



Guide Réservoirs de stockage

Partie B

Réservoirs cylindriques verticaux à fonds plats destinés au stockage de produits liquides à une température de service inférieure à la température ambiante

Mise en application de la section II
[Dispositions relatives aux règles parasismiques applicables à certaines installations]
de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié

DT 109
Avril 2014

SOMMAIRE		Page
1	GÉNÉRALITÉS	7
1.1	Objet et domaine d'application du guide	7
1.2	Comportement des réservoirs soumis à des sollicitations sismiques	11
1.3	Principaux modes d'endommagement des réservoirs soumis à des sollicitations sismiques	14
1.4	Organisation des calculs	22
1.4.1	Réservoirs posés au sol	22
1.4.2	Réservoirs installés sur une infrastructure	25
1.5	Données nécessaires pour réaliser les calculs	26
2	NOTATIONS ET DÉFINITIONS	27
3	RÉSERVOIRS CYLINDRIQUES VERTICAUX À FOND PLAT POSÉS AU SOL DESTINÉS AU STOCKAGE DE PRODUITS LIQUIDES À UNE TEMPÉRATURE DE SERVICE INFÉRIEURE À LA TEMPÉRATURE AMBIANTE VÉRIFICATION DE LA RÉSISTANCE AU SÉISME À PARTIR DE CALCULS ANALYTIQUES (CALCUL PAR FORMULES)	28
3.1	Introduction	28
3.2	Périodes des modes impulsif, convectif et axisymétrique de l'ensemble constitué du réservoir et du produit stocké	29
3.2.1	Période du mode impulsif	29
3.2.2	Période du mode convectif	33
3.2.3	Période du mode axisymétrique	33
3.2.4	Exemple de calcul des périodes des modes impulsif, convectif et axisymétrique de l'ensemble constitué du réservoir et du produit stocké	34
3.3	Détermination des accélérations spectrales	35
3.3.1	Introduction	35
3.3.2	modifications des amortissements en fonction de l'interaction sol-structure	35
3.3.3	Coefficient de réduction	36
3.3.4	Exemple de détermination des accélérations spectrales réduites	37
3.4	Détermination des pressions appliquées à la robe	38
3.4.1	Contribution de la composante horizontale du séisme	38
3.4.2	Contribution de la composante verticale du séisme	39
3.4.3	Pression résultante totale	39
3.5	Contraintes de membrane circonférentielles	40
3.5.1	Calcul des contraintes de membrane circonférentielles	40
3.5.2	Évaluation des contraintes de membrane circonférentielles	40

SOMMAIRE (Suite)		Page
3.6	Détermination des masses effectives de produit et des positions des centres d'action associés aux modes impulsif et convectif	41
3.6.1	Mode impulsif	41
3.6.2	Mode convectif	43
3.7	Détermination de l'effort tranchant et du moment de renversement	43
3.8	Vérification de la résistance vis-à-vis du moment de renversement et stabilité de la robe	46
3.8.1	Réservoir non ancré	46
3.8.2	Réservoir ancré	49
3.9	Hauteur de la vague due au ballonnement du liquide	50
4	RÉSERVOIRS CYLINDRIQUES VERTICAUX À FOND PLAT INSTALLÉS SUR UNE INFRASTRUCTURE DESTINÉS AU STOCKAGE DE PRODUITS LIQUIDES À UNE TEMPÉRATURE DE SERVICE INFÉRIEURE À LA TEMPÉRATURE AMBIANTE VÉRIFICATION DE LA RÉSISTANCE AU SÉISME À PARTIR D'UNE MODÉLISATION NUMÉRIQUE ET DE CALCULS ANALYTIQUES	51
4.1	Introduction	51
4.2	<i>§ non utilisés</i>	52
4.3	<i>§ non utilisés</i>	52
4.4	Détermination des pressions appliquées à la robe	52
4.4.1	Contribution de la composante horizontale du séisme	52
4.4.2	Contribution de la composante verticale du séisme	53
4.4.3	Pression résultante totale	53
4.5	Contraintes de membrane circonférentielles	54
4.5.1	Calcul des contraintes de membrane circonférentielles	54
4.5.2	Évaluation des contraintes de membrane circonférentielles	54
4.6	Détermination des masses effectives de produit et des positions des centres d'action associés aux modes impulsif et convectif	55
4.6.1	Mode impulsif	55
4.6.2	Mode convectif	56
4.7	Détermination de l'effort tranchant et du moment de renversement	57
4.8	Vérification de la résistance vis-à-vis du moment de renversement et stabilité de la robe	57
4.8.1	Réservoir non ancré	57
4.8.2	Réservoir ancré	61
4.9	Hauteur de la vague due au ballonnement du liquide	62
4.10	Exemple d'application : Réservoir Diamètre =12,50 m	63

SOMMAIRE (Suite)		Page
5	RÉSERVOIRS CYLINDRIQUES VERTICAUX À FOND PLAT POSÉS AU SOL OU INSTALLÉS SUR UNE INFRASTRUCTURE DESTINÉS AU STOCKAGE DE PRODUITS LIQUIDES À UNE TEMPÉRATURE DE SERVICE SUPÉRIEURE OU ÉGALE À LA TEMPÉRATURE AMBIANTE <i>VÉRIFICATION DE LA RÉSISTANCE AU SÉISME À PARTIR D'UNE MODÉLISATION NUMÉRIQUES (MODÈLES ÉLÉMENTS FINIS)</i>	89
	5.1 Introduction	89
	5.2 Modèle de calcul	89
	5.2.1 Épaisseurs	89
	5.2.2 Maillage	89
	5.2.3 Loi de comportement, spectre de calcul et conditions aux limites	90
	5.3 Chargements	91
	5.4 Analyse des résultats	92
6	RÉFÉRENCES	93

1 - GENERALITES

1.1 - Objet et domaine d'application du guide

Le but du présent guide est de définir des procédures et/ou méthodologies de vérification au séisme des réservoirs de stockage acceptables au titre de la réglementation applicable sur le territoire français [3], [4], [6].

Les réservoirs couverts par la présente version du guide sont les réservoirs répondant aux critères définis par l'arrêté du 24 Janvier 2011 [6] et de l'un des types suivants :

- Réservoirs cylindriques aériens, verticaux, à fonds plats, en acier et aciers alliés, aluminium et alliages d'aluminium, nickel et alliages de nickel destinés au stockage de produits à une pression inférieure ou égale à 500 mbar et à une température du produit stocké comprise entre -196°C et 300°C.

Pour une température du produit stocké supérieure ou égale à la température ambiante il s'agit notamment des réservoirs devant être construits conformément aux exigences des références [20], [25], [28] et [31] et, pour les réservoirs en service, ceux répondant aux recommandations des références [21] et [26]. Ces réservoirs font l'objet de la Partie A du guide.

Pour les réservoirs réfrigérés ou cryogéniques neufs, pour lesquels la température du produit stocké peut atteindre -196°C, il convient de se reporter aux références [32] et [68]. **Ces réservoirs font l'objet de la présente Partie B du guide.** Deux exemples de ce type de réservoir sont brièvement présentés Figures 1.1-1 et 1.1-2.

Toutefois, sous réserve d'accord des parties concernées, il peut être fait référence à d'autres Normes, Codes de construction ou Guides [33], [34], [37], [38], [70] et [71], l'adéquation des exigences du présent guide et de celles de ces référentiels étant alors de la responsabilité des intervenants.

- Réservoirs cylindriques horizontaux aériens répondant aux exigences de la référence [36].

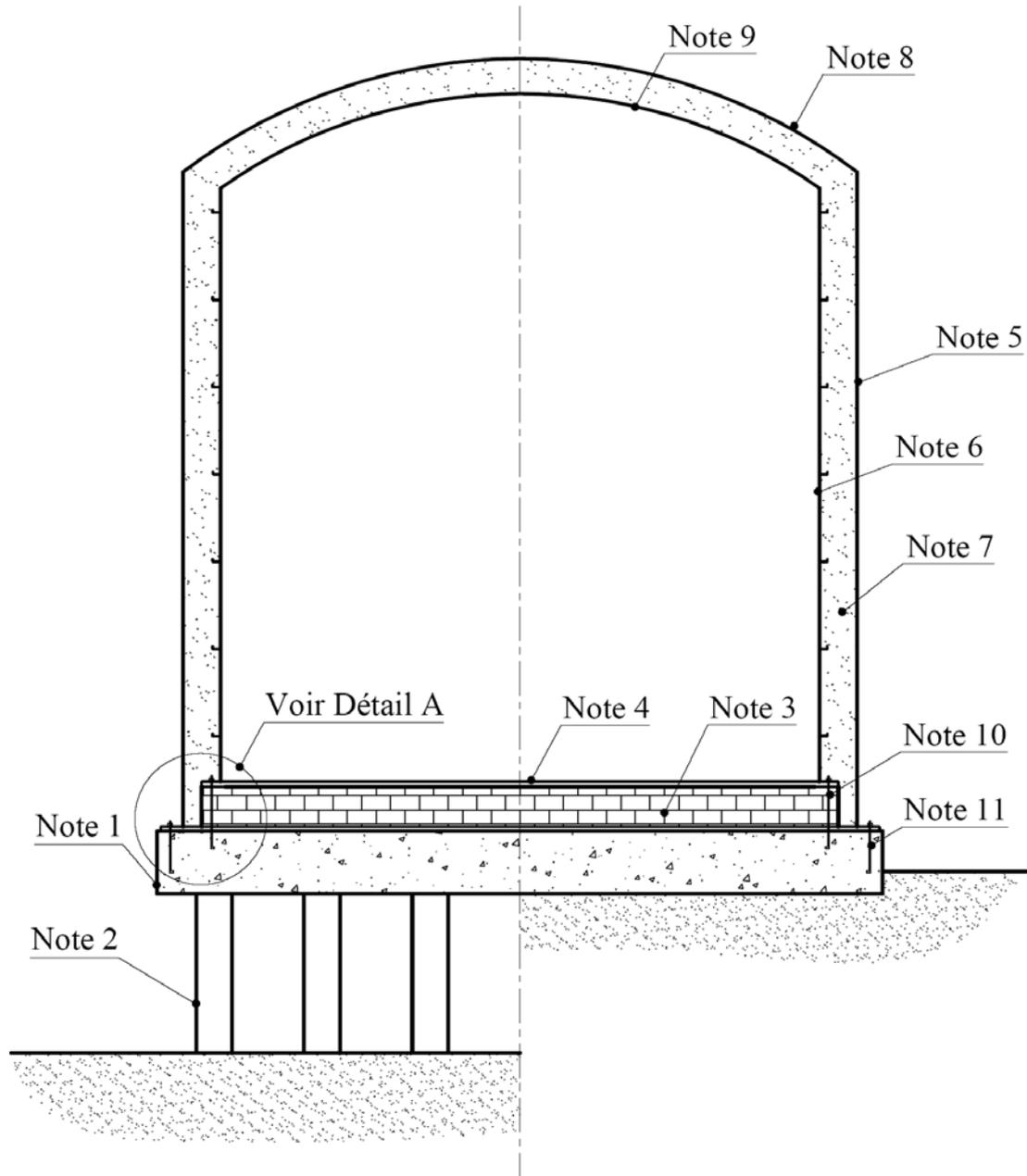
Ces réservoirs font l'objet de la Partie C du guide.

Les données sismiques nécessaires à la vérification au séisme de ces réservoirs doivent être conformes aux exigences réglementaires applicables. A cet égard, l'exploitation et les interprétations éventuelles des textes réglementaires font l'objet des recommandations spécifiques du *Guide Méthodologie générale* [7a] auquel il convient de se reporter pour l'application du présent guide.

Les recommandations du présent guide concernent les réservoirs posés directement au sol ainsi que les réservoirs installés sur une infrastructure. Toutefois, dans ce dernier cas, il convient de se reporter aussi au *Guide Structures support* [9c].

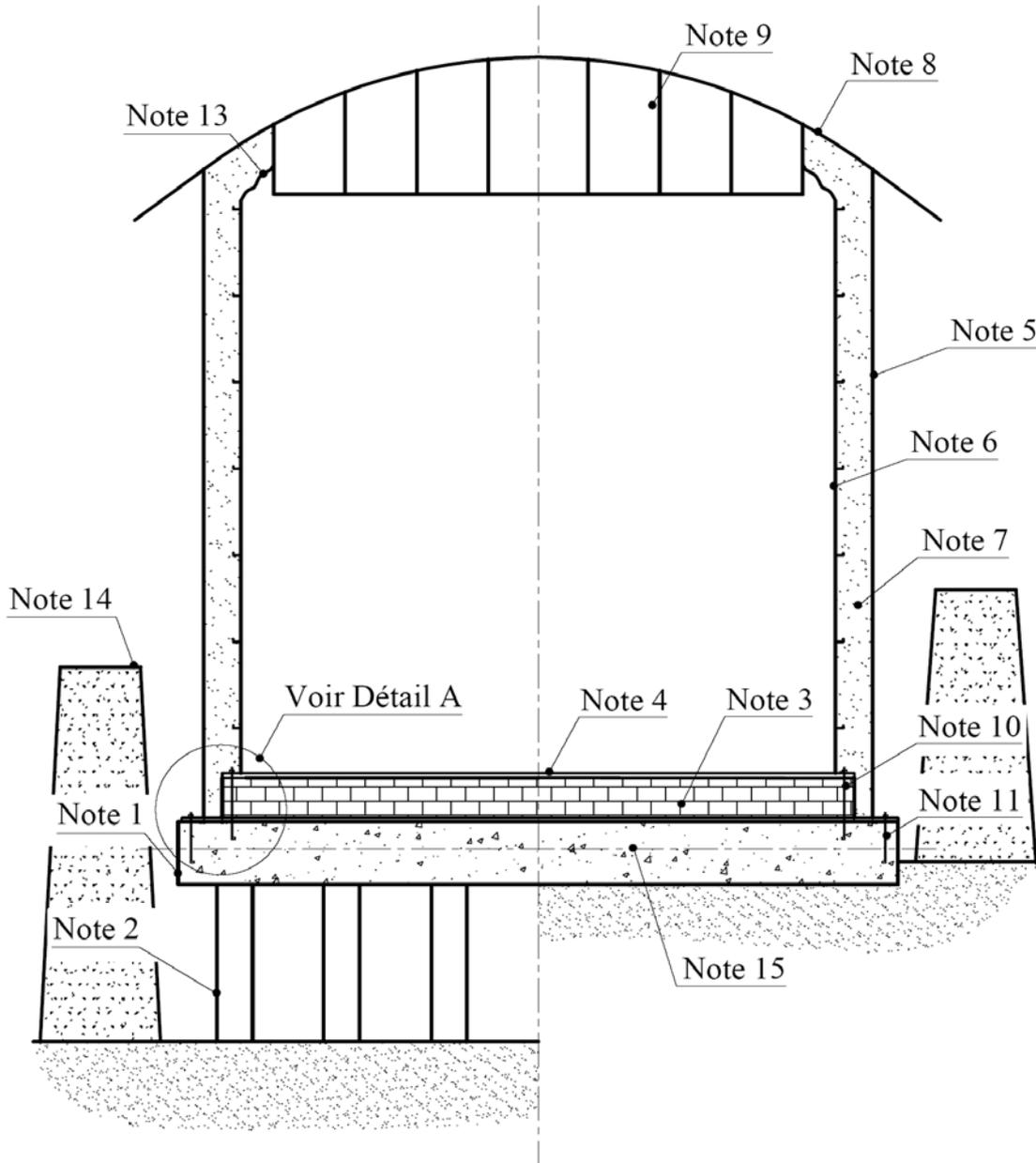
Dans le cadre du présent guide, la vérification au séisme des réservoirs a uniquement pour but d'assurer le confinement du produit stocké c'est-à-dire que les vérifications envisagées ne portent que sur l'état limite ultime au sens de la référence [15].





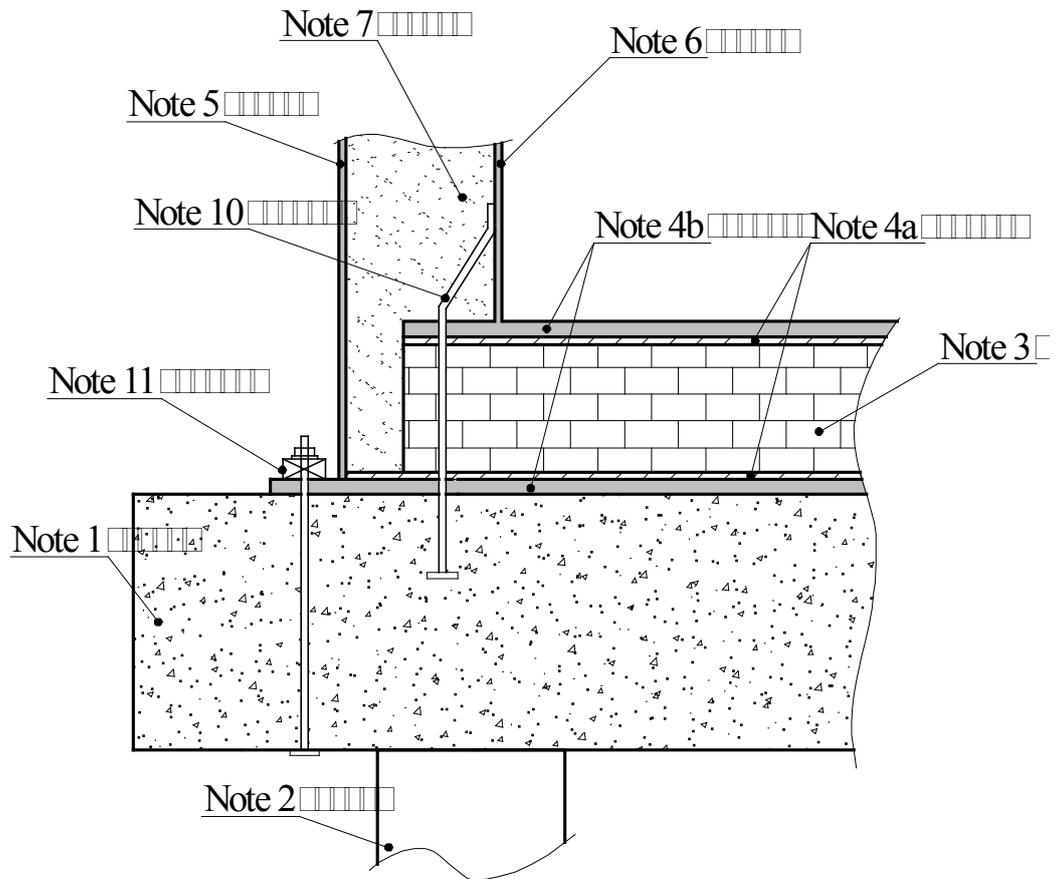
- Note 1 : Table/Dalle béton armée
- Note 2 : Pieux/poteaux ou voiles/barettes
- Note 3 : Isolant verre (par exemple Foamglas®)
- Note 4 : Dalle de béton
- Note 5 : Enveloppe extérieure
- Note 6 : Réservoir intérieur
- Note 7 : Perlite ou autre matériau isolant
- Note 8 : Toit extérieur
- Note 9 : Toit intérieur
- Note 10 : Ancrage du réservoir intérieur
- Note 11 : Ancrage de l'enveloppe extérieure

Figure 1.1-1 - Réservoir à simple intégrité (acier carbone, acier inoxydable, aluminium) destiné au stockage des gaz de l'air.



- Note 1 : Table/Dalle béton armée
 Note 2 : Pieux/poteaux ou voiles/barettes
 Note 3 : Isolant verre (par exemple Foamglas®)
 Note 4 : Dalle béton
 Note 5 : Enveloppe extérieure
 Note 6 : Réservoir intérieur
 Note 7 : Perlite ou autre matériau isolant
 Note 8 : Toit extérieur
 Note 9 : Toit intérieur (suspendu ou fixe)
 Note 10 : Ancrage du réservoir intérieur
 Note 11 : Ancrage de l'enveloppe extérieure
 Note 12 : *Non utilisée*
 Note 13 : Joint isolant souple
 Note 14 : Mur de rétention en terre armée
 Note 15 : Système de chauffage

Figure 1.1-2 - Réservoir à simple intégrité avec mur de rétention en terre armée



- Note 1 : Table béton armé
- Note 2 : Pieux/poteaux ou voiles/barettes
- Note 3 : Isolant verre (par exemple Foamglas[®])
- Note 4a : Membrane étanche
- Note 4b : Fonds réservoir extérieur et intérieur
- Note 5 : Enveloppe extérieur (ou protection extérieure contre les intempéries)
- Note 6 : Réservoir intérieur
- Note 7 : Perlite ou autre matériau isolant
- Note 8 : *Non utilisée*
- Note 9 : *Non utilisée*
- Note 10 : Ancrage du réservoir intérieur
- Note 11 : Ancrage de l'enveloppe extérieure

Détail A

1.2 - Comportement des réservoirs soumis à des sollicitations sismiques

Lors d'un séisme, le produit stocké dans un réservoir cylindrique vertical est soumis à des effets inertiels dus aux mouvements du sol, effets qui engendrent des surpressions ou dépressions hydrodynamiques sur la robe et sur le fond du réservoir (Figure 1.2-1).

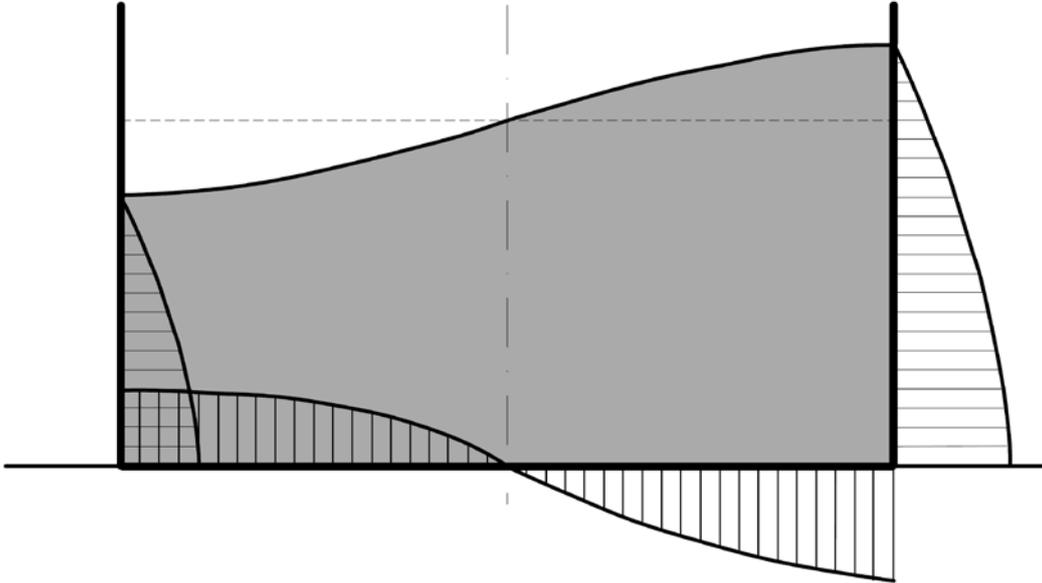


Figure 1.2-1

Les procédures mathématiques complètes permettant une description précise de ces phénomènes ainsi que l'évaluation de leurs conséquences étant extrêmement complexes, différentes méthodes simplifiées analytiques (calculs par formules) ou numériques (calculs par éléments finis) ont fait l'objet de différents développements depuis de nombreuses années [39], [41], [42], [45], [72].

De manière générale, les modèles simplifiés retenus pour décrire le comportement des réservoirs et auxquels il est fait référence dans le présent guide sont composés de deux champs de pressions : l'un correspondant au ballotement de la surface libre du produit stocké (pression convective), l'autre correspondant au produit oscillant en phase avec la paroi du réservoir (pression impulsive).

Ces pressions vont notamment permettre de vérifier le comportement du réservoir vis-à-vis de la défaillance par déformation excessive (vérification des contraintes circonférentielles).

Par ailleurs, l'intégration des champs de pressions permet de définir des modèles masses-ressorts simples (Figure 1.2-2) utilisables pour déterminer un effort horizontal et un moment résultant utilisés pour évaluer la stabilité de l'équipement (vérification des contraintes verticales/longitudinales vis-à-vis des risques de flambement élastique Figures 1.3-2a et 1.3-2b ou de flambement élastoplastique Figures 1.3-3a à 1.3-3c en pied du réservoir & 1.3-4 en partie courante de la robe du réservoir).

Ces modèles masses-ressorts ont été initialement développés dans l'hypothèse de réservoirs « rigides » c'est-à-dire pour lesquels la masse totale de produit associée au comportement impulsif est soumise à l'accélération maximum au sol, c'est-à-dire sans amplification dynamique due au comportement « flexible » du réservoir.

Afin de tenir compte de manière conservatrice de cet effet potentiel, les procédures décrites au § 3.7a [Réservoir « rigide »] proposent que la masse totale de produit associée au mode impulsif (§ 3.6.1a) soit soumise à l'accélération spectrale correspondant au mode impulsif à la place de l'accélération maximum au sol [40], [62].

Toutefois, alternativement et de manière moins conservatrice, les procédures décrites au § 3.7*b* [Réservoir « flexible »] proposent que les masses de produit associées au comportement impulsif « rigide » d'une part et au comportement impulsif « flexible » d'autre part (§ 3.6.1*b*) soit respectivement soumises à l'accélération maximum au sol et à l'accélération spectrale correspondant au mode impulsif. Cette seconde possibilité n'offre d'intérêt que pour un ratio $H/R \geq 1$, où H est la hauteur de remplissage maximale et R le rayon du réservoir [25 Figure CA1.3.6.1-3].

Au titre du présent guide, l'une ou l'autre de ces procédures est acceptable.

Ces modèles permettent aussi de déterminer s'il est nécessaire d'ancrer le réservoir considéré et dans ce cas de dimensionner les ancrages (Figures 1.3-9 et 1.3-10).

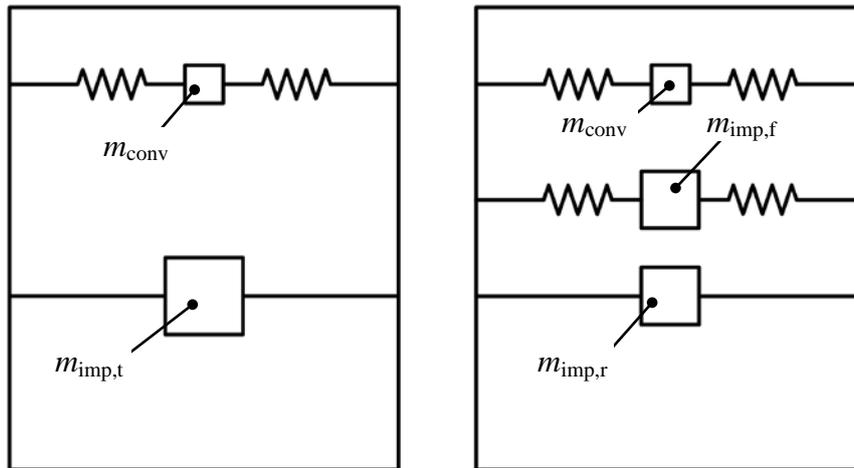


Figure 1.2-2a) et b)

Pour les réservoirs non ancrés, les procédures proposées permettent de :

- vérifier l'absence de risque de déchirure dans la partie du fond qui est susceptible de se soulever,
- vérifier que le soulèvement éventuel ne provoque pas de désordre au niveau des différents piquages (Figure 1.3-8),
- vérifier que la rotation au niveau de la rotule plastique à la liaison robe-fond reste acceptable et,
- vérifier l'absence de risque de glissement du réservoir.

Enfin, les effets de la vague convective due au ballonnement de la surface libre du réservoir sont évalués afin d'éviter tout endommagement du toit (Figures 1.3-5 et 1.3-6) ou tout débordement non acceptable du produit stocké.

Les vérifications proposées permettent, lorsque nécessaire, de tenir compte de l'influence du sol et/ou des fondations sur le comportement du réservoir. Toutefois, ces vérifications supposent un comportement acceptable du sol et/ou des fondations supportant le réservoir (Figure 1.3-1*a* et *b*). Les analyses nécessaires à l'évaluation du comportement du sol et/ou des fondations sortant du cadre du présent guide, il convient alors de se reporter au *Guide Méthodologie générale* [9a].

Par ailleurs, certains réservoirs peuvent être installés sur une infrastructure dans la plupart des cas en béton armé surélevant le niveau du fond du réservoir de plusieurs mètres par rapport au sol (Figure 1.2-3).

Cette configuration peut conduire à une modification de l'action sismique supportée par le réservoir contenant le produit stocké, modification qui doit être prise en compte tant pour la vérification du réservoir que pour la vérification de l'infrastructure (Figure 1.3-11) et pour la vérification des fondations de l'ensemble. A cet égard, il convient alors de se reporter aux recommandations du *Guide Structures support* [9c] notamment au chapitre 3.5. et, le cas échéant, au Chapitre 4 du présent guide.



Figure 1.2-3

Enfin, en fonction des différentes situations pouvant être rencontrées les logigrammes présentés au § 1.4 ci-après définissent l'organisation des différents calculs décrits aux chapitres 3 et 4 devant être réalisés.

1.3 - Principaux modes d'endommagement des réservoirs soumis à des sollicitations sismiques

Les principaux modes d'endommagement des réservoirs soumis au séisme sont illustrés ci-dessous. Toutefois, il est rappelé qu'en France, aucun séisme, en métropole, n'a entraîné de tels désordres sur des réservoirs de stockage couverts par la présente version du guide.

Le comportement d'un réservoir dépendant de très nombreux paramètres, il est recommandé, pour plus d'informations de se reporter aux documents référencés dans les légendes des illustrations ainsi qu'aux références [67] et [69].



Figure 1.3-1a
Tassement du réservoir dû à la liquéfaction du sol au voisinage de la fondation
[64 : Séisme de Tohoku, Magnitude 7, Japon 2011]

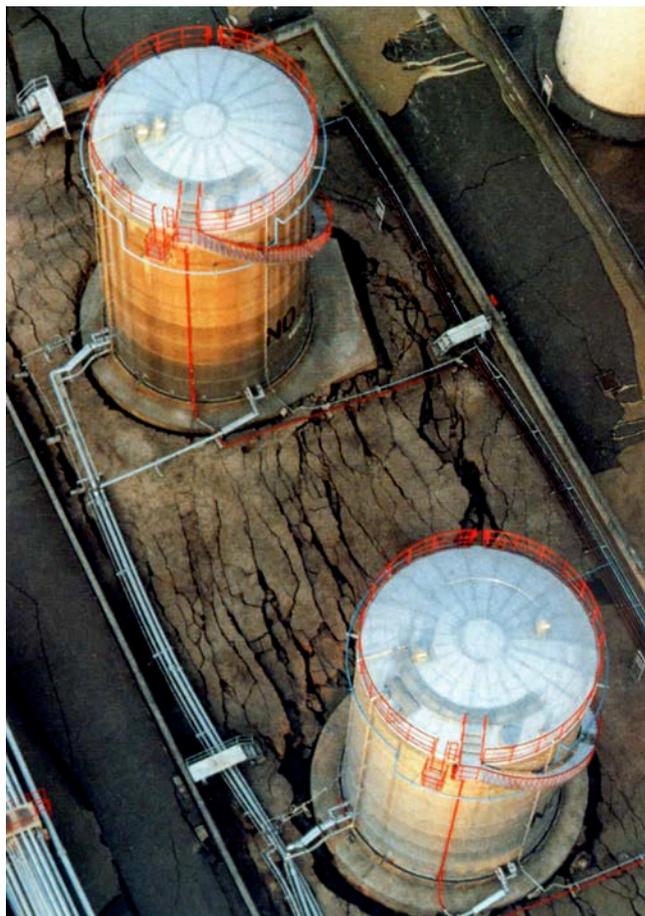


Figure 1.3-1b
Dégradation et liquéfaction du sol au voisinage des fondations

[Séisme de Kobe, Magnitude 6.7, Japon 1995]

NISEE, University of California, Berkeley
PEER Center, Kobe Collection No. K0009



NISEE, University of California, Berkeley
PEER Center, Steinbrugge Collection No. S5618



NISEE, University of California, Berkeley
PEER Center, Steinbrugge Collection No. S5612

Figure 1.3-2a et b - Flambement *en losange* - Réservoirs en acier inoxydable pleins

[Séisme de Livermore, Magnitude 5.9, Californie USA 1980]



NISEE, University of California, Berkeley
PEER Center, Steinbrugge Collection No. S4183

Figure 1.3-3a

Flambement *en pied d'éléphant*

[Séisme de San Fernando,
Magnitude 6.6,
Californie USA 1971]



NISEE, University of California, Berkeley
PEER Center, Steinbrugge Collection No. S2503



NISEE, University of California, Berkeley
PEER Center, Steinbrugge Collection No. S2508

Figure 1.3-3b et c- Flambement en pied d'éléphant

[65 : Séisme d'Anchorage, Magnitude 9.2, Alaska 1964]



Figure 1.3-4

Flambement en pied et genou d'éléphant

[65 : Séisme Magnitude 7, Haiti 2010]



NISEE, University of California, Berkeley
PEER Center, Steinbrugge Collection No. S4431

Figure 1.3-5

Endommagement de la virole supérieure dû au ballonnement du produit stocké

[Séisme de San Fernando, Magnitude 6.6, Californie USA 1971]



Figure 1.3-6

Endommagements de la virole supérieure et dus toit du au ballonnement du produit stocké

[50 : Séisme de Marmara, Magnitude 7.4, Turquie 1999, Tupras refinery (Korfez)]

Figure 1.3-7 - Non utilisée.



Figure 1.3-8
Rupture de tuyauterie consécutive au flambement de la robe [51]



Figure 1.3-9
Endommagement et rupture d'ancrages
[54 : Séisme d'Hanshin-Awaji, Japon 1995]



Figure 1.3-10
Allongement de la tige d'ancrage, déformation du réservoir (5000 m³ gas oil), allongement des tiges filetées et fissuration du béton
[65, Magnitude 8.4, Pérou 2001]



Figure 1.3-11

[66] : Réservoirs d'oxygène liquide et d'azote - Usine d'Habas, Izmit.

Les supports en béton armé des réservoirs de gauche et du milieu (pleins au moment du séisme) se sont effondrés. Celui de droite, remplie au quart de sa capacité n'a pas bougé.

[Séisme d'Izmit, Turquie 1999]

NISEE, University of California, Berkeley PEER Center, No. IMG-83



NISEE, University of California, Berkeley PEER Center, No. IZT-120 & IMG-84



NISEE, University of California, Berkeley PEER Center, No. IZT-129 & IZT-130

1.4 - Organisation des calculs

1.4.1 - Réservoirs posés au sol

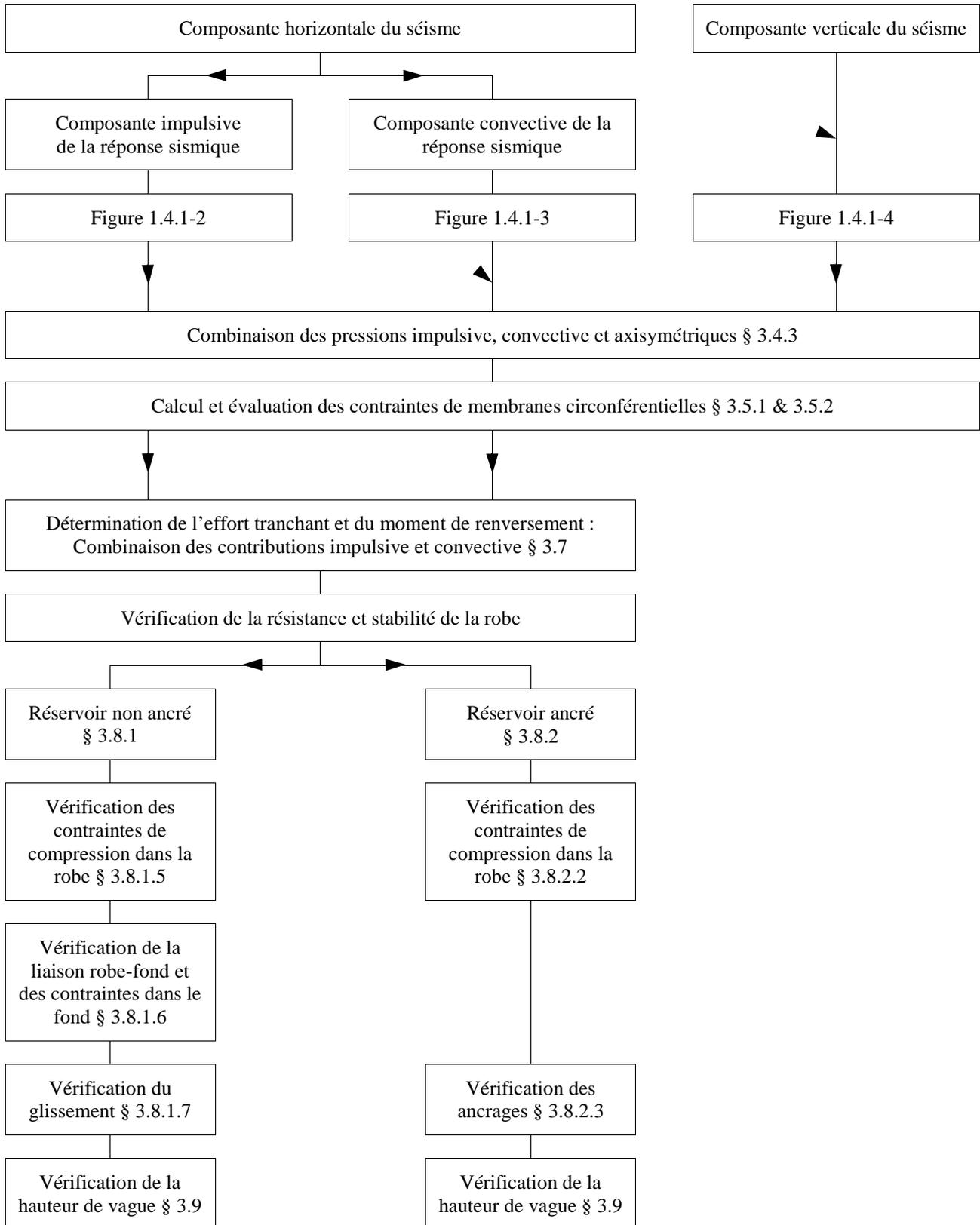
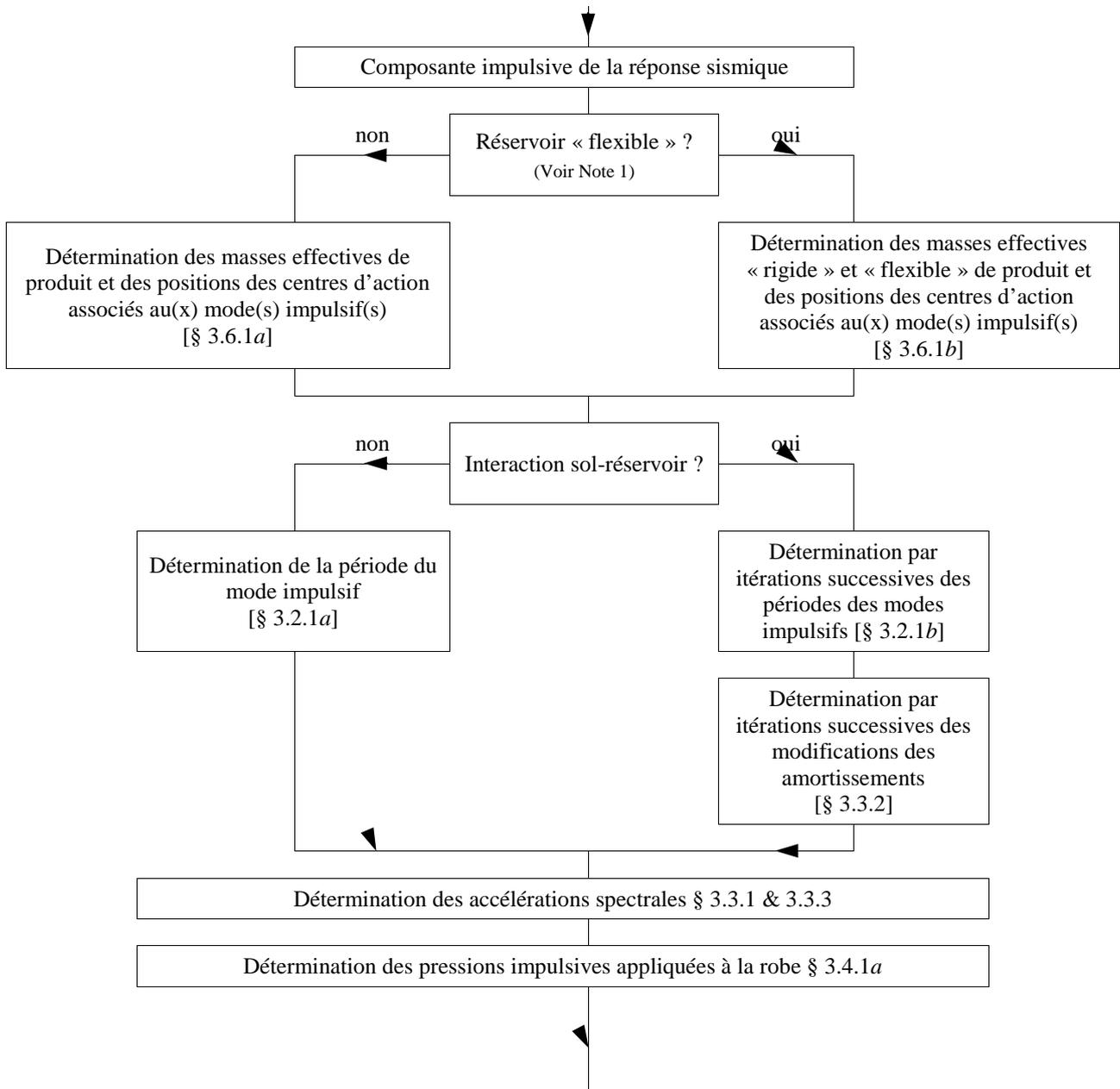


Figure 1.4.1-1



Note 1 : Le choix de la prise en compte du mode de comportement du réservoir (« rigide » ou « flexible ») est de la responsabilité de l'intervenant sachant que considérer le réservoir comme « flexible » peut permettre de réduire le conservatisme des analyses mais rend celles-ci plus complexes à réaliser.

De plus, il convient de noter que considérer le réservoir comme « flexible » peut présenter un intérêt uniquement pour $H/R \geq 1$.

Figure 1.4.1-2

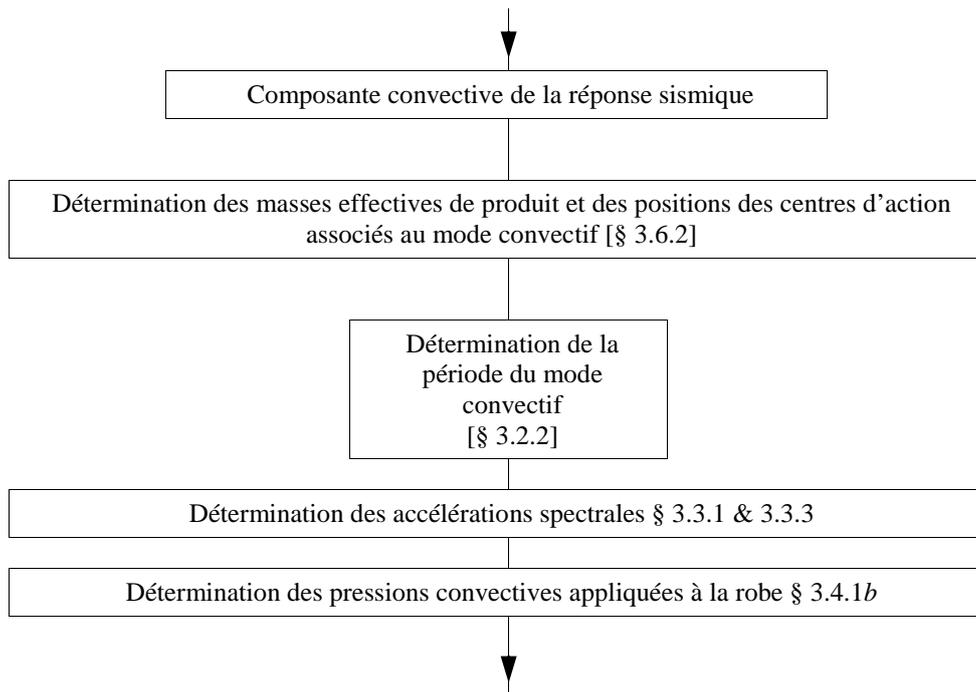


Figure 1.4.1-3

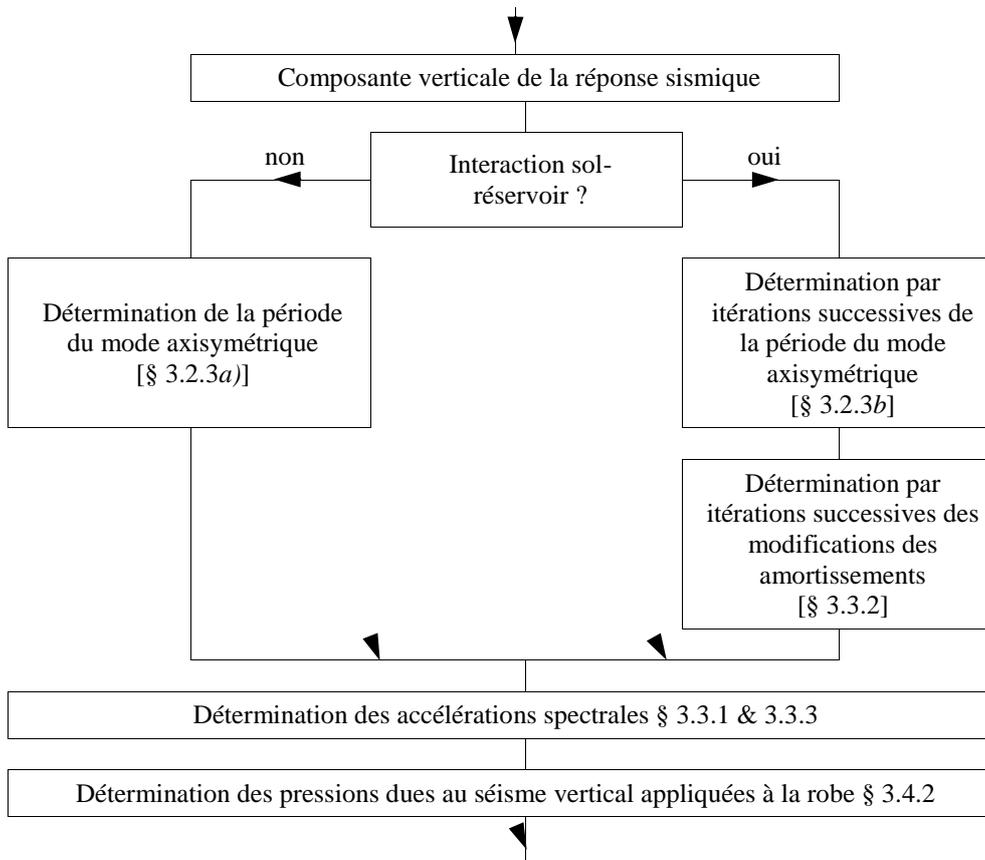


Figure 1.4.1-4

1.4.2 - Réservoirs installés sur une infrastructure

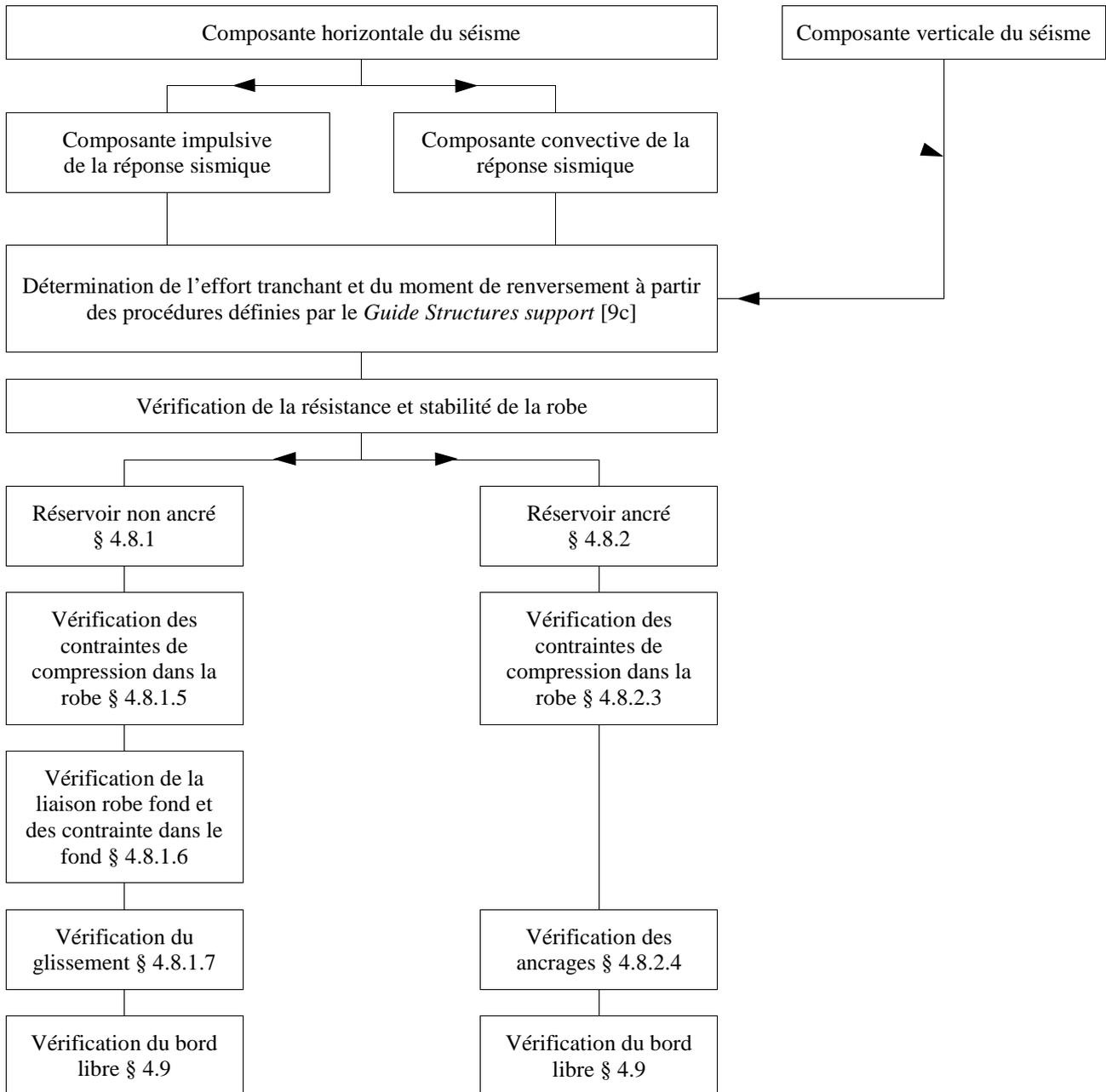


Figure 1.4.2-1

1.5 - Données nécessaires pour réaliser les calculs

- D : Diamètre du réservoir.
- H : Hauteur de remplissage retenue pour les calculs correspondant [9a § 4.4.4] à la hauteur d'exploitation maximale affectée d'un coefficient de simultanéité égal à 0,9.
- Densité/Masse volumique du produit stocké.
- Température de stockage.
- Pression de service.
- Matériau, hauteur et épaisseur de toutes les viroles constituant la robe (voir § 2 notamment pour les réservoirs en service).
- Matériau et épaisseur des tôles marginales au droit de la robe ou matériau, largeur et épaisseur de la bordure annulaire (voir § 2 notamment pour les réservoirs en service).
- Masse du toit du réservoir (y compris les éventuels accessoires associés).
- Masse de la charpente.
- Poids du fond du réservoir.
- Amortissement.
- Caractéristiques du sol (Module de cisaillement dynamique effectif, Masse volumique, Coefficient de Poisson).
- Rayon de la fondation.
- Spectres sismiques applicables.

2 - NOTATIONS ET DEFINITIONS

Les définitions ci-après relatives aux épaisseurs prises en compte pour l'évaluation de l'aptitude au service d'un réservoir sont applicables aux réservoirs pour lesquels les référentiels techniques d'où ces définitions sont extraites ([20], [21], [25] ou [26] selon le cas) sont utilisés mais aussi au cas des réservoirs pour lesquels la référence [28] est mise en œuvre. **Le choix de l'une ou l'autre des possibilités offertes ci-après est de la responsabilité de l'Exploitant.**

e_{eq} = Épaisseur équivalente définie au § 3.2 du présent guide.

e_{tf} = Pour les équipements neufs, lorsque les références [20] ou [25] sont utilisées, épaisseur nominale de commande des tôles marginales du fond ou de la bordure annulaire, surépaisseur de corrosion éventuelle déduite.

Pour les équipements en service :

Épaisseur nominale de commande (c.à.d. « tel que construit ») des tôles marginales du fond ou de la bordure annulaire, perte d'épaisseur due à la corrosion éventuelle déduite (voir Note).

Note : Perte d'épaisseur estimée pour la période comprise entre la date de construction du réservoir et la date du prochain relevé d'épaisseur prévu par le plan d'inspection. En fonction des matériaux utilisés, du produit stocké ainsi que des éventuelles dispositions constructives spécifiques (revêtement par exemple) cette perte d'épaisseur peut être nulle.

ou,

Épaisseur mesurée lors de la dernière inspection des tôles marginales du fond ou de la bordure annulaire, perte d'épaisseur due à la corrosion éventuelle déduite (voir Note).

Note : Perte d'épaisseur estimée pour la période comprise entre la date à laquelle les mesures d'épaisseur ont été effectuées et la date du prochain relevé d'épaisseur prévu par le plan d'inspection. En fonction des matériaux utilisés, du produit stocké ainsi que des éventuelles dispositions constructives spécifiques (revêtement par exemple) cette perte d'épaisseur peut être nulle.

ou,

Épaisseur minimum requise (voir Note), lors de la prochaine inspection, des tôles marginales du fond ou de la bordure annulaire.

Note : Il s'agit ici des épaisseurs minimum requises pour répondre aux conditions d'exploitation. Ces épaisseurs sont définies notamment par les références [21], [26].

e_{vi} = Pour les équipements neufs, épaisseur nominale de commande des tôles constituant la virole i , surépaisseur de corrosion éventuelle déduite

Pour les équipements en service :

Épaisseur nominale de commande (c.à.d. « tel que construit ») des tôles constituant la virole i , perte d'épaisseur due à la corrosion éventuelle déduite (voir Note).

Note : Perte d'épaisseur estimée pour la période comprise entre la date de construction du réservoir et la date du prochain relevé d'épaisseur prévu par le plan d'inspection. En fonction des matériaux utilisés, du produit stocké ainsi que des éventuelles dispositions constructives spécifiques (revêtement par exemple) cette perte d'épaisseur peut être nulle.

ou,

Épaisseur mesurée lors de la dernière inspection des tôles constituant la virole i , perte d'épaisseur due à la corrosion éventuelle déduite (voir Note).

Note : Perte d'épaisseur estimée pour la période comprise entre la date à laquelle les mesures d'épaisseur ont été effectuées et la date du prochain relevé d'épaisseur prévu par le plan d'inspection. En fonction des matériaux utilisés, du produit stocké ainsi que des éventuelles dispositions constructives spécifiques (revêtement par exemple) cette perte d'épaisseur peut être nulle.

ou,

Épaisseur minimum requise (voir Note), lors de la prochaine inspection, des tôles constituant la virole i .

Note : Il s'agit ici des épaisseurs minimum requises pour répondre aux conditions d'exploitation. Ces épaisseurs sont définies notamment par les références [21], [26].

3 - RÉSERVOIRS CYLINDRIQUES VERTICAUX À FOND PLAT POSÉS AU SOL DESTINÉS AU STOCKAGE DE PRODUITS LIQUIDES À UNE TEMPÉRATURE DE SERVICE INFÉRIEURE À LA TEMPÉRATURE AMBIANTE

VÉRIFICATION DE LA RÉSISTANCE AU SÉISME À PARTIR DE CALCULS ANALYTIQUES (CALCULS PAR FORMULES)

3.1 - Introduction

Les procédures de vérification de la résistance au séisme des réservoirs cylindriques verticaux à fond plat à partir de calculs analytiques proposées ci-après sont applicables aux réservoirs dont le rapport H/D est compris entre 0,15 et 1,5.

Par ailleurs, la réponse sismique d'un réservoir pouvant être sensiblement modifiée par le comportement du sol sur lequel il est fondé [47] & [48], les procédures proposées permettent de tenir compte de cette interaction sol/structure notamment dans les cas suivants où cette interaction doit être prise en compte :

- si le réservoir est fondé sur pieux,
- si le réservoir est fondé sur un sol très mou qui ne soit pas de catégorie A à E (S1 ou S2) [6].

et concernent uniquement les modes impulsif et axisymétrique et les amortissements correspondant [29], [47] & [69].

Note : Il est admis que les modes convectifs ne sont pas affectés par l'interaction sol-structure.

Pour les réservoirs calorifugés, l'isolation doit être prise en compte de la manière suivante :

- Isolation sur la robe : Si l'isolation est attachée à la robe, sa masse doit être prise en compte dans le calcul des efforts sismiques et dans le calcul de la résistance au renversement (stabilité, glissement). Le système de protection éventuel sera aussi pris en compte s'il est solidaire de la robe. Si l'isolation est en vrac entre la robe du réservoir et un container à isolation extérieur (ou une cuve secondaire), sa masse sera répartie également entre les réservoirs intérieur et extérieur. Elle doit être prise en compte dans le calcul des efforts sismiques mais pas dans le calcul de la résistance au renversement.
- Isolation sur le toit : La masse de l'isolation sur le toit doit être prise en compte dans le calcul des efforts sismiques et dans le calcul de la résistance au renversement (stabilité, glissement), de même si l'isolation est posée sur un pont suspendu au toit.

Pour le calcul des masses de l'isolation, on considérera par défaut les épaisseurs et densités nominales. La masse peut être considérée comme également répartie sur la robe (respectivement le toit)

Pour la prise en compte d'une isolation sous le réservoir (par exemple Foamglass[®]), il convient de se reporter au *Guide Structures support* [9c]

Les procédures proposées s'appuient sur différents référentiels techniques susceptibles de permettre de répondre aux exigences réglementaires applicables : NF EN 14620 [32] & NF EN 1998-4 [28] d'une part et API 625 [68], API 620 [34] & API 650 [20] d'autre part. Le choix de l'un ou l'autre de ces ensembles de référentiels pour vérifier la résistance au séisme d'un réservoir est de la responsabilité du Donneur d'ordre (réservoir neuf) ou de l'Exploitant (réservoir en service).

Toutefois, ces ensembles de référentiels, complétés par les ajouts, corrections et conditions d'application définis dans les chapitres ci-après, sont des ensembles de règles techniques cohérentes. Aussi lorsque l'un de ces ensembles référentiels est choisi pour vérifier la résistance au séisme d'un réservoir, les règles de cet ensemble doivent être appliquées dans leur intégralité sans possibilité de « panachage » des règles des différents ensembles.

3.2 - Périodes des modes impulsif, convectif et axisymétrique de l'ensemble constitué du réservoir et du produit stocké

3.2.1 - Période du mode impulsif

a) Lorsque l'interaction sol/structure peut être négligée, la période du mode impulsif est donnée par les formules ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Formule A.35 Note 1	Formule E.4.5.1-1a
Note 1 : La référence [28] propose (Formule A.24) une formule permettant de déterminer la période du mode impulsif dans l'hypothèse d'un comportement « flexible » du réservoir. Toutefois, la validité de cette formule n'ayant pu être vérifiée elle n'est pas reprise dans la présente édition du guide.	

Dans ces formules, les coefficients C_i [28] ou C_{imp} [25], [26] (Figure 3.2.1) sont donnés par les tableaux, figure ou formule suivants :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Tableau A.2	Figure E-1

et l'épaisseur uniforme équivalente de la robe du réservoir, e_{eq} , est égale à l'épaisseur au 1/3 de la hauteur maximum de remplissage ou déterminée à partir de la formulation proposée référence [40] et détaillée références [25] et [26].

La détermination de cette épaisseur équivalente est illustrée par les exemples 3.2.1-1 et 3.2.1-2 (réservoir non corrodé) ainsi que par l'exemple 3.2.1-3 (réservoir corrodé) ci-après et le calcul de la période du mode impulsif par l'exemple développé au § 3.2.4.

b) Lorsque l'interaction sol/structure ne peut pas être négligée, les procédures permettant de définir les modifications du comportement décrit au § a) ci-dessus sont données dans les § ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
§ A.7.2 Note 1	Sans objet
Note 1 : Les caractéristiques (impédances de la fondation) nécessaires à l'application de cette formulation peuvent être déterminées à partir de la référence [47] ou [69].	

Exemple 3.2.1-1 : Détermination de l'épaisseur uniforme équivalente [25]

(voir Figure 3.2.1-3 ci-après)

Nombre de viroles :

$$n_v = 4$$

Hauteur maximum de remplissage

$$H = 8\,000,00 \text{ mm}$$

Épaisseurs des différentes viroles

$$e_{v4} = 8,00 \text{ mm}$$

$$e_{v3} = 8,00 \text{ mm}$$

$$e_{v2} = 10,00 \text{ mm}$$

$$e_{v1} = 10,00 \text{ mm}$$

Hauteurs "mouillées" des différentes viroles

$$h_{liqv4} = 800,00 \text{ mm}$$

$$h_{liqv3} = 2\,400,00 \text{ mm}$$

$$h_{liqv2} = 2\,400,00 \text{ mm}$$

$$h_{liqv1} = 2\,400,00 \text{ mm}$$

Distances du centre de gravité des parties "mouillées" des différentes viroles

à la surface libre du produit

$$hg_{liqv4} = 400,00 \text{ mm}$$

$$hg_{liqv3} = 2\,000,00 \text{ mm}$$

$$hg_{liqv2} = 4\,400,00 \text{ mm}$$

$$hg_{liqv1} = 6\,800,00 \text{ mm}$$

Épaisseur uniforme équivalente

$$e_{eq} = \mathbf{9,68 \text{ mm}}$$

Prise au 1/3 de la hauteur maximum de remplissage, cette épaisseur équivalente serait égale à : **10 mm** et donc moins « conservative ».

Exemple 3.2.1-2 : Détermination de l'épaisseur uniforme équivalente [25]

(voir Figure 3.2.1-3 ci-après)

Nombre de viroles :

$$n_v = 4$$

Hauteur maximum de remplissage

$$H = 8\,000,00 \text{ mm}$$

Épaisseurs des différentes viroles

$$e_{v4} = 6,00 \text{ mm}$$

$$e_{v3} = 8,00 \text{ mm}$$

$$e_{v2} = 10,00 \text{ mm}$$

$$e_{v1} = 12,00 \text{ mm}$$

Hauteurs "mouillées" des différentes viroles

$$h_{liqv4} = 800,00 \text{ mm}$$

$$h_{liqv3} = 2\,400,00 \text{ mm}$$

$$h_{liqv2} = 2\,400,00 \text{ mm}$$

$$h_{liqv1} = 2\,400,00 \text{ mm}$$

Distances du centre de gravité des parties "mouillées" des différentes viroles

à la surface libre du produit

$$hg_{liqv4} = 400,00 \text{ mm}$$

$$hg_{liqv3} = 2\,000,00 \text{ mm}$$

$$hg_{liqv2} = 4\,400,00 \text{ mm}$$

$$hg_{liqv1} = 6\,800,00 \text{ mm}$$

Épaisseur uniforme équivalente

$$e_{eq} = \mathbf{10,68 \text{ mm}}$$

Prise au 1/3 de la hauteur maximum de remplissage, cette épaisseur équivalente serait égale à : **10 mm** et donc plus « conservative ».

Exemple 3.2.1-3 : Détermination de l'épaisseur uniforme équivalente

La virole 3 présente une zone corrodée sur une hauteur de 1 m. L'épaisseur moyenne de cette zone, déterminée conformément aux prescriptions du § SIA2.3.2.2*b*, est égale à 6 mm.

Pour la détermination de l'épaisseur équivalente, il convient alors de considérer que la virole 3 est composée de 3 viroles, v3a, v3b et v3c, de longueurs respectivement égales à 400 mm, 1000 mm et 1000 mm et d'épaisseurs respectivement égales à 8 mm, 6 mm et 8 mm (voir Figure 3.2.1-3 ci-après)

Nombre de viroles :

$$n_v = 4$$

Hauteur maximum de remplissage

$$H = 8\,000,00 \text{ mm}$$

Épaisseurs des différentes viroles

$$e_{v4} = 6,00 \text{ mm}$$

$$e_{v3c} = 8,00 \text{ mm}$$

$$e_{v3b} = 6,00 \text{ mm}$$

$$e_{v3a} = 8,00 \text{ mm}$$

$$e_{v2} = 10,00 \text{ mm}$$

$$e_{v1} = 12,00 \text{ mm}$$

Hauteurs "mouillées" des différentes viroles

$$h_{liqv4} = 800,00 \text{ mm}$$

$$h_{liqv3c} = 1\,000,00 \text{ mm}$$

$$h_{liqv3b} = 1\,000,00 \text{ mm}$$

$$h_{liqv3a} = 400,00 \text{ mm}$$

$$h_{liqv2} = 2\,400,00 \text{ mm}$$

$$h_{liqv1} = 2\,400,00 \text{ mm}$$

Distances du centre de gravité des parties

"mouillées" des différentes viroles

à la surface libre du produit

$$h_{g_{liqv4}} = 400,00 \text{ mm}$$

$$h_{g_{liqv3c}} = 1\,300,00 \text{ mm}$$

$$h_{g_{liqv3b}} = 2\,300,00 \text{ mm}$$

$$h_{g_{liqv3a}} = 3\,000,00 \text{ mm}$$

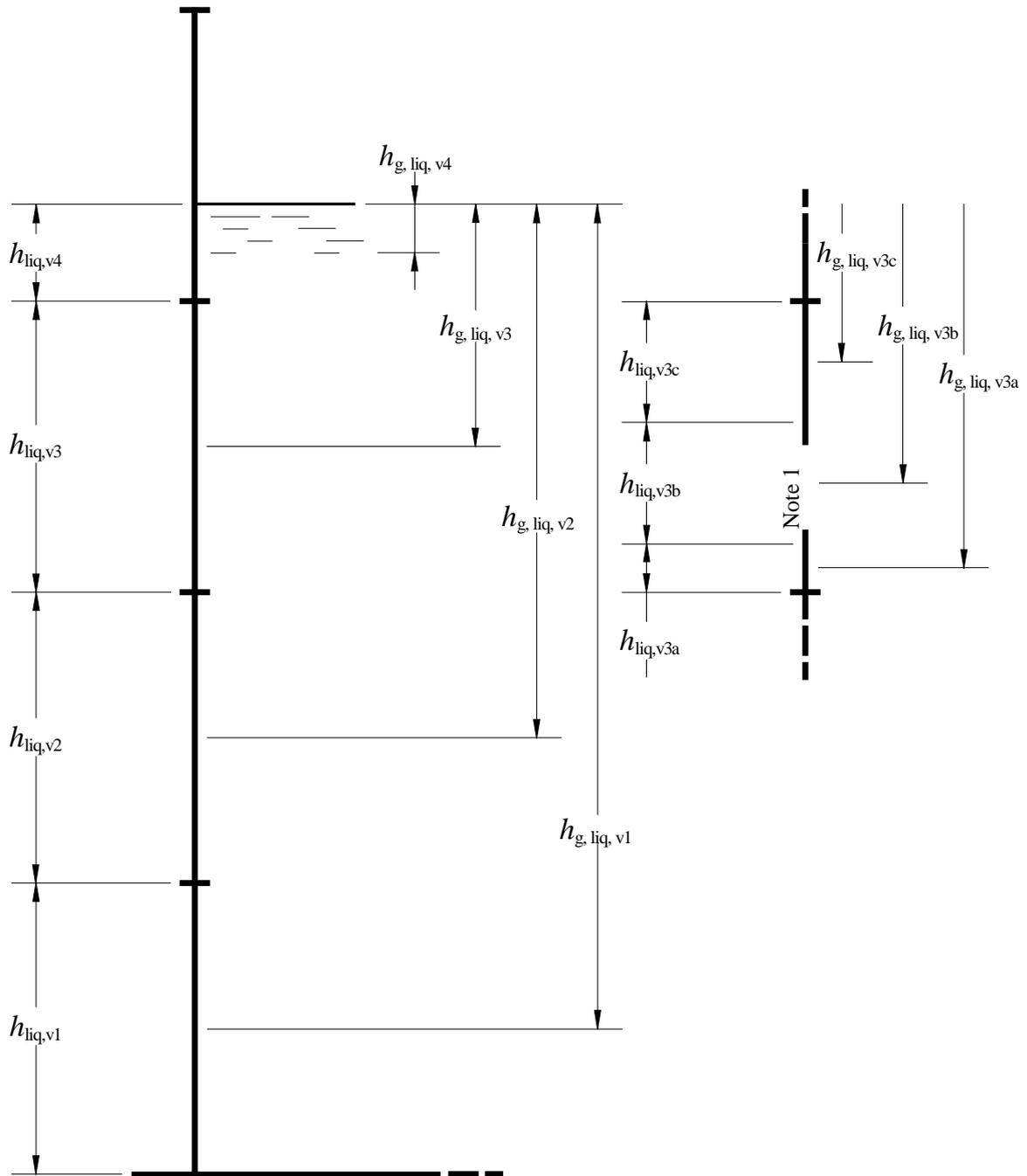
$$h_{g_{liqv2}} = 4\,400,00 \text{ mm}$$

$$h_{g_{liqv1}} = 6\,800,00 \text{ mm}$$

Épaisseur uniforme équivalente

$$e_{eq} = \mathbf{10,54} \text{ mm}$$

Prise au 1/3 de la hauteur maximum de remplissage, cette épaisseur équivalente serait égale à : **10 mm**



Note 1 : Zone corrodée

Figure 3.2.1-3

3.2.2 - Période du mode convectif

La période du mode convectif est donnée par les formules ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Formule A.36	Formule E.4.5.2-a

Dans ces formules, le coefficient C_c (K_s , C_{conv}) est donné par le tableau ou les formules suivantes :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Tableau A.2	Formule E.4.5.2-c

Le calcul de la période du premier mode convectif est illustré par l'exemple développé au § 3.2.4.

3.2.3 - Période du mode axisymétrique

a) Lorsque l'interaction sol/structure peut être négligée, la période du mode axisymétrique est donnée par les formules ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Formule A.42	Sans objet
Note 1 : Dans cette formule $\gamma_1 = \pi R / (2 H)$ [25], [26].	

Le calcul de la période du premier mode axisymétrique est illustré par l'exemple développé au § 3.2.4.

b) Lorsque l'interaction sol/structure ne peut pas être négligée, les procédures permettant de définir les modifications du comportement décrit au § a) ci-dessus sont données dans les § ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
§ A.7.2 Note 1	Sans objet
Note 1 : Les caractéristiques (impédances de la fondation) nécessaires à l'application de cette formulation peuvent être déterminées à partir de la référence [47].	

3.2.4 - Exemple de calcul des périodes des modes impulsif, convectif et axisymétrique de l'ensemble constitué du réservoir et du produit stocké

Exemple 3.2.4		
D =	20,00	m
H =	8,00	m
H/D =	0,40	
eeq =	9,68	mm
	Voir Exemple 3.2.1-1	
g =	9,81	m/s ²
rholiq =	1 000,00	kg/m ³
E =	2,00E+11	Pa
Période du mode impulsif		
Cimp =	6,77	[25] Tableau CA1.3.2.1-1 [26] Tableau SIA5.3.2.1-1
Timp =	0,1231	s
ou		
Cimp =	6,38	[25] Formule CA1.3.2.1-a2 [26] Formule SIA5.3.2.1-a2
Timp =	0,1159	s
Période du mode convectif		
Cconv =	3,45	
Tconv =	4,9298	s
Période du mode axisymétrique		
Caxi =	1,45	[25] Formule CA1.3.2.3-a1 [26] Formule SIA5.3.2.3-a1
Taxi =	0,1169	s
ou		
Caxi =	1,51	[25] Formules CA1.3.2.3-a1 & CA1.3.2.3-a2 [26] Formules SIA5.3.2.3-a1 & SIA5.3.2.3-a2
Taxi =	0,1193	s

3.3 - Détermination des accélérations spectrales [15], [28]

3.3.1 - Introduction

De manière générale, pour les modes convectifs, le spectre de réponse élastique est le spectre correspondant à un amortissement de 0,5%.

Pour les modes impulsif et axisymétrique les spectres de réponse élastique sont ceux obtenus pour un amortissement de 5%. Toutefois, pour ces modes, lorsque l'interaction sol-structure est prise en compte, cette interaction peut modifier les valeurs des amortissements. Les procédures permettant de prendre en compte ces modifications sont définies au § 3.3.2 ci-après.

Par ailleurs, l'évaluation du comportement sismique d'un réservoir à partir d'un calcul élastique linéaire est dans la plupart des cas extrêmement conservative.

Aussi, afin de limiter ce conservatisme tout en évitant d'effectuer des calculs élastoplastiques explicites, la capacité de dissipation d'énergie du réservoir due au comportement ductile de certains de ses composants et/ou à d'autres mécanismes (soulèvement...), peut être prise en compte en réalisant une analyse élastique fondée sur des spectres de réponse réduits (spectres de calcul) par rapport aux spectres de réponse élastique spécifiés pour le réservoir considéré. Les procédures permettant de déterminer ces spectres sont définies au § 3.3.3 ci-après.

3.3.2 - Modifications des amortissements en fonction de l'interaction sol-structure

Lorsque l'interaction sol/structure est prise en compte, les valeurs des amortissements relatifs aux modes impulsifs et axisymétriques peuvent être modifiées conformément aux procédures décrites dans les § suivants :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
§ A.7.2 Notes 1 à 3	Sans objet
<p>Note 1 : Les caractéristiques (impédances de la fondation) nécessaires à l'application de cette formulation peuvent être déterminées à partir de la référence [47].</p> <p>Note 2 : Pour les sols de Type A, B et E la valeur de 5% peut être, de manière conservative, conservée. Pour les sols de Type C et D la valeur déterminée à partir des procédures définies ci-dessus ne doit pas être supérieure à 10%.</p> <p>Note 3 : Lorsqu'un spectre réduit (voir § 3.3.3 ci-après) est utilisé, l'influence de l'augmentation éventuelle de l'amortissement est normalement intégrée dans le coefficient de réduction q.</p>	

3.3.3 - Coefficients de réduction

L'évaluation du comportement sismique d'un réservoir à partir d'un calcul élastique linéaire est dans la plupart des cas extrêmement conservatrice. Aussi, afin de limiter ce conservatisme tout en évitant d'effectuer des calculs élasto-plastiques explicites, la capacité de dissipation d'énergie du réservoir due au comportement ductile de certains de ses composants et/ou à d'autres mécanismes (soulèvement...), peut être prise en compte en réalisant une analyse élastique fondée sur des spectres de réponse réduits (spectres de calcul) par rapport aux spectres de réponse élastique spécifiés pour le réservoir considéré.

La réduction des spectres considérés est réalisée en introduisant le coefficient de réduction q défini ci-après dans les formules permettant d'établir les spectres de calcul données au § 3.2.2.5 de la référence [15] ou au § CA1.3.3.3 et SIA5.3.3.3, respectivement des références [25] et [26]. Toutefois, cette réduction ne s'applique qu'aux modes impulsif et axisymétrique, le(s) mode(s) convectifs restant soumis aux spectres de réponse élastique initiaux.

Sauf justification spécifique, les coefficients utilisés ne doivent pas excéder les valeurs suivantes :

Type de réservoir	q	
	Mode impulsif	Mode axisymétrique
	Spectres horizontaux	Spectre vertical
Réservoir posé au sol, non fixé mécaniquement (Note 1)	2,00	1,5
Réservoir posé au sol, fixé mécaniquement (Note 2)	2,50	1,5

Note 1 :

- Le coefficient de réduction de 2 ne peut être utilisé que si toutes les autres règles de dimensionnement des réservoirs sont respectées, notamment, pour ce qui est de la bordure annulaire (ou de la marginale), l'épaisseur de cette dernière, sauf justification spécifique, doit être inférieure ou égale à l'épaisseur de la virole inférieure.
- Les calculs des déplacements, soulèvement et angle de rotation plastique doivent être effectués avec un coefficient de réduction égal à 1.

Note 2 :

L'utilisation d'un coefficient de réduction égal à 2,5 suppose que les ancrages soient suffisamment ductiles et conçus de manière appropriés, c'est-à-dire qu'ils respectent au minimum les exigences suivantes :

- Les ancrages doivent être conçus pour développer un effort résistant à tout stade du décollement du réservoir.
- Les ancrages doivent pouvoir s'allonger sans rupture d'une longueur supérieure ou égale à $R/200$ où R est le rayon du réservoir.
- L'assemblage des ancrages au réservoir doit être vérifié à l'état limite ultime pour l'effort de plastification des ancrages majoré d'un coefficient 1,25.
- Les points de solidarisation des ancrages au repère fixe, en général le sol supportant la fondation, doivent être conçus et dimensionnés pour résister à l'effort de plastification majoré du coefficient 1,25 avec un déplacement vertical inférieur à $R/500$.

3.3.4 - Exemple de détermination des accélérations spectrales réduites

Zone de sismicité 1

Classe de sol A

$C_{sol} = 1$

Séisme horizontal

$T_B = 0,03 \text{ s}$; $T_C = 0,20 \text{ s}$; $T_D = 2,50 \text{ s}$; $\gamma_{hg} = 0,88 \text{ m/s}^2$ $\xi = 5 \%$

Spectre de réponse élastique

Courbe **1a**

Spectres de calcul pour l'analyse élastique $q = 2$

Courbe **1b**

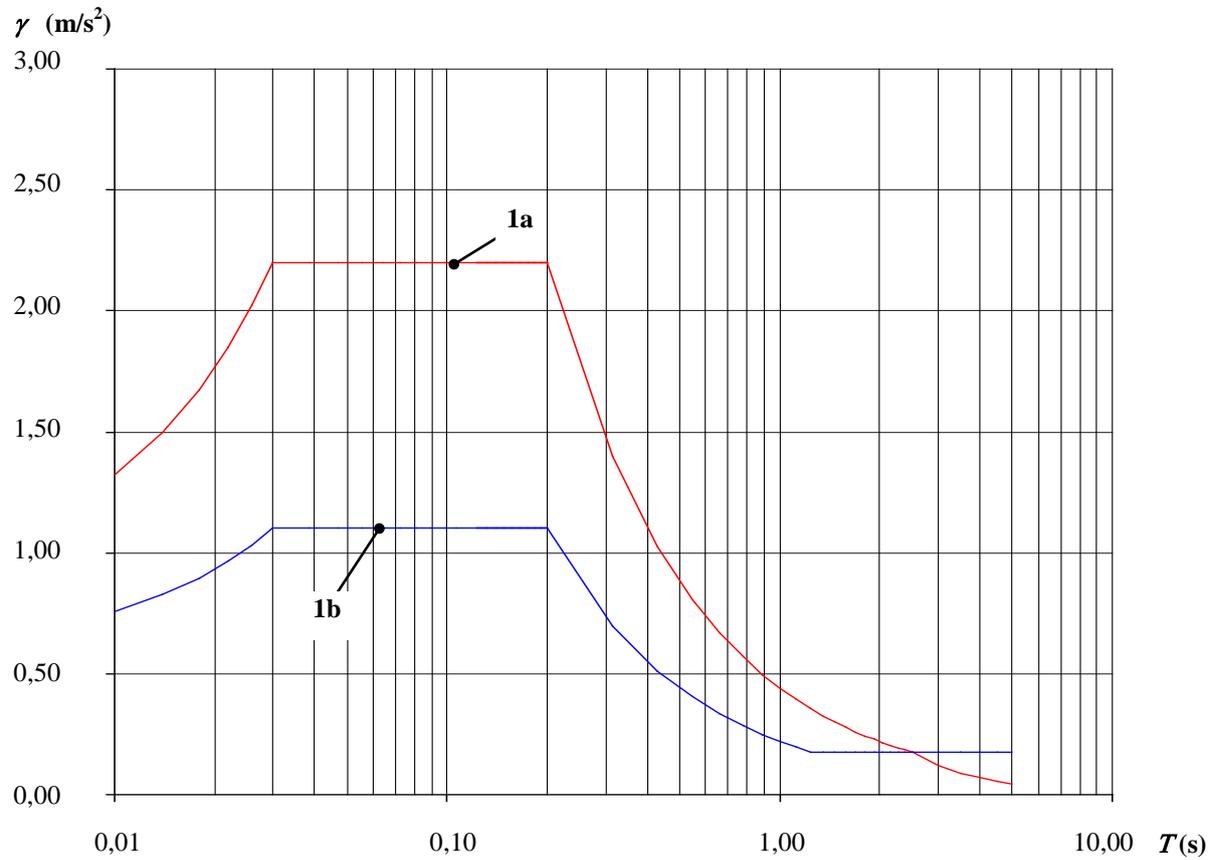


Figure 3.3.3

3.4 - Détermination des pressions appliquées à la robe

3.4.1 - Contribution de la composante horizontale du séisme

a) Mode impulsif

Les pressions impulsives sont données par les formules ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
A.1 & A.2	$D/H \geq 4/3$
	E.6.1.4-1a Note 1
	$D/H < 4/3$
	$h < 0,75 D$
	E.6.1.4-2a Note 1
	$h \geq 0,75 D$
Note 1 : Formulation implicite, les valeurs des pressions peuvent être obtenues à partir des valeurs des efforts linéiques fournies par le document.	

où h est la distance du point de calcul de la virole considérée à la surface libre du produit stocké,

et,

où l'accélération à prendre en compte dans ces différentes formulations est l'accélération spectrale horizontale correspondant au mode impulsif considéré.

b) Mode convectif

Les pressions convectives sont données par les formules ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
A.7 & A.8	E.6.1.4-4a Note 1
Note 1 : Formulation implicite, les valeurs des pressions peuvent être obtenues à partir des valeurs des efforts linéiques fournies par cette formule.	

où l'accélération à prendre en compte dans ces différentes formulations est l'accélération spectrale horizontale correspondant au mode convectif considéré.

3.4.2 - Contribution de la composante verticale du séisme

Les pressions sont données par les formules ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
A.17	E6.1.3 & E6.1.4

où l'accélération à prendre en compte dans ces différentes formulations est, dans le cadre du présent guide, l'accélération spectrale verticale correspondant au mode axisymétrique considéré.

3.4.3 - Pression résultante totale

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Note 2	E6.1.4-5 & E6.1.4-6 Note 1
<p>Note 1 : Formulation implicite, les valeurs des pressions peuvent être obtenues à partir des valeurs des efforts linéiques fournies par cette formule.</p> <p>Note 2 : En l'absence de proposition claire et en s'appuyant sur les § A.2.1.6 et A.2.3 de la référence [28], il est recommandé pour déterminer la pression maximum pour la virole <i>i</i> d'appliquer la formulation proposée ci-après :</p> $p_{vi} = p_{hydro,vi} + p_{imp,vi} + p_{conv,vi} + 0,3 p_{axi,vi}$ <p>$p_{hydro,vi}$ = Pression hydrostatique</p> <p>$p_{imp,vi}$ = Pression impulsive définie au § 3.4.1a) du présent guide</p> <p>$p_{conv,vi}$ = Pression convective définie au § 3.4.1b) du présent guide</p> <p>$p_{axi,vi}$ = Pression due au séisme verticale définie au § 3.4.2 du présent guide</p>	

3.5 - Contraintes de membrane circonférentielles

3.5.1 - Calcul des contraintes de membrane circonférentielles

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Note 1	E.6.1.4-5 & E.6.1.4-6
<p>Note 1 : En l'absence de proposition, il est recommandé d'appliquer la formulation proposée ci-après :</p> $\sigma_{c,vi} = \left[\frac{P_{vi}}{e_{vi}} R \right]$ <p>où e_{vi}, l'épaisseur de la virole i à prendre en compte est définie au § 2 du présent guide.</p>	

3.5.2 - Évaluation des contraintes de membrane circonférentielles

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Note 1	E.6.2
<p>Note 1 : En l'absence de proposition claire, il est recommandé de limiter la contrainte de membrane circonférentielle à 100% de la limite d'élasticité du matériau.</p>	

3.6 - Détermination des masses effectives de produit et des positions des centres d'action associés aux modes impulsif et convectif

3.6.1 - Mode impulsif

a) Réservoir « rigide »

La masse effective de produit associée au mode impulsif est donnée par le tableau ou les formules ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Tableau A.2	$D/H \geq 4/3$
	E.6.1.1-1
	$D/H < 4/3$
	E.6.1.1-2

La position du centre d'action de la masse effective de produit associée au mode impulsif est donnée par les formules ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Pour le calcul des efforts supportés par le réservoir :	
Tableau A.2	$D/H \geq 4/3$
	E.6.1.2.1-1
	$D/H < 4/3$
	E.6.1.2.1-2
Pour le calcul des efforts supportés par la fondation :	
Tableau A.2	$D/H \geq 4/3$
	E.6.1.2.2-1
	$D/H < 4/3$
	E.6.1.2.2-2

b) Réservoir « flexible »

Les masses effectives de produit associées aux modes impulsifs sont données aux § ci-après :

	NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Mode impulsif « rigide »	[69]	Sans objet
Mode impulsif « flexible »	§ C3.3.2 Note 1	
Note 1 : Formulation recommandée par le présent guide en l'absence de solution pratique proposée par la norme.		

Les positions des centres d'action des masses effectives de produit associées aux modes impulsifs sont données aux § ci-après :

	NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Pour le calcul des efforts supportés par le réservoir :		
Mode impulsif « rigide »	[69]	Sans objet
Mode impulsif « flexible »	§ C3.3.2 Note 1	
Pour le calcul des efforts supportés par la fondation :		
Mode impulsif « rigide »	[69]	Sans objet
Mode impulsif « flexible »	§ C3.3.2 Note 1	
Note 1 : Formulation recommandée par le présent guide en l'absence de solution pratique proposée par la norme.		

3.6.2 - Mode convectif

La masse effective de produit associée au mode convectif est donnée par le tableau ou les formules ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Tableau A.2	E.6.1.1-3

La position du centre d'action de la masse effective de produit associée au mode convectif est donnée par les formules ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Pour le calcul des efforts supportés par le réservoir :	
Tableau A.2	E.6.1.2.1-3 & E.6.1.2.2-3
Pour le calcul des efforts supportés par la fondation :	
Tableau A.2	Sans objet

3.7 - Détermination de l'effort tranchant et du moment de renversement

a) Réservoir « rigide »

Les différents efforts (**sans interaction sol/réservoir**) sont donnés par les formules suivantes :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Effort tranchant au niveau de la base :	
A.37	E.6.1-1 à E.6.1-3
Moment de renversement supporté par le réservoir :	
A.38	E.6.1.5-1
Moment de renversement supporté par la fondation :	
A.39	E.6.1.5-2

Les différents efforts (**avec interaction sol/réservoir**) sont donnés par les formules suivantes :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Effort tranchant au niveau de la base :	
A.37	E.6.1-1 à E.6.1-3
Moment de renversement supporté par le réservoir :	
A.38	E.6.1.5-1
Moment de renversement supporté par la fondation :	
A.39	E.6.1.5-2

b) Réservoir « flexible »

Les différents efforts (**sans interaction sol/réservoir**) sont donnés par les formules suivantes :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Effort tranchant au niveau de la base :	
[69] Formules 3.9 à 3.17	Sans objet
Moment de renversement supporté par le réservoir :	
[69] Formules 3.9 à 3.17	Sans objet
Moment de renversement supporté par la fondation :	
[69] Formules 3.9 à 3.17	Sans objet

Les différents efforts (**avec interaction sol/réservoir**) sont donnés par les formules suivantes :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Effort tranchant au niveau de la base :	
[69] Formules 3.9 à 3.17 Note 1	Sans objet
Moment de renversement supporté par le réservoir :	
[69] Formules 3.9 à 3.17 Note 1	Sans objet
Moment de renversement supporté par la fondation :	
[69] Formules 3.9 à 3.17 Note 1	Sans objet
Note 1 : Formulation recommandée par le présent guide en l'absence de solution pratique proposée par la norme.	

3.8 - Vérification de la résistance vis-à-vis du moment de renversement et stabilité de la robe

3.8.1 - Réservoir non ancré

3.8.1.1 - Introduction

Pour les réservoirs non ancrés, la résistance vis-à-vis du moment de renversement appliqué à la base du réservoir et, le cas échéant, de la force générée par la pression intérieure est assurée par le poids du réservoir et le poids d'une fraction du produit contenu s'opposant au soulèvement.

3.8.1.2 - Force résistante générée par le produit stocké

La force résistante générée par le produit est donnée par les formules suivantes :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Sans objet	E.6.2.1.1-1a & § E.6.2.1.1 Note 1
Note 1 : Dans ces différentes formules, l'épaisseur des tôles marginales de fond ou de la bordure annulaire à prendre définie au § 2 du présent guide.	

3.8.1.3 - Rapport RA

La valeur du rapport RA (ancrage) est donnée par les formules suivantes :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Sans objet	E.6.2.1.1.1-1 Note 1
Note 1 : $RA \leq 0,785$: Pas de soulèvement. Le réservoir est stable sous réserve du respect des exigences relatives aux contraintes de compression. $0,785 < RA \leq 1,54$: Le réservoir peut se soulever. Le réservoir est stable sous réserve du respect des exigences relatives aux contraintes de compression. $RA > 1,54$: Le réservoir n'est pas stable. L'épaisseur des tôles du fond au droit de la robe doit être augmentée ou le réservoir doit être ancré.	

3.8.1.4 - Détermination et vérification de la contrainte de membrane dans la direction radiale du fond

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
§ A.9.4 Note 1	Sans objet
Note 1 : Dans ces différentes formulations, l'épaisseur de la virole i à prendre en compte est définie au § 2 du présent guide.	

3.8.1.5 - Détermination et vérification des contraintes de compression dans la robe du réservoir

Les contraintes de compression maximales et les critères d'acceptabilité associés sont donnés par les formules suivantes :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
§ A.10.2 & § A.10.3 Notes 1, 2, 3 & 4	E.6.2.2.1-1a ou E.6.2.2.1-2a Note 1 & 5
Note 1 : Dans ces différentes formulations, l'épaisseur de la virole i à prendre en compte est définie au § 2 du présent guide.	
Note 2 : La formule proposée (A.69) doit être corrigée : le terme $r^{1.15}$ doit être remplacé par $r^{1.5}$.	
Note 3 : La contrainte maximale de compression dans la robe peut être déterminée notamment à partir de la formulation proposée § C4.4.1 de la référence [69].	
Note 4 : La vérification de l'absence de risque d'instabilité élastique requise au § A.10.2 de la référence [28] doit être basée sur la pression <i>minimale</i> de la pression interne dans la situation sismique de calcul. La vérification de l'absence de risque d'instabilité élastoplastique requise au § A.10.3 de la référence [28] doit être basée sur la pression <i>maximale</i> de la pression interne dans la situation sismique de calcul.	
Note 5 : Les références [25] & [26] proposent deux procédures concernant la détermination des contraintes de compression et des critères associées. La première procédure est proche de celle proposée par la référence [20] (Coefficient de sécurité de 2 sur la « contrainte de compression admissible »), la deuxième correspond à celle des références [28] & [69] (Coefficient de calibration égale à 2,5 sur la « contrainte maximum de compression »). Dans tous les cas, l'une et l'autre de ces procédures conduisent à des résultats similaires (Voir exemple).	

3.8.1.6 - Vérification de la liaison robe-fond et du fond

La « rotation plastique » à la liaison robe-fond peut être évaluée à partir des formulations proposées aux § suivants :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
§ A.9.5	Sans objet

3.8.1.7 - Glissement

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Note 1	§ E.7.6
<p>Note 1 : Il est recommandé d'utiliser la formulation suivante pour vérifier l'absence de risque de glissement :</p> $\frac{Q}{N} < \frac{\tan(\phi)}{1,25}$ <p>Où :</p> <p>Q = effort tranchant</p> <p>N = effort normal résultant de la combinaison du poids propre et du séisme vertical ascendant (§ 3.4.3)</p> <p>ϕ = angle de frottement du fond sur la fondation (valeur par défaut 25°)</p>	

3.8.2 - Réservoir ancré

3.8.2.1 - Introduction

Pour les réservoirs ancrés, la résistance vis-à-vis du moment de renversement appliqué à la base du réservoir et, le cas échéant, de la force générée par la pression intérieure (w_p) est assurée par les ancrages.

Note : Pour un réservoir ancré, il n'est pas permis de tenir compte d'une force générée par une fraction du produit contenu s'opposant au renversement du réservoir [28].

3.8.2.2 - Détermination et vérification des contraintes de compression dans la robe du réservoir

Les contraintes de compression maximales et les critères d'acceptabilité associés sont donnés par les formules suivantes :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
§ A.10.2 & § A.10.3 Notes 1, 2, 3 & 4	E.6.2.2.1-1a ou E.6.2.2.1-2a Note 1 & 5
<p>Note 1 : Dans ces différentes formulations, l'épaisseur de la virole i à prendre en compte est définie au § 2 du présent guide.</p> <p>Note 2 : La formule proposée (A.69) doit être corrigée : le terme $r^{1.15}$ doit être remplacé par $r^{1.5}$.</p> <p>Note 3 : La contrainte maximale de compression dans la robe peut être déterminée notamment à partir de la formulation proposée § C4.4.1 de la référence [69].</p> <p>Note 4 : La vérification de l'absence de risque d'instabilité élastique requise au § A.10.2 de la référence [28] doit être basée sur la pression <i>minimale</i> de la pression interne dans la situation sismique de calcul. La vérification de l'absence de risque d'instabilité élastoplastique requise au § A.10.3 de la référence [28] doit être basée sur la pression <i>maximale</i> de la pression interne dans la situation sismique de calcul.</p> <p>Note 5 : Les références [25] & [26] proposent deux procédures concernant la détermination des contraintes de compression et des critères associés. La première procédure est proche de celle proposée par la référence [20] (Coefficient de sécurité de 2 sur la « contrainte de compression admissible »), la deuxième correspond à celle des références [28] & [69] (Coefficient de calibration égale à 2,5 sur la « contrainte maximum de compression »). Dans tous les cas, l'une et l'autre de ces procédures conduisent à des résultats similaires (Voir exemple).</p>	

3.8.2.3 - Ancrages

Les efforts auxquels les ancrages doivent résister sont définis par les formules suivantes :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Note 1	§ E.6.2.1.2 Formules E.6.2.1.2 -2 & E.6.2.1.2 -1
<p>Note 1 : Il est recommandé que les efforts dans les ancrages soit déterminés à partir des formules suivantes :</p> $F = N \frac{\pi D}{n_a}$ <p>avec :</p> $N = \frac{4 M_r}{\pi D_a^2} - W$ <p>où :</p> <p>n_a = nombre d'ancrages régulièrement espacés sur la périphérie du réservoir M_r = moment de renversement supporté par le réservoir W = poids de la robe, du toit, de la charpente... D_a = diamètre d'implantation des ancrages</p>	

3.9 - Hauteur de la vague due au ballonnement du liquide

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
§ A.2.1.4 Formule A.15	§ E.7.2 Formule E.7.2-1
<p>Il est recommandé que la hauteur libre (non remplie) de la dernière virole du réservoir soit supérieure ou égale à la hauteur de vague telle que déterminée ci-dessus. Lorsque cette exigence ne peut pas être respectée la résistance du toit doit être vérifiée (voir par exemple [60]).</p>	

4 - RÉSERVOIRS CYLINDRIQUES VERTICAUX À FOND PLAT INSTALLÉS SUR UNE INFRASTRUCTURE DESTINÉS AU STOCKAGE DE PRODUITS LIQUIDES À UNE TEMPÉRATURE DE SERVICE INFÉRIEURE À LA TEMPÉRATURE AMBIANTE

VÉRIFICATION DE LA RÉSISTANCE AU SÉISME À PARTIR D'UNE MODÉLISATION NUMÉRIQUE ET DE CALCULS ANALYTIQUES

4.1 - Introduction

Les procédures de vérification de la résistance au séisme des réservoirs cylindriques verticaux à fond plat à partir de calculs analytiques proposées ci-après sont applicables aux réservoirs dont le rapport H/D est compris entre 0,15 et 1,5.

Pour les réservoirs objet du présent chapitre, il convient tout d'abord, conformément aux logigrammes Figures 1.4.2-1 et -2, de déterminer à l'aide d'un modèle tel que décrit dans le *Guide Structures support* [9c], les accélérations spectrales, le moment de renversement et l'effort tranchant auxquels le réservoir est soumis.

Pour les réservoirs calorifugés, l'isolation doit être prise en compte de la manière suivante :

- Isolation sur la robe : Si l'isolation est attachée à la robe, sa masse doit être prise en compte dans le calcul des efforts sismiques et dans le calcul de la résistance au renversement (stabilité, glissement). Le système de protection éventuel sera aussi pris en compte s'il est solidaire de la robe. Si l'isolation est en vrac entre la robe du réservoir et un container à isolation extérieur (ou une cuve secondaire), sa masse sera répartie également entre les réservoirs intérieur et extérieur. Elle doit être prise en compte dans le calcul des efforts sismiques mais pas dans le calcul de la résistance au renversement.
- Isolation sur le toit : La masse de l'isolation sur le toit doit être prise en compte dans le calcul des efforts sismiques et dans le calcul de la résistance au renversement (stabilité, glissement), de même si l'isolation est posée sur un pont suspendu au toit.

Pour le calcul des masses de l'isolation, on considérera par défaut les épaisseurs et densités nominales. La masse peut être considérée comme également répartie sur la robe (respectivement le toit).

Les procédures proposées s'appuient sur différents référentiels techniques susceptibles de permettre de répondre aux exigences réglementaires applicables : NF EN 14620 [32] & NF EN 1998-4 [28] d'une part et API 625 [68], API 620 [34] & API 650 [20] d'autre part. Le choix de l'un ou l'autre de ces ensembles de référentiels pour vérifier la résistance au séisme d'un réservoir est de la responsabilité du Donneur d'ordre (réservoir neuf) ou de l'Exploitant (réservoir en service).

Toutefois, ces ensembles de référentiels, complétés par les ajouts, corrections et conditions d'application définis dans les chapitres ci-après, sont des ensembles de règles techniques cohérentes. Aussi lorsque l'un de ces ensembles référentiels est choisi pour vérifier la résistance au séisme d'un réservoir, les règles de cet ensemble doivent être appliquées dans leur intégralité sans possibilité de « panachage » des règles des différents ensembles.

4.2 & 4.3 - § non utilisés

4.4 - Détermination des pressions appliquées à la robe

4.4.1 - Contribution de la composante horizontale du séisme

a) Mode impulsif

Les pressions impulsives sont données par les formules ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
A.1 & A.2	$D/H \geq 4/3$
	E.6.1.4-1a Note 1
	$D/H < 4/3$
	$h < 0,75 D$
	E.6.1.4-2a Note 1
	$h \geq 0,75 D$
	E.6.1.4-3a Note 1
Note 1 : Formulation implicite, les valeurs des pressions peuvent être obtenues à partir des valeurs des efforts linéiques fournies par le document.	

où l'accélération à prendre en compte dans ces différentes formulations est l'accélération spectrale horizontale correspondant au mode impulsif considéré et déterminée à l'aide d'un modèle tel que décrit dans le *Guide Structures Support* [9c].

b) Mode convectif

Les pressions convectives sont données par les formules ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
A.7 & A.8	E.6.1.4-4a Note 1
Note 1 : Formulation implicite, les valeurs des pressions peuvent être obtenues à partir des valeurs des efforts linéiques fournies par le document.	

où l'accélération à prendre en compte dans ces différentes formulations est l'accélération spectrale horizontale correspondant au mode convectif considéré et déterminée à l'aide d'un modèle tel que décrit dans le *Guide Structures Support* [9c].

4.4.2 - Contribution de la composante verticale du séisme

Les pressions sont données par les formules ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
A.17	E6.1.3 & E6.1.4

où l'accélération à prendre en compte dans ces différentes formulations est, dans le cadre du présent guide, l'accélération spectrale verticale correspondant au mode axisymétrique considéré et déterminée à l'aide d'un modèle tel que décrit dans le *Guide Structures Support* [9c].

4.4.3 - Pression résultante totale

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Note 2	E6.1.4-5 & E6.1.4-6 Note 1

Note 1 : Formulation implicite, les valeurs des pressions peuvent être obtenues à partir des valeurs des efforts linéiques fournies par le document.

Note 2 : En l'absence de proposition claire et en s'appuyant sur les § A.2.1.6 et A.2.3 de la référence [28], il est recommandé pour déterminer la pression maximum pour la virole *i* d'appliquer la formulation proposée ci-après :

$$P_{vi} = P_{hydro,vi} + P_{imp,vi} + P_{conv,vi} + 0,3 P_{axi,vi}$$

$P_{hydro,vi}$ = Pression hydrostatique

$P_{imp,vi}$ = Pression impulsive définie au § 4.4.1a du présent guide

$P_{conv,vi}$ = Pression convective définie au § 4.4.1b du présent guide

$P_{axi,vi}$ = Pression due au séisme verticale définie au § 4.4.2 du présent guide

4.5 - Contraintes de membrane circonférentielles**4.5.1 - Calcul des contraintes de membrane circonférentielles**

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Note 1	E.6.1.4-5 & E.6.1.4-6
Note 1 : En l'absence de proposition, il est recommandé d'appliquer la formulation proposée ci-après : $\sigma_{c,vi} = \left[\frac{P_{vi}}{e_{vi}} R \right]$ où e_{vi} , l'épaisseur de la virole i à prendre en compte est définie au § 2 du présent guide.	

4.5.2 - Évaluation des contraintes de membrane circonférentielles

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Note 1	E.6.2
Note 1 : En l'absence de proposition claire, il est recommandé de limiter la contrainte de membrane circonférentielle à 100% de la limite d'élasticité du matériau.	

4.6 - Détermination des masses effectives de produit et des positions des centres d'action associés aux modes impulsif et convectif

4.6.1 - Mode impulsif

a) Réservoir « rigide »

La masse effective de produit associée au mode impulsif est donnée par le tableau ou les formules ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Tableau A.2	$D/H \geq 4/3$
	E.6.1.1-1
	$D/H < 4/3$
	E.6.1.1-2

La position du centre d'action de la masse effective de produit associée au mode impulsif est donnée par les formules ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Pour le calcul des efforts supportés par le réservoir :	
Tableau A.2	$D/H \geq 4/3$
	E.6.1.2.1-1
	$D/H < 4/3$
	E.6.1.2.1-2
Pour le calcul des efforts supportés par la fondation :	
Tableau A.2	$D/H \geq 4/3$
	E.6.1.2.2-1
	$D/H < 4/3$
	E.6.1.2.2-2

b) Réservoir « flexible »

Les masses effectives de produit associées aux modes impulsifs sont données aux § ci-après :

	NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Mode impulsif « rigide »	[69]	Sans objet
Mode impulsif « flexible »	§ C3.3.2 Note 1	
Note 1 : Formulation recommandée par le présent guide en l'absence de solution pratique proposée par la norme.		

Les positions des centres d'action des masses effectives de produit associées aux modes impulsifs sont données aux § ci-après :

	NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
	Pour le calcul des efforts supportés par le réservoir :	
Mode impulsif « rigide »	[69]	Sans objet
Mode impulsif « flexible »	§ C3.3.2 Note 1	
	Pour le calcul des efforts supportés par la fondation :	
Mode impulsif « rigide »	[69]	Sans objet
Mode impulsif « flexible »	§ C3.3.2 Note 1	
Note 1 : Formulation recommandée par le présent guide en l'absence de solution pratique proposée par la norme.		

4.6.2 - Mode convectif

La masse effective de produit associée au mode convectif est donnée par le tableau ou les formules ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Tableau A.2	E.6.1.1-3

La position du centre d'action de la masse effective de produit associée au mode convectif est donnée par les formules ci-après :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Pour le calcul des efforts supportés par le réservoir :	
Tableau A.2	E.6.1.2.1-3 & E.6.1.2.2-3
Pour le calcul des efforts supportés par la fondation :	
Tableau A.2	

4.7 - Détermination de l'effort tranchant et des moments de renversement

Le moment de renversement et l'effort tranchant auxquels le réservoir est soumis doivent être déterminés à l'aide d'un modèle tel que décrit dans le *Guide Structures Support* [9c].

4.8 - Vérification de la résistance vis-à-vis du moment de renversement et stabilité de la robe

4.8.1 - Réservoir non ancré

4.8.1.1 - Introduction

Pour les réservoirs non ancrés, la résistance vis-à-vis du moment de renversement appliqué à la base du réservoir et, le cas échéant, de la force générée par la pression intérieure est assurée par le poids du réservoir et le poids d'une fraction du produit contenu s'opposant au soulèvement.

4.8.1.2 - Force résistante générée par le produit stocké

La force résistante générée par le produit est donnée par les formules suivantes :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Sans objet	E.6.2.1.1-1a & § E.6.2.1.1 Note 1
Note 1 : Dans ces différentes formules, l'épaisseur des tôles marginales de fond ou de la bordure annulaire à prendre définie au § 2 du présent guide.	

4.8.1.3 - Rapport RA

La valeur du rapport RA (ancrage) est donnée par les formules suivantes :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Sans objet	E.6.2.1.1.1-1 Note 1
Note 1 : $RA \leq 0,785$: Pas de soulèvement. Le réservoir est stable sous réserve du respect des exigences relatives aux contraintes de compression. $0,785 < RA \leq 1,54$: Le réservoir peut se soulever. Le réservoir est stable sous réserve du respect des exigences relatives aux contraintes de compression. $RA > 1,54$: Le réservoir n'est pas stable. L'épaisseur des tôles du fond au droit de la robe doit être augmentée ou le réservoir doit être ancré.	

4.8.1.4 - Détermination et vérification de la contrainte de membrane dans la direction radiale du fond

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
§ A.9.4 Note 1	Sans objet
Note 1 : Dans ces différentes formulations, l'épaisseur de la virole i à prendre en compte est définie au § 2 du présent guide.	

4.8.1.5 - Détermination et vérification des contraintes de compression dans la robe du réservoir

Les contraintes de compression maximales et les critères d'acceptabilité associés sont donnés par les formules suivantes :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
§ A.10.2 & § A.10.3 Notes 1, 2, 3 & 4	E.6.2.2.1-1a ou E.6.2.2.1-2a Note 1 & 5
Note 1 : Dans ces différentes formulations, l'épaisseur de la virole i à prendre en compte est définie au § 2 du présent guide. Note 2 : La formule proposée (A.69) doit être corrigée : le terme $r^{1.15}$ doit être remplacé par $r^{1.5}$. Note 3 : La contrainte maximale de compression dans la robe peut être déterminée notamment à partir de la formulation proposée § C4.4.1 de la référence [69]. Note 4 : La vérification de l'absence de risque d'instabilité élastique requise au § A.10.2 de la référence [28] doit être basée sur la pression <i>minimale</i> de la pression interne dans la situation sismique de calcul. La vérification de l'absence de risque d'instabilité élastoplastique requise au § A.10.3 de la référence [28] doit être basée sur la pression <i>maximale</i> de la pression interne dans la situation sismique de calcul. Note 5 : Les références [25] & [26] proposent deux procédures concernant la détermination des contraintes de compression et des critères associées. La première procédure est proche de celle proposée par la référence [20] (Coefficient de sécurité de 2 sur la « contrainte de compression admissible »), la deuxième correspond à celle des références [28] & [69] (Coefficient de calibration égale à 2,5 sur la « contrainte maximum de compression »). Dans tous les cas, l'une et l'autre de ces procédures conduisent à des résultats similaires (Voir exemple).	

4.8.1.6 - Vérification de la liaison robe-fond et du fond

La « rotation plastique » à la liaison robe fond peut être évaluée à partir des formulations proposées aux § suivants :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
§ A.9.5	

4.8.1.7 - Glissement

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Note 1	§ E.7.6
Note 1 : Il est recommandé d'utiliser la formulation suivante pour vérifier l'absence de risque de glissement : $\frac{Q}{N} < \frac{\tan(\phi)}{1,25}$ où : Q = effort tranchant N = effort normal résultant de la combinaison du poids propre et du séisme vertical ascendant (§ 4.4.3). φ = angle de frottement du fond sur la fondation (valeur par défaut 25°).	

4.8.2 - Réservoir ancré

4.8.2.1 - Introduction

Pour les réservoirs ancrés, la résistance vis-à-vis du moment de renversement appliqué à la base du réservoir et, le cas échéant, de la force générée par la pression intérieure (w_p) est assurée par les ancrages.

Note : Pour un réservoir ancré, il n'est pas permis de tenir compte d'une force générée par une fraction du produit contenu s'opposant au renversement du réservoir.

4.8.2.2 - Détermination et vérification des contraintes de compression dans la robe du réservoir

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
§ A.10.2 & § A.10.3 Notes 1, 2, 3 & 4	E.6.2.2.1-1a ou E.6.2.2.1-2a Note 1 & 5
<p>Note 1 : Dans ces différentes formulations, l'épaisseur de la virole i à prendre en compte est définie au § 2 du présent guide.</p> <p>Note 2 : La formule proposée (A.69) doit être corrigée : le terme $r^{1,15}$ doit être remplacé par $r^{1,5}$.</p> <p>Note 3 : La contrainte maximale de compression dans la robe peut être déterminée notamment à partir de la formulation proposée § C4.4.1 de la référence [69].</p> <p>Note 4 : La vérification de l'absence de risque d'instabilité élastique requise au § A.10.2 de la référence [28] doit être basée sur la pression <i>minimale</i> de la pression interne dans la situation sismique de calcul. La vérification de l'absence de risque d'instabilité élastoplastique requise au § A.10.3 de la référence [28] doit être basée sur la pression <i>maximale</i> de la pression interne dans la situation sismique de calcul.</p> <p>Note 5 : Les références [25] & [26] proposent deux procédures concernant la détermination des contraintes de compression et des critères associées. La première procédure est proche de celle proposée par la référence [20] (Coefficient de sécurité de 2 sur la « contrainte de compression admissible »), la deuxième correspond à celle des références [28] & [69] (Coefficient de calibration égale à 2,5 sur la « contrainte maximum de compression »). Dans tous les cas, l'une et l'autre de ces procédures conduisent à des résultats similaires (Voir exemple).</p>	

4.8.2.4 - Ancrages

Les efforts auxquels les ancrages doivent résister sont définis par les formules suivantes :

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
Note 1	§ E.6.2.1.2 Formules E.6.2.1.2 -2 & E.6.2.1.2 -1
<p>Note 1 : Il est recommandé que les efforts dans les ancrages soit déterminés à partir des formules suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • ancrage non ductile ($q = 1$) : $N = \frac{4 M_r}{\pi D_a^2} - W$ • ancrage ductile ($q = 2,5$) : $N = \frac{8 M_r}{3 \pi D_a^2} - W$ <p>avec :</p> <p>M_r = moment de renversement supporté par le réservoir W = poids de la robe et du toit D_a = diamètre d'implantation des ancrages</p>	

4.9 - Hauteur de la vague due au ballonnement du liquide

NF EN 14620 [32] ↓ NF EN 1998-4 [28]	API 625 [68] ↓ API 620 [34] ↓ API 650 [20]
§ A.2.1.4 Formule A.15	§ E.7.2 Formule E.7.2-1
<p>Il est recommandé que la hauteur libre (non remplie) de la dernière virole du réservoir soit supérieure ou égale à la hauteur de vague telle que déterminée ci-dessus. Lorsque cette exigence ne peut pas être respectée la résistance du toit doit être vérifiée (voir par exemple [60]).</p>	

4.10 - Exemple d'application : Réservoir Diamètre = 12,50 m

Les exemples ci-après portent sur un réservoir de 12,5 m :

- 1° Calcul : réservoir posé au sol, traité comme dans la Partie A par les formulations de la référence [25], à titre de comparaison.
- 2° Calcul : réservoir installé sur une infrastructure [84], modélisé avec des hypothèses similaires à celles utilisées pour les calculs « réservoir posé au sol ».
- 3° Calcul : réservoir installé sur une infrastructure [84], modélisé avec des hypothèses s'appuyant sur celles utilisées pour les calculs « réservoir posé au sol » et tenant compte de la flexibilité du réservoir.

Exemple	Réservoir de stockage D = 12,50 m			Page
		CODRES 12,50 m Posé au sol	NF EN 1998-4 12,50 m Sur infrastructure [84] modèle 1	NF EN 1998-4 12,50 m Sur infrastructure [84] modèle 2AXI
<i>Diamètre du réservoir</i>				
D =	m	12,50	12,50	12,50
D =	mm	12 500,00	12 500,00	12 500,00
<i>Hauteur maximum de remplissage</i>				
Hmax_exploit =	m	12,00	12,00	12,00
Coeff. Simul. =		1,00	1,00	1,00 Note
H =	m	12,00	12,00	12,00
H =	mm	12 000,00	12 000,00	12 000,00
H/D =	-	0,9600	0,9600	0,9600
D/H =	-	1,0417	1,0417	1,0417
<i>Nombre de viroles</i>				
nv =	-	7	7	7
<i>Épaisseur des différentes viroles</i>				
ev9 =	mm	0,00	0,00	0,00
ev8 =	mm	0,00	0,00	0,00
ev7 =	mm	0,00	0,00	0,00
ev6 =	mm	6,00	6,00	6,00
ev5 =	mm	6,00	6,00	6,00
ev4 =	mm	6,00	6,00	6,00
ev3 =	mm	6,00	6,00	6,00
ev2 =	mm	6,00	6,00	6,00
ev1 =	mm	15,00	15,00	15,00
<i>Hauteur des différentes viroles</i>				
hv9 =	mm	0,00	0,00	0,00
hv8 =	mm	0,00	0,00	0,00
hv7 =	mm	0,00	0,00	0,00
hv6 =	mm	2 000,00	2 000,00	2 000,00
hv5 =	mm	2 000,00	2 000,00	2 000,00
hv4 =	mm	2 000,00	2 000,00	2 000,00
hv3 =	mm	2 000,00	2 000,00	2 000,00
hv2 =	mm	2 000,00	2 000,00	2 000,00
hv1 =	mm	2 000,00	2 000,00	2 000,00
<i>Hauteur totale de la robe</i>				
hv =	mm	12 000,00	12 000,00	12 000,00
<i>Épaisseur uniforme équivalente de la paroi de la robe du réservoir (§ CA.3.2.1)</i>				
eeq =	mm	8,75	8,75	8,75

Note : Aux fins d'exploitation des résultats des calculs éléments finis et de de comparaison le coefficient de simultanéité qui, normalement, devrait être égal à 0,9 a été maintenu à égal à 1 dans le cadre de cet exemple.

Exemple Réservoir de stockage D = 12,50 m Page 2

CODRES **NF EN 1998-4** **NF EN 1998-4**
12,50 m **12,50 m** **12,50 m**

Hauteurs de produit aux différents niveaux auxquels les contraintes circonférentielles sont calculées

hcalcul =	mm	300,00	300,00	300,00
hc_liq_v9 =	mm	0,00	0,00	0,00
hc_liq_v8 =	mm	0,00	0,00	0,00
hc_liq_v7 =	mm	0,00	0,00	0,00
hc_liq_v6 =	mm	1 700,00	1 700,00	1 700,00
hc_liq_v5 =	mm	3 700,00	3 700,00	3 700,00
hc_liq_v4 =	mm	5 700,00	5 700,00	5 700,00
hc_liq_v3 =	mm	7 700,00	7 700,00	7 700,00
hc_liq_v2 =	mm	9 700,00	9 700,00	9 700,00
hc_liq_v1 =	mm	11 700,00	11 700,00	11 700,00
hliqv =	mm	12 000,00	12 000,00	12 000,00

Masse volumique et densité du produit stocké

rholiq =	kg/m3	1 100,00	1 100,00	1 100,00
densliq =		1,100	1,100	1,100

Pression de service

p =	mbar	25,00	25,00	25,00
-----	------	-------	-------	-------

Accélération de la gravité

g =	m/s2	9,81	9,81	9,81
-----	------	------	------	------

Limite d'élasticité des matériaux constituant les différentes viroles

		NF EN 10025-2		
Rpt9 =	MPa	0,00 -	0,00	0,00
Rpt8 =	MPa	0,00 -	0,00	0,00
Rpt7 =	MPa	0,00 -	0,00	0,00
Rpt6 =	MPa	235,00 S235JR	235,00	235,00
Rpt5 =	MPa	235,00 S235JR	235,00	235,00
Rpt4 =	MPa	235,00 S235JR	235,00	235,00
Rpt3 =	MPa	235,00 S235JR	235,00	235,00
Rpt2 =	MPa	235,00 S235JR	235,00	235,00
Rpt1 =	MPa	355,00 S355JR	355,00	355,00

Contrainte admissible des matériaux constituant les différentes viroles

Coeff_Rp =		0,8889	0,8889	0,8889
fséisme9 =	MPa	0,00	0,00	0,00
fséisme8 =	MPa	0,00	0,00	0,00
fséisme7 =	MPa	0,00	0,00	0,00
fséisme6 =	MPa	208,89	208,89	208,89
fséisme5 =	MPa	208,89	208,89	208,89
fséisme4 =	MPa	208,89	208,89	208,89
fséisme3 =	MPa	208,89	208,89	208,89
fséisme2 =	MPa	208,89	208,89	208,89
fséisme1 =	MPa	315,56	315,56	315,56

Exemple	Réservoir de stockage D = 12,50 m			Page	3
		CODRES 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m	
<i>Module d'élasticité des matériaux</i>					
E =	Pa	2,00E+11	2,00E+11	2,00E+11	
<i>Coefficient de Poisson des matériaux</i>					
nu =		0,30	0,30	0,30	
<i>Masse volumique des matériaux</i>					
rhoacier =	kg/m ³	7 800,00	7 800,00	7 800,00	
<i>Masse de la robe du réservoir et position du centre de gravité</i>					
mpr =	kg	27 567,48	27 567,48	27 567,48	
hpr =	m	4,16	4,16	4,16	
<i>Masse du toit du réservoir et position du centre de gravité</i>					
Rpt_toit =	MPa	NF EN 10025-2 S235JR 235,00	235,00	235,00	
mtr =	kg	6 225,00	6 225,00	6 225,00	
Type de toit =		1/5	1/5	0,2	
htr =	m	12,39	12,39	12,39	
<i>Masse du fond du réservoir</i>					
Rpt_fond =	MPa	NF EN 10025-2 S235JR 235,00	235,00	235,00	
mfr =	kg	7,00 6 700,43	7,00 6 700,43	7,00 6 700,43	
<i>Masse du produit contenu</i>					
mliq =	kg	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06	

Exemple	Réservoir de stockage D = 12,50 m		Page	4
		CODRES 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m
Périodes / Fréquences propres				
Mode impulsif				
Cimp =		6,19	Valeurs calculées par Eléments finis [84] modèle 1	Valeurs calculées par Eléments finis [84] modèle 2AXI
Timp =	s	0,1472	0,2190	0,2190
Fimp =	Hz	6,7922	4,5662	4,5662
Mode convectif				
Cconv =		3,28		
Tconv =	s	3,6994	3,6930	3,6940
Fconv =	Hz	0,2703	0,2708	0,2707
Mode axisymétrique				
Caxi =		2,61	2,64	
Taxi =	s	0,1326	0,1335	0,1380
Faxi =	Hz	7,5421	7,4922	7,2464

Exemple Réservoir de stockage D = 12,50 m Page 5

Spectre de réponse élastique		Horizontal			Zone de sismicité	3	
					Sol	A	
					Amortissement	5,00	%
g _{hT5%}	g _{hg}	n	Csol	T			
m/s ²	m/s ²			s			
2,4200	2,42	1,00	1,00	0,00			
6,0500	2,42	1,00	1,00	0,03	TB		
6,0500	2,42	1,00	1,00	0,0000	Timp _{12,50}		
6,0500	2,42	1,00	1,00	0,20	TC		
0,4840	2,42	1,00	1,00	2,50	TD		
0,1891	2,42	1,00	1,00	4,00			

Spectre de réponse élastique		Horizontal			Zone de sismicité	1	
					Sol	A	
					Amortissement	0,50	%
g _{hT0,5%}	g _{hg}	n	Csol	T			
m/s ²	m/s ²			s			
2,4200	2,42	1,35	1,00	0,00			
8,1578	2,42	1,35	1,00	0,03	TB		
8,1578	2,42	1,35	1,00	0,20	TC		
0,6526	2,42	1,35	1,00	2,50	TD		
0,6526	2,42	1,35	1,00	2,50			
0,2980	2,42	1,35	1,00	3,6994	Tconv _{12,50}		
0,2549	2,42	1,35	1,00	4,00			
0,2014	2,42	1,35	1,00	4,50	TE		
				10,00	TF		

Spectre de réponse élastique		Vertical			Zone de sismicité	1	
					Sol	A	
					Amortissement	5,00	%
g _{hT5%}	g _{hg}	n		T			
m/s ²	m/s ²			s			
2,1800	2,18	1,00		0,00			
6,5400	2,18	1,00		0,03	TB		
6,5400	2,18	1,00		0,0000	Taxi _{12,50}		
6,5400	2,18	1,00		0,20	TC		
0,5232	2,18	1,00		2,50	TD		
0,2044	2,18	1,00		4,00			

Exemple	Réservoir de stockage D = 12,50 m		Page
		CODRES 12,50 m	6
		NF EN 1998-4 12,50 m	
		NF EN 1998-4 12,50 m	

Note = Les calculs ci-après sont réalisés sans tenir compte d'une éventuelle interaction sol/structure (voir remarque ci-dessous) et sans coefficients de réduction

Accélération horizontale maximale du sol

$g_{solhmax} =$	g	0,2467	0,2467
	m/s ²	2,4200	2,4200

Accélération horizontale spectrale impulsive

$g_{imp} =$	g	0,6167	0,5301
	m/s ²	6,0500	5,2000

Accélération horizontale spectrale convective

$g_{conv} =$	g	0,0304	0,0304
	m/s ²	0,2980	0,2980

Accélération verticale maximale du sol

$g_{solvmax} =$	g	0,2222	0,2222
	m/s ²	2,1800	2,1800

Accélération verticale spectrale

$g_v =$	g	0,6667	0,6667
	m/s ²	6,5400	6,5400

Exemple	Réservoir de stockage D = 12,50 m		Page
		CODRES 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m

7

NF EN 1998-4
12,50 m**Pressions appliquées à la robe****Contribution de la composante horizontale du séisme***Participation du mode impulsif*

Lambda =		0,7095	1,0000
pimpv9 =	Pa	0,00	0,00
pimpv8 =	Pa	0,00	0,00
pimpv7 =	Pa	0,00	0,00
pimpv6 =	Pa	14 599,11	15 047,47
pimpv5 =	Pa	28 047,32	26 597,78
pimpv4 =	Pa	37 466,10	30 554,64
pimpv3 =	Pa	42 855,46	31 586,51
pimpv2 =	Pa	44 268,59	33 330,27
pimpv1 =	Pa	44 268,59	34 756,92

Participation du mode convectif

mu =		3,5273	1,841
pconvv9 =	Pa	0,00	0,00
pconvv8 =	Pa	0,00	0,00
pconvv7 =	Pa	0,00	0,00
pconvv6 =	Pa	778,16	1 041,08
pconvv5 =	Pa	434,54	580,61
pconvv4 =	Pa	245,47	327,54
pconvv3 =	Pa	143,70	191,47
pconvv2 =	Pa	93,05	123,81
pconvv1 =	Pa	75,49	100,36

Contribution de la composante verticale du séisme*Comportement d'ensemble ("rigide")*

		2,1800	2,1800
paxirv9 =	Pa	0,00	0,00
paxirv8 =	Pa	0,00	0,00
paxirv7 =	Pa	0,00	0,00
paxirv6 =	Pa	4 076,60	4 076,60
paxirv5 =	Pa	8 872,60	8 872,60
paxirv4 =	Pa	13 668,60	13 668,60
paxirv3 =	Pa	18 464,60	18 464,60
paxirv2 =	Pa	23 260,60	23 260,60
paxirv1 =	Pa	28 056,60	28 056,60

Exemple Réservoir de stockage D = 12,50 m Page 8

**CODRES
12,50 m**

**NF EN 1998-4
12,50 m**

**NF EN 1998-4
12,50 m**

Pressions appliquées à la robe (suite)

Contribution de la composante verticale du séisme (suite)

Participation du mode axisymétrique

F =		1,2567	1,2567
gamma dyn. =		4,3600	6,5400
paxifv9 =	Pa	0,00	0,00
paxifv8 =	Pa	0,00	0,00
paxifv7 =	Pa	0,00	0,00
paxifv6 =	Pa	13 009,47	19 514,21
paxifv5 =	Pa	27 446,63	41 169,94
paxifv4 =	Pa	40 013,34	60 020,01
paxifv3 =	Pa	49 853,20	74 779,81
paxifv2 =	Pa	56 295,66	84 443,49
paxifv1 =	Pa	58 901,66	88 352,49

Pression hydrostatique

phydrov9 =	Pa	0,00	0,00
phydrov8 =	Pa	0,00	0,00
phydrov7 =	Pa	0,00	0,00
phydrov6 =	Pa	18 344,70	18 344,70
phydrov5 =	Pa	39 926,70	39 926,70
phydrov4 =	Pa	61 508,70	61 508,70
phydrov3 =	Pa	83 090,70	83 090,70
phydrov2 =	Pa	104 672,70	104 672,70
phydrov1 =	Pa	126 254,70	126 254,70

Détermination et vérification des contraintes circonférentielle dans la robe

SCv9 =	MPa	0,00 -	0,00 -
SCv8 =	MPa	0,00 -	0,00 -
SCv7 =	MPa	0,00 -	0,00 -
SCv6 =	MPa	40,47 Acceptable	43,24 Acceptable
SCv5 =	MPa	82,61 Acceptable	85,54 Acceptable
SCv4 =	MPa	120,13 Acceptable	119,27 Acceptable
SCv3 =	MPa	152,69 Acceptable	148,79 Acceptable
SCv2 =	MPa	180,11 Acceptable	177,54 Acceptable
SCv1 =	MPa	81,95 Acceptable	81,68 Acceptable

Exemple Réservoir de stockage D = 12,50 m

Page 9

Masses effectives et centre d'action des masses et Effort tranchant Q et Moments de renversement

Valeurs calculées par
Eléments finis
[84] modèle 1Valeurs calculées par
Eléments finis
[84] modèle 2AXI

Réservoir "rigide"

		CODRES 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m
m_imp_t/mliq =	-	0,773		
m_imp_tr =	kg	1,25E+06		
mconv/mliq =	-	0,239		
mconv =	kg	3,87E+05		
Q =	N	7,89E+06	6,60E+06	5,60E+06
h_imp_tr/H =	-	0,402		
h_imp_tr =	m	4,828		
hconv_r/H =	-	0,732		
hconv_r =	m	8,789		
MrΣm =	N.m	3,87E+07	3,18E+07	4,01E+07

Exemple Réservoir de stockage D = 12,50 m Page 10

Vérification de la résistance vis-à-vis du moment de renversement et stabilité de la robe

Réservoir non ancré CODRES NF EN 1998-4 NF EN 1998-4
12,50 m 12,50 m 12,50 m

Epaisseur de la tôle marginale ou de la bordure annulaire au droit de la robe

etf = mm 9,00 9,00 9,00
Rpt = MPa 355,00 S355JR 355,00 355,00

Force résistante générée par le produit contenu

densité réduite = 0,8800
wLcalculé = N 55 104,70
wLmax = N 26 400,00
wL = N 26 400,00
/m de circonf.

Longueur minimum de la tôle marginale ou de la bordure annulaire au droit de la robe

_bordure_min = mm 348,80

Poids de la robe du réservoir et du toit

wT = N 8 445,97 8 445,97 8 445,97
/m de circonf.

Effort de soulèvement du à la pression interne

25,00 mbar

wP = N 7 812,50 7 812,50 7 812,50
/m de circonf.

Rapport RA RA = 9,7847
Note 1

Note 1 : Le réservoir n'est pas stable. L'épaisseur des tôles du fond au droit de la robe doit être augmentée ou le réservoir doit être ancré.

Force longitudinale de compression maximale dans la robe du réservoir non ancré

w_l,c,v1 = N [redacted] [redacted] [redacted]
/m de circonf.

Force longitudinale de compression maximale dans la robe du réservoir ancré

w_l,c,v1 = N 324 696,11 268 089,99 335 148,69
/m de circonf.

Contrainte longitudinale de compression maximale dans la robe du réservoir non ancré

sigma_l,c,v1 = MPa [redacted] [redacted] [redacted]

Contrainte longitudinale de compression maximale dans la robe du réservoir ancré

sigma_l,c,v1 = MPa 21,65 17,87 22,34

Exemple Réservoir de stockage D = 12,50 m

Page 11

Vérification de la résistance vis-à-vis du moment de renversement et stabilité de la robe

Réservoir non ancré	CODRES 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m
---------------------	-------------------	-------------------------	-------------------------

Evaluation de la longueur soulevée

$\tau =$	r/R			
téta étoile =				
k =				
Coeff_Mr =				
Mr =				
l_soul =				

Contrainte longitudinale dans la robe

Coeff_sol =			
Ajustement =			
w_s =			
sigma_l,c,vl =	MPa		

Contrainte radiale dans le fond

P_fond =	MPa			
sigma_r,fond =	MPa			
Coeff_rad =				
sigma_r,adm =	MPa			

Evaluation de la hauteur de soulèvement

Nx =	N/mm			
h_soul =	mm			

Evaluation de la "rotation plastique" à la liaison Robe-Fond

rot_plastique =			
-----------------	--	--	--

Exemple Réservoir de stockage D = 12,50 m Page 12

Vérification de la résistance vis-à-vis du moment de renversement et stabilité de la robe

Réservoir non ancré CODRES NF EN 1998-4 NF EN 1998-4
 12,50 m 12,50 m 12,50 m

Contrainte longitudinale de compression admissible maximale

Pour information : Contrainte critique pour un cylindre en compression axiale

$$\sigma_{c,f} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left(\frac{t}{R} \right)$$

"coeff sécurité" = 3 3 3
 sigma_crit = MPa 96,80 96,80 96,80

		<i>Instabilité élastique</i>		
		1,0	1,0	1,0 "qualité"
a =		1,225	1,225	1,225
delta/e =		1,519	1,519	1,519
1,24 delta/e =		0,207	0,207	0,207
sigma_b =		2	1	1
"coeff sécurité" =		145,255	290,509	288,000
sigma_c,f =		11,805	5,903	5,954
lambda2 =	<i>"pmin"</i>	30,071	60,143	59,623
sigma_0 =		0,151	0,133	0,138
pmax/min =		0,433	0,191	pbarre = 0,199293
p_b =		100,150	187,896	186,716
sigma_p =		108,720	207,392	sigma_m = 205,960
sigma_l,c,vl,ie =				
		<i>Instabilité élastoplastique</i>		
r =		1,042	1,042	1,042
pmax/min =	<i>"pmax"</i>	0,190	0,189	0,138
pR/sfy =		0,223	0,222	0,162
sigma_l,c,vl,iep =		90,189	180,504	sigma_m = 183,269

Rappel des valeurs des contraintes longitudinale de compression maximale dans la robe calculées précédemment et évaluation de ces contraintes

"Formulation originale"

sigma_l,c,vl = MPa **21,65**
 Acceptable

"Formulation NZ [69]"

sigma_l,c,vl = MPa	Coefficient 2,5	Coefficient 2,5
	44,68	55,86
	Acceptable	Acceptable

Exemple	Réservoir de stockage D = 12,50 m				Page	13
		CODRES 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m		
Vérification des ancrages						
<i>Nombre d'ancrages</i>						
na =		16	16	16		
dia =	mm	55,00	50,00	55,00		
Rpt_ancrage =	MPa	355,00	355,00	355,00		
fseisme_a =	MPa	355,00	1,00	355,00	1,00	355,00
wba =	N /m de circonf.	307 804,18	251 198,06	318 256,75		
Fba =	N	755 465,12	616 532,79	781 119,59		
sigma_a =	MPa	317,98 Acceptable	314,00 Acceptable	328,78 Acceptable		
Vérification de l'absence de glissement						
Masse totale =	kg	1,66E+06	1,66E+06	1,66E+06		
Coefficient de frottement =		0,4	0,4	0,4		
Effort résistant =	N	6,47E+06	6,47E+06	6,52E+06		
		Glissement possible	Glissement possible	Pas de glissement		
Hauteur de vague						
0,837 / 1		1	1			
hv_conv =	m	0,190	0,190			

Exemple Réservoir de stockage D = 28,10 m Page 2

CODRES **NF EN 1998-4** **NF EN 1998-4**
12,50 m **12,50 m** **12,50 m**

Hauteurs de produit aux différents niveaux auxquels les contraintes circonférentielles sont calculées

hcalcul =	mm	300,00	300,00	300,00
hc_liq_v9 =	mm	0,00	0,00	0,00
hc_liq_v8 =	mm	0,00	0,00	0,00
hc_liq_v7 =	mm	0,00	0,00	0,00
hc_liq_v6 =	mm	1 700,00	1 700,00	1 700,00
hc_liq_v5 =	mm	3 700,00	3 700,00	3 700,00
hc_liq_v4 =	mm	5 700,00	5 700,00	5 700,00
hc_liq_v3 =	mm	7 700,00	7 700,00	7 700,00
hc_liq_v2 =	mm	9 700,00	9 700,00	9 700,00
hc_liq_v1 =	mm	11 700,00	11 700,00	11 700,00
hliqv =	mm	12 000,00	12 000,00	12 000,00

Masse volumique et densité du produit stocké

rholiq =	kg/m3	1 100,00	1 100,00	1 100,00
densliq =		1,100	1,100	1,100

Pression de service

p =	mbar	25,00	25,00	25,00
-----	------	-------	-------	-------

Accélération de la gravité

g =	m/s2	9,81	9,81	9,81
-----	------	------	------	------

Limite d'élasticité des matériaux constituant les différentes viroles

		NF EN 10025-2		
Rpt9 =	MPa	0,00 -	0,00	0,00
Rpt8 =	MPa	0,00 -	0,00	0,00
Rpt7 =	MPa	0,00 -	0,00	0,00
Rpt6 =	MPa	235,00 S235JR	235,00	235,00
Rpt5 =	MPa	235,00 S235JR	235,00	235,00
Rpt4 =	MPa	235,00 S235JR	235,00	235,00
Rpt3 =	MPa	235,00 S235JR	235,00	235,00
Rpt2 =	MPa	235,00 S235JR	235,00	235,00
Rpt1 =	MPa	355,00 S355JR	355,00	355,00

Contrainte admissible des matériaux constituant les différentes viroles

Coeff_Rp =		0,8889	0,8889	0,8889
fséisme9 =	MPa	0,00	0,00	0,00
fséisme8 =	MPa	0,00	0,00	0,00
fséisme7 =	MPa	0,00	0,00	0,00
fséisme6 =	MPa	208,89	208,89	208,89
fséisme5 =	MPa	208,89	208,89	208,89
fséisme4 =	MPa	208,89	208,89	208,89
fséisme3 =	MPa	208,89	208,89	208,89
fséisme2 =	MPa	208,89	208,89	208,89
fséisme1 =	MPa	315,56	315,56	315,56

Exemple	Réservoir de stockage D = 28,10 m			Page	3
		CODRES 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m	
<i>Module d'élasticité des matériaux</i>					
E =	Pa	2,00E+11	2,00E+11	2,00E+11	
<i>Coefficient de Poisson des matériaux</i>					
nu =		0,30	0,30	0,30	
<i>Masse volumique des matériaux</i>					
rhoacier =	kg/m3	7 800,00	7 800,00	7 800,00	
<i>Masse de la robe du réservoir et position du centre de gravité</i>					
mpr =	kg	27 567,48	27 567,48	27 567,48	
hpr =	m	4,16	4,16	4,16	
<i>Masse du toit du réservoir et position du centre de gravité</i>					
Rpt_toit =	MPa	NF EN 10025-2 S235JR 235,00	235,00	235,00	
mtr =	kg	6 225,00	6 225,00	6 225,00	
Type de toit =		1/5 0,2	1/5 0,2	0,2	
htr =	m	12,39	12,39	12,39	
<i>Masse du fond du réservoir</i>					
Rpt_fond =	MPa	NF EN 10025-2 S235JR 235,00	235,00	235,00	
mfr =	kg	7,00 6 700,43	7,00 6 700,43	7,00 6 700,43	
<i>Masse du produit contenu</i>					
mliq =	kg	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06	

Exemple	Réservoir de stockage D = 28,10 m		Page 4	
	CODRES 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m	
Périodes / Fréquences propres				
Mode impulsif				
Cimp =	6,19	Valeurs calculées par Eléments finis [84] modèle 1	Valeurs calculées par Eléments finis [84] modèle 2AXI	
Timp = s	0,1472	0,2190	0,2190	
Fimp = Hz	6,7922	4,5662	4,5662	
Mode convectif				
Cconv =	3,28			
Tconv = s	3,6994	3,6930	3,6940	
Fconv = Hz	0,2703	0,2708	0,2707	
Mode axisymétrique				
Caxi =	2,61	2,64		
Taxi = s	0,1326	0,1335	0,1380	
Faxi = Hz	7,5421	7,4922	7,2464	

Exemple Réservoir de stockage D = 28,10 m Page 5

Spectre de réponse élastique		Horizontal			Zone de sismicité	3	
					Sol	A	
					Amortissement	5,00	%
g _{hT5%} m/s ²	g _{hg} m/s ²	n	Csol	T s			
2,4200	2,42	1,00	1,00	0,00			
6,0500	2,42	1,00	1,00	0,03	TB		
6,0500	2,42	1,00	1,00	0,0000	Timp_12,50		
6,0500	2,42	1,00	1,00	0,20	TC		
0,4840	2,42	1,00	1,00	2,50	TD		
0,1891	2,42	1,00	1,00	4,00			

Spectre de réponse élastique		Horizontal			Zone de sismicité	1	
					Sol	A	
					Amortissement	0,50	%
g _{hT0,5%} m/s ²	g _{hg} m/s ²	n	Csol	T s			
2,4200	2,42	1,35	1,00	0,00			
8,1578	2,42	1,35	1,00	0,03	TB		
8,1578	2,42	1,35	1,00	0,20	TC		
0,6526	2,42	1,35	1,00	2,50	TD		
0,6526	2,42	1,35	1,00	2,50			
0,2980	2,42	1,35	1,00	3,6994	Tconv_12,50		
0,2549	2,42	1,35	1,00	4,00			
0,2014	2,42	1,35	1,00	4,50	TE		
				10,00	TF		

Spectre de réponse élastique		Vertical			Zone de sismicité	1	
					Sol	A	
					Amortissement	5,00	%
g _{hT5%} m/s ²	g _{hg} m/s ²	n		T s			
2,1800	2,18	1,00		0,00			
6,5400	2,18	1,00		0,03	TB		
6,5400	2,18	1,00		0,0000	Taxi_12,50		
6,5400	2,18	1,00		0,20	TC		
0,5232	2,18	1,00		2,50	TD		
0,2044	2,18	1,00		4,00			

Exemple Réservoir de stockage D = 28,10 m Page 6

CODRES
12,50 m

NF EN 1998-4
12,50 m

NF EN 1998-4
12,50 m

Note = Les calculs ci-après sont réalisés sans tenir compte d'une éventuelle interaction sol/structure (voir remarque ci-dessous) et sans coefficients de réduction

Accélération horizontale maximale du sol

gsolhmax =	g	0,2467	0,2467
	m/s ²	2,4200	2,4200

Accélération horizontale spectrale impulsive

gimp =	g	0,6167	0,5301
	m/s ²	6,0500	5,2000

Accélération horizontale spectrale convective

gconv =	g	0,0304	0,0304
	m/s ²	0,2980	0,2980

Accélération verticale maximale du sol

gsolvmax =	g	0,2222	0,2222
	m/s ²	2,1800	2,1800

Accélération verticale spectrale

gv =	g	0,6667	0,6667
	m/s ²	6,5400	6,5400

Exemple Réservoir de stockage D = 28,10 m Page 7

CODRES NF EN 1998-4 NF EN 1998-4
12,50 m 12,50 m 12,50 m

Pressions appliquées à la robe

Contribution de la composante horizontale du séisme

Participation du mode impulsif

Lambda =		0,7095	1,0000
pimpv9 =	Pa	0,00	0,00
pimpv8 =	Pa	0,00	0,00
pimpv7 =	Pa	0,00	0,00
pimpv6 =	Pa	14 599,11	15 047,47
pimpv5 =	Pa	28 047,32	26 597,78
pimpv4 =	Pa	37 466,10	30 554,64
pimpv3 =	Pa	42 855,46	31 586,51
pimpv2 =	Pa	44 268,59	33 330,27
pimpv1 =	Pa	44 268,59	34 756,92

Participation du mode convectif

mu =		3,5273	1,841
pconvv9 =	Pa	0,00	0,00
pconvv8 =	Pa	0,00	0,00
pconvv7 =	Pa	0,00	0,00
pconvv6 =	Pa	778,16	1 041,08
pconvv5 =	Pa	434,54	580,61
pconvv4 =	Pa	245,47	327,54
pconvv3 =	Pa	143,70	191,47
pconvv2 =	Pa	93,05	123,81
pconvv1 =	Pa	75,49	100,36

Contribution de la composante verticale du séisme

Comportement d'ensemble ("rigide")

		2,1800	2,1800
paxirv9 =	Pa	0,00	0,00
paxirv8 =	Pa	0,00	0,00
paxirv7 =	Pa	0,00	0,00
paxirv6 =	Pa	4 076,60	4 076,60
paxirv5 =	Pa	8 872,60	8 872,60
paxirv4 =	Pa	13 668,60	13 668,60
paxirv3 =	Pa	18 464,60	18 464,60
paxirv2 =	Pa	23 260,60	23 260,60
paxirv1 =	Pa	28 056,60	28 056,60

Exemple Réservoir de stockage D = 28,10 m Page 8

CODRES NF EN 1998-4 NF EN 1998-4
12,50 m 12,50 m 12,50 m

Pressions appliquées à la robe (suite)

Contribution de la composante verticale du séisme (suite)

Participation du mode axisymétrique

F =		1,2567	1,2567
gamma dyn. =		4,3600	6,5400
paxifv9 =	Pa	0,00	0,00
paxifv8 =	Pa	0,00	0,00
paxifv7 =	Pa	0,00	0,00
paxifv6 =	Pa	13 009,47	19 514,21
paxifv5 =	Pa	27 446,63	41 169,94
paxifv4 =	Pa	40 013,34	60 020,01
paxifv3 =	Pa	49 853,20	74 779,81
paxifv2 =	Pa	56 295,66	84 443,49
paxifv1 =	Pa	58 901,66	88 352,49

Pression hydrostatique

phydrov9 =	Pa	0,00	0,00
phydrov8 =	Pa	0,00	0,00
phydrov7 =	Pa	0,00	0,00

SCv9 =	MPa	70,77 Acceptable	70,27 Acceptable
SCv5 =	MPa	82,61 Acceptable	85,54 Acceptable
SCv4 =	MPa	120,13 Acceptable	119,27 Acceptable
SCv3 =	MPa	152,69 Acceptable	148,79 Acceptable
SCv2 =	MPa	180,11 Acceptable	177,54 Acceptable
SCv1 =	MPa	81,95 Acceptable	81,68 Acceptable

Exemple Réservoir de stockage D = 28,10 m

Page 9

Masses effectives et centre d'action des masses et Effort tranchant Q et Moments de renversement

Valeurs calculées par
Eléments finis
[84] modèle 1Valeurs calculées par
Eléments finis
[84] modèle 2AXI

Réservoir "rigide"

		CODRES 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m
m_imp_t/mliq =	-	0,773		
m_imp_tr =	kg	1,25E+06		
mconv/mliq =	-	0,239		
mconv =	kg	3,87E+05		
Q =	N	7,89E+06	6,60E+06	5,60E+06
h_imp_tr/H =	-	0,402		
h_imp_tr =	m	4,828		
hconv_r/H =	-	0,732		
hconv_r =	m	8,789		
MrΣm =	N.m	3,87E+07	3,18E+07	4,01E+07

Exemple Réservoir de stockage D = 28,10 m Page 10

Vérification de la résistance vis-à-vis du moment de renversement et stabilité de la robe

Réservoir non ancré	CODRES 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m
---------------------	-------------------	-------------------------	-------------------------

Epaisseur de la tôle marginale ou de la bordure annulaire au droit de la robe

etf =	mm	9,00	9,00	9,00
Rpt =	MPa	355,00 S355JR	355,00	355,00

Force résistante générée par le produit contenu

densité réduite =		0,8800		
wLcalculé =	N	55 104,70		
wLmax =	N	26 400,00		
wL =	N	26 400,00		
	/m de circon.			

Longueur minimum de la tôle marginale ou de la bordure annulaire au droit de la robe

_bordure_min =	mm	348,80		
----------------	----	--------	--	--

Poids de la robe du réservoir et du toit

wT =	N	8 445,97	8 445,97	8 445,97
	/m de circon.			

Effort de soulèvement du à la pression interne 25,00 mbar

wP =	N	7 812,50	7 812,50	7 812,50
	/m de circon.			

Rapport RA	RA =	9,7847 Note 1		
------------	------	------------------	--	--

Note 1 : Le réservoir n'est pas stable. L'épaisseur des tôles du fond au droit de la robe doit être augmentée ou le réservoir doit être ancré.

Force longitudinale de compression maximale dans la robe du réservoir non ancré

w_l,c,v1 =	N			
	/m de circon.			

Force longitudinale de compression maximale dans la robe du réservoir ancré

w_l,c,v1 =	N	324 696,11	268 089,99	335 148,69
	/m de circon.			

Contrainte longitudinale de compression maximale dans la robe du réservoir non ancré

sigma_l,c,v1 =	MPa			
----------------	-----	--	--	--

Contrainte longitudinale de compression maximale dans la robe du réservoir ancré

sigma_l,c,v1 =	MPa	21,65	17,87	22,34
----------------	-----	-------	-------	-------

Exemple Réservoir de stockage D = 28,10 m Page 11

Vérification de la résistance vis-à-vis du moment de renversement et stabilité de la robe

Réservoir non ancré CODRES 12,50 m NF EN 1998-4 12,50 m NF EN 1998-4 12,50 m

Evaluation de la longueur soulevée

$\tau =$	r/R			
téta étoile =				
k =				
Coeff_Mr =				
Mr =				
$l_{soul} =$				

Contrainte longitudinale dans la robe

Coeff_sol =			
Ajustement =			
$w_s =$			
$\sigma_{l,c,vl} =$	MPa		

Contrainte radiale dans le fond

$P_{fond} =$	MPa			
$\sigma_{r,fond} =$	MPa			
Coeff_rad =				
$\sigma_{r,adm} =$	MPa			

Evaluation de la hauteur de soulèvement

$N_x =$	N/mm			
$h_{soul} =$	mm			

Evaluation de la "rotation plastique" à la liaison Robe-Fond

rot_plastique =			
-----------------	--	--	--

Exemple Réservoir de stockage D = 28,10 m Page 12

Vérification de la résistance vis-à-vis du moment de renversement et stabilité de la robe

Réservoir non ancré CODRES 12,50 m NF EN 1998-4 12,50 m NF EN 1998-4 12,50 m

Contrainte longitudinale de compression admissible maximale

Pour information : Contrainte critique pour un cylindre en compression axiale $\sigma_{c,f} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left(\frac{t}{R} \right)$

"coeff sécurité" = 3
 sigma_crit = MPa 96,80 96,80 96,80

Instabilité élastique

	1,0	1,0	1,0 "qualité"
a =	1,225	1,225	1,225
delta/e =	1,519	1,519	1,519
1,24 delta/e =	0,207	0,207	0,207
sigma_b =	2	1	1
sigma_b =	145,255	290,509	288,000
"coeff sécurité" =	11,805	5,903	5,954
sigma_c,f =	30,071	60,143	59,623
lambda2 = "pmin"	0,151	0,133	0,138
sigma_0 =	0,433	0,191	pbarre = 0,199293
pmax/min =	100,150	187,896	186,716
p_b =	108,720	207,392	sigma_m = 205,960

Instabilité élastoplastique

r =	1,042	1,042	1,042
pmax/min = "pmax"	0,190	0,189	0,138
pR/sfy =	0,223	0,222	0,162
sigma_l,c,v1,iep =	90,189	180,504	sigma_m = 183,269

Rappel des valeurs des contraintes longitudinale de compression maximale dans la robe calculées précédemment et évaluation de ces contraintes

"Formulation originale"

sigma_l,c,v1 = MPa 21,65
 Acceptable

"Formulation NZ [69]"

	Coefficient	Coefficient
	2,5	2,5
sigma_l,c,v1 = MPa	44,68	55,86
	Acceptable	Acceptable

Exemple	Réservoir de stockage D = 28,10 m			Page	13
		CODRES 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m	NF EN 1998-4 12,50 m	
Vérification des ancrages					
<i>Nombre d'ancrages</i>					
na =		16	16	16	
dia =	mm	55,00	50,00	55,00	
Rpt_ancrage =	MPa	355,00	355,00	355,00	
fseisme_a =	MPa	355,00	1,00	355,00	1,00
wba =	N /m de circonf.	307 804,18	251 198,06	318 256,75	
Fba =	N	755 465,12	616 532,79	781 119,59	
sigma_a =	MPa	317,98 Acceptable	314,00 Acceptable	328,78 Acceptable	
Vérification de l'absence de glissement					
Masse totale =	kg	1,66E+06	1,66E+06	1,66E+06	
Coefficient de frottement =		0,4	0,4	0,4	
Effort résistant =	N	6,47E+06	6,47E+06	6,52E+06	
		Glissement possible	Glissement possible	Pas de glissement	
Hauteur de vague					
0,837 / 1		1	1		
hv_conv =	m	0,190	0,190		

5 - RÉSERVOIRS CYLINDRIQUES VERTICAUX À FOND PLAT POSES AU SOIL OU INSTALLÉS SUR UNE INFRASTRUCTURE DESTINÉS AU STOCKAGE DE PRODUITS LIQUIDES À UNE TEMPÉRATURE DE SERVICE SUPÉRIEURE OU ÉGALE À LA TEMPÉRATURE AMBIANTE

VÉRIFICATION DE LA RÉSISTANCE AU SÉISME À PARTIR D'UNE MODÉLISATION NUMÉRIQUE (MODÈLES ÉLÉMENTS FINIS)

5.1 - Introduction

Le présent chapitre propose une méthodologie de portée générale pour la vérification de la résistance au séisme des réservoirs de stockage cylindriques verticaux à partir de calculs numériques.

Note : D'autres procédures permettant de prendre en compte le comportement non-linéaire des réservoirs peuvent être utilisées. Notamment une analyse statique en poussée progressive (Pushover) peut être utilisée [9a], [61], [76]. De même, le présent guide n'exclut pas la possibilité de réaliser des calculs dynamiques linéaires ou non linéaires avec prise en compte du couplage fluide-structure.

Les présentes recommandations concernent les éléments constituant la robe, le fond, la bordure annulaire éventuelle, le toit, la cornière de rive, ainsi que le cas échéant, la charpente, les poteaux et les ancrages des réservoirs cylindriques verticaux à fond plat.

Note 1 : Il est recommandé que les tuyauteries connectées au réservoir présentant une rigidité significative vis-à-vis de ce dernier, soient prises en compte dans les calculs.

Note 2 : Les composants et équipements de masse faible peuvent être négligés.

La présente méthodologie permet (sans être pour autant d'application obligatoire) de traiter les cas non couverts par les règles de dimensionnement et les calculs analytiques des référentiels techniques conventionnels [20], [21], [25], [26]. De plus, à l'initiative du Fabricant ou à la demande du Donneur d'ordre, la présente méthodologie peut être utilisée en lieu et place de ces règles de dimensionnement et de ces calculs analytiques. Il est rappelé toutefois que ces calculs numériques ne conduiront pas forcément à un dimensionnement ou des réparations plus économiques.

5.2 - Modèle de calcul

5.2.1 - Épaisseurs

Pour les réservoirs neufs, les épaisseurs à prendre en compte dans le modèle éléments finis, sont les épaisseurs nominales surépaisseur de corrosion éventuelle déduite.

Pour les réservoirs en service, les épaisseurs à prendre en compte dans le modèle éléments finis, doivent être définies par l'Exploitant sur la base par exemple des recommandations références [21] et [26].

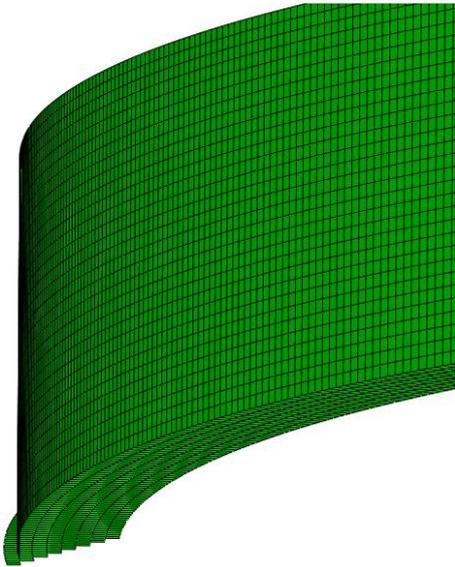
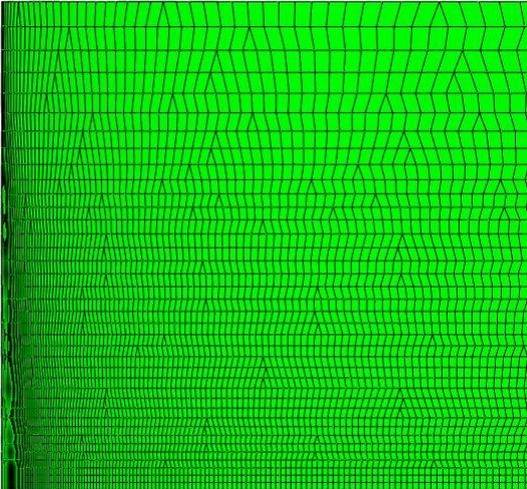
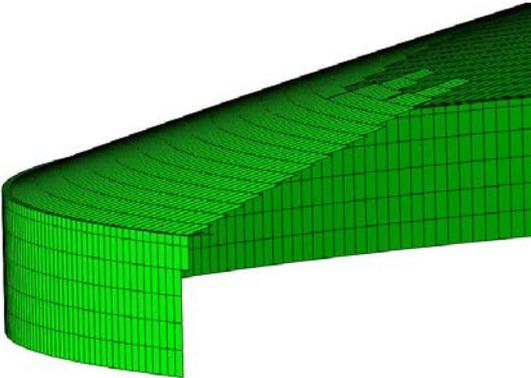
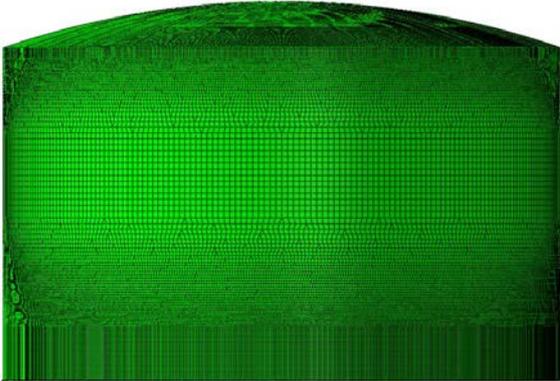
Note : L'application de ces recommandations est explicitée aux paragraphes 3.8.1.2, 3.8.1.5 et 3.8.2.3 du présent guide.

5.2.2 - Maillage

Il n'est pas nécessaire, pour ce type d'étude que la modélisation tienne compte des discontinuités mineures et des imperfections dues à la fabrication.

Le maillage du réservoir, dans l'hypothèse d'éléments « linéaires » doit être raffiné dans les zones les plus sensibles par exemple de la manière suivante :

- Pour la jonction entre la bordure annulaire ou la marginale et le fond et, en partant du fond, pour le premier 1/6 de la hauteur de la robe du réservoir : maillage de type quadrangle régulier de taille approximativement égale à $1/1000^{\text{ème}}$ du périmètre du réservoir pour la largeur et de dimension approximativement identique pour la hauteur.
- Puis pour le 1/6 de la hauteur de la robe du réservoir suivant : maillage de transition de taille approximativement entre $1/1000^{\text{ème}}$ et $1/500^{\text{ème}}$ du périmètre du réservoir pour la largeur et de dimension approximativement identique pour la hauteur.

	
<p align="center">Maillage de la liaison robe-fond</p>	<p align="center">Maillage de la robe entre 1/6 et 2/6 de la hauteur</p>
	
<p align="center">Maillage de la liaison robe toit</p>	<p align="center">Modèle complet</p>

5.2.3 - Loi de comportement, spectre de calcul et conditions aux limites

Au titre du présent guide deux possibilités sont envisagées :

- Calcul en élasticité linéaire sans prise en compte de l'éventuel soulèvement du fond. Pour ce calcul, un spectre réduit (spectres de calcul : voir § 3.3.3 du présent guide) peut être pris en compte.
- Calcul en élasto-plasticité avec prise en compte du soulèvement éventuel. Pour ce calcul, le spectre de réponse élastique doit être utilisé.

Pour ce dernier cas, les calculs élasto-plastiques avec contact doivent tenir compte des hypothèses et exigences suivantes :

- Le sol est supposé indéformable pour toutes les zones sur lesquelles repose le réservoir. Toutefois, sous réserve des justifications appropriées, une prise en compte détaillée du comportement du sol peut être envisagée.
- Le glissement éventuel du réservoir doit être possible (coefficient de frottement égale à 0,4 par exemple) et la zone de contact doit être suffisante pour prendre en compte ce glissement (environ 5% du diamètre).
- L'algorithme de calcul utilisé doit tenir compte des non linéarités géométriques (grandes transformations) [81], [82].

La loi de comportement retenue doit être, sauf justification particulière, une loi de comportement élasto-plastique par exemple telle que décrite ci-dessous :

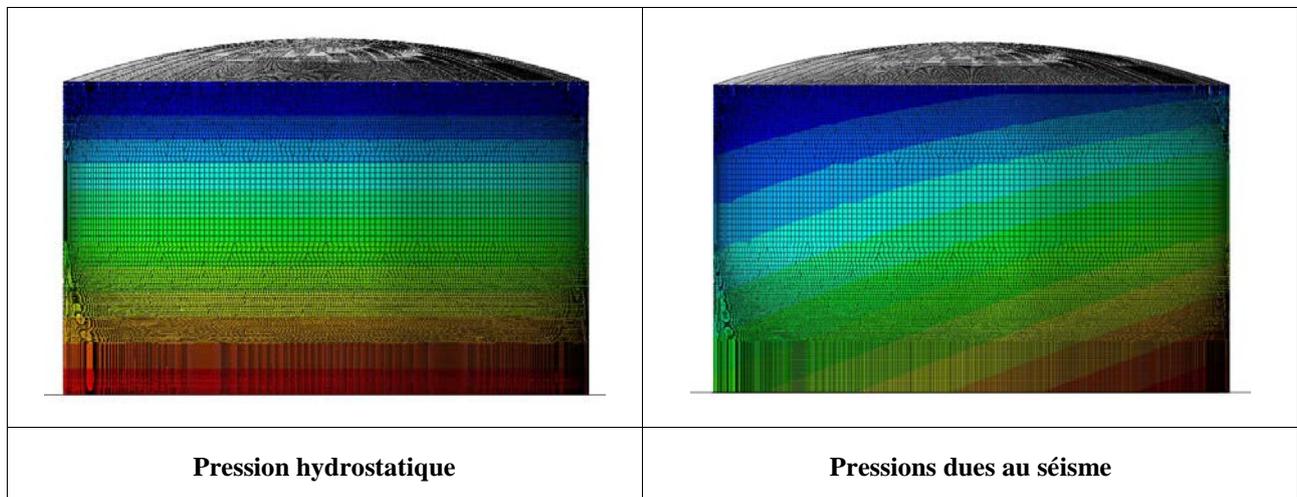
- Élastique linéaire en deçà de la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2% pour les aciers carbone/carbone manganèse, à 1% pour les aciers inoxydables et à 0,2% pour la plupart des nuances d'aluminium.
- De type courbe d'écroûissage au-delà de la limite conventionnelle d'élasticité ou à défaut parfaitement plastique [81], [82].

5.3 - Chargements

Les chargements correspondants à la situation étudiée, doivent être appliqués de façon proportionnellement croissante, en partant de zéro :

- Action de la pesanteur sur les parties métalliques du réservoir.
- Pression hydrostatique due au liquide (90% du niveau correspondant à l'alarme haute).
- Surpression éventuelle liée à l'exploitation du réservoir.
- Pressions dues au chargement sismique : Ces pressions doivent être déterminées conformément aux exigences du référentiel retenu pour la vérification au séisme. A cet effet il convient de se reporter au paragraphe 3.4 du présent guide qui définit l'ensemble des pressions à prendre en compte. Les formulations référencées dans ce paragraphe correspondent aux pressions appliquées à la génératrice ($\theta = 0$) représentée sur le schéma ci-dessous. La répartition spatiale de ces pressions doit être déterminée en affectant le coefficient $\cos\theta$ à l'ensemble des formules précitées.

Les chargements liés au séisme doivent être appliqués simultanément et de façon proportionnellement croissante, en partant de l'état correspondant à l'ensemble des chargements précédents.



5.4 - Analyse des résultats

5.4.1 - Dans le cas d'une étude avec un comportement du matériau élastique linéaire :

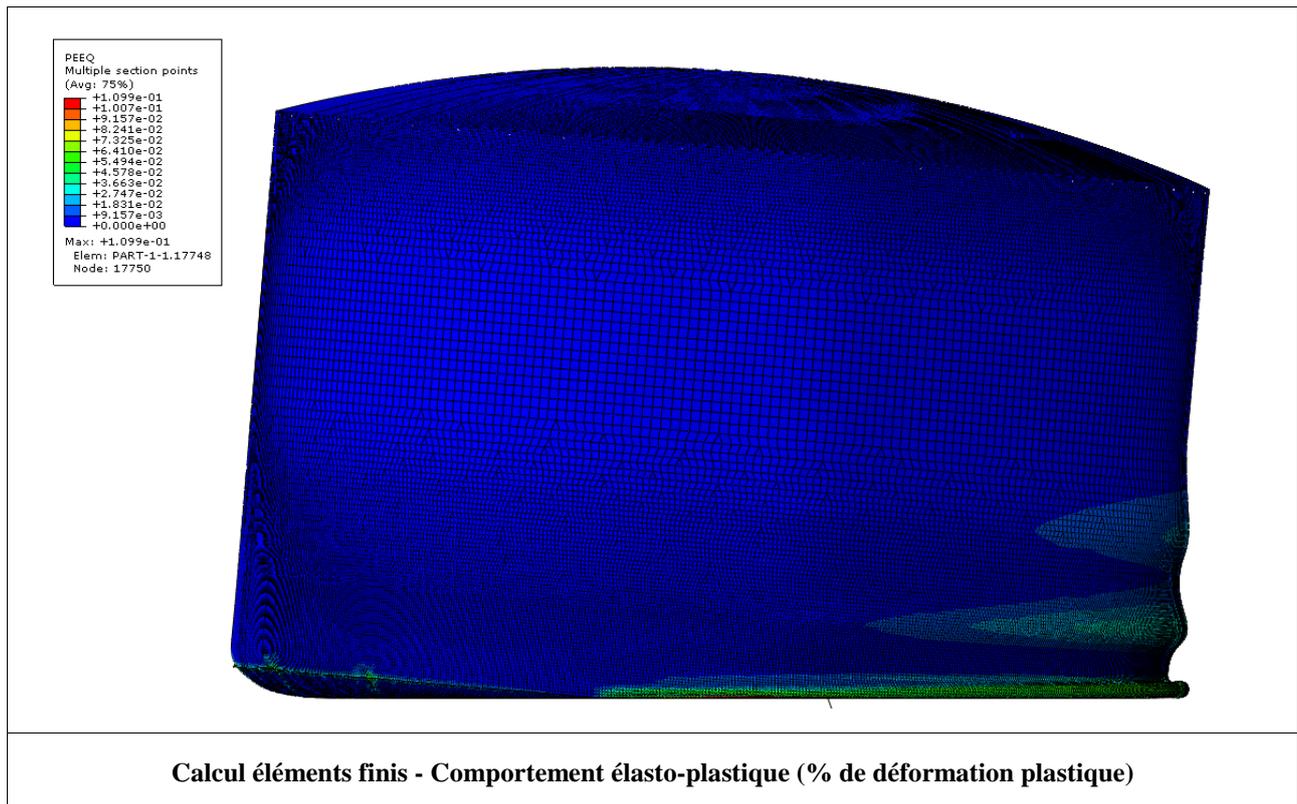
Les résultats obtenus doivent faire, au minimum, l'objet des évaluations ci-dessous :

- Pour la zone comprimée du réservoir, les contraintes, notamment au niveau de la liaison robe-fond, doivent faire l'objet des vérifications requises au paragraphe 3.8.1.5 du présent guide.
- En complément, les contraintes de traction notamment dans la zone diamétralement opposée à la zone comprimée, doivent être évaluées en fonction de la contrainte admissible définie par le référentiel retenu pour cette vérification.

4.4.2 - Dans le cadre d'une étude prenant en compte un comportement élasto-plastique du matériau :

Les résultats obtenus doivent faire, au minimum, l'objet des évaluations ci-dessous :

- Pour la zone comprimée du réservoir, les contraintes, notamment au niveau de la liaison robe-fond, doivent faire l'objet des vérifications requises au paragraphe 3.8.1.5 du présent guide.
- En complément, les déformations plastiques dans les zones en traction notamment dans la zone diamétralement opposée à la zone comprimée, doivent être limitées à 5% pour un acier carbone/carbone-manganèse et à 7,5% pour un acier inoxydable.



6 - RÉFÉRENCES

- [1] Arrêté du 10 mai 2000 relatif à la prévention des accidents majeurs impliquant des substances ou des préparations dangereuses présentes dans certaines catégories d'installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation
- [2a] Arrêté du 4 octobre 2010 relatif à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation (JO du 16 novembre 2010)
- [2b] Arrêté du 4 octobre 2010 + mise à jour de l'Arrêté du 19 juillet 2011 (JO du 5 août 2011)
- [2c] Projet de modification de l'arrêté du 4 octobre 2010
- [3] Décret n° 2010-1254 du 22 octobre 2010 relatif à la prévention du risque sismique (JO du 24 octobre 2010)
- [4] Décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010 portant délimitation des zones de sismicité du territoire français (JO du 24 octobre 2010)
- [5] Arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal » (JO du 24 octobre 2010)
- [6] Arrêté du 24 janvier 2011 fixant les règles parasismiques applicables à certaines installations classées (JO du 31 mars 2011) + (rectificatif) (JO du 9 avril 2011)
- [7] Projet d'arrêté relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux canalisations, tuyauteries, silos, réservoirs, structures hautes et élancées de la classe dite « à risque normal »
- [8] *Référence non utilisée*
- [9a] Guide « séisme » : Méthodologie générale
- [9b] Guide « séisme » : Réservoirs de stockage
- [9c] Guide « séisme » : Structures support
- [10] Décret n° 91-461 du 14 mai 1991 relatif à la prévention du risque sismique
- [11] Arrêtés du 10 mai 1993 fixant les règles parasismiques applicables aux installations soumises à la législation sur les installations classées
- [12] Arrêtés du 29 mai 1997 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la catégorie dite à *risque normal*.
- [13] à [14] *références non utilisées*
- [15a] NF EN 1998-1 (Septembre 2005) Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments
- [15b] NF EN 1998-1/NA (Décembre 2007) Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments - Annexe nationale à la NF EN 1998-1 : 2005 - Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments
- [16] à [19] *références non utilisées*
- [20a] API 650 Welded Steel Tanks for Oil Storage
11th Edition June 2007
- [20b] API 650 Welded Steel Tanks for Oil Storage
11th Edition Addendum 1, November 2008
- [20c] API 650 Welded Steel Tanks for Oil Storage
11th Edition Addendum 2, November 2009
- [20d] API 650 Welded Steel Tanks for Oil Storage
11th Edition Addendum 3, August 2011
- [20e] API 650 Welded Steel Tanks for Oil Storage
12th Edition, March 2013

- [21a] API 653 Tanks Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction Fourth Edition, April 2009
- [21b] API 653 Tanks Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction Fourth Edition Addendum 1, August 2010
- [21c] API 653 Tanks Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction Fourth Edition Addendum 2, January 2012
- [22] à [24] *références non utilisées*
- [25a] CODRES Division 1
Code de Construction des Réservoirs de Stockage Cylindriques Verticaux
- [25b] CODRES Division 1
Code de Construction des Réservoirs de Stockage Cylindriques Verticaux Edition 2007 Révision 12/09
- [25c] CODRES Division 1
Code de Construction des Réservoirs de Stockage Cylindriques Verticaux Edition 2007 Révision 06/11
- [26a] CODRES Division 2
Recommandations pour la Maintenance des Réservoirs de Stockage Cylindriques Verticaux Edition 2009
- [26b] CODRES Division 2
Recommandations pour la Maintenance des Réservoirs de Stockage Cylindriques Verticaux Edition 2009 & Révision 06/11
- [27] *Référence non utilisée*
- [28a] NF EN 1998-4 (Mars 2007) Eurocode 8 Calcul des structures pour leur résistance aux séismes
Partie 4 : Silos, réservoirs et canalisations
- [28b] NF EN 1998-4/NA (Janvier 2008) Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes -
Partie 4 : Silos, réservoirs et canalisations Annexe Nationale à la NF EN 1998-4 : 2007 Silos, réservoirs et canalisations
- [29] à [30] *Références non utilisées*
- [31a] NF EN 1991-4 Eurocode 1 Actions sur les structures Partie 4 : Silos et réservoirs Mai 2007
- [31b] NF EN 1991-4/NA Eurocode 1 Actions sur les structures Partie 4 : Silos et réservoirs Annexe nationale à la NF EN 1991-4 : 2007 Novembre 2007
- [32a] NF EN 14620-1 Décembre 2006 Conception et fabrication de réservoirs en acier à fond plat, verticaux cylindriques, construits sur site, destinés au stockage de gaz réfrigérés, liquéfiés dont les températures de service sont comprises entre 0°C et - 165 °C
- [33] NF EN 14015 Juin 2005 Spécification pour la conception et la fabrication de réservoirs en acier, soudés, aériens, à fond plat, cylindriques verticaux, construits sur site destinés au stockage des liquides à la température ambiante ou supérieure
- [34a] API 620 Design and Construction of Large Welded, Low-Pressure Storage Tanks
10th Edition February 2002 & Addendum June 2004
- [34b] API 620 Design and Construction of Large Welded, Low-Pressure Storage Tanks
11th Edition February 2008
- [34c] API 620 Design and Construction of Large Welded, Low-Pressure Storage Tanks
11th Edition Addendum 1, March 2009
- [34d] API 620 Design and Construction of Large Welded, Low-Pressure Storage Tanks
11th Edition Addendum 2, August 2010
- [34e] API 620 Design and Construction of Large Welded, Low-Pressure Storage Tanks
11th Edition Addendum 3, March 2012

- [35] NF EN 12285-1 Réservoirs en aciers fabriqués en atelier - Partie 1 : réservoirs horizontaux cylindriques à simple et double paroi pour le stockage enterré de liquides inflammables et non inflammables polluant l'eau
Septembre 2003
- [36] NF EN 12285-2 Réservoirs en acier fabriqués en atelier - Partie 2 : réservoirs horizontaux cylindriques à simple et double paroi pour le stockage aérien de liquides inflammables et non inflammables polluant l'eau
Août 2005
- [37] BS 2654 : 1989
Specification for manufacture of vertical steel welded non-refrigerated storage tanks with butt-welded shells for the petroleum industry
- [38] EEMUA
User's Guide to the Inspection, Maintenance and Repair of Aboveground Vertical Cylindrical Steel Storage tanks
Third Edition, Publication n°159: 2003 Volumes 1 & 2 and Corrigenda & Amendments N°1 February 2004 & Amendments N°2 January 2005
- [39] G.W. Housner
The dynamic behavior of water tanks
Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 53, No. 2, pp. 381-387. February, 1963
- [40] P.K.Malhotra, T.Wenk, M.Wieland
Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks
Structural Engineering International Mars2000
- [41] TID-7024 Chapter 6 Dynamic pressure on fluid containers
US Atomic Energy Commission, Nuclear Reactors and Earthquakes
Office of Technical Service, Washington DC, 1963
- [42] R.Souloumiac, DL.Nguyen
Analyse simplifiée des réservoirs à surface libre placés sur le sol et soumis à l'action des séismes
Deuxième colloque national AFPS, Avril 1989.
- [43] Fluid structure interaction effects on and dynamic response of pressure vessels and tanks subjected to dynamic loading
HSE Research Report RR527 - 2007
- [44] IITK-GSDMA Guidelines for seismic design of liquid storage tanks
Provisions with Commentary and Explanatory Examples
Indian Institute of Technology Kanpur October 2007
- [45] R.S. Wozniak, W.W.Mitchell
Basis of seismic design provisions for welded steel oil storage tank
API, Refining 43rd Midyear Meeting, Toronto Canada, May 1978
- [46] P.E.Myers
Above Ground Storage Tanks
Mc Graw Hill 1997

- [47] G.Gazetas
Analysis of machine foundation vibrations: state of the art
Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1983, Vol. 2, No. 1
- [48] M.A. Chung & T.J. Larkin
Nonlinear Foundation Response of Liquid Storage Tanks under Seismic Loading
2008 NZSEE Conference
- [49] N. Hosseinzadeh
Seismic Vulnerability Assessment of Steel Storage Tanks in Iranian Oil Refineries
International Disaster Reduction Conference
August 2008, DAVOS –Switzerland
- [50] S.A. Kilic & Z. Ozdemir
Damaged seals in tanks from sloshing of liquids
LS-DYNA Anwenderforum, Frankenthal 2007
- [51] P.K. Malhotra
Seismic Design of Liquid Storage Tanks
ASCE 2006
- [52] G. Johnson
Refinery Damage and Emergency Response
in the 1999 Izmit, Turkey Earthquake
- [53] T.Matsui
Sloshing and seismic response of a floating roof in a cylindrical liquid storage tank
2007 AEES Conference
- [54] Design recommendation for storage tanks and their supports with emphasis on seismic design
2010 Edition
Architectural Institute of Japan
- [55] R.C. Barros
Parametric study of the seismic response of anchored metallic tanks by international codes
The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 2008, Beijing, China
- [56] K. Meskouris, B. Holtschoppen, C. Butenweg,
J. Rosin
Seismic analysis of liquid storage tanks E
2nd INQUA-IGCP-567 International Workshop on Active Tectonics, Earthquake Geology, Archaeology and
Engineering, Corinth, Greece (2011)
- [57] F. Djaalali, H. Afra
Modèle dynamique équivalent pour le calcul sismique des réservoirs flexibles
Génie parasismiques et réponse dynamique des ouvrages, 5^{ième} Colloque National AFPS, Octobre 1999,
Cachan, France
- [58] G.W. Hunt, G.J. Lord, M.A. Peletier
Cylindrical shell buckling : A characterization of localization and periodicity
Discrete and continuous dynamical systems – Serie B Volume 3, Number 4, November 2003

- [59] B. Heubach
Seismic vulnerability and mitigation of water system components
Pacific Northwest Section AWWA Annual Conference, May 2008
- [60] P. Malhotra
Earthquake Induced Sloshing in Tanks with Insufficient Freeboard
Structural Engineering International 2006
- [61] P. Malhotra
Practical nonlinear seismic analysis of tanks
Earthquake Spectra, May 2000
- [62] A.S. Veletsos
Seismic Effects in Flexible Liquid Storage Tanks
5th World Conference on Earthquake Engineering 1974, Rome, Italy
- [63] D. Whittaker, R.D. Jury
Seismic design loads for storage tanks
12th World Conference on Earthquake Engineering, 2000
- [64] H.Nishi
Damage on hazardous materials facilities
Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, 2012, Tokyo, Japan
- [65] FEMA E-74
Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage
A Practical Guide, Fourth Edition January 2011
- [66] Rapport intermédiaire Opération a : synthèse sur les risques dus aux séismes, inondations, mouvements de terrain et tempêtes - accidentologie
INERIS Rapport d'étude n° DRA-13
Direction des Risques Accidentels Novembre 2001
- [67] T.W.Cooper
A study the performance of petroleum storage tanks during earthquakes, 1933-1995
NIST GCR 97-720
U.S Department of Commerce
Technology Administration
National institute of Standards and technology
- [68] API 625 Tank Systems for Refrigerated Liquefied Gas Storage
1st Edition, August 2010
- [69a] Seismic Design of Storage Tanks : 2009
Recommendations of a NZSEE Study Group on Seismic Design of Storage Tanks
November 2009
New Zealand Society for Earthquake Engineering
- [69b] M.J.N.Priestley, J.H.Wood and B.J.Davidson
Seismic Design of Storage Tanks
Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 19, No. 4, December 1986

- [70] Guide d'inspection et de maintenance des réservoirs aériens cylindriques verticaux
DT 94 UIC Octobre 2011
- [71] Guide d'inspection et de maintenance des réservoirs cryogéniques
DT 97 UIC Février 2012
- [72] The dynamic behaviour of liquids in moving containers
NASA SP-106
- [73] NF EN 1473 Avril 2007 Installations et équipements de gaz naturel liquéfié Conception des installations terrestres
- [74] BS 7777-4 : 1993 June 1993 Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service
Part 4 : Specification for the design and construction of single containment tanks for the storage of liquid oxygen, liquid nitrogen or liquid argon
- [75a] R.CHAMAYOU
Réservoirs métalliques pour stockage des liquides. Généralités.
Techniques de l'Ingénieur, Génie mécanique BM 6 590, 1997
- [75b] R.CHAMAYOU
Réservoirs métalliques : stockages des liquides à température ambiante.
Techniques de l'Ingénieur. Génie mécanique BM 6 591, 1997.
- [75c] R.CHAMAYOU
Réservoir métalliques : stockages des liquides à température contrôlée.
Techniques de l'Ingénieur. Génie mécanique BM 6 592, 1997.
- [76] AFPS Cahier Technique N° 26
Méthode en déplacement : Principe - Codification - Application
- [77] Analysis of unanchored liquid storage tanks under seismic loads
Thesis by R.PEEK Report No. EERL 86_01
California Institute of Technology 1986
- [78] Référentiels, normes et guides de bonnes pratiques pour le stockage de Gaz Naturel Liquéfié (GNL) -
Installations fixes
INERIS Rapport d'étude n° DRA-11-117405-03833C - 17/10/2011
- [79] *Référence non utilisée*
- [80] Y.GUILLON
Improved lumped mass analysis of large LNG tanks
Recent advances in earthquake engineering and structural dynamics V-7 1992
- [81] P. ROUGEE
Mécanique des grandes transformations
Mathématiques & Applications 25, Springer, 1997
- [82] P. LADEVEZE
Mécanique non linéaire des structures, Hermes, 1996
- [83] Forum de l'IPSI en Analyse de Structure
2001 Volume 25 N°1

- [84] TRACTEBEL Engineering GDF SUEZ
Test2 : Réservoir reposant sur une dalle en hauteur
ICPE-GTSUPPORT-MVT_TRANSFERE-002-0 Rev.2