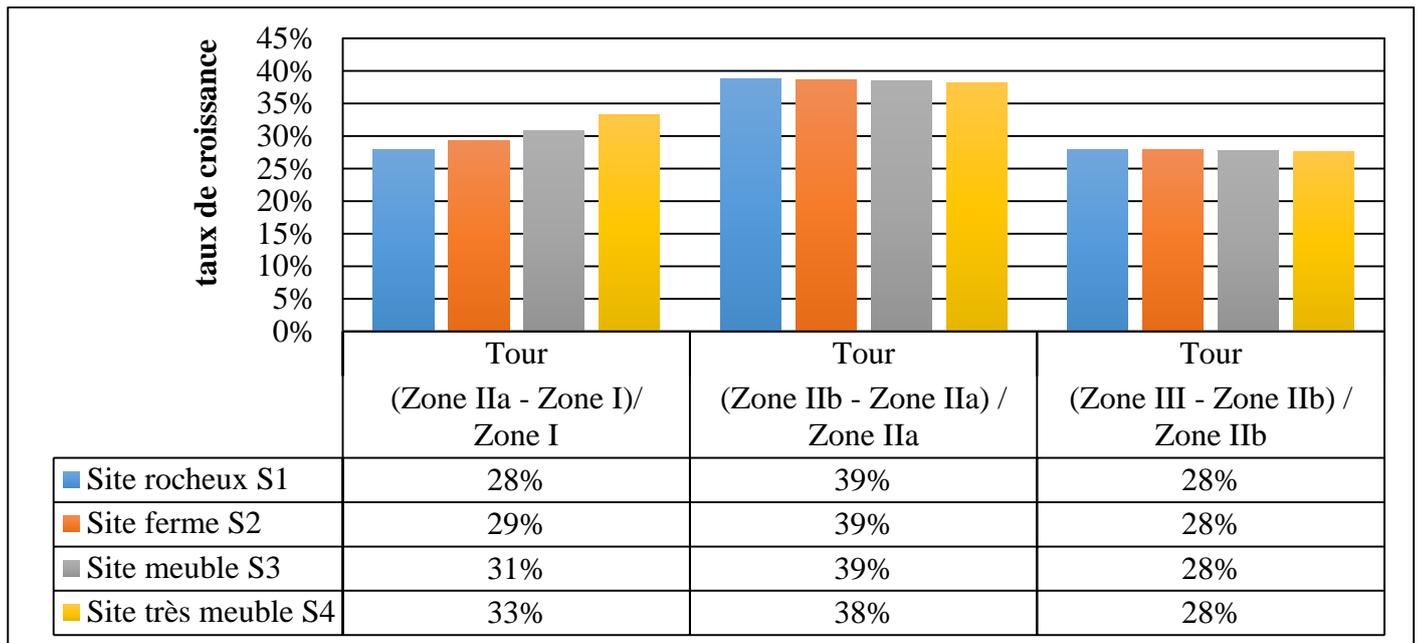


Figure 4.39 : Taux de croissance du montant total coffrage et acier pour le réservoir sur tour.

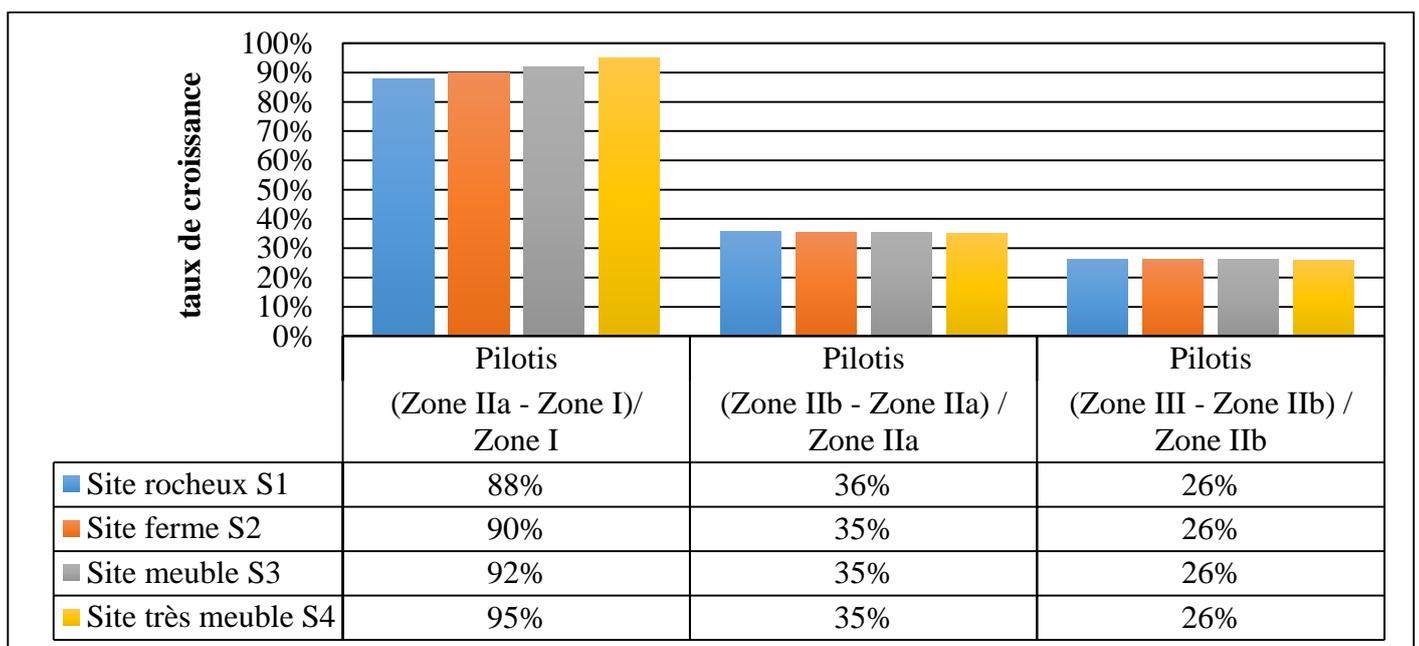


Figure 4.40 : Taux de croissance du montant total coffrage et acier pour le réservoir sur des pilotis.

Nous constatons que le montant total du coffrage et des aciers reste constant en faisant varier le sol d’implantation pour les deux types de réservoirs surélevés, (Figure 4.38 et 4.39).

Par contre, le montant des deux supports augmente en fonction de la sismicité de la zone, en effet, pour un sol d’implantation donné, le montant total du coffrage et des aciers peut aller du simple au triple, un réservoir implanté en zone I coûteras trois fois plus cher en zone III, et deux fois plus cher en zone IIb, (Figures 4.38 et 4.39).

Le taux de croissance du montant du coffrage et des aciers dans le cas du réservoir posé sur la tour est plus important de l'ordre de 39% passons de la zone IIa à IIb, (Figure 4.40), par contre, pour le réservoir posé sur des pilotis le taux est plus important en passant de la zone I à IIa de l'ordre 91%, (Figure 4.41).

Ainsi, nous pouvons conclure que la nature des sols n'influe pas sur le montant de réalisation, contrairement à l'effet de la zone sismique qui est considérable.

4.8.1. Comparaison du montant total (coffrage + acier) de la tour et celui des pilotis :

Dans ce qui suit, nous représentons la variation du montant coffrage et aciers en fonction du site d'implantation pour chaque zone sismique pour les deux réservoirs (Figure 4.41) ainsi que le rapport entre les contraintes internes de traction des pilotis et celui de la tour en pourcentage (Figure 4.42).

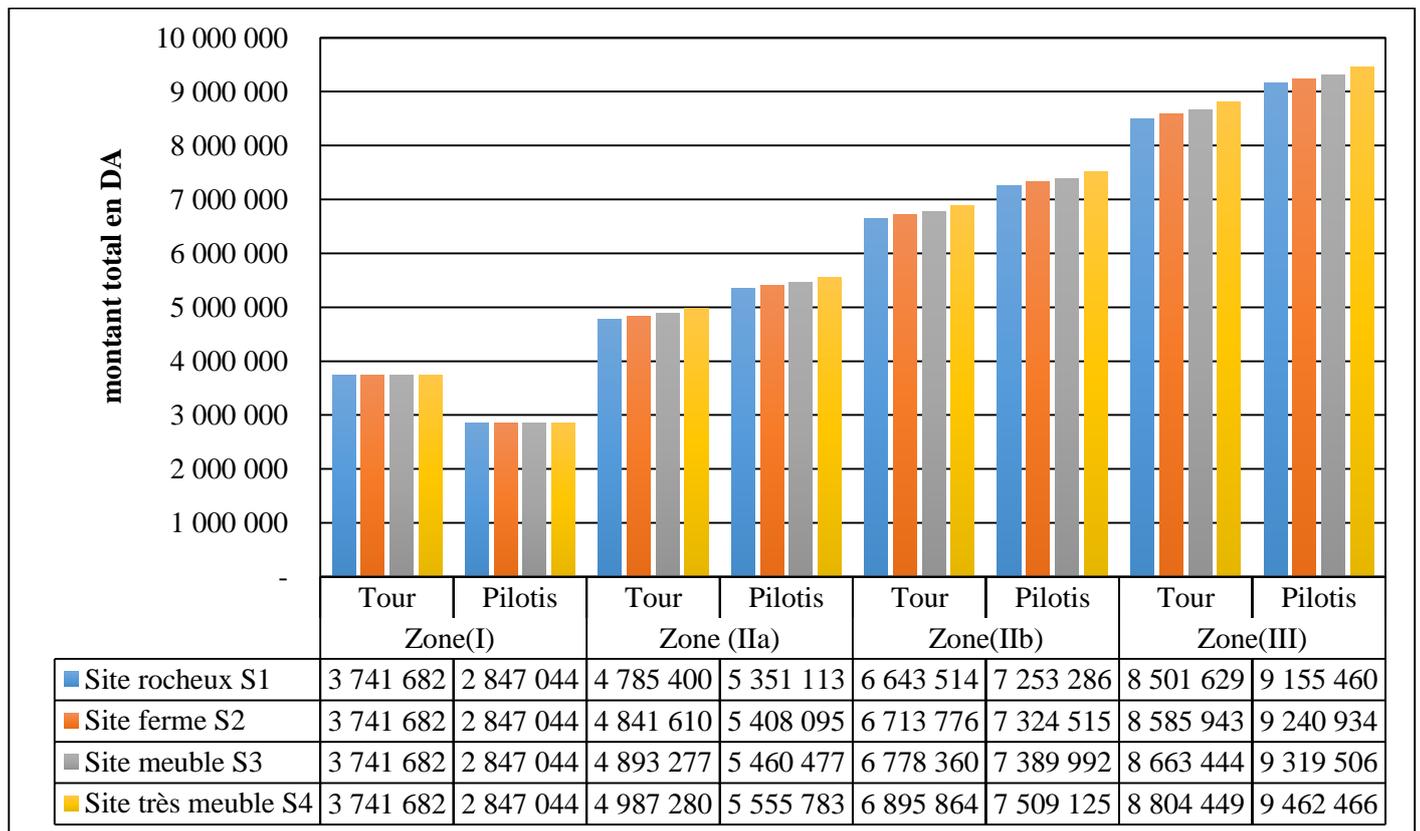


Figure 4.41 : Montant total coffrage et aciers pour la tour et pilotis.

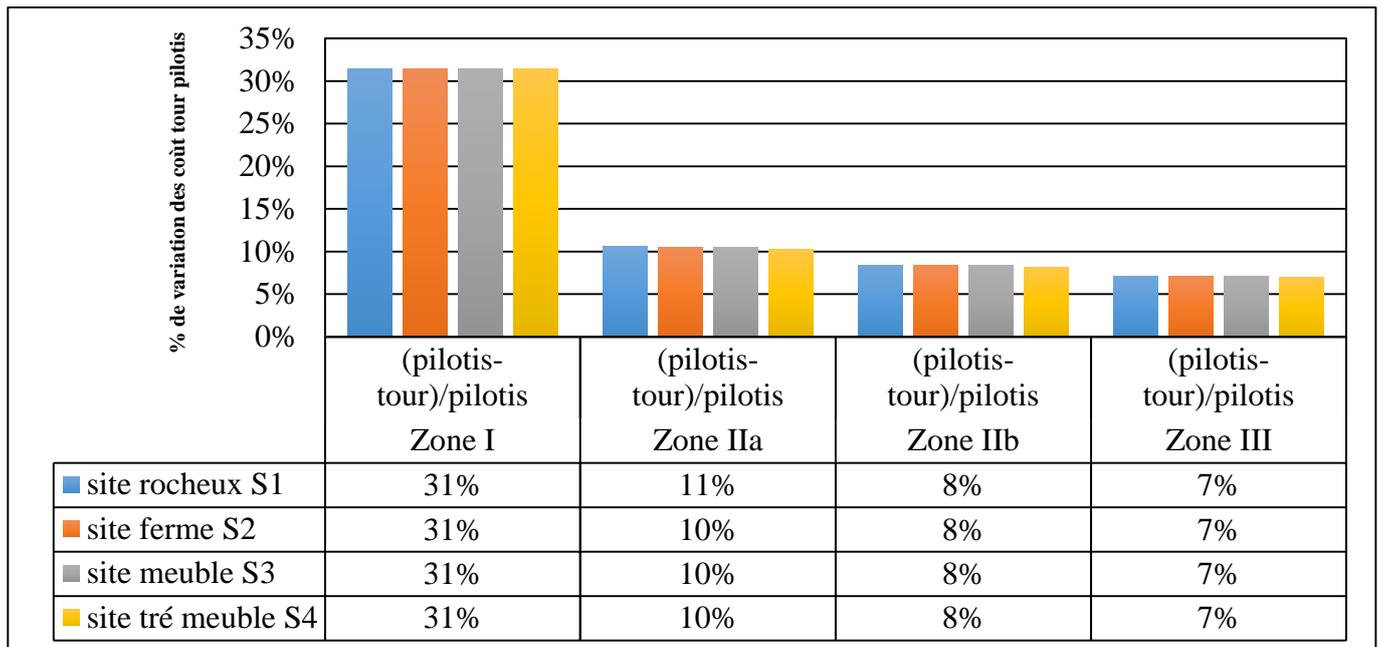


Figure 4.42 : Variation du pourcentage des coûts (coffrage et aciers) de la tour et des pilotis.

D'après la figure 4.42, nous remarquons que pour la zone I (faible sismicité), le montant total (coffrage ; aciers) de la tour est nettement plus important que celui des pilotis sur tous les sites. Comme nous pouvons le voir sur la figure 4.43, le montant total de la tour est plus élevé de 31% que celui des pilotis dans la zone I (faible sismicité).

Par contre, pour les autres zones sismiques, (zones IIa, IIb et III), les pilotis coûtent légèrement plus chères que la tour, comme nous le constatons sur la figure 4.43, il est de 7 à 10% plus cher.

- **En résumé :**

Après comparaison des coûts, nous aboutissons aux résultats suivants :

- la nature des sols n'influe pas sur le montant de réalisation pour une zone sismique donnée.
- L'effet de la zone sismique est considérable.
- pour la zone I (faible sismicité), le réservoir sur tour est moins cher que le réservoir posé sur des pilotis
- pour les zones IIa, IIb, et III, le réservoir posé sur des pilotis est le moins cher mais avec une légère différence.

Ce qui nous amène à faire le choix économique du type de réservoir surélevé suivant :

- Pour la zone I, le réservoir sur tour est recommandé.
- Pour les zones IIa, IIb, et III, on peut opter pour les deux types de réservoirs surélevés.

Conclusion :

Après avoir explicité, analysé et comparé les résultats des facteurs de sécurité au glissement et au renversement, les contraintes internes de compression et de traction exercées sur les deux supports, ainsi que le montant du coffrage et des aciers pour les deux types de support du réservoir surélevé. Nous avons démontré qu'il n'y a pas d'effet du site d'implantation, et que le comportement du réservoir surélevé vis-à-vis du séisme n'est pas fonction de la rigidité du sol d'implantation, par contre nous avons constaté qu'il y a un effet considérable de la zone sismique.

Dans le tableau qui suit, nous élaborerons un choix technique en fonction des différentes zones sismiques selon les résultats obtenus au paravent concernant le glissement, le renversement et les contraintes internes de traction et de compression, et un choix économique en fonction du montant du coffrage et des aciers :

Tableau 4.32 : Choix technique et choix économique du réservoir surélevé en fonction de la zone sismique.

Choix		Zone sismique			
		Zone I Faible sismicité	Zone IIa Moyenne sismicité	Zone IIb Moyenne sismicité	Zone III Forte sismicité
Technique	Glissement	Tour / Pilotis	Tour / Pilotis	Tour / Pilotis	Tour / Pilotis
	Renversement	Tour / Pilotis	Tour / Pilotis	Tour	Tour
	Contrainte de compression	Pilotis	Tour / Pilotis	Tour	Tour
	Contrainte de traction	Tour / Pilotis	Tour	Tour	Tour
Economique		Pilotis	Tour / Pilotis	Tour / Pilotis	Tour / Pilotis

Afin de répondre aux préoccupations des ingénieurs, nous avons fait une étude comparative entre les deux types de réservoir selon deux aspects, d'abord l'aspect technique, dont nous avons été appelés à vérifier la stabilité de chaque réservoir vis-à-vis de l'action sismique en vérifiant leur stabilité au glissement et au renversement, ainsi que les contraintes internes de traction et de compression exercées sur les deux supports pour chaque zone sismique et type de sol d'implantation. Pour l'aspect économique, nous avons comparé les montants à consentir pour la réalisation des deux réservoirs.

A la lumière des résultats obtenus, les conclusions suivantes s'imposent :

Sur le plan technique, nous avons constaté ce qui suit :

Pour le glissement, nous avons remarqué que la variation du facteur de sécurité en fonction du site d'implantation reste constante pour une zone sismique donnée, mais varie considérablement en fonction de la zone sismique pour un même site d'implantation, cette variation est d'autant plus importante entre la zone I et IIa. Ce qui implique qu'il n'y a pas d'effet du site d'implantation et que l'effet de la zone sismique est considérable relativement au glissement. Ce constat est le même pour les deux types de réservoirs. En revanche, la stabilité au glissement est largement vérifiée pour les deux types de réservoirs ($F_g > 1.5$), le réservoir posé sur tour présente un facteur de sécurité au glissement plus important que le réservoir posé sur des pilotis. Nous avons constaté aussi que le rapport entre le facteur de sécurité au glissement de la tour et celui des pilotis ($F_{g_{tour}}/F_{g_{pilotis}}$) reste constant quel que soit la zone sismique et le sol d'implantation. Ce qui nous a amené à conclure que les deux types de réservoirs conviennent en toutes zones sismiques et sol d'implantation par rapport au glissement.

En ce qui concerne le renversement, nous remarquons que si nous faisons varier les sites d'implantations dans une zone sismique donnée, le facteur de sécurité au renversement reste inchangé, par contre si nous faisons varier les zones sismiques pour un site d'implantation donné le facteur de sécurité varie considérablement. Ce qui implique qu'il n'y a pas d'effet de site et que l'effet de zone sismique est considérable. Ce constat est le même pour les deux types de réservoirs comme nous l'avons déjà vu pour le facteur de sécurité au glissement. D'un autre côté, le réservoir posé sur tour présente un facteur de sécurité au renversement plus important que le réservoir posé sur des pilotis. Le rapport entre les facteurs de sécurité au renversement des deux réservoirs ($F_{S_{tour}}/F_{S_{pilotis}}$) reste toujours constant quel que soit la zone sismique ou le sol d'implantation. Un autre résultat éminent, est que le réservoir posé sur tour est stable vis-à-

vis du renversement pour toutes les zones sismiques ($F_s > 2.5$), quant au réservoir posé sur des pilotis, il présente une stabilité suffisante vis-à-vis du renversement en zones I et IIa, par contre, pour les deux autres zones, il y a risque de renversement en zone IIb ($F_s \approx 2.5$) et la stabilité n'est pas atteinte en zone III ($F_s < 2.5$). À la base de ses résultats, notre choix vis-à-vis du renversement est comme suit :

- En zone I et IIa, l'ingénieur peut opter pour les deux types de réservoirs surélevés.
- En zone IIb, le réservoir posé sur tour est plus confortable vis-à-vis du renversement.
- En zone III, l'ingénieur est dans l'obligation d'opter pour le réservoir posé sur tour.

Concernant les contraintes internes de compression, nous avons démontré également qu'elles ne varient pas en fonction du site d'implantation pour une zone sismique donnée, et que sa variation en fonction des zones sismique est considérable pour un site donné, cette variation est d'autant plus importante entre la zone I et IIa. Ce qui veut dire qu'il n'y a pas d'effet de site et que l'effet de la zone sismique est considérable pour les deux types de supports. Par ailleurs, les contraintes internes de compression exercées sur les deux supports pour les différentes zones sismiques et sols d'implantation, sont largement vérifiées $\sigma_c \leq \bar{\sigma}_{bc} = 1500 \text{ t/m}^2$, en revanche, la contrainte interne de compression exercée sur le poteau le plus sollicité est plus importante que celle exercée sur la tour, et le rapport des contraintes internes de compression entre le poteau le plus sollicité et la tour ($\sigma_{c_{pilotis}}/\sigma_{c_{tour}}$) est constant. Concernant le choix du type de réservoir surélevé vis-à-vis des contraintes internes de compression, nous avons envisagé de faire travailler le béton dans une plage de contrainte assez confortable, qui est le tiers central de la contrainte limite ($\bar{\sigma}_{bc} = 1500 \text{ t/m}^2$), c'est à dire dans l'intervalle de]500 ; 1000[(t/m^2). Ce qui nous amène à faire le choix suivant :

- En zone I, le réservoir posé sur pilotis est plus approprié.
- En zone IIa, les deux types de réservoirs conviennent.
- En zone IIb et III, nous optons pour le réservoir posé sur tour.

Quant aux contraintes internes de tractions exercées sur les deux supports, nous avons constaté qu'elles ne changent pas en fonction du site d'implantation, par contre, elles varient considérablement en fonction de la zone sismique, ce qui nous amène à conclure qu'il n'y a pas d'effet du site d'implantation et que l'effet de la zone sismique est considérable. Par ailleurs, pour ce qui est du contreventement, nous avons constaté que les contraintes internes exercées sur le poteau le plus sollicité sont plus importantes que celles appliquées sur la tour et qu'en zone I de faible sismicité, les contraintes de tractions sont vérifiées pour les deux types de

réservoirs contrairement aux autres zones sismiques (zones I, II et III) où ces contraintes sont supérieures à la contrainte limite. A la base de ces résultats, notre choix vis-à-vis des contraintes internes de traction sera comme suit :

- En zone IIa, IIb, et III, il est préférable d'opter pour un réservoir sur tour.
- En zone I, les contraintes de traction sont vérifiées $\sigma_t < \bar{\sigma}_{bt}$ pour les deux réservoirs, on peut opter pour les deux.

Sur le plan économique, du fait que les deux types de réservoirs possèdent une même cuve et un radier identique, et les deux supports ont la même section, le paramètre de comparaison des deux réservoirs se résume à l'estimation du coût du coffrage et des aciers des deux supports (tour ; pilotis). Après analyse des résultats, nous avons constaté que le montant du coffrage et des aciers reste constant en faisant varier le sol d'implantation dans une zone sismique donnée. Par contre, le montant des deux supports varie considérablement en fonction de la zone sismique sur un sol d'implantation donné. Ainsi, nous pouvons conclure que la nature du sol n'influe pas sur le montant de réalisation, contrairement à l'effet de la zone sismique qui est considérable. Ce constat a été fait pour les deux réservoirs. Un autre résultat remarquable, est que pour la zone I (faible sismicité), le montant total (coffrage ; aciers) de la tour est nettement plus élevé que celui des pilotis sur tous les sites, en revanche, pour les autres zones sismiques, (zones IIa, IIb et III), les pilotis coûtent légèrement plus chères que la tour. Ce qui nous a amené à faire le choix économique suivant :

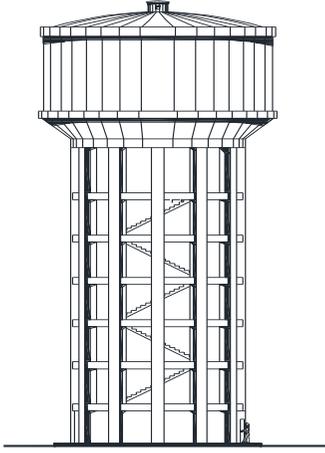
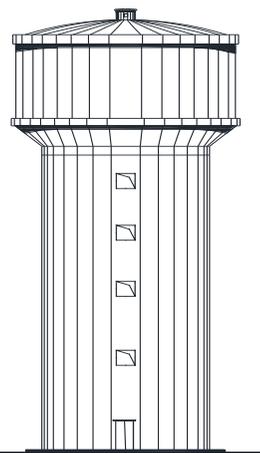
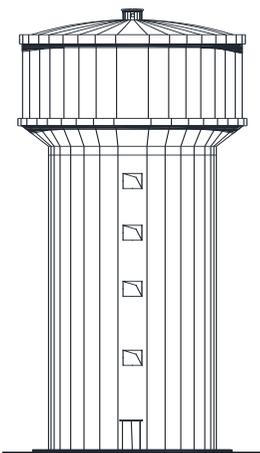
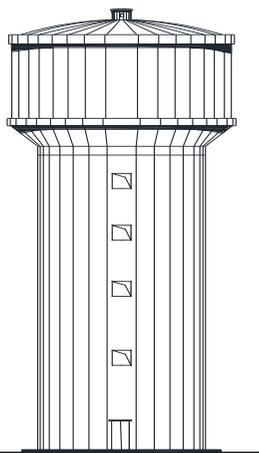
- Pour la zone I, le réservoir sur tour est recommandé.
- Pour les zones IIa, IIb, et III, nous pouvons opter pour les deux types de réservoirs surélevés.

Sur la base des résultats obtenus précédemment, comme synthèse globale, nous pouvons dire que l'effet du site d'implantation est négligeable, contrairement à l'effet de la zone sismique qui est considérable. De ce fait, notre choix pour le type de contreventement du réservoir surélevé (tour, pilotis) se fera uniquement en fonction de la zone sismique en combinant les deux aspects technique et économique.

Dans le tableau suivant, nous proposons un choix technico-économique du type de réservoir surélevé qui convient pour chaque zone sismique :

conclusion générale

Tableau 5.1 : Choix technico-économique du réservoir surélevé en fonction de la zone sismique.

Zones sismiques Choix		Zone I Faible sismicité	Zone IIa Moyenne sismicité	Zone IIb Moyenne sismicité	Zone III Forte sismicité
		Technique	Glissement	Tour / Pilotis	Tour / Pilotis
	Renversement	Tour / Pilotis	Tour / Pilotis	Tour	Tour
	Contrainte de compression	Pilotis	Tour / Pilotis	Tour	Tour
	Contrainte de traction	Tour / Pilotis	Tour	Tour	Tour
Economique		Pilotis	Tour / Pilotis	Tour / Pilotis	Tour / Pilotis
Choix technico-économique		 <p>Pilotis</p>	 <p>Tour</p>	 <p>Tour</p>	 <p>Tour</p>

ACI-COMMITTEE-350 (2006). Seismic design of liquid-containing concrete structures and commentary. Rapport technique, American Concrete Institute.

AIT L'HADJ L., « Analyse non linéaire d'un immeuble surmonté d'un réservoir d'eau potable, par la méthode de push over ». Mémoire de master, spécialité génie civil, option structure et matériaux, Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, 2013.

AIT SLIMANE N., « Etude d'un château d'eau tronconique de capacité 1000m³ implanté à Boudouaou (w.Boumerdes) », thèse en d'ingénieur d'état en génie civil option voies et ouvrages d'art, 2010.

BAEL, « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites-**BAEL91** révisé **99** », 1999.

BALANDIER P., « Conception parasismique des bâtiments (structures) introduction à la dynamique des structures », cours de construction parasismique – volume 2. Juillet 2001.

BALANDIER P., « le séisme et les bâtiments » Document d'information à l'usage du constructeur - volume 3.

BELLAZOUGUI M., calcul des ouvrages en béton armé, office des publications universitaires, Alger. 1996.

BOUCHALA F, SEGHIR A, TAHAKOURT A., « Analyse du comportement sismique des réservoirs en béton surélevés », 6^{eme} symposium international sur la construction en zone sismique. Chlef, octobre 2013.

CHARPENTIER. T.H., « les pathologies des châteaux d'eau en béton armé », thèse d'ingénieur option construction-aménagement, conservatoire national des arts et métiers, Paris, Juin 2006.

DAVIDOVICI V., « la construction en zone sismique », Le moniteur, Paris, 1999.

DAVIDOVICI V., HADDADI A., « calcul pratique de réservoirs en zone sismique » ANNALES de l'institut du bâtiment et des travaux publics, série théories et méthodes de calcul, novembre 1982.

DTR B C 2-48, «Règles parasismiques algérienne (addenda 2003) RPA99/2003», CGS,

EUROCODE 8, « Calcul des structures pour leur résistances au séisme », Diffuser par l'association française de normalisation AFNOR, **2003**.

GOULMOT D., « Nouvelles méthodes numériques pour l'analyse sismique des réservoirs de liquide: effets de l'asymétrie, du ballonnement en surface libre et de blocs de glace en flottaison » département des génies civil, géologique et des mines école polytechnique de Montréal. Mémoire diplôme de maîtrise és sciences appliquées (génie civil) juillet 2012.

GUERRIN A., « traité de béton armé. Tome 6, réservoirs, châteaux d'eau, piscines » DUNOP.1972.

HAMMOUM H., « Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des réservoirs en béton arme. Développement de méthodes d'aide à l'expertise », Thèse de doctorat des sciences en Génie Civil, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2012.

HAMMOUM H., « Notes de cours du module Hydrodynamique », 2014.

HOUSNER G.W., (1963). The dynamic behavior of water tanks. Bull., Seismological Soc. Of. Am., vol. 53, pp. 381–389.

HOUSNER G.W., Dynamic analysis of fluids in containers subjected to acceleration, in Nuclear Reactors And Earthquakes, Report no. TID 7024, U.S. Atomic Energy Commission, Washington DS, 1963

IBRAHIM, R. (2005). Liquid Sloshing Dynamics : Theory And Applications. Cambridge University Press.

Règlement parasismique algérien (RPA 99/ version 2003), Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique.

LAUZIN X, «Calcul des réservoirs en zone sismique». Editions AFNOR et EYROLLES, France, 2013.

SARRE I-A., «Elaboration de programmes de dimensionnement de réservoirs en béton arme, application sur la conception des ouvrages hydrauliques en béton arme du projet d'alimentation en eau potable a Mbane», Thèse d'ingénieur en Génie Civil, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2009.

SLIMANI D., « Analyse du risque sismique des réservoirs surélevés par la méthode de l'indice de vulnérabilité » thèse de master génie civil option structures et matériaux, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2013.

Références bibliographiques

TABELLOUT L., « Recherche des axes principaux pour les moments d'inertie d'un réservoir surélevé en support pilotis », thèse master en Génie civil option structures et matériaux, Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, juillet 2014.

ZACEK M., « construction parasismique » Edition Parenthèses, Marseille, 1996.

ZACEK M., « conception parasismique, niveau avant-projet », chier 1, septembre 2003.

Résumé :

Dans les régions de forte sismicité et à forte densité de population, une rupture de réservoir suite à un tremblement de terre, peut causer d'énormes dommages et de grandes pertes en biens et en vies humaines. Par ailleurs, durant l'après séisme, il est primordial que les réservoirs d'eau potable soient préservés pour leur rôle crucial dans l'organisation des premiers secours.

La protection parasismique nécessite un choix judicieux du système de contreventement, en effet, l'efficacité du comportement parasismique est directement liée à la nature du système porteur. Un contreventement judicieux permet d'assurer la stabilité lors du séisme et de minimiser les coûts de la protection parasismique. Les ingénieurs dans les bureaux d'études sont confrontés justement à ce choix. Dans quel cas il serait convenable d'opter pour un réservoir posé sur tour et dans quelle situation devons-nous opter pour un réservoir posé sur des pilotis ?

A travers une analyse hydrodynamique et de stabilité de deux types de réservoirs surélevés de même capacité (l'un posé sur pilotis et l'autre sur voile), nous avons pu aboutir à proposer directement le choix de contreventement adéquat pour chaque zone sismique. Ce qui est un grand pas dans le choix du type de contreventement pour les réservoirs surélevés.

Abstract :

In areas of high seismicity and high population density, a tank collapse caused by an earthquake, can cause important damage and great loss and human lives. Moreover, during the post earthquake, it is important that drinking water tanks are preserved for their crucial role in the organization of first aid.

Seismic protection requires a judicious choice of bracing system, in fact, the effectiveness of seismic behavior is directly linked to the nature of the support system, a wise bracing ensures stability during the earthquake and minimize costs seismic protection. Engineers in design offices are facing precisely to the judicious choice of the type of bracing, in which case it would be advisable to opt for a tank placed on tower and in what situation should we opt for a tank on columns ?

Through hydrodynamic analysis, and stability of both types of elevated tanks of the same capacity (one set on columns and one on tower), we could reach to offer choice of adequate bracing directly for each seismic zone. This is a big step in choosing the type of bracing for elevated tanks.