

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
فرنسيس جانسون

École Nationale Supérieure des Travaux Publics

Francis Jeanson



Mémoire

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Matériaux & Structures

Thème

**DIMENSIONNEMENT ET ÉTUDE D'UN
RÉSERVOIR DE GAZ NATUREL
LIQUÉFIÉ**

Présenté par :

BENHAFID Ahmed.

Encadré par :

Dr. ADJADJ Mustapha

Directeur r&d AMENHYD SPA

Co-encadré par :

Dr. M. OUMOUSA

Enseignante à l'ENSTP

Promotion 2022 /2023



REMERCIEMENTS

Tout d'abord je remercie Dieu tout puissant de m'avoir guidé et donné la force et le courage nécessaires pour mener à bien cette thèse.

Un immense merci à mes très chers parents pour leur amour éternel, leurs grands sacrifices, leurs encouragements et leur soutien infailible tout au long de ce parcours.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers ma famille pour leur soutien indéfectible et pour avoir cru en moi.

Je tiens à remercier chaleureusement mon encadrant, M. ADJADJ Mustapha, pour sa disponibilité, ses encouragements, son expertise et sa foi en mes capacités, ainsi que ma co-encadrante Mme M.OUMOUSA pour ses enseignements, sa gentillesse et ses conseils.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers l'entreprise AMENHYD SPA pour leur accueil formidable, leur hospitalité sans pareille et leur assistance inestimable.

Un grand merci à Mme F. MEKIDECHE-CHAFI, directrice de l'ENSTP, pour ses précieux conseils, sa disponibilité, sa foi en moi et sa gentillesse.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à tous mes professeurs pour leur enseignement précieux et leur contribution à ma formation ainsi qu'au staff de l'administration qui nous ont accompagné durant notre cursus.

Mes remerciements vont également à Mlle MEZAACHE et Mme BOUAKAZ, directrice de la bibliothèque de l'ENSTP, pour leur assistance précieuse, leur disponibilité et leur amabilité.

Enfin, un grand merci à mes très chers amis pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de cette aventure.

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de cette incroyable aventure, à ma famille, à mes amis.

À mes professeurs et encadrants, pour leur expertise, leur patience et leur soutien infaillible.

À toute la promotion DMS 2022-2023, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables, à tous ceux qui ont croisé ma route et m'ont inspiré.

Et enfin, à moi-même, pour avoir persévéré et surmonté les obstacles sur le chemin de la réussite.

Cette thèse est le fruit d'années de travail, de dévouement et de passion. C'est avec gratitude que je la dédie à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation. Que cette dédicace soit le reflet de ma reconnaissance éternelle envers chacun d'entre vous. Merci du fond du cœur.

Abstract:

This dissertation examines the evolution of Liquefied Natural Gas (LNG) as an energy source, with a particular focus on LNG tank design. It explores the historical background of LNG, its role as a clean fuel, and the design standards for LNG tanks. Various types of tanks used in the LNG industry are presented, along with specific requirements related to tank capacity and environmental constraints. The study delves into the analysis of membrane stresses developed in the cylindrical section of the tank and pre-stressing. Additionally, it examines the effects of wind on LNG tanks by identifying areas of overpressure and depression. Finally, thermal analysis assesses temperatures and temperature gradients in different parts of the tank, emphasizing thermal insulation and the materials used.

Keywords: LNG, energy, reservoir, capacity, constraints, membrane, pre-stressed, cylinder, overpressure, depression, thermal, temperature, insulation.

ملخص

تستعرض هذه الأطروحة تطور الغاز الطبيعي المسال كمصدر للطاقة مع التركيز بشكل خاص على تصميم خزانات الغاز الطبيعي المسال. سنستكشف الخلفية التاريخية للغاز الطبيعي المسال ودوره كوقود نظيف والمعايير التصميمية لهذه الأنواع من خزانات. سيتم التعريف بمختلف أنواع خزانات الغاز الطبيعي المسال المعمول بها مع ذكر المتطلبات والمعايير المتعلقة بتحديد سعة الخزان. سنستكشف الدراسة كذلك على الاجهادات الظاهرة على مستوى الجزء الاسطواناني من الخزان وحساب الخرسانة مسبقة الاجهاد في هذا الجزء بالإضافة الى ذلك سنقوم بدراسة تأثير الرياح وتحديد مناطق الضغط الزائد والضغط الناقص. واخيرا سنقوم بدراسة حرارية للخزان مع تقييم تدفق الحرارة في كل جزء منهم مع التركيز على المواد المستخدمة للعزل الحراري

الكلمات المفتاحية: غاز طبيعي مسال، طاقة، خزان، سعة، اجهاد، غشاء، مسبق الاجهاد، اسطوانة، ضغط زائد، ضغط سلبي، حراري، درجة حرارة، عزل

Résumé :

Ce mémoire examine l'évolution du Gaz Naturel Liquéfié en tant que source d'énergie et se concentre sur la conception des réservoirs de GNL. Il explore l'historique du GNL, son rôle en tant que carburant propre et les normes de conception des réservoirs. Différents types de réservoirs utilisés dans l'industrie du GNL sont présentés, ainsi que les exigences spécifiques liées à la capacité du réservoir et aux contraintes environnementales. L'étude se penche sur l'étude des contraintes membranaires développées dans la partie cylindrique du réservoir et la précontrainte. De plus, elle examine les effets du vent sur les réservoirs de GNL, en identifiant les zones de surpression et de dépression. Enfin, l'analyse thermique évalue les températures et les gradients de température dans différentes parties du réservoir, en mettant l'accent sur l'isolation thermique et les matériaux utilisés.

Mots clés : GNL, énergie, réservoir, capacité, contraintes, membrane, précontrainte, cylindre, surpression, dépression, thermique, température, isolation.

LISTES DES TABLES

CHAPITRE I : HISTORIQUE, EVOLUTION DU GNL ET REGLEMENTATIONS.

CHAPITRE II : EMBLACEMENT DU PROJET & CONCEPTION DE LA SUPERSTRUCTURE.

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

Tableau A1 : Résultats des calculs des pertes instantanées et différées de précontraintes pour un câble 19T15s horizontal type.....60-63

Tableau A2 : Résultats des calculs des pertes instantanées et différées de précontraintes pour un câble 12T15s vertical type.....64-66

CHAPITRE IV : ETUDE AU VENT.

Tableau 4.1 : Catégorie du terrain du projet72

Tableau 4.2 : Résultats du calcul du coefficient de rugosité pour chaque bande73

Tableau 4.3 : Résultats du calcul de l'intensité de turbulence pour chaque bande74

Tableau 4.4 : Résultats du calcul du coefficient d'exposition pour chaque bande.....74

Tableau 4.5 : Les valeurs de $q_p(z_e)$ 75

Tableau 4.6 : Résultats de calcul de la pression dynamique du vent pour chaque bande.....78

Tableau 4.7 : Valeur des $C_{p,e}$ aux points A.B.C80

Tableau 4.8 : Résultats de calcul de la pression du vent appliquée en haut du réservoir81

CHAPITRE V : ÉTUDE THERMIQUE LINÉAIRE.

Table 5.1 : Propriétés thermiques et densité des matériaux d'isolation utilisés.....85

Table 5.2 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone courante du radier.....86

Table 5.3 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone périphérique du radier -Hiver-.....87

Table 5.4 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone périphérique du radier -été-.....88

Table 5.5 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone courante de la jupe -Hiver-.....89

Table 5.6 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone courante de la jupe -été-.....89

Table 5.7 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone d'épaississement de la jupe -Hiver-.....	91
Table 5.8 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone d'épaississement de la jupe -été-	92
Table 5.9 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone courante du dôme -été-.....	92
Table 5.10 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone courante du dôme -été-.....	93
Table 5.11 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone d'épaississement du dôme -Hiver-.....	94
Table 5.12 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone d'épaississement du dôme -été-.....	95

LISTES DES FIGURES

CHAPITRE I : HISTORIQUE, EVOLUTION DU GNL ET REGLEMENTATIONS.

Figure 1.1 : Chaîne traditionnelle d’approvisionnement GNL	04
Figure 1.2 : SS Methane Princess, 12th Oct 1964, Photo de la SIGTTO	07
Figure 1.3 : Exemple d’un Pool fire.....	12
Figure 1.4 : Différentes configurations d’un réservoir à confinement simple.....	13
Figure 1.5 : Différentes configurations d’un réservoir à confinement double.....	14
Figure 1.6 : Différentes configurations d’un réservoir à confinement intégral.....	15
Figure 1.7 : Natural Gas Atlas -SNAM- 2016	17

CHAPITRE II : EMLACEMENT DU PROJET & CONCEPTION DE LA SUPERSTRUCTURE.

Figure 2.1 : Vue satellite des réservoirs au sein du complexe GL-1K -Skikda-Juin 2023-	20
Figure 2.2 : Coté est du complexe GL-1K -Source KBR-	21
Figure 2.3 : Situation géographique de la wilaya de Skikda	21
Figure 2.4 : Classification sismique des wilayas d’Algérie -RPA 2003-	23
Figure 2.5 : Réseau routier de la wilaya de Skikda ainsi que ses frontières -Google Maps -...	23
Figure 2.6 : Morphologie générale du réservoir de type confinement intégral	24
Figure 2.7 : Niveaux de liquides et volumes. API-625 6.3	25
Figure 2.8 : Schéma de répartition des pieux forés sous le radier	28
Figure 2.9 : Section verticale type du réservoir GNL étudié.	29
Figure 2.10 : Section verticale de la jupe du réservoir	30
Figure 2.11 : Section vertical du model 3D complet du réservoir en béton	31
Figure 2.12 : Section vertical du model 3D sans pieux du réservoir en béton.....	31

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

Figure 3.1 : Résultat numérique du réservoir à vide	34
Figure 3.2 : Distribution verticale des contraintes circonférentielles sous poids propre	34
Figure 3.3 : Résultat numérique du réservoir soumis à une dépression de -5 mbarg	35
Figure 3.4 : Distribution verticale des contraintes circonférentielles sous effet de dépression.....	35
Figure 3.5 : Résultat numérique du réservoir soumis à une surpression de + 387.5 mbarg ...	36
Figure 3.6 : Distribution verticale des contraintes circonférentielles sous effet de surpression de +387.5 mbarg	36
Figure 3.7 : Résultat numérique du réservoir soumis à une surpression de + 310 mbarg	37
Figure 3.8 : Distribution verticale des contraintes circonférentielles avec +310 mbarg	37
Figure 3.9 : Résultat numérique du réservoir soumis à un cas de charge accidentel	38

Figure 3.10: Distribution verticale des contraintes circonférentielles en cas accidentel .	38
Figure 3.11: Résultat numérique du réservoir soumis à une surpression de +387.5 mbarg	39
Figure 3.12: Résultat numérique du réservoir soumis à une surpression de +310 mbarg	40
Figure 3.13: Dispositions des câbles horizontaux	44
Figure 3.14: Semi géométrie d'un câble horizontal type	45
Figure 3.15: Coupe type sur bossage en zone courante de la jupe et au niveau de la poutre annulaire.	46
Figure 3.16: Coupe type sur bossage en zone courante de la jupe et au niveau de la poutre annulaire	47
Figure 3.17: Détails sur les positions des points d'ancrages des câbles verticaux et leurs géométries au niveau du radier	48
Figure 3.18 : Détermination de la longueur intéressée par le recul d'ancrage pour un câble vertical type.	52
Figure 3.19 : Détermination de la longueur intéressée par le recul d'ancrage pour un câble horizontal type.	53
Figure 3.20 : Drying shrinkage of normal-weight concrete - BS-8110-2 fig.7.2	55
Figure 3.21 : Graphe de la fonction d'interpolation du retrait $\epsilon(t)$	56
Figure 3.22: Illustration des régions R1,R2 et R3	69

CHAPITRE IV : ETUDE AU VENT.

Figure 4.1 Géométrie de la section verticale simplifiée du réservoir.	72
Figure 4.2 : Résultats obtenus par simulation sur SolidWorks	75
Figure 4.3 : Distribution des $C_{p,e}$ dans la direction radiale	79
Figure 4.4 : Division des toitures en forme de calottes sphériques -RNV 2013-	79
Figure 4.5 : Coefficient $C_{p,e}$ pour toitures en dômes à base circulaire	80
Figure 4.6 : Distribution des $C_{p,e}$ sur le dôme	80

CHAPITRE V : ÉTUDE THERMIQUE LINÉAIRE.

Figure 5.1 : Section verticale type de la partie inférieure du réservoir	83
Figure 5.2 : Utilisation des matériaux d'isolation dans le cas d'un réservoir à confinement intégral – BS EN 14620-4 2006 ANNEX A-	84

TABLE DES MATIÈRES

<u>INTRODUCTION GÉNÉRIQUE :</u>	01
--	----

CHAPITRE I : HISTORIQUE, EVOLUTION DU GNL ET REGLEMENTATIONS.

1.1 Introduction :	03
1.2 Que-est-ce que le GNL ? :	03
1.3 Le GNL, une ressource essentielle pour l'économie mondiale :	04
1.4 L'Évolution Historique GNL de ses Débuts Prometteurs à l'Émergence d'une Industrie Mondiale :	05
1.5 L'Algérie, premier exportateur de GNL :	06
1.6 Normes et standards :	07
1.6.1 Historique des réglementations :	07
1.6.2 Standards et réglementations utilisées :	08
1.6.2.1 BS EN-14620 :	08
1.6.2.2 API 620:	09
1.6.2.3 API 625:	10
1.6.2.4 ACI 376:	10
1.6.2.5 NFPA 59A:	11
1.7 Définitions des différents types de réservoirs :	11
1.7.1 Système de réservoir à simple confinement :	12
1.7.2 Système de réservoir à double confinement :	13
1.7.3 Système de réservoir à confinement intégral :	15
1.8 Conclusion :	17

CHAPITRE II : EMPLACEMENT DU PROJET & CONCEPTION DE LA SUPERSTRUCTURE.

2.1 Introduction :	19
2.2 Le complexe GL-1K :	19
2.3 Le projet 'New LNG Train -Erected Field Tanks-':	19
2.4 La wilaya de Skikda :	21
2.4.1 Emplacement :	21
2.4.2 Population, climat et météo :	22
2.4.3 Sismicité du site :	22
2.4.4 Réseau routier :	23
2.5 Type de réservoir choisi pour le projet :	24
2.6 Dimensionnement de la superstructure du réservoir :	24
2.6.1 Détermination de la hauteur totale du réservoir interne :	25
2.6.1.1 Hauteur nette :	25
2.6.1.2 Hauteur minimale :	26
2.6.1.3 La hauteur totale :	26
2.6.2 Capacité géométrique maximale du réservoir primaire :	26
2.6.3 Détermination de la hauteur totale du réservoir secondaire :	26
2.6.3.1 Hauteur du liquide pour le dimensionnement du réservoir secondaire :	26

2.6.3.2 Hauteur du liquide maximale dans le réservoir secondaire :.....	27
2.6.3.3 La hauteur de la jupe du réservoir secondaire :.....	27
2.6.4 Capacité géométrique maximale du réservoir secondaire :.....	27
2.6.5 L'épaisseur de la jupe et du dôme :.....	27
2.6.6 Diamètre du dôme :.....	28
2.6.7 Dimensions de la poutre annulaire :.....	28
2.7 Description de l'infrastructure : (Radier et Pieux).....	28
2.8 Conclusion :.....	31

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

3.1 Introduction :.....	33
3.2 Hypothèses et considérations pour l'étude :.....	33
3.2a Hypothèses du logiciel Midas :	33
3.3 Etude de la Jupe et poutre annulaire du réservoir :.....	33
3.3.1 Dans la direction circonférentielle :.....	33
3.3.1.1 Scénario 1 :.....	34
3.3.1.2 Scénario 2 :.....	35
3.3.1.3 Scénario 3 :.....	37
3.3.1.4 Scénario 4 :.....	38
3.3.2 Dans la direction axiale :.....	39
3.3.2.1 Scénario 2 :.....	39
3.3.2.2 Scénario 3 :.....	40
3.4 Synthèse des résultats :.....	41
3.4.1 Dans la direction circonférentielle :.....	41
3.4.2 Dans la direction axiale :.....	41
3.5 Estimation du nombre de câbles de Précontraintes Horizontaux et verticaux :... ..	41
3.5.1 Câbles Horizontaux :.....	41
3.5.1.1 La poutre annulaire :.....	41
3.5.1.2 La jupe du réservoir :.....	42
3.5.2 Câbles Verticaux :.....	43
3.6 Géométrie des câbles horizontaux et verticaux :.....	43
3.7 Calcul de la Précontrainte :.....	49
3.7.1 Matériaux :.....	49
3.7.1.1 Béton :.....	49
3.7.1.1a Déformation élastique :.....	49
3.7.1.2 Aciers de précontrainte :.....	50
3.7.1.2a Torons :.....	50
3.7.1.2b Câbles :.....	50
3.7.2 Calcul des pertes instantanées :.....	51
3.7.2.1 Pertes par frottement :.....	51
3.7.2.2 Pertes par recul d'ancrage :.....	52
3.7.2.3 Raccourcissement élastique du béton :.....	53
3.7.3 Pertes dépendantes du temps (différées) :.....	54

3.7.3.1 Relaxation des aciers :	54
3.7.3.2 Retrait :	54
3.7.3.3 Fluage :	57
3.8 Discussion et vérification des résultats obtenus :	67
3.8.1 Câbles horizontaux 19T15s :	67
3.8.2 Câbles Verticaux 12T15s :	67
3.9 Répartitions des câbles horizontaux et verticaux :	67
3.9.1 Câbles horizontaux :	67
3.9.1.1 Dans la poutre annulaire :	67
3.9.1.2 Dans la jupe :	67
3.9.1.3 Vérification des contraintes :	69
3.9.1.3a Poutre annulaire :	69
3.9.1.3b Jupe :	69
3.9.2 Câbles verticaux :	70
3.9.2a Vérification des contraintes :	70
3.10 Conclusion :	70

CHAPITRE IV : ETUDE AU VENT.

4.1 Introduction :	72
4.2 Direction du vent :	72
4.3 Hauteur de référence z_e :	72
4.4 Catégorie du terrain :	72
4.5 Coefficient de topographie $C_t(z)$:	73
4.6 Coefficient de rugosité $C_r(z)$:	73
4.7 Intensité de turbulence $I_v(z)$:	73
4.8 Coefficient d'exposition $C_e(z_e)$:	74
4.9 Pression dynamique de pointe :	74
4.10 Coefficient dynamique C_d :	75
4.10.1 Hauteur équivalente :	75
4.10.2 Fréquence fondamentale :	75
4.10.3 Echelle de turbulence $L_i(z_{eq})$:	76
4.10.4 Partie quasi-statique :	76
4.10.5 Vitesse moyenne :	76
4.10.6 Fréquence adimensionnelle :	76
4.10.7 Densité spectrale de puissance :	76
4.10.8 Admittances aérodynamiques :	76
4.10.9 Décrément logarithmique d'amortissement :	77
4.10.10 Partie résonante :	77
4.10.11 Fréquence moyenne :	77
4.10.12 Facteur de pointe :	77
4.10.13 Intensité de turbulence :	77
4.10.14 Coefficient dynamique :	77
4.11 Pression dynamique du vent :	78
4.12 Coefficient de pression C_p :	78
4.12.1 Parois verticales des constructions à base circulaire :	78
4.12.2 Toiture en forme de sphère ou calotte sphérique :	79
4.13 Discussion des résultats :	81
4.14 Conclusion :	81

CHAPITRE V : ÉTUDE THERMIQUE LINÉAIRE.

5.1 Introduction :	83
5.2 Hypothèses et considérations :	83
5.3 Standards utilisés pour la conception de l'isolation thermique :	84
5.4 Caractéristiques des matériaux utilisés dans l'étude :	85
5.5 Calculs au niveau du radier :	85
5.5.1 En zone courante (épaisseur de 1.1m) :	85
5.5.2 En zone périphérique (épaississement de 1.3 m) : 'hiver'	86
5.5.3 En zone périphérique (épaississement de 1.3 m) : 'été'	87
5.6 Calculs au niveau de la jupe :	88
5.6.1 En zone courante : 'hiver' ...	88
5.6.2 En zone courante : 'été' ...	89
5.6.3 En zone d'épaississement : 'hiver'	90
5.6.4 En zone d'épaississement : 'été'	91
5.7 Calculs au niveau du dôme :	92
5.7.1 En zone courante : 'hiver'	92
5.7.2 En zone courante : 'été'	93
5.7.3 En zone d'épaississement : 'hiver'	93
5.7.4 En zone d'épaississement : 'été'	94
5.8 Discussion des résultats :	95
5.9 Conclusion :	95
<u>CONCLUSION GÉNÉRALE :</u>	96

LISTE DES ABREVIATIONS

ACI	American Concrete Institute.
AEA	Atomic Energy Authority.
API	American Petroleum Institute.
BS	British Standard
CEA	Commissariat de l'Énergie Atomique.
EEMUA	Engineering Equipment and Materials Users Association.
EPC	Engineering, Procurement, and Construction
ETA	European Technical Approval.
FEF	French organizations Electricité de France
GNL	Gaz Naturel Liquifié.
GPL	Gaz de Pétrole Liquifié.
KBR	Kellogg Brown & Root (engineering company)
NFPA	National Fire Protection Association
ONM	Office National de la Météorologie
RNV	Règlement Neige et Vent
RLG	Refrigerated Liquefied Gases.
RPA	Règlement Parasismique Algérien
SIGTTO	Society of International Gas Tanker and Terminal Operators
SNAM	Società Nazionale Metanodotti (Italian gas infrastructure company)
TEAL	ThermoElectric-Actuated Liquefaction (liquefaction procedure)

INTRODUCTION GENERALE

"Ingénierie est l'art de diriger les grandes sources de puissance dans la nature pour l'usage et la commodité de l'homme."

— **Thomas Tredgold.**

Ce présent mémoire de fin d'études est l'un des fruits de ma formation d'ingénieur, qui m'a permis d'exploiter et mettre en pratique le modeste savoir acquis durant mes cinq années d'études.

De nos jours, l'utilisation du gaz naturel liquéfié (GNL) comme source d'énergie connaît une croissance significative dans le domaine de l'ingénierie et de l'industrie. Grâce à ses avantages en termes de transport, de stockage et de combustion plus propre, le GNL a émergé comme une solution prometteuse pour répondre à la demande croissante en énergie, tout en réduisant l'impact environnemental.

Dans ce contexte, l'étude structurelle et thermique des réservoirs de GNL revêt une importance cruciale. Ils doivent être conçus pour résister à des conditions extrêmes, tant en termes de contraintes mécaniques que de fluctuations thermiques, afin d'assurer la sécurité et l'efficacité de la chaîne d'approvisionnement du GNL.

Le présent mémoire se propose d'explorer certains aspects structurels et thermiques liés aux réservoirs de GNL. L'objectif principal de cette étude est de fournir une analyse des principes fondamentaux de conception, des matériaux utilisés et des méthodes d'analyse employées dans ce domaine. En se basant sur différents standards et normes Européennes, Britanniques et Américaines et sur des études de cas, ce mémoire cherche à apporter des éclaircissements sur certains aspects de conception et de fonctionnement de ce type de structures.

Ce mémoire sera structuré de la manière suivante :

- Le premier chapitre sera consacré à l'historique, évolution du GNL, standards de conception et types de réservoirs.
- Le deuxième chapitre sera dédié à la caractérisation de la zone d'implantation du projet et la conception de la superstructure ainsi que la géométrie du réservoir.
- Le troisième chapitre traitera le comportement mécanique membranaire de la jupe et de la poutre annulaire du réservoir, avec analyse des contraintes développées et de l'étude de la précontrainte.
- Le quatrième chapitre sera axé sur l'étude au vent du réservoir afin de cibler les zones de soulèvement et de surpression.
- Le cinquième chapitre portera sur l'étude thermique linéaire du réservoir, en analysant le flux de chaleur et les températures moyennes.

Enfin, il sera achevé par une conclusion générale.

CHAPITRE I :

HISTORIQUE, EVOLUTION DU GNL ET
REGLEMENTATIONS.

1.1 Introduction :

Le premier chapitre de ce mémoire se consacre à l'historique, à l'évolution du Gaz Naturel Liquéfié (GNL) en tant que source d'énergie et aux standards de conception des réservoirs de gaz liquéfié réfrigéré (RLG). Ce chapitre permettra de situer le contexte et d'acquérir une compréhension des fondements et des normes qui ont façonné l'industrie du GNL.

L'utilisation du GNL en tant que source d'énergie s'est développée de manière significative au cours des dernières décennies. Depuis sa première commercialisation dans les années 1960, le GNL est devenu un élément essentiel de la chaîne d'approvisionnement énergétique mondiale. Son rôle en tant que carburant propre, polyvalent et économiquement viable a suscité un intérêt croissant à l'échelle internationale.

Dans ce contexte, il est essentiel d'examiner les standards de conception des réservoirs de GNL, qui ont évolué pour garantir la sécurité, la fiabilité et la performance optimale de ces infrastructures critiques. Les standards de conception fournissent des lignes directrices et des critères rigoureux pour la construction et l'exploitation des réservoirs de RLG, en prenant en compte les aspects liés à la sécurité structurelle, à la résistance aux charges, aux contraintes thermiques et bien d'autres.

Une connaissance des différents types de réservoirs utilisés dans l'industrie du GNL est également nécessaire. Les réservoirs de GNL peuvent être de types variés, tels que les réservoirs à simple confinement, les réservoirs à double confinement et les réservoirs à confinement intégral. Chaque type présente des caractéristiques spécifiques en termes de conception, de performance et de sécurité, adaptées à des applications particulières.

Ce chapitre fournira donc une vue d'ensemble de l'historique et de l'évolution du GNL en tant que source d'énergie, des standards de conception régissant les réservoirs de RLG et des différents types de réservoirs utilisés dans l'industrie. Cette compréhension constituera une base pour les chapitres ultérieurs de ce mémoire, en permettant d'explorer plus en détail les aspects spécifiques de la conception, du comportement mécanique, de l'impact du vent et de la thermique des réservoirs de GNL.

1.2 Que-est-ce que le GNL ?

Le Gaz Naturel Liquéfié (GNL) est un combustible fossile composé principalement de méthane (CH_4), ainsi que de petites quantités d'autres hydrocarbures tels que l'éthane (C_2H_6), le propane (C_3H_8) et le butane (C_4H_{10}). Il est obtenu par le processus de liquéfaction du gaz naturel, au cours duquel le gaz est refroidi à des températures extrêmement basses pour le transformer en liquide.

La composition typique du GNL varie en fonction des gisements de gaz naturel d'où il est extrait. Cependant, le méthane représente généralement plus de 85% du GNL, ce qui en fait la composante principale. Les autres hydrocarbures présents se trouvent en concentrations plus faibles, généralement inférieures à 10%. Le GNL peut également contenir de petites quantités d'azote, de dioxyde de carbone et de traces de composés soufrés.

Les propriétés du GNL en font une source d'énergie attrayante et polyvalente. L'une des caractéristiques clés du GNL est sa densité énergétique élevée, ce qui signifie qu'il possède une grande quantité d'énergie par unité de volume. Lorsque le gaz naturel est liquéfié, il occupe

environ 1/600e de son volume gazeux, ce qui facilite son stockage et son transport à grande échelle.

Le GNL est stocké et transporté à des températures très basses, généralement autour de -162°C (-260°F), ce qui nécessite une isolation thermique avancée pour préserver sa liquéfaction. Sa transformation en liquide permet de réduire considérablement son volume, facilitant ainsi son transport par des navires méthaniers spécialisés vers les marchés mondiaux.

En raison de sa faible teneur en impuretés, le GNL a une combustion plus propre que d'autres combustibles fossiles tels que le charbon ou le pétrole. Il émet moins de dioxyde de carbone (CO_2), de polluants atmosphériques et de particules lors de sa combustion, contribuant ainsi à réduire les émissions et à améliorer la qualité de l'air.

1.3 Le GNL, une ressource essentielle pour l'économie mondiale :

Le gaz naturel, autrefois considéré comme un sous-produit de la production de pétrole brut, occupe désormais une place centrale dans l'économie mondiale, représentant environ 22 % des approvisionnements énergétiques mondiaux. Cette ascension s'explique par les avantages économiques, politiques et écologiques qu'il offre. Une des évolutions majeures est l'utilisation croissante du gaz naturel liquéfié (GNL) en tant que carburant marin, répondant aux nouvelles exigences en matière d'émissions établies par l'Organisation maritime internationale. Ce choix entraîne des réductions significatives des émissions de gaz telles que les oxydes d'azote, le dioxyde de carbone, le dioxyde de soufre et les particules fines.

L'intégration du GNL comme carburant marin connaît une croissance rapide. Ce changement majeur est étroitement lié à la baisse des prix du gaz naturel résultant de la production mondiale de gaz de schiste. Il convient de souligner que si les pipelines sont un moyen économique de transport sur des distances allant jusqu'à 4000-5000 km, l'approvisionnement en gaz dans des régions telles que les îles ou les zones montagneuses s'avère difficile et coûteux. C'est pourquoi le gaz naturel est liquéfié et transporté par des navires sur de longues distances, rendant ainsi le transport économiquement viable.

Cette chaîne de transport de GNL par navires, connue sous le nom de "LNG chain", comprend plusieurs composantes essentielles. Elle débute par l'usine de liquéfaction, où le gaz est transformé en liquide. Ensuite, le GNL est stocké dans des réservoirs spéciaux à bord des navires, puis déchargé dans les terminaux d'importation, où il est stocké dans des réservoirs de stockage dédiés avant d'être regazéifié par des installations appropriées.

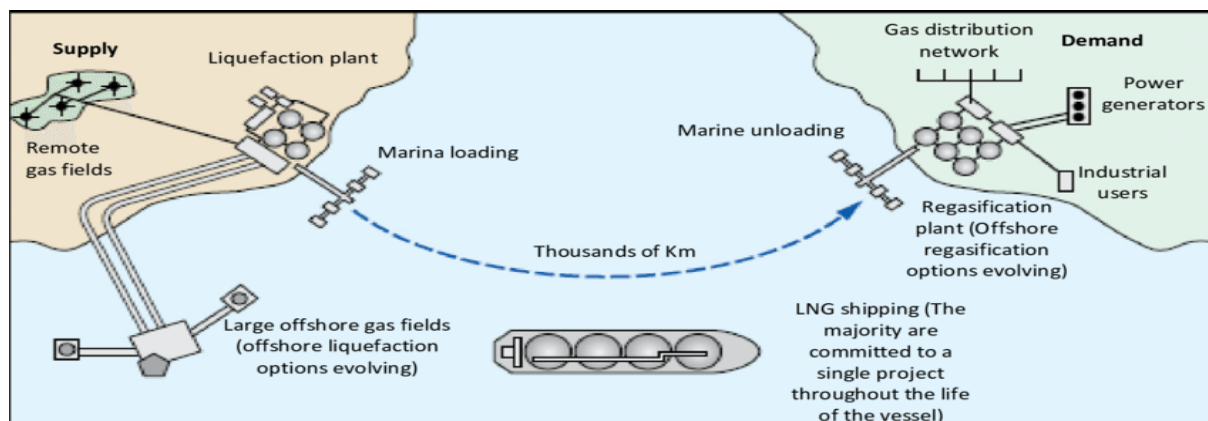


Figure 1.1 : Chaîne traditionnelle d'approvisionnement GNL

1.4 L'Évolution Historique GNL de ses Débuts Prometteurs à l'Émergence d'une Industrie Mondiale :

L'histoire du gaz naturel liquéfié (GNL) remonte au début du XXe siècle, lorsque son potentiel en tant que source d'énergie viable a commencé à être exploré. En 1912, Godfrey Cabot parvint à liquéfier avec succès du gaz naturel aux États-Unis. Cependant, ce n'est qu'à partir des années 1950 que le GNL émergea en tant qu'acteur majeur sur le marché mondial de l'énergie.

La commercialisation du GNL commença en 1959 avec le voyage historique du Methane Pioneer, le premier navire méthanier au monde. Il transporta une cargaison de GNL depuis Lake Charles, en Louisiane, jusqu'à Canvey Island, au Royaume-Uni, marquant ainsi la naissance de l'industrie du GNL. Cette étape fut rendue possible grâce au développement de la technologie du GNL et à la construction de navires méthaniers spécialisés, permettant le transport du gaz naturel sur de longues distances.

L'idée d'utiliser le GNL comme agent de refroidissement dans l'industrie de la viande est venue de William Wood Prince, président d'Union Stockyards à Chicago, au cours des années 1950. Pour transporter le GNL jusqu'à Chicago, il fallait des navires appropriés. Willard S. Morrison, ingénieur et spécialiste de la réfrigération, fut chargé d'étudier les matériaux les plus adaptés pour les réservoirs de GNL et l'isolation.

Morrison opta pour une méthode consistant à utiliser un matériau de réservoir normal et à fixer l'isolation à l'intérieur du réservoir. Le bois de balsa fut choisi comme matériau isolant après des essais préliminaires. Cependant, des tests initiaux révélèrent des plaques de givre et une usure sur l'extérieur du réservoir et les couches les plus internes de l'isolation. Des entreprises expérimentées furent sollicitées pour améliorer l'isolation en bois de balsa et réaliser des plans de travail pour les réservoirs.

Dans le même temps, la Constock Liquid Methane Corporation collabora avec le British Gas Council pour construire un pétrolier GNL. La décision fut prise d'utiliser de l'acier au nickel à 9 % comme matériau de réservoir, qui s'est avéré adapté aux basses températures et plus économique que l'acier inoxydable. Le Methane Pioneer, équipé de réservoirs doublés d'aluminium et isolés avec du bois de balsa, fut lancé en 1959 et transporta avec succès du GNL des États-Unis au Royaume-Uni, marquant ainsi le début de l'industrie mondiale du GNL.

Arthur D. Little, basé à Cambridge, Massachusetts, joua un rôle crucial dans la conception du réservoir. Ils construisirent un réservoir d'essai rempli d'azote liquide et le soumirent à divers scénarios pour en assurer la fiabilité. Le cargo Nomarti fut ensuite converti et équipé de cinq réservoirs, chacun doublé d'aluminium pour offrir une résistance aux basses températures. L'isolation en bois de balsa fut installée dans un environnement contrôlé, et les soudures furent testées sous pression et inspectées par radiographie. Le Nomarti fut soumis à des tests rigoureux dans des conditions extrêmes et se comporta exceptionnellement bien, prouvant le transport sûr de grandes quantités de GNL à travers les océans.

Les voyages réussis du Methane Pioneer et du Nomarti ont démontré la faisabilité du transport de GNL par navire, marquant une étape significative dans le développement de l'industrie de ce dernier. Ces réalisations ont élargi la base de connaissances sur le transport de GNL et ont ouvert la voie à la construction de navires méthaniers plus grands et à l'établissement d'infrastructures GNL dans le monde entier.

1.5 L'Algérie, premier exportateur de GNL :

Le développement du GNL en Europe s'est initialement concentré sur l'importation de GNL depuis l'Algérie, qui disposait de vastes réserves de gaz naturel. Le gouvernement français a pris l'initiative de la recherche et du développement des infrastructures nécessaires, notamment des terminaux de GNL et du transport par voie maritime. Les contrats avec l'Algérie ont été signés en 1962 et ont marqué le début des opérations commerciales à grande échelle de GNL en Europe.

Shell a également joué un rôle important dans le développement du GNL en Europe, avec ses bureaux de Londres et de La Hague travaillant simultanément sur le projet. À mesure que le potentiel du GNL augmentait, d'autres pays européens ont commencé à investir dans la recherche et le développement afin de sécuriser leurs propres approvisionnements en gaz naturel.

Une chaîne de GNL, ou l'ensemble des éléments et installations nécessaires pour le pompage, la liquéfaction, le stockage, le transport et la regazéification du gaz naturel, est devenue nécessaire pour la première fois :

- Production de gaz naturel terrestre ou maritime.
- Pipelines menant au terminal d'exportation.
- Une installation de purification et de liquéfaction du gaz dans un terminal d'exportation.
- Un terminal de réception avec des jetées, des réservoirs et une installation de regazéification pour l'importation et le stockage du GNL, ainsi qu'une installation avec les réseaux de gaz ou les consommateurs.
- Réservoirs pour le stockage intermédiaire.

En 1954, Gaz de France avait envisagé d'importer du gaz d'Algérie. En 1960, Gaz de France a créé un centre de recherche à Nantes pour développer une chaîne de transport de gaz naturel liquéfié (GNL). L'installation avait une capacité de réservoir de GNL de 500 m³, et les tests réalisés étaient similaires à ceux effectués aux États-Unis, couvrant les matériaux, les processus et les méthodes nécessaires au développement d'une chaîne de transport.

Cependant, la France n'a pas pu obtenir de licences ni acheter de pétroliers-citernes à Constock, ce qui l'a amenée à développer sa propre conception de navires pour le transport de GNL. Dans un effort coordonné, la France a converti un cargo, le Beauvais, et a testé trois réservoirs différents développés par différents fabricants au printemps et à l'été 1962.

Conch Methane International, une coentreprise entre Shell et Constock, a été créée pour coordonner les travaux du côté britannique pour l'importation de GNL depuis l'Algérie. Le Royaume-Uni a construit deux navires, le Methane Princess et le Methane Progress, avec des réservoirs en aluminium et une isolation en bois de balsa. La France a construit le Jules Verne avec un réservoir en acier au nickel à 9% et une isolation synthétique. Des terminaux de réception ont été construits à Canvey Island et au Havre, tandis que des pipelines ont été posés du champ de gaz de Hassi R'Mel au port d'Arzew, en Algérie, où une usine de liquéfaction, des réservoirs de stockage et d'autres installations portuaires nécessaires ont été construits. Le

premier GNL en provenance d'Algérie est arrivé au Royaume-Uni en octobre 1964 et en France en avril 1965.



Figure 1.2: SS Methane Princess, 12th Oct 1964, Photo de la SIGTTO

1.6 Normes et standards :

1.6.1 Historique des réglementations :

En 1919, l'American Petroleum Institute a été créé et en 1928, il a commencé à publier une série de spécifications connues sous le nom d'**API 12A** à **API 12G**. Ces spécifications portaient sur la construction de réservoirs pour le stockage du pétrole en utilisant diverses méthodes telles que le rivetage, le boulonnage et le soudage. Parmi elles, **API 12C** (réservoirs soudés) a abouti au développement de la norme **API 620** '*Design and Construction of Large, Welded, Low-pressure Storage Tanks*', qui est l'une des normes les plus importantes pour les réservoirs en acier. Cette norme régit la conception et l'agencement des réservoirs plats soudés utilisés pour le stockage de liquides à température ambiante et à des pressions allant jusqu'à 1 bar. Elle comprend deux annexes, à savoir l'annexe **Q** et l'annexe **R**. L'annexe **Q** décrit les procédures de conception pour le stockage d'éthane, d'éthylène et de méthane liquéfiés à des températures aussi basses que -165°C et une pression maximale de 1 bar. En revanche, l'annexe **R** traite de la conception de réservoirs pour le stockage de produits réfrigérés à des températures aussi basses que -50°C . Malgré son ancienneté **API 620** reste une référence largement reconnue et appliquée pour la conception et la construction de conteneurs intérieurs pour les réservoirs de stockage de GNL dans le monde entier.

Les British Standards (BS) ont adopté le système de classification américain basé sur les gammes de température et les gaz liquéfiés. Les deux premières normes, **BS 4741** et **BS 5387**, ont été publiées respectivement en 1971 et 1976, pour des températures allant de -50°C à -196°C . Ces normes exigeaient des réservoirs avec une paroi unique, appelés réservoirs à simple confinement, qui étaient à la pointe de la technologie à l'époque.

Par la suite, l'Engineering Equipment and Material Users Association (EEMUA) a élaboré la publication n° 147 en 1986, intitulée " *Recommendations for the Design and Construction of Refrigerated Liquefied Gas Storage Tanks*". Ce document a introduit la classification des réservoirs en réservoirs à simple confinement, à double confinement et à confinement intégral, qui ont été largement adoptés dans les normes et spécifications ultérieures.

Après un échec d'un réservoir au Qatar, les réglementations de l'EEMUA ont été révisées et publiées sous la forme des parties 1 à 4 de la norme **BS7777**, avec des références à d'autres normes britanniques et une harmonisation avec celles-ci. Les structures en béton ont été conçues selon la norme **BS 8110**. Avec l'émergence des normes européennes, bon nombre des dispositions de la norme **BS 7777** ont été incorporées dans l'**EN 14620**, publiée en 2006. Cependant, les liens et l'alignement avec d'autres réglementations ont été perdus dans une certaine mesure. L'**EN 14620** présente plusieurs lacunes, telles que la définition des coefficients de sécurité partiels et les superpositions des cas de charge, qui doivent être spécifiées dans la documentation de projet.

Aux États-Unis, des efforts soutenus ont été déployés pour adapter et développer les normes du GNL dans le but de créer une norme globale qui aborderait les lacunes des normes existantes, qui se concentraient principalement sur les réservoirs en acier, et établir des réglementations autonomes pour les réservoirs de GNL composés de béton. Le comité ACI 376 a été formé et a tenu sa réunion inaugurale lors de la Convention ACI à San Francisco à l'automne 2004. En 2011, le comité avait achevé ses travaux et publié la nouvelle norme **ACI 376** 'Code Requirements for Design and Construction of Concrete Structures for the Containment of Refrigerated Liquefied Gases'. Cette nouvelle norme est plus complète et détaillée que l'**EN 14620**.

1.6.2 Standards et réglementations utilisées:

1.6.2.1 BS EN-14620: 'Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0°C and -165°C', est divisée en cinq parties:

- **Partie 1:** 'General', fournit une explication complète des exigences fondamentales pour la conception et la sélection des types de réservoirs, ainsi que des critères de performance généraux. Cette section offre des lignes directrices détaillées concernant la conception et la sélection des réservoirs. La plage d'application comprend des températures allant de 0 à -165°C et des surpressions jusqu'à 500 mbarg. Lorsque la pression dépasse 500 mbarg, il est considéré comme un récipient sous pression, ce qui relève de la norme **EN 13445**. Cette norme s'applique uniquement aux réservoirs primaires en acier et exclut les réservoirs internes en béton précontraint. Ces réservoirs sont principalement utilisés pour stocker de grandes quantités de gaz liquéfiés réfrigérés (RLG), tels que le méthane, l'éthane, le propane, le butane, l'éthylène, le propylène, le gaz naturel liquéfié (GNL) et le gaz de pétrole liquéfié (GPL).
- **Partie 2:** 'Metallic components', Elle établit les exigences générales concernant les matériaux, la conception, la fabrication, les méthodes de soudage, la construction et l'installation des composants métalliques destinés à être utilisés dans les réservoirs. Les types d'acier nécessaires sont spécifiés en fonction du type de gaz liquéfié à stocker, ainsi que de la température et du type de réservoir en question.

- **Partie 3:** ‘*Concrete components*’, Elle décrit les principes fondamentaux et les détails pour la conception et l'établissement des éléments en béton, qui font référence au réservoir secondaire ou extérieur construit en béton. Conformément à la Partie 1, le récipient primaire ou interne est fabriqué en acier. Les stipulations concernant les matériaux, notamment le béton, le renforcement conventionnel et l'acier de précontrainte sont abordées dans cette partie.
Conformément à l'**EN 1992-1-1**, le respect des normes pour l'acier de précontrainte, les ancrages et les conduits est obligatoire. De plus, il est essentiel de s'assurer que l'acier de précontrainte et les ancrages sont adaptés aux basses températures.
- **Partie 4:** ‘*Insulation components*’, Elle comprend des informations détaillées sur les exigences de conception et la sélection des matériaux d'isolation, la conception de la barrière vapeur, qui empêche l'infiltration de vapeur d'eau depuis l'extérieur et la vapeur du produit stocké depuis l'intérieur, la conception du système d'isolation, l'installation de l'isolation, la mise en service et la maintenance. Dans le contexte du gaz liquéfié stocké dans les réservoirs de GNL, le point d'ébullition est inférieur à la température ambiante, ce qui rend crucial d'éviter toute infiltration de chaleur de vaporisation non régulée ou excessive. Les principales fonctions du système d'isolation sont de maintenir une température désignée inférieure au point d'ébullition, de protéger les composants du réservoir externe qui ne sont pas destinés à de si basses températures et de réduire le taux d'évaporation. De plus, les systèmes d'isolation thermique et de chauffage de la fondation jouent un rôle crucial pour empêcher le gel du sol et le soulèvement consécutif du gel, ainsi que pour limiter la formation de condensation et de glace à la surface du récipient externe.
- **Partie 5:** ‘*Testing, drying, purging and cool-down*’. Elle décrit les spécifications concernant les procédures de test, de séchage, de purge et de refroidissement des réservoirs. Les tests des réservoirs sont séparés en tests hydrostatiques et pneumatiques. Pour les réservoirs à paroi simple, les deux tests sont effectués simultanément. La pression d'essai est appliquée dans l'espace de vapeur au-dessus de l'eau. En revanche, pour les réservoirs à double paroi et à confinement total, les deux tests peuvent être effectués simultanément ou séparément. Le test de pression consiste à exercer une pression équivalente à 1,25 fois la pression de conception. Avant le test, des soupapes de décharge de pression sont installées et réglées à cette pression, puis retirées après le test. Le réservoir est ensuite soumis à un vide partiel correspondant à la pression de conception négative du réservoir, généralement 5 ou 10 mbarg. Le vide partiel est généré à l'aide d'une pompe ou simplement en abaissant le niveau d'eau.

1.6.2.2 API 620: ‘*Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks*’:

Etablit les principes de planification et d'assemblage de réservoirs en acier expansé, soudés sur site, utilisés pour le stockage d'intermédiaires pétroliers tels que les gaz ou vapeurs, les produits finis et autres produits liquides requis par différentes branches industrielles. La réglementation s'applique aux réservoirs qui possèdent un seul axe vertical de révolution, avec des températures métalliques ne dépassant pas 120°C et une surpression de 1 bar. Les dispositions de la norme s'appliquent aux réservoirs destinés à stocker à la fois des liquides et des gaz ou vapeurs situés au-dessus de la surface du liquide, ainsi qu'aux gaz et vapeurs seuls. Elle intègre deux

appendices importants, à savoir l'appendice Q et l'appendice R. Les réglementations détaillées dans ces appendices servent de guide pour la sélection des matériaux des réservoirs et la conception et la construction de réservoirs utilisés pour le stockage de gaz liquéfiés. Un réservoir de stockage de gaz liquéfiés peut adopter une construction à simple ou double paroi, cette dernière comprenant un conteneur interne pour contenir le liquide et un conteneur externe pour protéger l'isolation et accueillir une basse pression de gaz. Le réservoir à double paroi est une structure en deux parties, dans laquelle le conteneur externe n'est pas destiné à contenir le produit à l'intérieur du conteneur interne. Ainsi, des exigences distinctes s'appliquent aux matériaux, à la conception et aux tests des conteneurs interne et externe d'un réservoir à double paroi. L'appendice R spécifie les réglementations pour le développement de réservoirs qui stockent des produits à des températures descendant jusqu'à -50°C , tandis que l'appendice Q énonce les dispositions pour la construction de réservoirs contenant de l'éthane, de l'éthylène et du méthane liquéfiés à des températures descendant jusqu'à -165°C , avec une pression interne maximale de 1 bar dans chaque cas. De nombreux conteneurs internes pour les réservoirs de GNL sont encore conçus et érigés selon cette norme.

1.6.2.3 API 625: *'Tank Systems for Refrigerated Liquefied Gas Storage'*.

Elle a été publiée pour la première fois en 2010 et fournit des directives complètes pour la conception, la construction, l'inspection et la maintenance des réservoirs de GNL. La norme couvre tous les aspects pertinents, y compris les matériaux de construction, les systèmes d'isolation, les équipements auxiliaires, les systèmes de sécurité, les essais et les procédures de contrôle de la qualité.

Un élément clé cette norme est la classification des réservoirs de GNL en fonction du confinement. Les réservoirs peuvent être classés en réservoirs à simple confinement, à double confinement ou à confinement complet, en fonction des niveaux de sécurité requis. Cette classification est basée sur les principes de prévention des fuites et de confinement des liquides en cas d'incident.

Elle définit également des exigences spécifiques pour les matériaux utilisés dans la construction des réservoirs de GNL, en mettant l'accent sur la résistance à la corrosion et à la cryogénie. Elle fournit des directives détaillées sur les systèmes d'isolation, y compris les matériaux isolants appropriés et les méthodes d'installation. De plus, la norme spécifie les exigences relatives aux équipements auxiliaires tels que les pompes, les compresseurs, les systèmes de sécurité, les systèmes de surveillance et de contrôle. Elle comprend également des recommandations pour les inspections régulières des réservoirs de GNL afin de garantir leur intégrité et leur fonctionnement sécurisé. Elle établit des critères pour les essais de performance, les inspections visuelles, les tests non destructifs et les évaluations de l'état des réservoirs.

1.6.2.4 ACI 376: *'Code Requirements for Design and Construction of Concrete Structures for the Containment of Refrigerated Liquefied Gases and Commentary'*.

Elle définit les prérequis nécessaires à la planification et à la construction de structures en béton armé et précontraint utilisées pour le confinement et la préservation de gaz liquéfiés réfrigérés, avec des températures de travail allant de $+4$ à -200°C , ainsi que des réservoirs pour l'oxygène et l'azote. De plus, les réglementations détaillées dans la norme permettent également leur utilisation dans les fondations en béton des réservoirs en acier à double paroi. Les aspects structuraux incluent la forme du mur du réservoir, la fondation, le toit et la dalle de base.

1.6.2.5 NFPA 59A: *‘Standard for the Production, Storage, and Handling of Liquefied Natural Gas’.*

Elle établit les exigences minimales de sécurité pour la production, le stockage et la manipulation de gaz naturel liquéfié. La norme vise à garantir que ces activités sont réalisées en toute sécurité et couvre un éventail de problèmes tels que la conception des installations, le fonctionnement sûr de l'équipement et la formation du personnel. L'un des principaux objectifs de la **NFPA 59A** est de fournir des lignes directrices pour la construction de réservoirs de stockage de GNL. La norme comprend des exigences spécifiques pour la conception et la construction des réservoirs, y compris des dispositions concernant l'utilisation des matériaux, l'épaisseur des parois du réservoir et le type d'isolation à utiliser. Ces exigences visent à garantir que les réservoirs de stockage de GNL sont conçus et construits pour résister aux propriétés uniques du GNL, notamment les températures extrêmement basses et les hautes pressions.

1.7 Définitions des différents types de réservoirs :

Diverses normes telles que l'EEMUA, la **NFPA 59A**, l'**EN 14620-1** et l'**API 625** ont différencié différents types de systèmes de réservoirs de confinement, à savoir les réservoirs simples, doubles et à confinement intégral. Parmi ces normes, les réglementations européennes ont élaboré davantage sur un type particulier de réservoir connu sous le nom de réservoir à membrane. Avant les années 1970, seuls les réservoirs à paroi simple existaient. Des avancées ultérieures dans la technologie des réservoirs et les exigences de construction associées ont été développées pour faire face aux risques potentiels tels que la défaillance du conteneur interne, l'incendie, les ondes de pression d'explosion et les impacts. Étant donné les risques importants associés à la défaillance d'un réservoir et à son impact sur les zones environnantes, il est crucial de choisir le type approprié de système de réservoir.

En utilisant l'exemple d'une défaillance potentielle du conteneur interne comme point de référence, les paragraphes suivants expliqueront selon l'**EN 14620-1** et l'**API 625** les impacts conséquents sur l'ensemble du réservoir et de son voisinage immédiat à travers les trois configurations de réservoir fréquemment utilisées.

Dans un système à confinement simple, l'échappement de gaz liquéfié dans le bassin de confinement, qui est une zone confinée entourée d'un mur de protection, peut se produire. L'**EN 14620-1** permet une distance allant jusqu'à 20 mètres entre le conteneur primaire et le mur de confinement ou protection 'bund wall', ce qui inonde une vaste zone entourée d'un mur de faible hauteur et remplie de GNL. En cas d'évaporation du GNL et un pool fire qui s'ensuit, une partie importante de l'installation peut être impactée, sans mesures mises en place pour atténuer l'impact du rayonnement thermique sur les bâtiments, les structures voisines ou d'autres zones de l'usine.

Le système de réservoir à double confinement est une mesure de sécurité visant à atténuer les risques potentiels. Il consiste à enfermer le conteneur primaire dans un conteneur supplémentaire, avec une distance maximale de 6 mètres autorisée entre les parois des réservoirs primaire et secondaire. En cas de fuite, le gaz liquéfié s'écoule dans le conteneur secondaire, qui doit avoir une hauteur plus grande par rapport au mur de confinement requis pour un réservoir à simple confinement afin de pouvoir accueillir le volume de liquide dans une zone annulaire relativement plus petite. En conséquence, le conteneur primaire est généralement protégé par un mur en béton dans la plupart des conceptions, ce qui conduit à une

zone moins inondée de gaz liquéfié et de vapeur. Le mur en béton offre une protection aux installations adjacentes, limitant le pool fire à une zone plus restreinte et dirigeant principalement son évolution vers le haut plutôt que latéralement. De plus, cette configuration entraîne un impact minimal du rayonnement thermique sur les bâtiments, les structures et les autres parties de l'usine voisins.

Le système de réservoir à confinement intégral implique un conteneur secondaire qui doit avoir la capacité de contenir tout gaz liquéfié en cas de rupture du réservoir primaire, tout en empêchant la libération de tout liquide ou vapeur. Cette conception exclut la possibilité d'un pool fire. De plus, toute vapeur de gaz potentielle ne peut être évacuée que par la soupape de décharge de secours, ce qui entraîne un impact minimal sur les installations voisines.

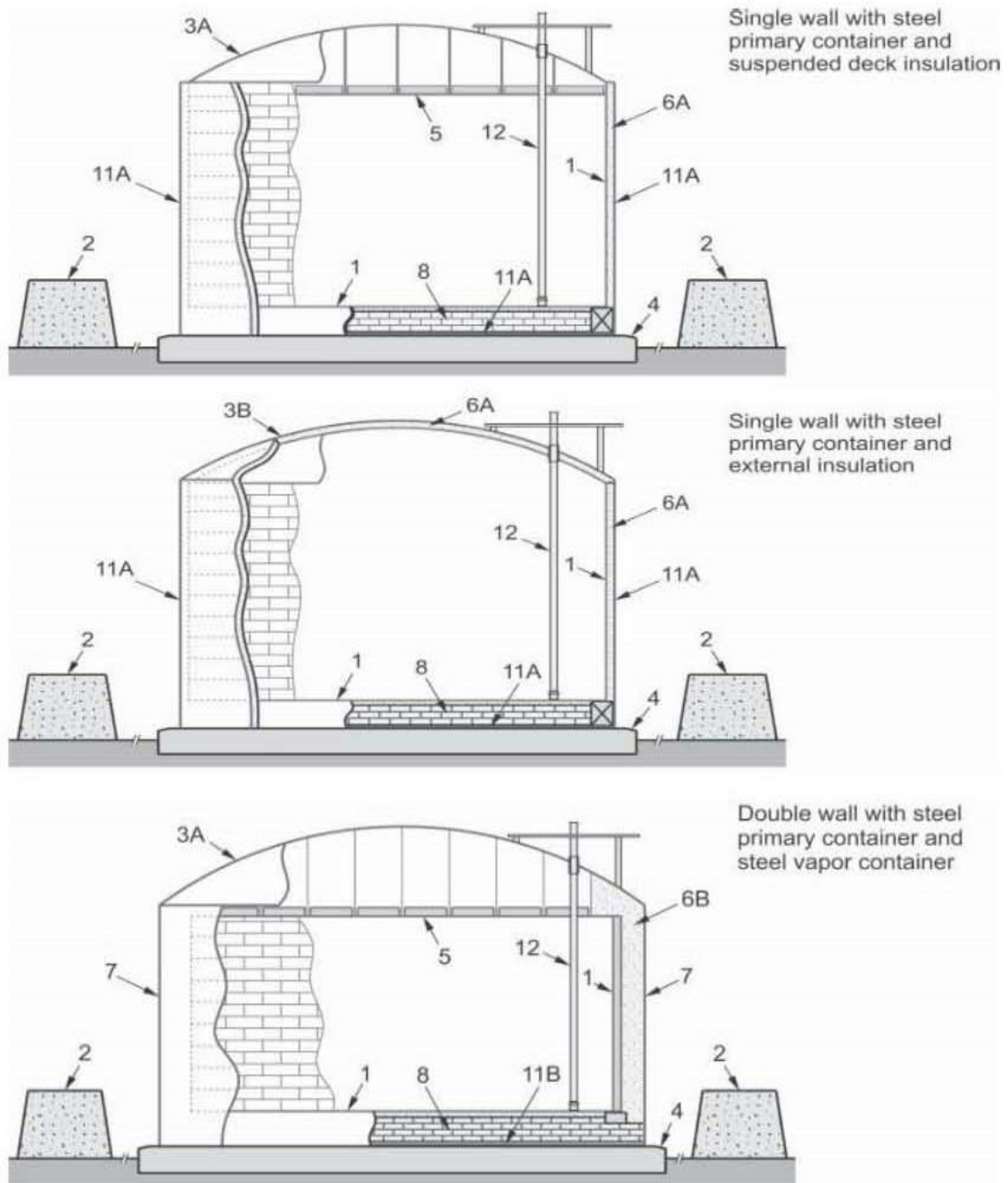


Figure 1.3 : Exemple d'un Pool fire.

1.7.1 Système de réservoir à simple confinement :

C'est un conteneur étanche à la fois aux liquides et aux vapeurs. Ce type de réservoir peut être construit sous la forme d'une structure à paroi unique résistante aux liquides et aux vapeurs, ou sous la forme d'une structure composite composée de conteneurs intérieurs et extérieurs. Dans ce dernier cas, le conteneur intérieur est étanche aux liquides mais ouvert en haut. L'utilisation d'un conteneur extérieur vise principalement à protéger l'isolation contre l'humidité et à accueillir la surpression de vapeur de gaz, et n'est pas conçue pour contenir le GNL en cas de fuite. Pour garantir la sécurité de la rétention du liquide, un réservoir à simple confinement doit être entouré d'une barrière de sécurité, généralement un remblai en terre, pour empêcher le liquide de s'échapper dans l'environnement environnant. Selon la norme **EN 14620**, le

conteneur intérieur doit être construit en acier, tandis que l'API 625 autorise également l'utilisation de béton précontraint. Si un conteneur extérieur est utilisé, il est généralement en acier au carbone.

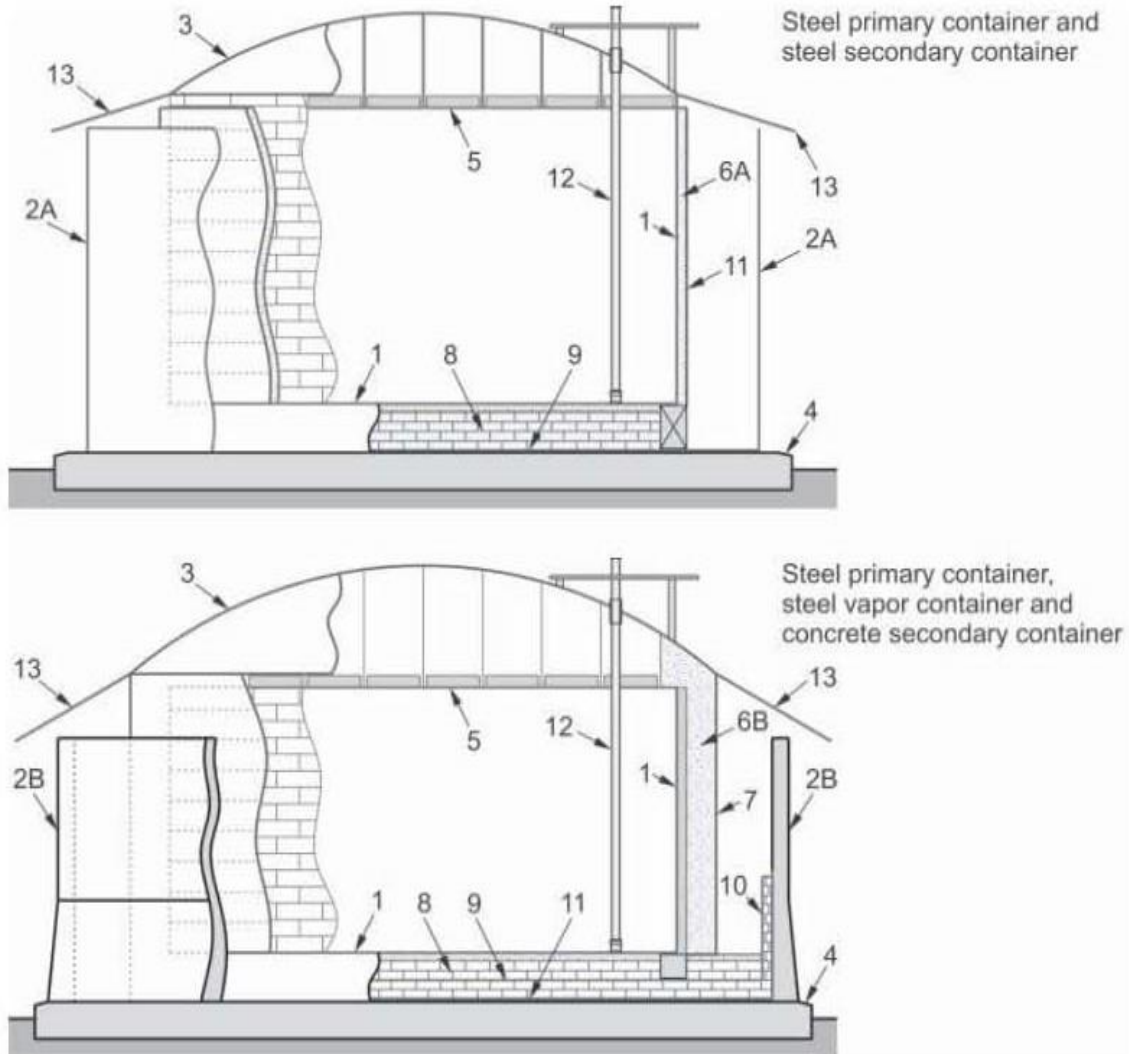


- | | |
|---|---|
| 1 Réservoir primaire (acier basse température). | 6A Isolation (externe). |
| 2 Réservoir secondaire (Remblais de terre). | 6B Isolation en perlite (espace annulaire). |
| 3A Récipient de vapeur (toit). | 7 enveloppe extérieure |
| 3B Toiture réfrigérée temporaire. | 8 Isolation inférieure (verre cellulaire). |
| 4 Fondation en béton. | 11A Pare-vapeur d'humidité. |
| 5 Pont suspendu avec isolation. | 11B Récipient de vapeur. |
| | 12 Colonne de pompe. |

Figure 1.4 : Différentes configurations d'un réservoir à confinement simple selon l'API-625.

1.7.2 Système de réservoir à double confinement :

Il est constitué d'un conteneur primaire qui répond aux normes d'un système de réservoir à simple confinement, mais qui est construit à l'intérieur d'un conteneur secondaire. Le conteneur primaire est à la fois étanche aux liquides et aux vapeurs, tandis que le conteneur secondaire est ouvert en haut et est capable de contenir tout gaz liquéfié. Il est important de noter que le conteneur secondaire n'est pas destiné à empêcher l'échappement du gaz. L'espace entre les conteneurs primaire et secondaire, appelé espace annulaire, ne doit pas dépasser une largeur de 6 mètres. L'API 625 permet l'utilisation à la fois de l'acier et du béton précontraint pour la construction des conteneurs primaire et secondaire.



- | | |
|---|--|
| 1 Réservoir primaire (acier basse température). | 6B Isolation en perlite (espace annulaire). |
| 2A Réservoir secondaire (acier basse température). | 7 Récipient de vapeur (enveloppe extérieure). |
| 2B Réservoir secondaire (béton). | 8 Isolation inférieure (verre cellulaire). |
| 3 Récipient de vapeur (toit). | 10 Système de protection thermique (TCP). |
| 4 Fondation en béton. | 11A Pare-vapeur d'humidité. |
| 5 Toit suspendu avec isolation. | 12 Colonne de pompe. |
| 6A Isolation (externe). | 13 Toit (pare-pluie). |

Figure 1.5 : Différentes configurations d'un réservoir à confinement double selon l'API-625.

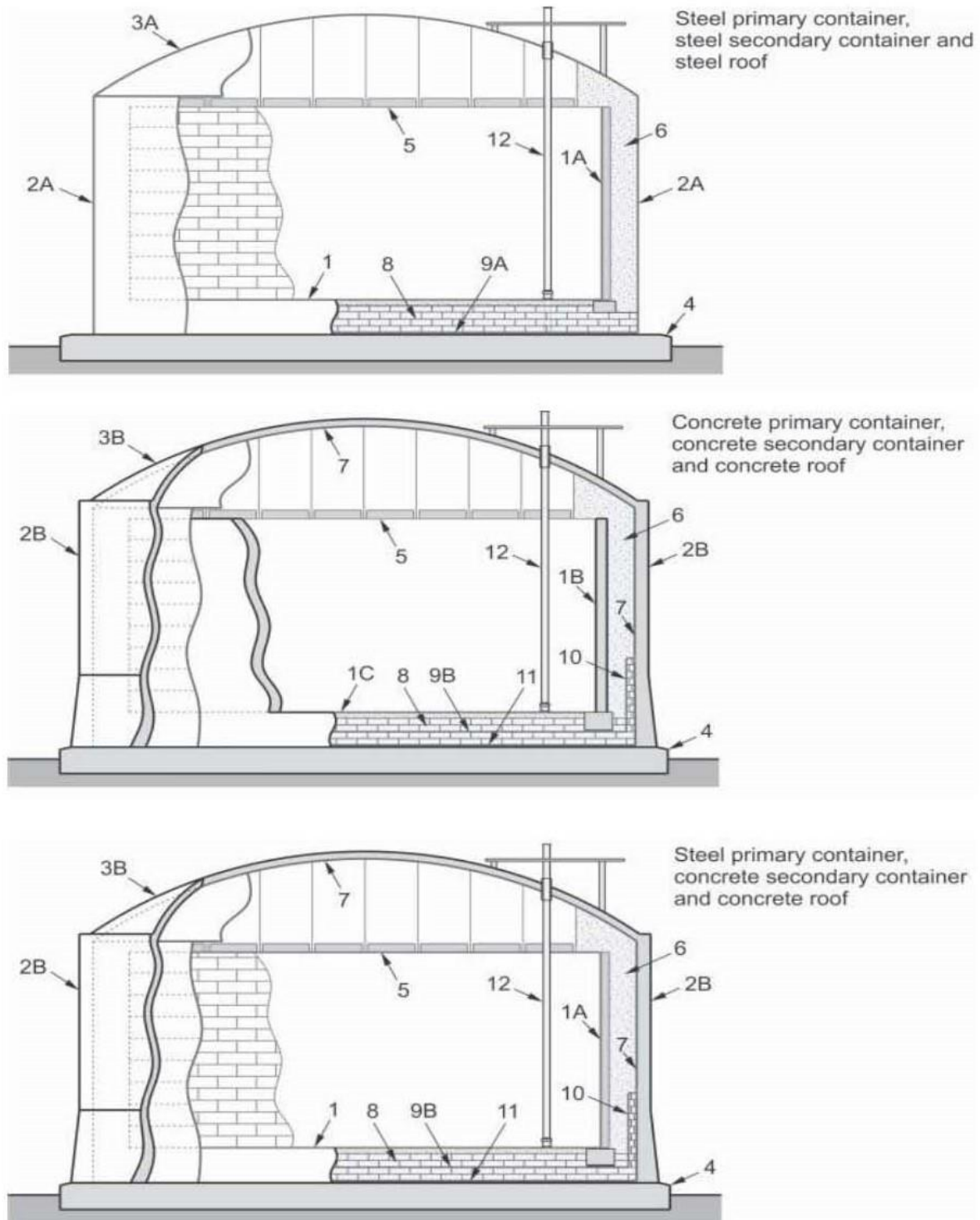
1.7.3 Système de réservoir à confinement intégral :

Un système de réservoir à confinement intégral est composé de deux conteneurs, un conteneur primaire et un conteneur secondaire, qui fonctionnent ensemble pour former un système de stockage intégral. Le conteneur primaire est constitué d'un réservoir cylindrique en acier autoportant avec une seule paroi. Selon l'utilisation prévue, il peut être ouvert en haut, permettant la libération de la vapeur, ou construit avec un toit en dôme pour empêcher toute échappement de vapeur. Le conteneur secondaire est également autoportant et est fait d'acier ou de béton avec un toit en dôme. Si le conteneur primaire est ouvert en haut, le conteneur secondaire doit agir comme le système de confinement principal de la vapeur pendant le fonctionnement normal. En cas de fuite du conteneur primaire, le conteneur secondaire doit retenir le gaz liquéfié et rester étanche aux. Le système de décharge de pression permet une évacuation contrôlée. Si le conteneur extérieur est construit en béton, l'API 625 permet des pertes acceptables de produit en raison de la perméabilité du béton. L'acier et le béton précontraint peuvent être utilisés pour la construction des conteneurs, avec une étanchéité à la vapeur requise pour le fonctionnement normal.

Les joints coulissants, articulés et fixes entre la paroi et le radier sont décrits dans l'**EN 14620-3** (annexe B) et l'**ACI 376** (annexe A), avec des détails fournis. L'utilisation de joints coulissants ou articulés est uniquement recommandée pour les petits réservoirs fonctionnant à des températures et des pressions plus basses. Pour les réservoirs de GNL, la jonction monolithique entre la paroi et radier est la seule option envisageable.

Le système de réservoir à confinement intégral avec un conteneur extérieur en béton précontraint et une liaison monolithique rigide entre la jupe et le radier nécessite une attention particulière lors de la conception pour garantir un fonctionnement fiable en cas de défaillance du conteneur intérieur. Si le conteneur intérieur est rompu, la paroi du conteneur secondaire sera soumise à des gradients de température pouvant atteindre 200 °C. Pour les diamètres de réservoir couramment utilisés, cette différence de température entraîne un raccourcissement radial pouvant atteindre 4 à 5 cm. Sans mesures supplémentaires, cela pourrait entraîner une grave défaillance de la section transversale en béton au niveau de la jonction entre la paroi et le radier. Une solution à ce problème consiste à mettre en place un système de protection thermique d'au moins 5 m de hauteur à la base de la paroi pour réduire la contraction de la paroi en béton à un niveau tolérable.

Bien qu'il ait été observé que la probabilité de défaillance d'un réservoir à simple confinement, à condition qu'il ait été construit conformément aux directives réglementaires, soit assez faible, il est possible de minimiser davantage de tels risques en imposant des exigences plus strictes sur des facteurs tels que la sélection des matériaux, la conception, la construction, l'inspection et les essais. Néanmoins, dans les cas où les conséquences d'une défaillance du réservoir pour certains produits pétroliers sont exceptionnellement graves, un système de réservoir supérieur doit être utilisé. La sélection d'un système de réservoir approprié doit prendre en compte divers facteurs tels que l'emplacement, les conditions d'exploitation et les critères environnementaux.



- | | |
|--|---|
| 1A Réservoir primaire (acier basse température). | 6 Isolation en perlite (espace annulaire). |
| 1B Réservoir primaire (béton). | 7 Revêtement (enveloppe extérieure). |
| 1C Réservoir primaire (acier basse température). | 8 Isolation inférieure (verre cellulaire). |
| 2A Réservoir secondaire (acier basse température). | 9A Réservoir secondaire (acier basse temp). |
| 2B Récipient liquide secondaire (béton). | 9B Fond secondaire (acier basse température). |
| 3A Récipient de vapeur chaude (toit). | 10 Système de protection thermique (TCP). |
| 3B Toiture (béton). | 11 Pare-vapeur d'humidité. |
| 4 Fondation en béton. | 12 Colonne de pompe. |
| 5 Pont suspendu isolé | |

Figure 1.6 : Différentes configurations d'un réservoir à confinement intégral selon l'API-625.

1.8 Conclusion :

En conclusion, nous avons exploré l'histoire fascinante du gaz naturel liquéfié (GNL) et son rôle croissant dans l'approvisionnement énergétique mondial. Du premier transport commercial de GNL en 1959 à la création de vastes infrastructures de liquéfaction et de regazéification à travers le monde, le GNL a révolutionné le commerce international du gaz naturel.

Nous avons également examiné les normes et réglementations essentielles qui régissent l'industrie du GNL notamment l'EN-14620, la NFPA 59A, l'ACI 376, l'API 620 & 625 etc. Des organismes tels que l'American Petroleum Institute (API), l'American Concrete Institute (ACI), l'European Committee for Standardization (CEN) jouent un rôle clé dans l'établissement de normes de sécurité, de conception et d'exploitation pour les infrastructures de GNL.

En ce qui concerne les systèmes de réservoirs utilisés pour le stockage de GNL, nous avons analysé les types de réservoirs couramment utilisés. Les systèmes de réservoirs à simple, double et à confinement intégral.

Il est essentiel de noter que la sécurité et l'intégrité des infrastructures de stockage de GNL sont d'une importance primordiale. Les normes et réglementations strictes garantissent la conception, la construction et l'exploitation appropriées de ces installations critiques. La sélection du système de réservoir approprié doit prendre en compte divers facteurs tels que la gestion des risques, les conditions d'exploitation et les critères environnementaux.

L'histoire du GNL est marquée par des développements technologiques et des progrès significatifs dans les infrastructures de liquéfaction, de transport et de stockage. Les normes internationales guident l'industrie du GNL en matière de sécurité et de performance. Les systèmes de réservoirs à simple confinement, double confinement et confinement intégral offrent des solutions adaptées aux besoins spécifiques de stockage de GNL, en assurant la sécurité des installations et en minimisant les risques pour l'environnement.

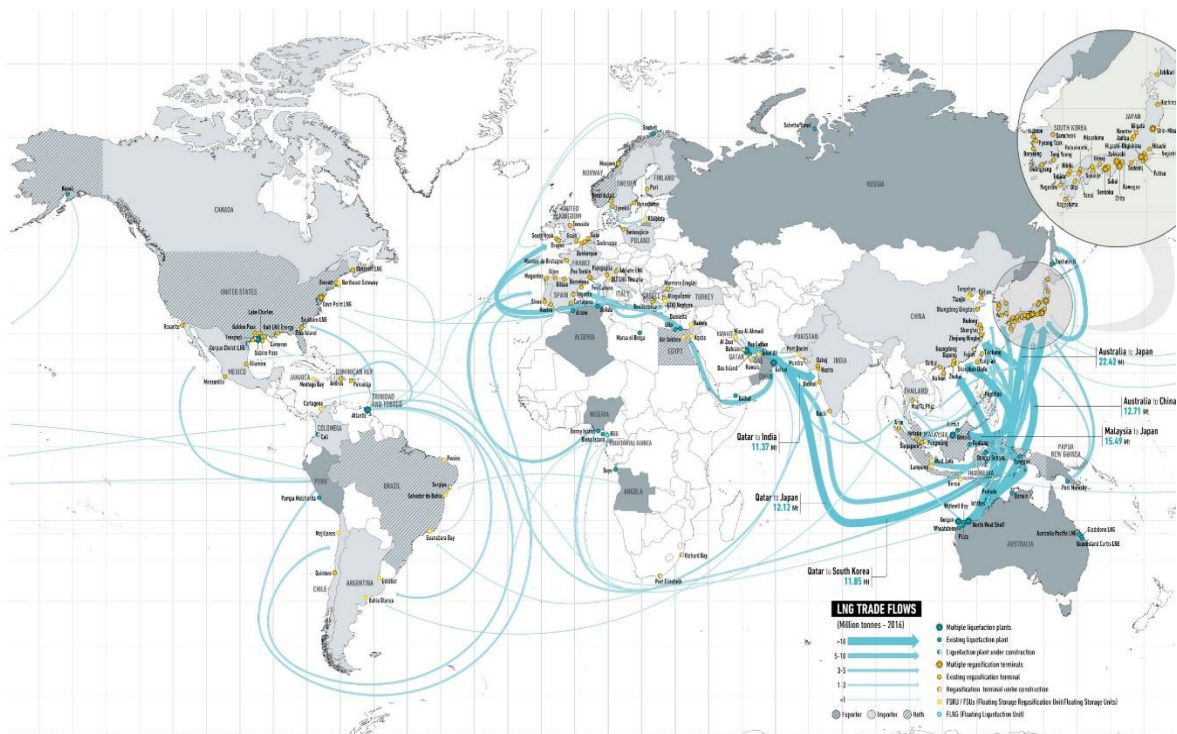


Figure 1.7: Natural Gas Atlas -SNAM- 2016

CHAPITRE II :

EMPLACEMENT DU PROJET & CONCEPTION DE LA
SUPERSTRUCTURE.

CHAPITRE II : EMLACEMENT DU PROJET & CONCEPTION DE LA SUPERSTRUCTURE.

2.1 Introduction :

La demande croissante de GNL a conduit à la construction de réservoirs de plus grande capacité, nécessitant une conception et un dimensionnement précis pour garantir la stabilité et la durabilité à long terme. La conception doit prendre en compte les exigences spécifiques liées à la capacité du réservoir, aux contraintes environnementales, ainsi qu'aux normes et réglementations en vigueur.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord parler de l'historique du complexe GL-1K de la raffinerie de Skikda qui sera la zone d'implantation du projet 'New LNG Train -Erected Field Tanks' ainsi que la wilaya de Skikda et ses caractéristiques, nous décrirons ensuite la méthodologie et les étapes pour le dimensionnement de la superstructure du réservoir GNL d'une capacité de 150.000 m³ qui est le cœur de ce mémoire.

2.2 Le complexe GL-1K :

Il revêt une importance significative dans l'industrie pétrolière et gazière de l'Algérie. Situé sur un site de 92 hectares à environ 10 kilomètres à l'est du centre-ville de Skikda, le complexe est en activité depuis le début des années 1970. Il est détenu et exploité par SONATRACH, la société pétrolière et gazière d'État. Le complexe GL-1K comprend plusieurs trains de GNL et une installation de raffinerie. La construction du complexe s'est déroulée en plusieurs phases. La phase initiale a consisté en la mise en service des trains 10, 20 et 30 en 1971 et 1973, respectivement. Ces trains ont été construits par Technip de France et utilisaient le procédé de liquéfaction TEAL. Chacun de ces trains avait une capacité de production d'environ 1,1 milliard de mètres cubes par an ou 0,85 million de tonnes par an. Dans la deuxième phase de développement, le train 40 a été mis en service en 1981 après un retard de six ans. Il a été construit par Prichard Rhodes et représentait une expansion significative du complexe GL-1K. Les trains 5P et 6P ont été construits par Prichard Rhodes et ont commencé leurs opérations en 1981, plusieurs années après la planification initiale. Les trains 5P et 6P étaient de plus grande taille par rapport aux trains précédents, avec une capacité de production d'environ 1,64 milliard de mètres cubes par an ou 1,25 million de tonnes par an chacun.

Tout au long des années 1990, un programme de modernisation a été mis en œuvre au complexe GL-1K, comprenant la rénovation des six trains. Ce programme visait à améliorer l'efficacité et la productivité de l'installation.

Cependant, en avril 2004, un incident dévastateur s'est produit lors d'une opération de maintenance routinière de la chaudière du train 40. Une purge insuffisante de la chaudière a entraîné une explosion qui a détruit trois trains et causé de graves dommages à un autre. Malheureusement, 26 travailleurs ont perdu la vie et 74 ont été blessés. Par conséquent, l'usine de GNL et la raffinerie ont été fermées pour enquête.

À la suite de l'incident, le complexe GL1K a connu des changements importants. De nouveaux designs ont été mis en œuvre pour éliminer le besoin de chaudières, les remplaçant par des turbines et des compresseurs fonctionnant au gaz qui sont plus efficaces.

2.3 Le projet 'New LNG Train -Erected Field Tanks-':

Le complexe GNL de Skikda englobe une zone côtière importante et comprend diverses installations (GL1K, CP1K, CP2K, RA1K...) dédiées à la production, à la liquéfaction et à l'exportation de gaz naturel. Ces installations comprennent des trains de liquéfaction de GNL,

CHAPITRE II : EMLACEMENT DU PROJET & CONCEPTION DE LA SUPERSTRUCTURE.

des réservoirs de stockage, des jetées de chargement et des infrastructures associées nécessaires au traitement et à l'expédition de GNL.

Le site sélectionné pour la mise en œuvre du projet est situé dans les locaux de l'installation GL-1K. Cette intégration avec le site existant de la raffinerie garantissait des opérations synergiques et une utilisation efficace des ressources. La coexistence du projet de train GNL et de la raffinerie au même endroit a permis une infrastructure partagée et une coordination logistique améliorée, contribuant ainsi à l'efficacité globale du complexe énergétique.

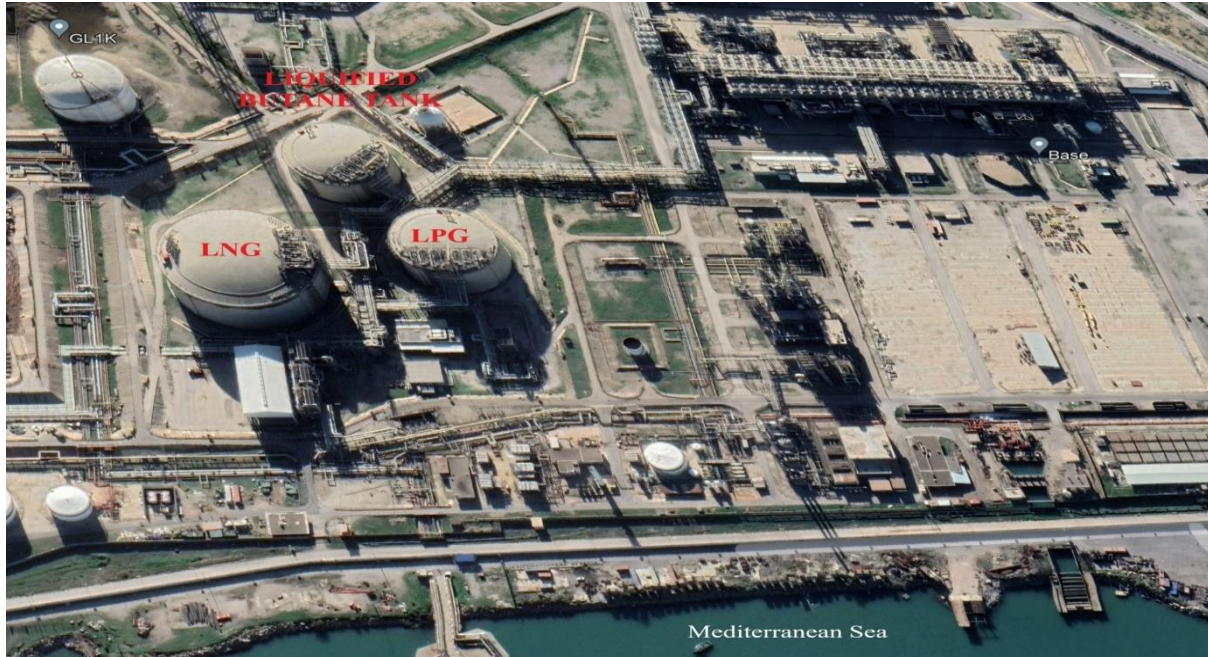


Figure 2.1 : Vue satellite des réservoirs au sein du complexe GL-1K -Skikda-Juin 2023-

En janvier 2007, le contrat de démolition et de récupération des trois trains de liquéfaction de gaz du complexe pétrochimique de Skikda a été signé avec Delair Navarra. Cette expansion impliquait la construction et l'installation d'un train de liquéfaction supplémentaire et la construction de nouveaux réservoirs pour améliorer la capacité de stockage. Ces nouveaux réservoirs comprenaient un réservoir de GNL, un réservoir de GPL (gaz de pétrole liquéfié) et un réservoir de butane liquéfié. En mars 2007, KBR (Kellogg Brown & Root International) s'est vu attribuer le contrat d'ingénierie, d'approvisionnement et de construction (EPC) d'une valeur approximative de 2,8 milliards de dollars pour le nouveau train de GNL à Skikda. En plus d'effectuer les travaux EPC pour le train de GNL d'une capacité de 4,5 millions de tonnes par an, ainsi que la récupération associée de GPL et de condensats, KBR a exécuté la partie de pré-mise en service et de mise en service du contrat.

La construction de ces réservoirs faisait partie intégrante du projet, visant à accroître la capacité de production et d'exportation de GNL de la raffinerie. Le réservoir de GNL offrait une capacité de stockage supplémentaire pour le GNL, garantissant un approvisionnement régulier et facilitant le chargement efficace sur les transporteurs de GNL pour le transport vers les marchés mondiaux. Le réservoir de GPL et le réservoir de butane liquéfié étaient conçus pour stocker et faciliter la manipulation et la distribution de GPL et de butane liquéfié, respectivement.

CHAPITRE II : EMLACEMENT DU PROJET & CONCEPTION DE LA SUPERSTRUCTURE.



Figure 2.2 : Coté est du complexe GL-1K -Source KBR-

Cette expansion faisait partie de la stratégie globale de l'Algérie visant à valoriser ses réserves abondantes de gaz naturel et à répondre à la demande mondiale croissante de GNL. Le projet visait à renforcer la position de l'Algérie en tant qu'exportateur de GNL de premier plan et à contribuer à l'économie nationale grâce à une augmentation des revenus générés par les exportations de gaz naturel.

2.4 La wilaya de Skikda :

2.4.1 Emplacement :



Figure 2.3 : Situation géographique de la wilaya de Skikda

CHAPITRE II : EMLACEMENT DU PROJET & CONCEPTION DE LA SUPERSTRUCTURE.

La Wilaya de Skikda, également connue historiquement sous le nom de Philippeville, se situe au nord-est de l'Algérie. Les coordonnées géographiques de la wilaya sont d'environ 36,8796° de latitude N et 6,9094° de longitude E. Skikda partage ses frontières avec plusieurs wilayas importantes, contribuant chacune à la dynamique culturelle et économique de la région. À l'est se trouve la wilaya d'Annaba, à l'ouest se trouve la wilaya de Jijel. Guelma et Mila se trouvent respectivement au sud-est et au sud-ouest. Au sud on retrouve la wilaya de Constantine célèbre pour son importance historique, son patrimoine culturel et ses ponts.

La situation côtière de la Wilaya le long de la mer Méditerranée améliore non seulement son attrait esthétique, mais offre également un avantage stratégique en termes de transport maritime et de commerce. Le littoral de Skikda s'étend sur environ 160 kilomètres, comprenant des plages de sable, des criques rocheuses et des falaises offrant des vues imprenables sur la mer. La proximité de la mer Méditerranée a historiquement contribué au développement du port de Skikda. À l'intérieur des terres, le relief de Skikda est caractérisé par des plaines fertiles et des plateaux qui soutiennent les activités agricoles et permettent diverses cultures.

2.4.2 Population, climat et météo :

Skikda connaît un climat méditerranéen caractérisé par des hivers doux et humides et des étés chauds et secs. Pendant les mois d'hiver, les températures moyennes varient de 3 °C à 15 °C, accompagnées de précipitations relativement élevées. Le printemps annonce une transition vers des températures plus chaudes, avec des températures variant de 12 °C à 24 °C. Les étés à Skikda sont caractérisés par des conditions plus chaudes et humides, avec des températures moyennes allant de 24 °C à 38 °C. L'automne voit un refroidissement progressif, avec des températures variant de 16 °C à 26 °C. La région d'implantation du projet reçoit une tranche d'eau annuelle comprise entre 600 et 900 mm (source ONM), Relativement abondante, cette pluviométrie reste cependant irrégulière.

Selon les dernières données disponibles, Skikda compte environ 1,1 million d'habitants, ce qui en fait l'un des principaux centres urbains du nord-est de l'Algérie. La croissance de la population reflète l'importance économique de Skikda et son attractivité en tant que pôle résidentiel et commercial.

2.4.3 Sismicité du site :

La wilaya de Skikda est l'une des régions propices aux activités sismiques. En se basant sur la sismicité historique, l'Algérie a été subdivisée en quatre zones macrosismiques (RPA.2003).

- Zone III : sismicité élevée ;
- Zone IIa et IIb : sismicité moyenne ;
- Zone I : sismicité faible ;
- Zone 0 : sismicité négligeable.

CHAPITRE II : EMBLEMEMENT DU PROJET & CONCEPTION DE LA SUPERSTRUCTURE.

D'après le document technique réglementaire DTR BC 2-48 des règles parasismiques algériennes RPA99/2003, la région de Skikda est classée en Zone IIa (sismicité moyenne).

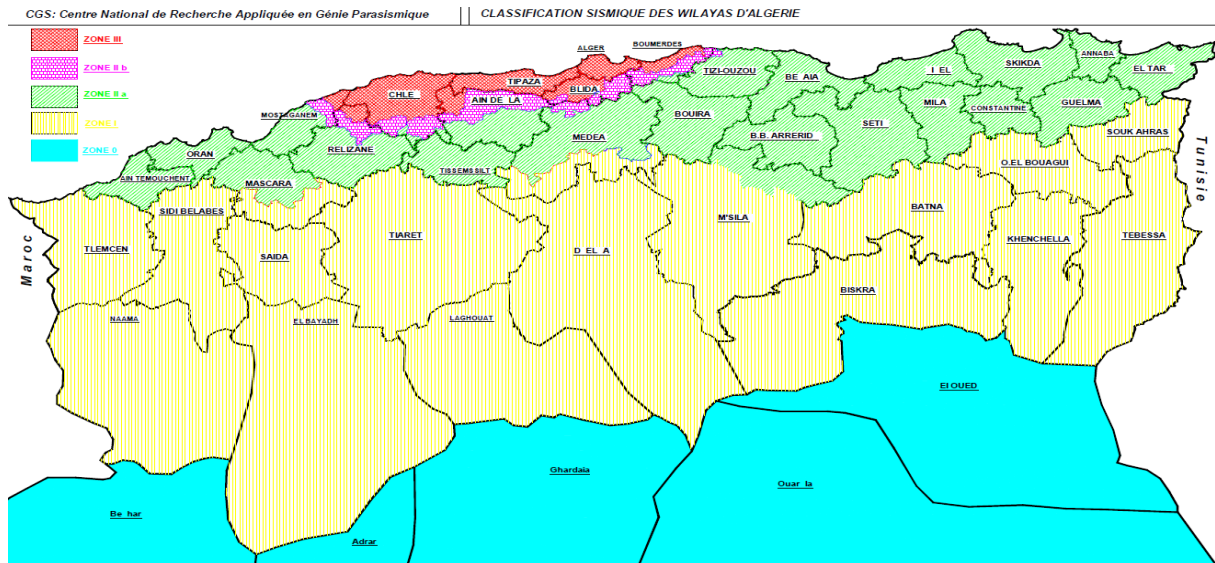


Figure 2.4 : Classification sismique des wilayas d'Algérie -RPA 2003-

2.4.4 Réseau routier :

Le réseau routier de la Wilaya de Skikda est bien développé et permet une connectivité efficace tant à l'échelle régionale que nationale. Il est composé de différents types de routes qui relient Skikda à diverses destinations importantes.

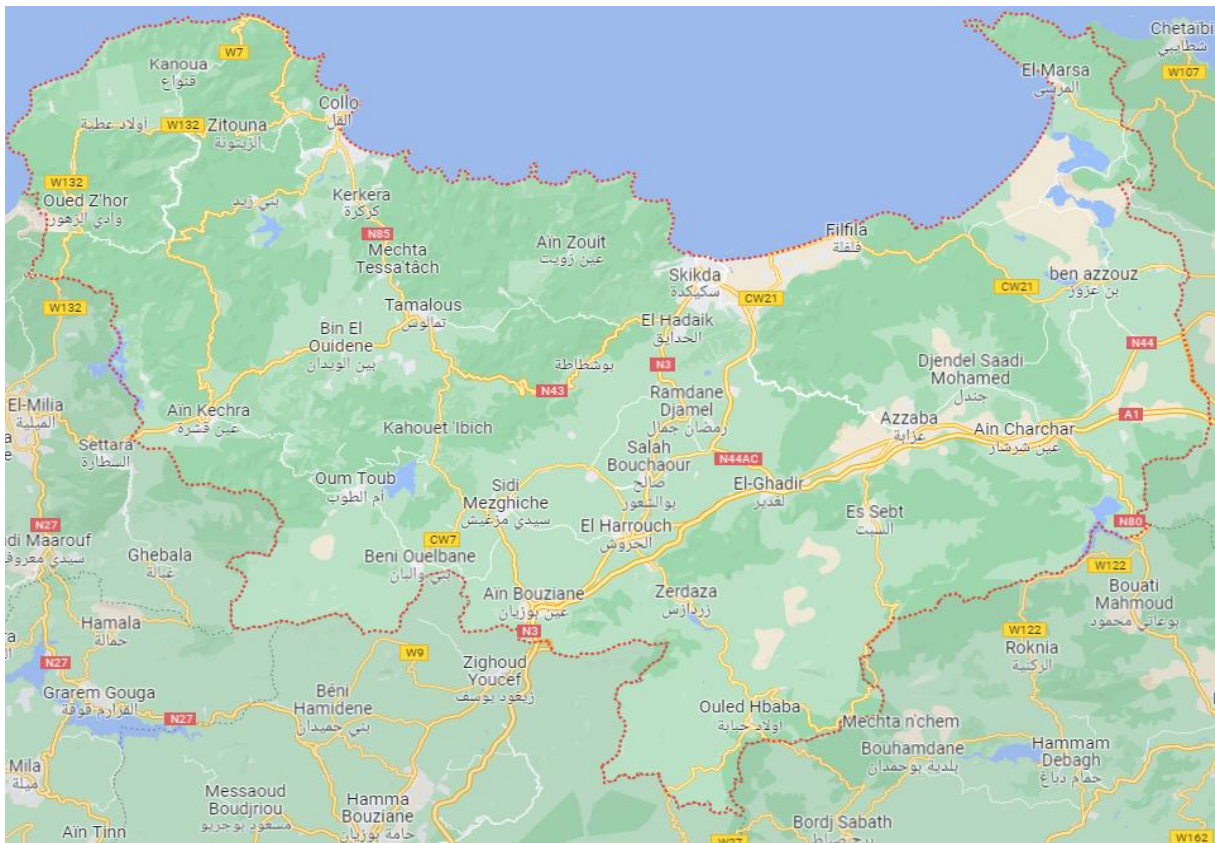


Figure 2.5 : Réseau routier de la wilaya de Skikda ainsi que ses frontières -Google Maps-

CHAPITRE II : EMBLACEMENT DU PROJET & CONCEPTION DE LA SUPERSTRUCTURE.

Les routes nationales jouent un rôle essentiel dans le réseau routier de la wilaya, la RN3 relie Skikda à Constantine, la RN 44 la relie à Annaba, facilitant les déplacements vers cette autre wilaya côtière, la RN 80 relie Skikda à Guelma. Enfin, la RN 43 relie Skikda à Jijel et Mila. L'autoroute A1 est-ouest, d'une longueur de 75 km, traverse également la wilaya de Skikda, offrant une voie rapide et pratique pour les déplacements à travers le pays.

En plus des routes nationales, la wilaya dispose de 578 km de chemins de Wilaya qui relient le chef-lieu de la wilaya à d'autres grands centres urbains. Parmi ces chemins, le CW21 au nord-est de la wilaya et les CW7 et CW132 à l'ouest sont particulièrement importants.

Par ailleurs, la wilaya de Skikda est également bien desservie par les chemins communaux, avec un réseau de 1668 km de ces voies qui facilitent les déplacements à l'intérieur de la wilaya, notamment dans les zones rurales et les communautés locales.

En ce qui concerne l'accès à la raffinerie, il est possible de s'y rendre en empruntant le chemin de wilaya CW21 ou en utilisant la pénétrante du nouveau port en passant par la RN44ab.

2.5 Type de réservoir choisi pour le projet :

La demande de SONATRACH était de 150.000 m³ en matière de GNL, et en raison de superficie dédiée à la construction des 3 réservoirs et aux exigences par rapport à la distance minimale entre réservoirs selon le NFPA-59A et l'API 625 (section 6.2, ANNEX D) qui est déterminée en fonction des facteurs de risques et de danger auxquels les réservoirs sont confrontés (séismes vents, ...), un réservoir de type confinement intégral a été choisi.

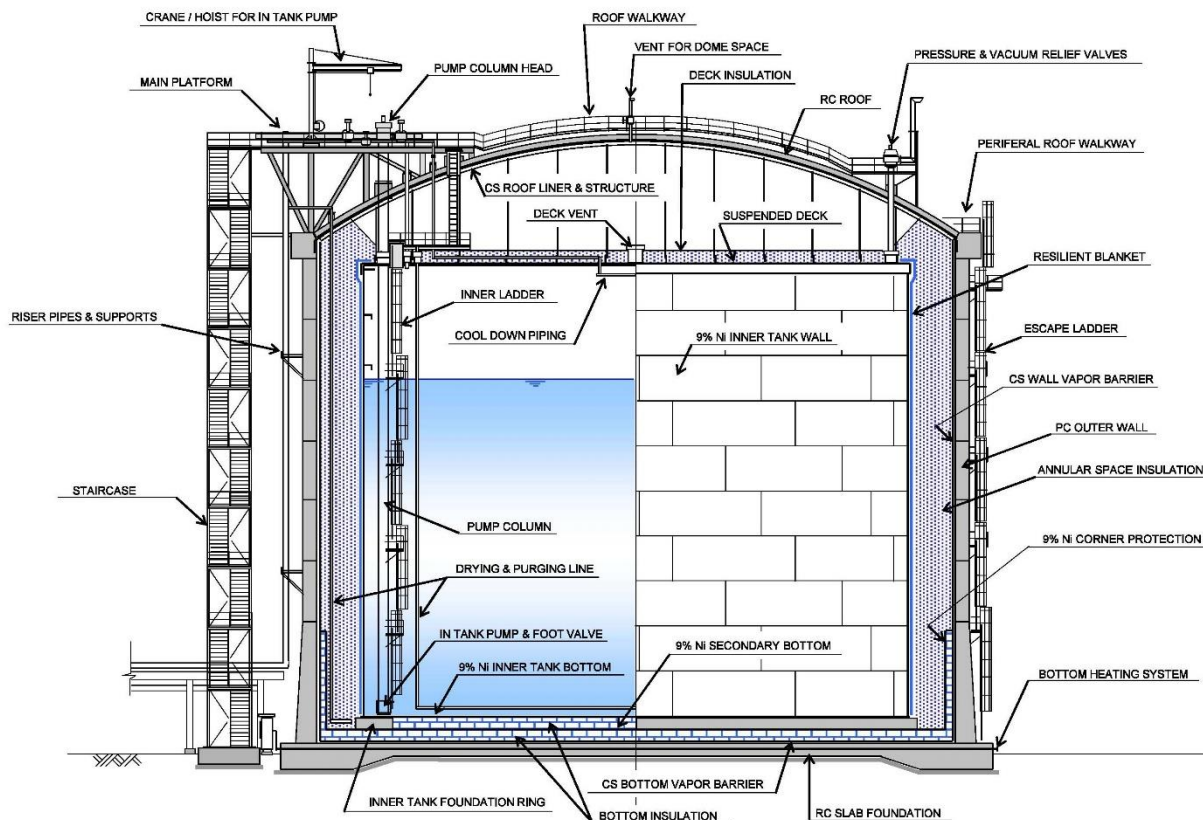


Figure 2.6: Morphologie générale du réservoir de type confinement intégral.

2.6 Dimensionnement de la superstructure du réservoir : (Jupe et dôme)

D'après les contraintes mentionnées dans la section précédente, un diamètre de 80 m du réservoir interne a été choisi, et avec lequel on déterminera la hauteur de ce dernier.

Suivant l'API-625 section 6.3 la hauteur du réservoir dépend de plusieurs paramètres :

- Un franc-bord de 0.3 m au-dessus du niveau maximal du liquide doit être inclus dans la hauteur du réservoir.
- Un niveau minimal d'opération, permettant l'enclenchement des pompes.
- Un niveau de liquide inutilisable appelé talon de 0.15 m qui permet de maintenir la température du réservoir.
- Un calcul de la hauteur d'onde de ballonnement du fluide en cas de séisme est nécessaire.
- Une marge de protection de débordement.
- Une hauteur nette d'opération.

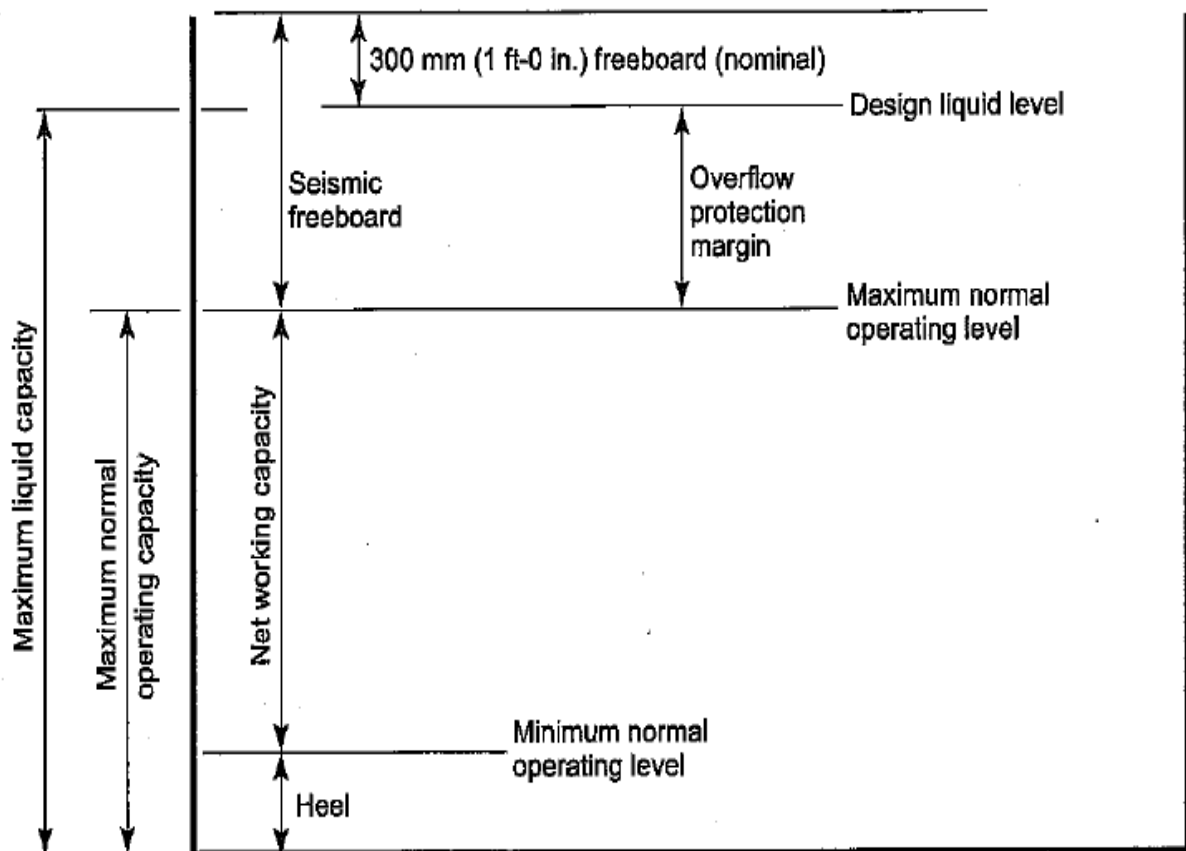


Figure 2.7: Niveaux de liquides et volumes. API-625 6.3

2.6.1 Détermination de la hauteur totale du réservoir interne :

2.6.1.1 Hauteur nette :

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 h_u ; 150000 = \frac{\pi}{4} 80^2 h_u ; h_u = 29.85\text{m}$$

CHAPITRE II : EMLACEMENT DU PROJET & CONCEPTION DE LA SUPERSTRUCTURE.

2.6.1.2 Hauteur minimale :

$$h_{\min} = h_{\text{heel}} + h_{\text{ml}}$$

Où :

h_{heel} : Hauteur du talon (m).

h_{ml} : Niveau minimal d'opération (m).

$$h_{\min} = 0.15 + 1 = 1.15 \text{ m}$$

La marge de protection de débordement est fixée à 2.2 m.

2.6.1.3 La hauteur totale :

$$H_t = 29.85 + 1.15 + 2.2 + 0.3 = 33.5 \text{ m}$$

Cette hauteur représente la hauteur géométrique maximale du réservoir primaire ainsi que le réservoir secondaire en béton.

Le dimensionnement du réservoir primaire se fera sur la base de la hauteur de la capacité maximale du liquide, soit à :

$$h = H_t - 0.3 = 33.2 \text{ m}$$

L'espace inter coque-Jupe ou vide annulaire, est dimensionné suivant l'épaisseur de la couverture ou l'isolation thermique nécessaire afin de garantir un boil-off-rate inférieur à celui fixé par SONATRACH. L'espace annulaire a été dimensionné et fixé à 1 m.

Nous rappelons que le boil-off-rate est un pourcentage d'évaporation journalier du gaz naturel sous effet d'échanges thermique, par conduction, convection naturelle et irradiation solaire à travers les différentes couches d'isolation, dans les différentes parties du réservoir, à savoir le radier, la jupe et le dôme.

Le diamètre interne du réservoir secondaire en béton est donc de 82 m.

2.6.2 Capacité géométrique maximale du réservoir primaire :

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 H_t ; V = \frac{\pi}{4} 80^2 \cdot 33.5 ; V = 168.389,3662 \text{ m}^3$$

2.6.3 Détermination de la hauteur totale du réservoir secondaire :

2.6.3.1 Hauteur du liquide pour le dimensionnement du réservoir secondaire :

Selon l'API-625 section 6.4, le réservoir secondaire doit impérativement contenir la capacité maximale du liquide du réservoir primaire, soit à la hauteur de 33.2 m.

2.6.3.2 Hauteur du liquide maximale dans le réservoir secondaire :

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 h_{\max} ; 168.389,3662 = \frac{\pi}{4} 82^2 h_{\max}; h_{\max} = 31.89 \text{ m}$$

Le calcul de la pression hydrostatique se fera en fonction de cette hauteur.

2.6.3.3 La hauteur de la jupe du réservoir secondaire :

Elle est calculée à partir de la face supérieure du radier -*qui est considérée comme référence des hauteurs dans tous les calculs*- en fonction de la hauteur géométrique du réservoir primaire et de l'épaisseur du système d'isolation thermique à la base qui est fixée à 0.8 m, sur lequel repose le réservoir primaire qui est autoportant.

$$H_{\text{jupe}} = H_t + 0.8 = 34.3 \text{ m}$$

2.6.4 Capacité géométrique maximale du réservoir secondaire :

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 H_{\text{jupe}} ; V = \frac{\pi}{4} 82^2 \cdot 34.3 ; V = 181.138,8917 \text{ m}^3$$

2.6.5 L'épaisseur de la jupe et du dôme :

Il n'y a aucun standard ou guide officiel qui donne une marche à suivre exacte du dimensionnement de l'épaisseur de la jupe, son épaisseur varie de 0.5 à 0.8 et même jusqu'à 0.85 m pour les réservoirs de très grandes capacités de plus de 250.000 m³, les BS-EN-14620-3 donnent presque aucune indication sur l'épaisseur minimale à prendre, où il est mentionné en section 8.3 qu'on doit prendre en considération un recouvrement adéquat, et un espace suffisant entre les mailles des nappes d'aciers intérieures et extérieures et les gaines de précontrainte horizontales et verticales.

L'ACI-376 donne une loi empirique pour évaluer la résistance de pénétration du béton due à un projectile solide en section 8.4.12, elle a été développée par la (FEF) et le (CEA) commissariat de l'Energie atomique.

Suivant les consignes de la UK Atomic Energy Authority, une simulation d'impact de projectile solide de 50 kg à une vitesse de 45 m/s a été faite sur le réservoir, et les résultats ont montré qu'une épaisseur minimale de 0.5 m pour la jupe et 0.35 m pour le dôme doivent être prises en considération.

Dans notre cas, une épaisseur de 0.65 m a été adoptée pour la jupe et 0.4 m pour le dôme.

En raison des efforts flexionnels très importants auxquelles les coques -cylindrique et sphérique- sont soumises, en plus des efforts membranaires, un épaissement du dôme aux abords de sa jonction avec le cylindre est opéré, pour atteindre 1.4 m. La même chose pour le cylindre à sa base, où il atteint 1.1 m.

CHAPITRE II : EMLACEMENT DU PROJET & CONCEPTION DE LA SUPERSTRUCTURE.

2.6.6 Diamètre du dôme :

Il est commode dans la construction des réservoirs GNL d'avoir une flèche égale à $1/8$ du diamètre interne du réservoir secondaire. (*Journal of University of Babylon for Engineering Sciences, Vol. (26), No. (6): 2018*)

Suivant les recommandations de l'API-650 concernant le revêtement en acier, ce standard préconise d'avoir un rayon de dôme compris entre $0.8d$ et $1.2d$, où d est le diamètre interne. Donc le rayon du dôme choisi est égal à $1.0d$ soit $R_{\text{dôme}} = 82 \text{ m}$.

2.6.7 Dimensions de la poutre annulaire :

La hauteur de la poutre est prise à 3.4 m et d'une largeur de 0.8 m soit un épaissement de 0.15 m par rapport à la jupe.

2.7 Description de l'infrastructure : (Radier et Pieux)

Le radier repose sur 332 pieux foré en béton (d'un diamètre de 1 mètre). Ces pieux sont disposés selon une grille carrée de $4,5 \times 4,5 \text{ m}^2$ dans la partie centrale et en 3 rangées circulaires de 52 pieux en périphérie de la dalle. Le radier (rayon de 43.1 mètres) a une épaisseur de 1 m dans la partie centrale, sous le réservoir primaire, et s'épaissit à 1.3 m en périphérie pour créer un support de fondation pour les parois des réservoirs intérieur et extérieur.

Le radier est enfoncé d'environ 0.6 m sous la surface du sol et dépasse la surface du sol de 0.7 m . La dalle est divisée en plusieurs secteurs qui seront coulés alternativement afin de minimiser les effets des contraintes thermiques pendant l'hydratation du ciment et du retrait précoce du béton.

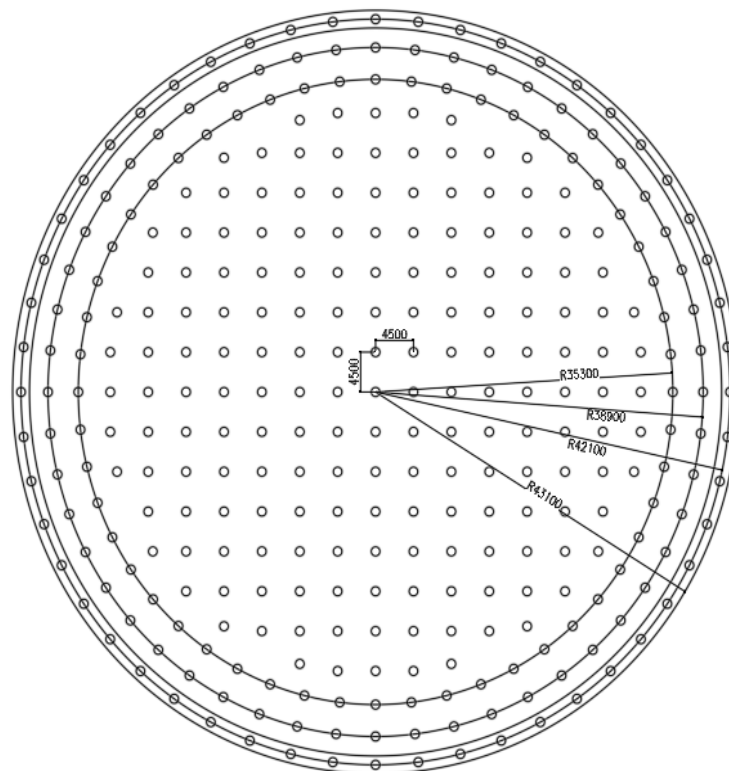


Figure 2.8 : Schéma de répartition des pieux forés sous le radier.

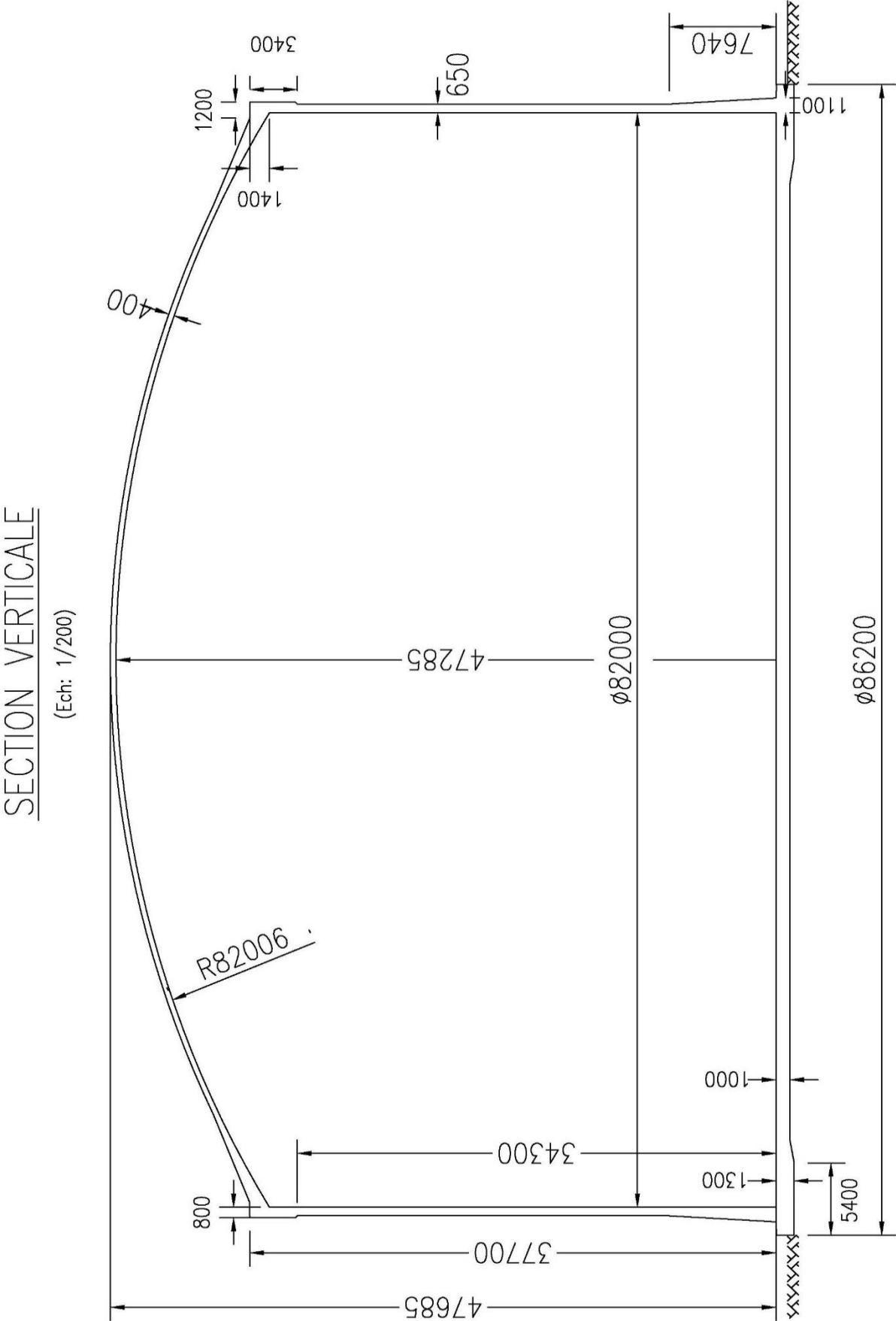


Figure 2.9 : Section verticale type du réservoir GNL étudié.

SECTION VERTICALE DE LA JUPE

(Ech: 1/200)

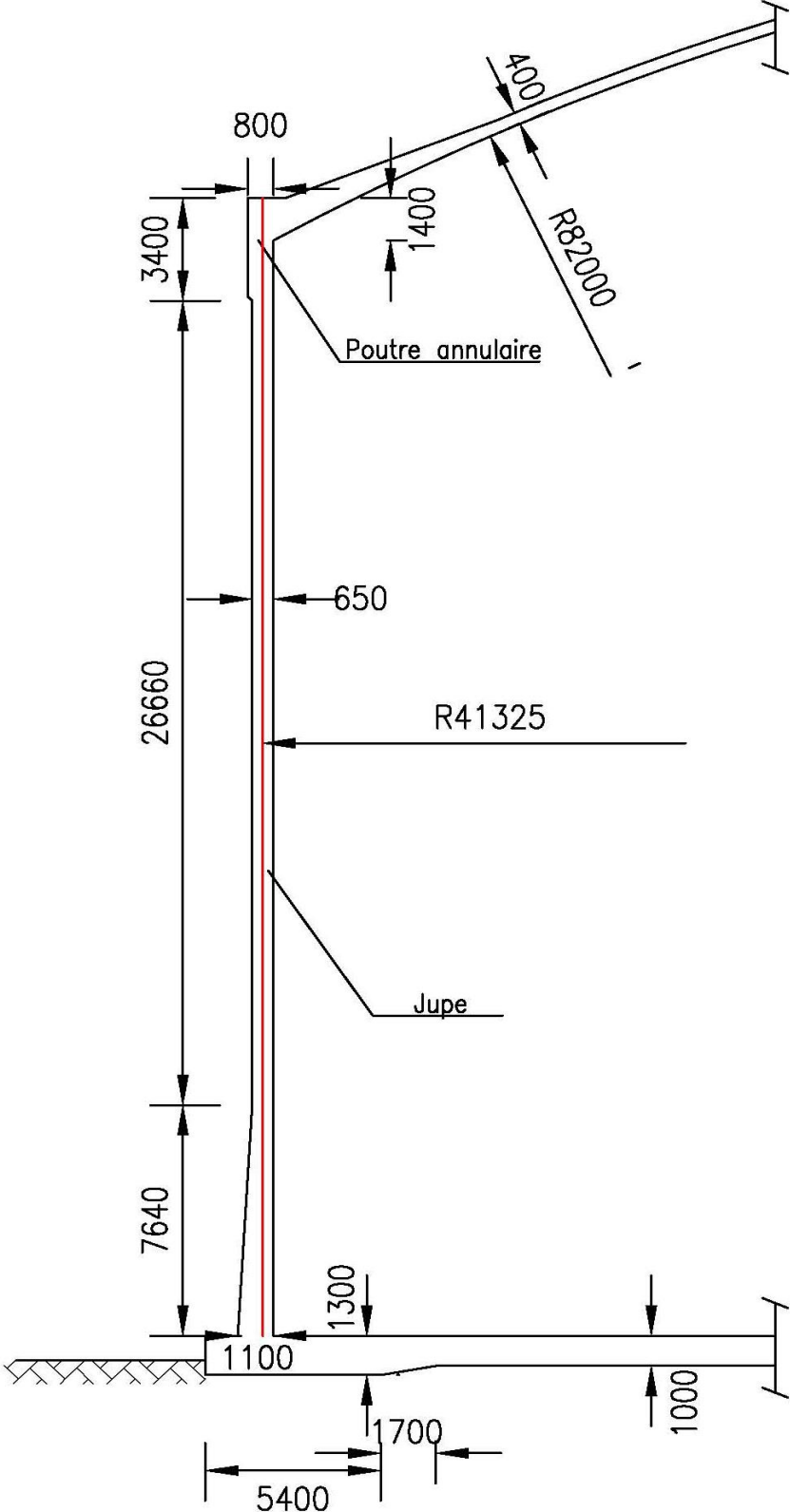


Figure 2.10 : Section verticale de la jupe du réservoir.

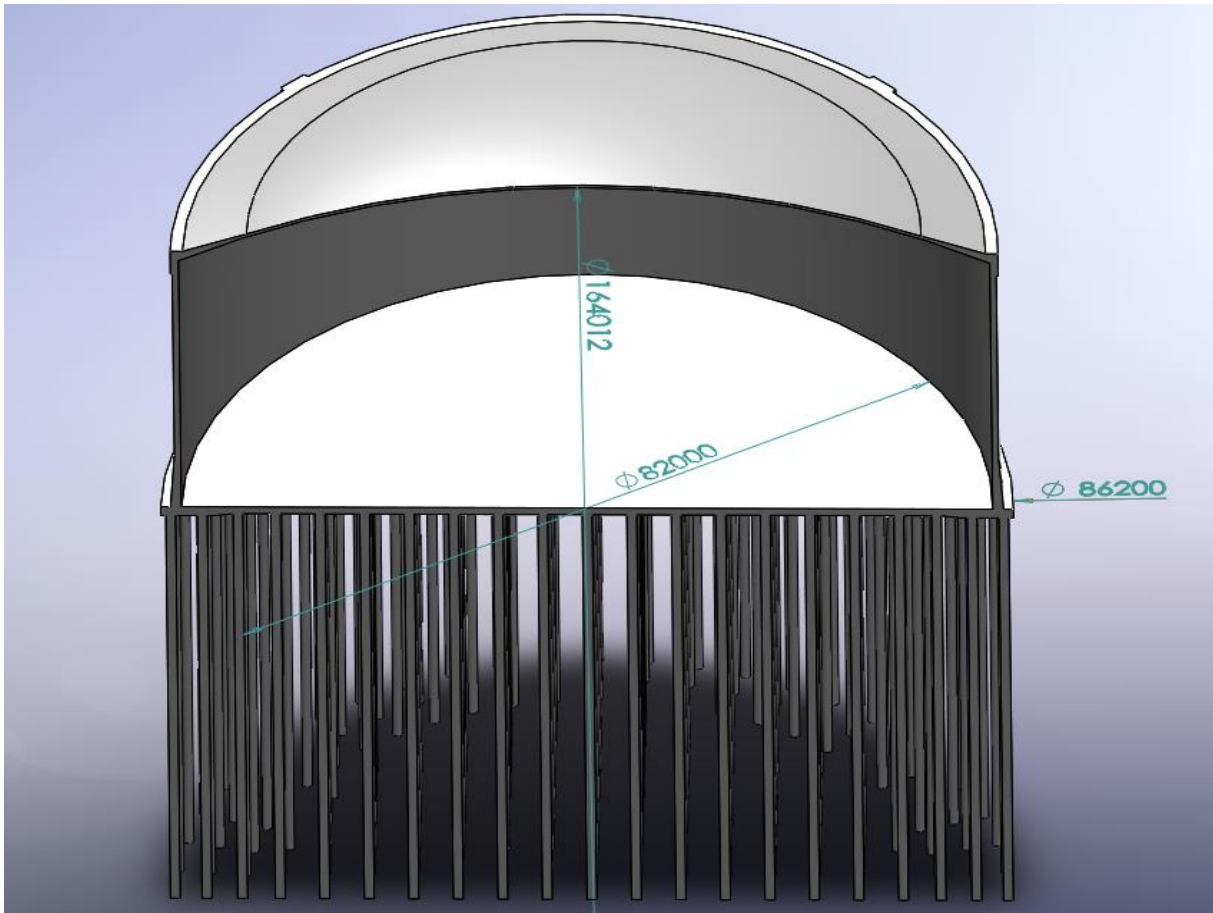


Figure 2.11 : Section verticale du model 3D complet du réservoir en béton.

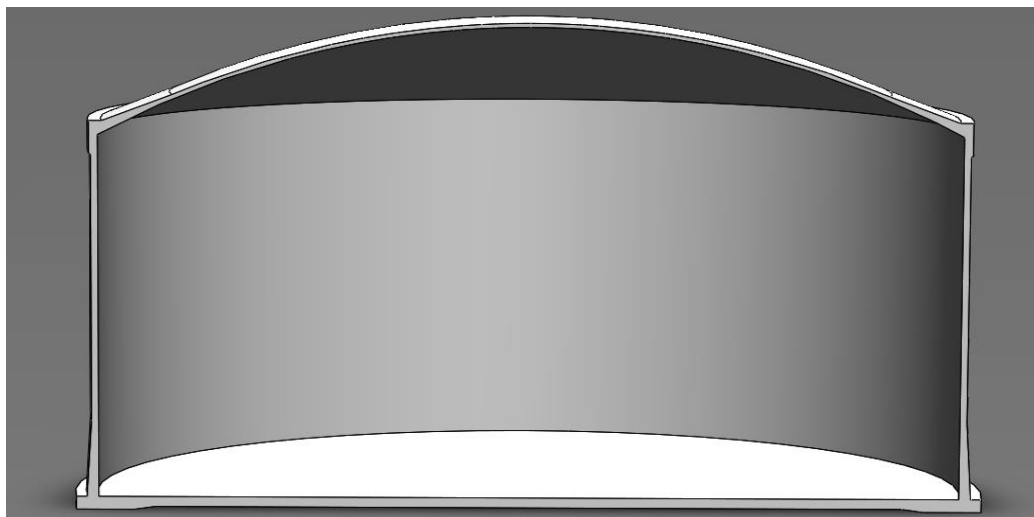


Figure 2.12 : Section verticale du model 3D sans pieux du réservoir en béton

2.8 Conclusion :

Ce chapitre a présenté une vue d'ensemble de la zone d'implantation du projet et ses caractéristiques, ainsi que la méthodologie pour le dimensionnement de la superstructure du réservoir GNL, nous avons obtenus les paramètres géométriques clés et nous avons établi les plans nécessaires pour la suite de ce mémoire.

CHAPITRE III :

ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA
PRECONTRAINTÉ.

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

3.1 Introduction :

Le présent chapitre se concentre sur l'étude des contraintes induites par les efforts membranaires développées au niveau de la jupe du réservoir ainsi que dans la poutre annulaire, sous différents types de chargements et l'étude de la précontrainte.

Dans un premier temps, nous nous pencherons sur l'analyse des contraintes circonférentielles et axiales développées dans la jupe et la poutre annulaire, nous enchaînerons avec l'étude de la précontrainte horizontale et verticale du réservoir suivant le BS-EN-1992-1 et le BS-8110, et cela après avoir au préalable déterminer le type et le nombre de câbles de précontrainte.

Cependant, il convient de souligner que l'étude de ce réservoir présente une complexité considérable. Dans notre approche, nous chercherons à simplifier au maximum l'analyse en considérant quatre scénarios, à partir desquels nous déterminerons les efforts membranaires maximaux en appliquant différents types de chargements axisymétriques.

Il est à noter aussi que cette étude ne prend pas en considération les effets de températures et les chargements dynamiques.

3.2 Hypothèses et considérations pour l'étude :

Pour faciliter notre étude, nous utiliserons un modèle numérique axisymétrique et le logiciel MIDAS. Les caractéristiques géométriques spécifiques du réservoir, qui ont été introduites dans le logiciel, sont décrites en détail dans la section 2.6.3.2 du chapitre 2, avec les figures 2.9 et 2.10

Le modèle axisymétrique est utilisé pour résoudre des problèmes présentant une symétrie de révolution autour d'un axe. Cette approche simplifie considérablement la modélisation et l'analyse des structures tubulaires et rotatives dans le cadre de la recherche académique.

Les cas de charges et chargements étudiés ne seront pas pondérés et les vérifications des contraintes de béton se feront à l'ELS.

Lorsque la construction de réservoir est achevée, il est soumis à des différents tests, notamment des tests pneumatiques et hydrostatiques, dans le cas de notre réservoir qui est de type 'confinement intégral' et conformément aux ACI-376 section 12.3 et API-625 section 10.3, le second conteneur (Réservoir en béton) doit être uniquement soumis à un test pneumatique et il est exclu du test hydrostatique auquel seul le conteneur métallique y est soumis.

3.2a Hypothèses du logiciel Midas :

Lors de l'utilisation du logiciel Midas pour l'analyse par éléments finis, certaines hypothèses sont faites. Ces hypothèses comprennent la linéarité des matériaux, leur isotropie et l'élasticité linéaire. On suppose également de petits déplacements et déformations, la continuité du champ de déformation, et l'utilisation d'un maillage suffisamment fin.

3.3 Etude de la jupe et poutre annulaire du réservoir :

3.3.1 Dans la direction circonférentielle :

Nous avons proposé 4 scénarios :

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

3.3.1.1 Scénario 1 : Réservoir vide.

Nous allons analyser le réservoir soumis à son poids propre uniquement avec une masse volumique de 25 kN/m^3 et une accélération gravitaire égale à 9.81 m/s^2 (N/kg).

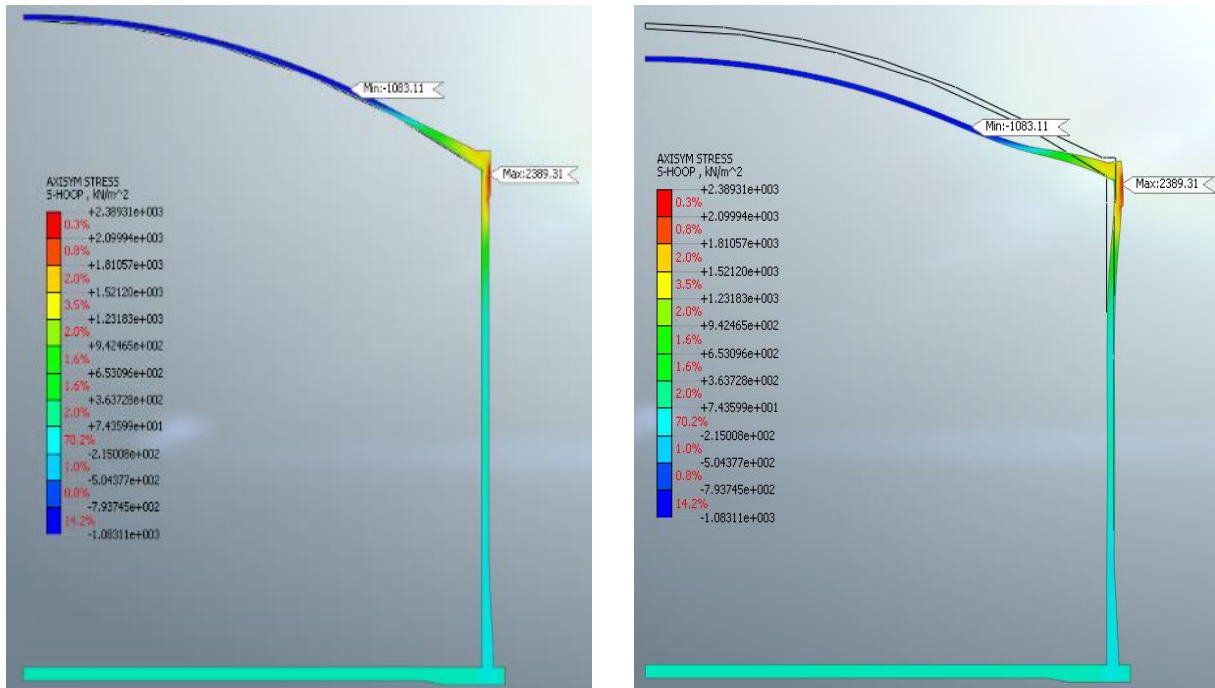


Figure 3.1 : Résultat numérique du réservoir à vide.

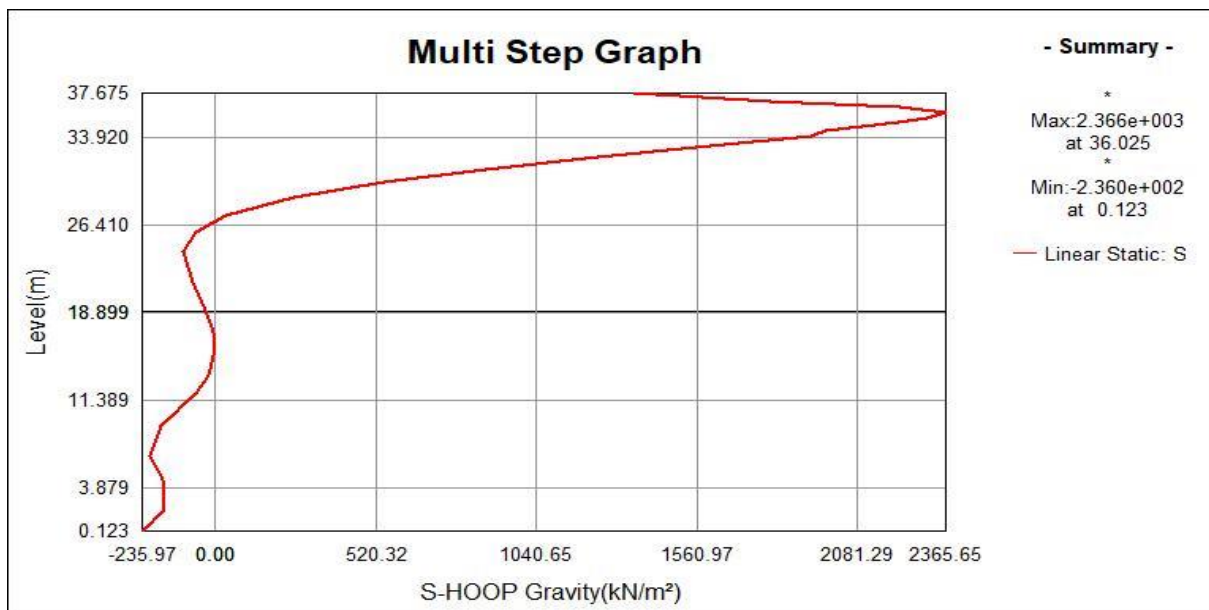


Figure 3.2 : Distribution verticale des contraintes circonférentielles sous poids propre.

Analyse du scénario 1 :

D'après les résultats obtenus par MIDAS nous constatons que la poussée du dôme exerce des forces induisant des contraintes circonférentielles de traction étalées au niveau de la poutre annulaire atteignant 2.4 MPa au milieu de la hauteur de cette dernière et 2.1 MPa en haut de la jupe.

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

3.3.1.2 Scénario 2 : Tests Pneumatiques.

Dans ce cas nous allons soumettre le réservoir en plus de son poids propre à une dépression interne égale à -5 mbarg, qui figure dans l'un des tests pneumatiques.

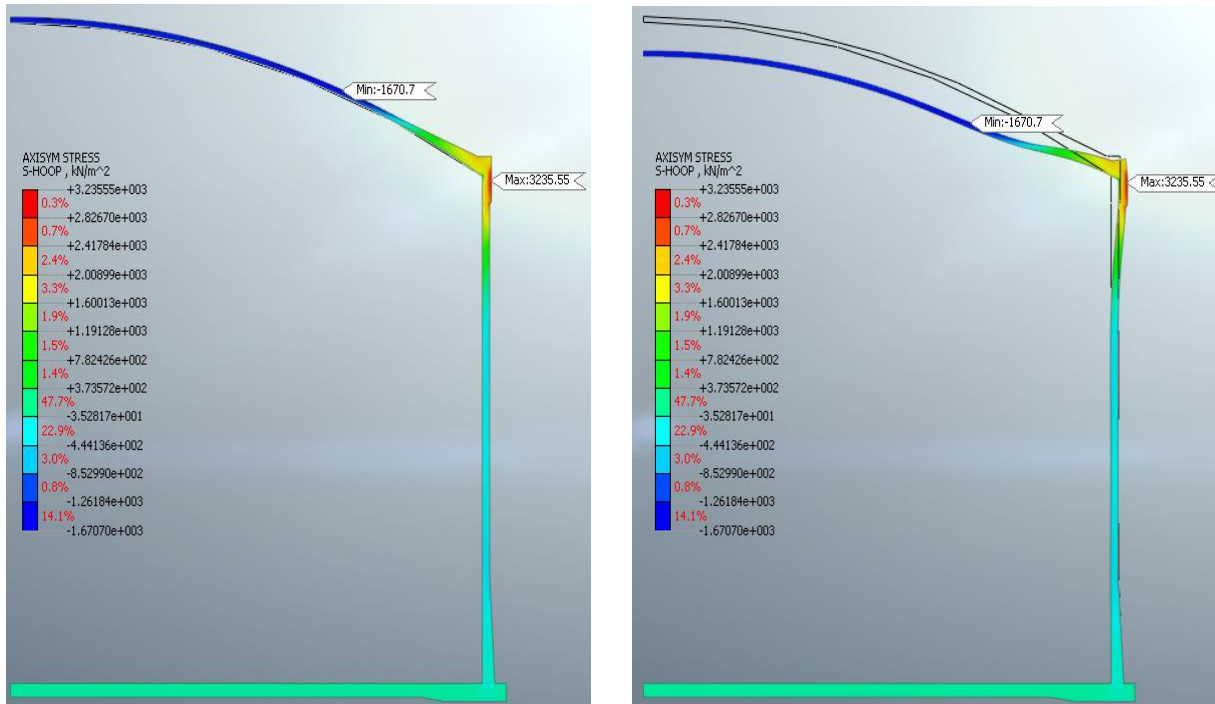


Figure 3.3: Résultat numérique du réservoir soumis à une dépression de -5 mbarg.

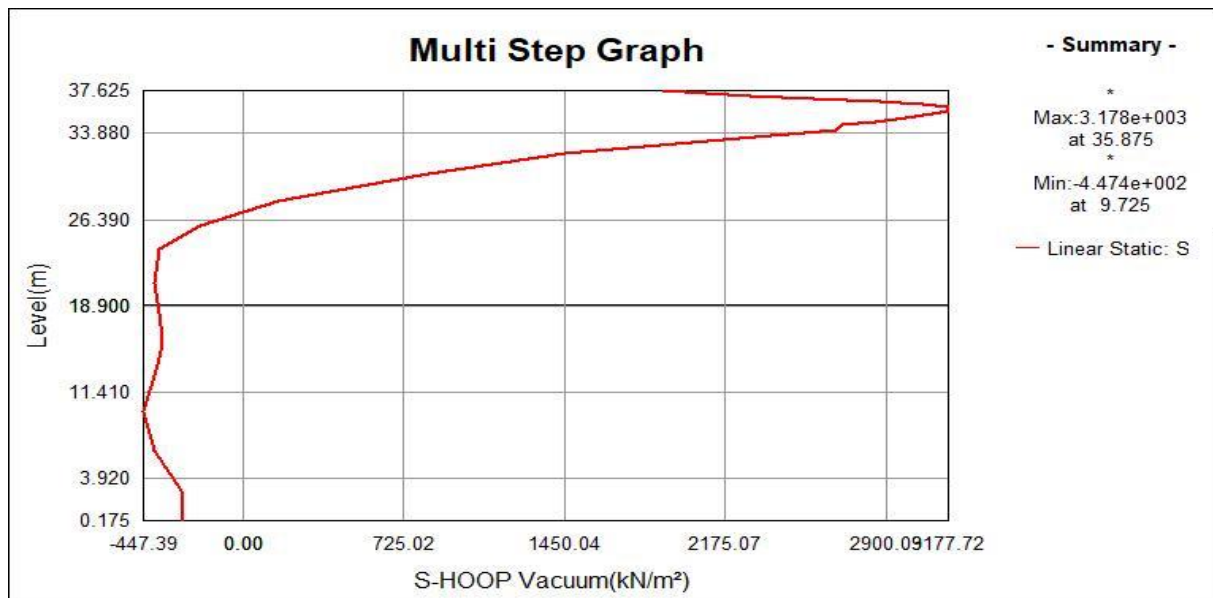


Figure 3.4 : Distribution verticale des contraintes circonférentielles sous effet de dépression.

Analyse du scénario 2 (dépression):

À partir des résultats obtenus, nous remarquons que l'effet de la dépression fait augmenter la poussée du dôme et par conséquent la contrainte circonférentielle de traction au niveau de la poutre annulaire et le haut de la jupe grimpe de 35.4% pour atteindre 3.24 MPa comme maximum.

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

Dans ce qui suit nous allons soumettre le réservoir à une surpression de +387.5 mbarg en plus de son poids propre.

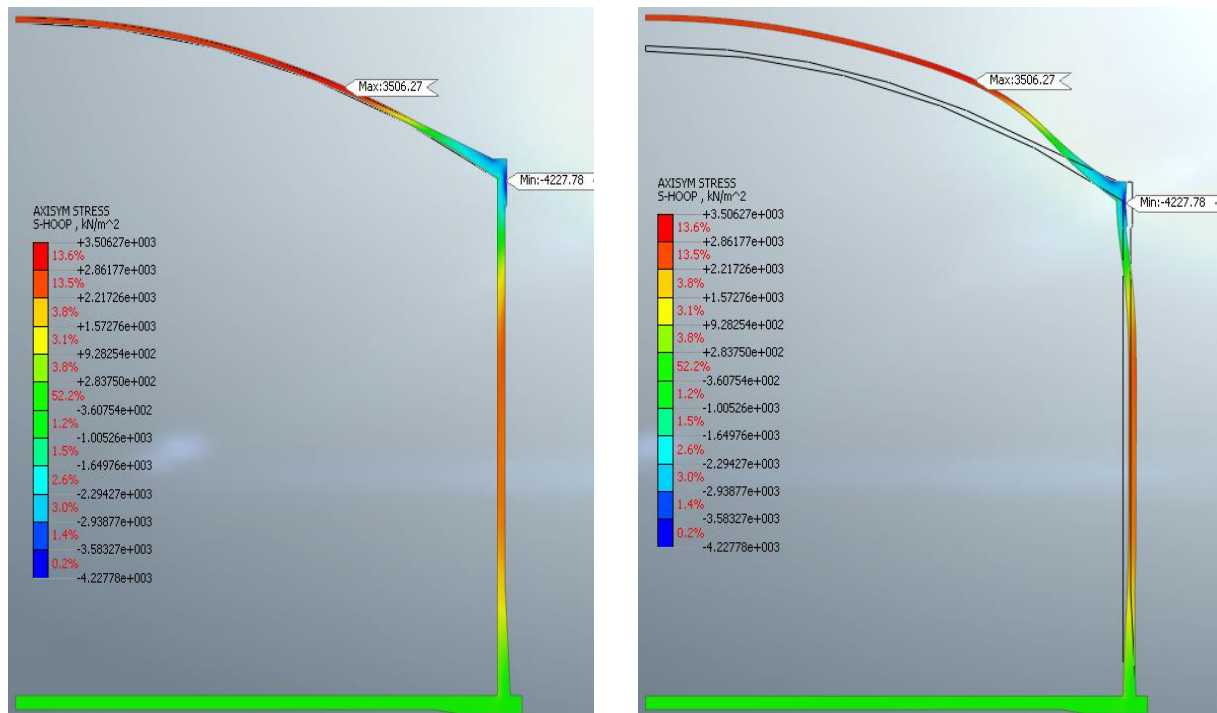


Figure 3.5 : Résultat numérique du réservoir soumis à une surpression de + 387.5 mbarg.



Figure 3.6 : Distribution verticale des contraintes circonférentielles sous effet de surpression de +387.5 mbarg.

Analyse du scénario 2 (Surpression) :

Dans ce cas nous pouvons constater que cette surpression provoque des contraintes de compression au niveau de le poutre annulaire avec un maximum de 4.23 MPa et des contraintes de traction sur la majeure partie de la jupe avec des valeurs atteignant 2.73 MPa.

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

3.3.1.3 Scénario 3 : Fonctionnement normal du réservoir avec surpression.

Dans ce cas nous allons soumettre le réservoir à une surpression maximale en opération de +310 mbarg,

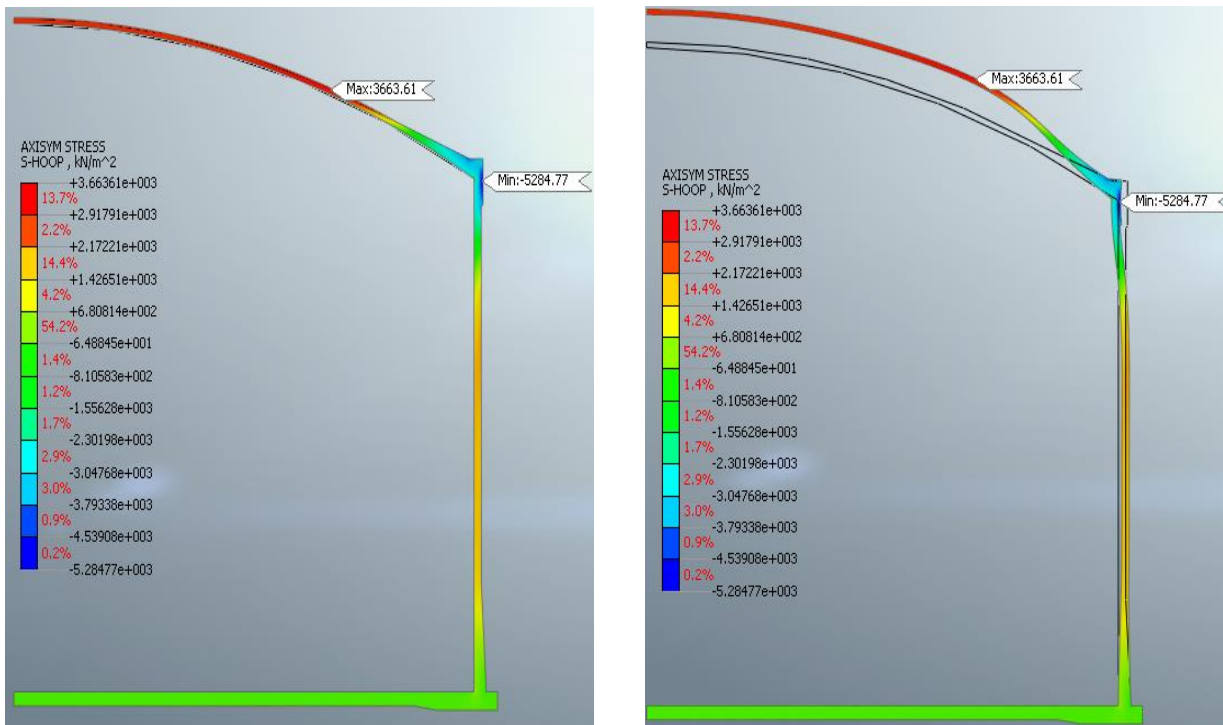


Figure 3.7 : Résultat numérique du réservoir soumis à une surpression de + 310 mbarg.

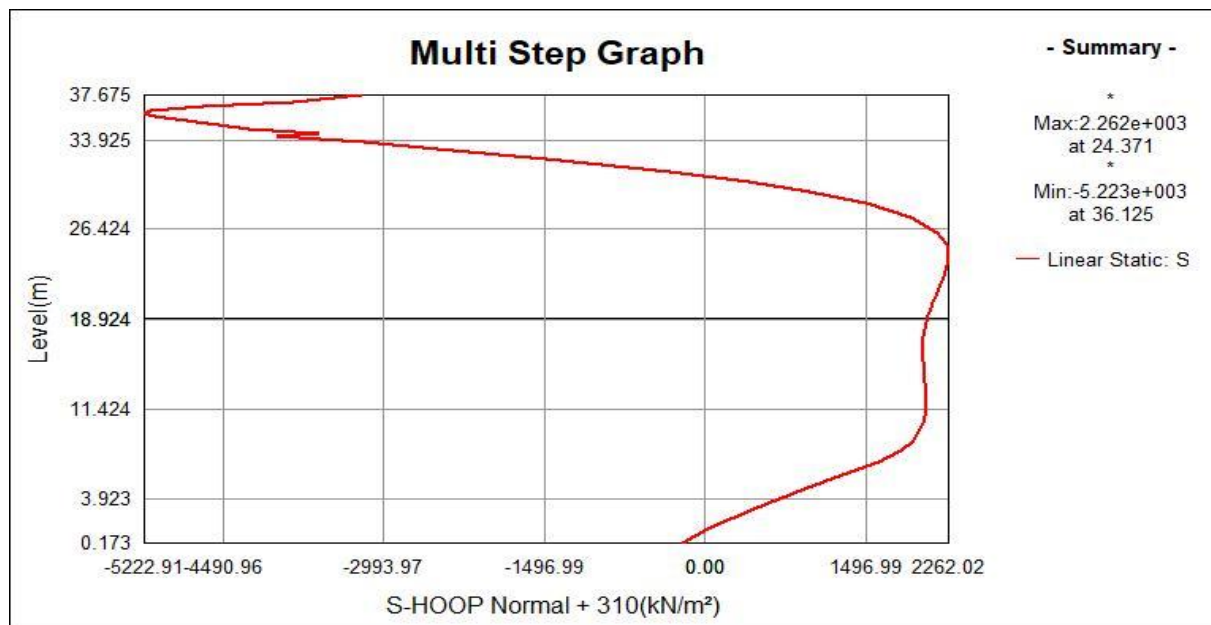


Figure 3.8 : Distribution verticale des contraintes circonférentielles avec +310 mbarg.

Analyse du scénario 3 :

Dans ce cas, il est observé que la surpression entraîne des contraintes de compression dans la poutre annulaire, atteignant un maximum de 5,29 MPa. De plus, la majeure partie de la jupe subit des contraintes de traction allant jusqu'à 2,27 MPa.

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

3.3.1.4 Scénario 4 : Cas d'une rupture accidentelle totale du réservoir primaire.

Dans ce cas nous allons soumettre le réservoir à une surpression de +310 mbarg et une pression hydrostatique due au GNL de hauteur maximale de 32.65 m. l'effet de la température n'est pas pris en compte dans cette étude.

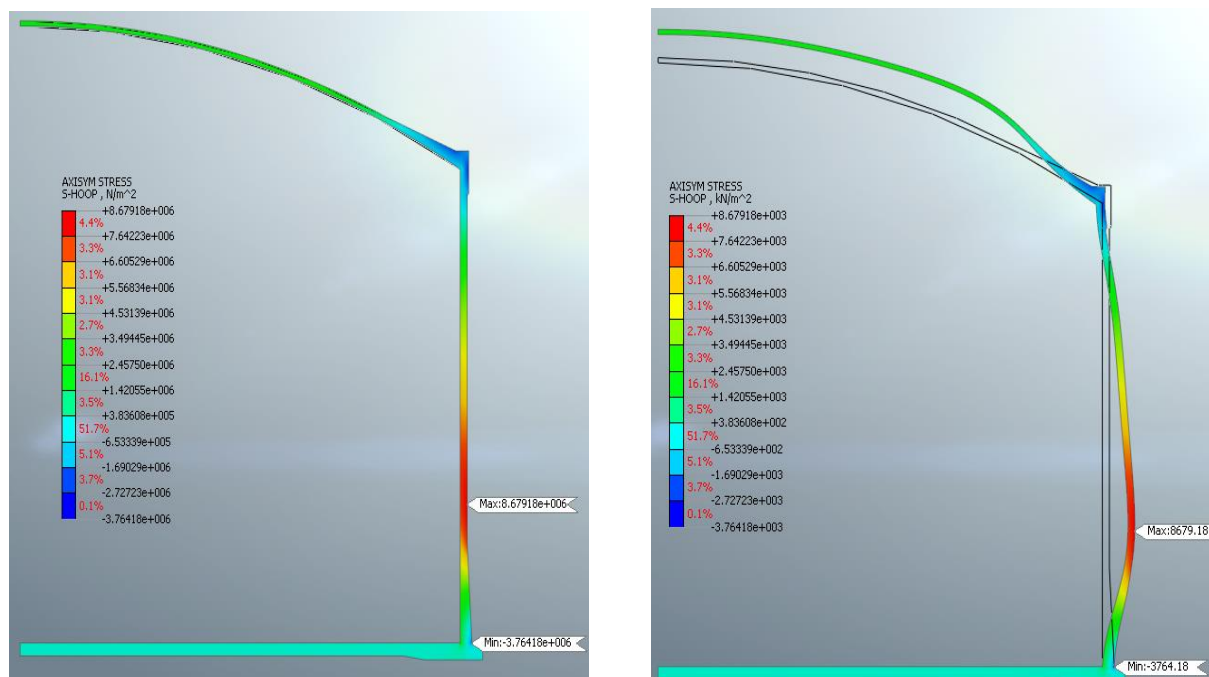


Figure 3.9 : Résultat numérique du réservoir soumis à un cas de charge accidentel.

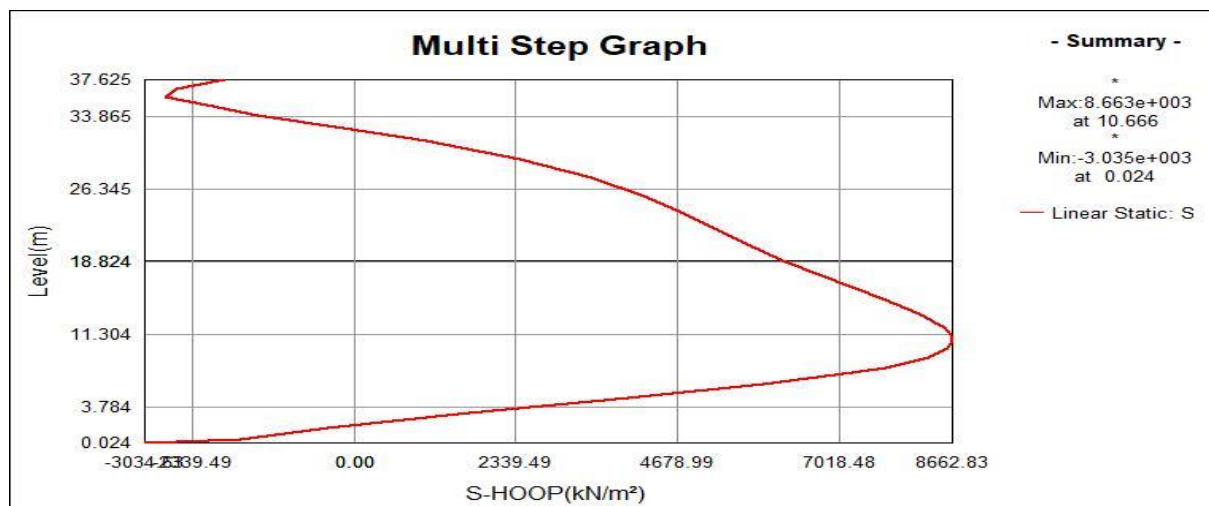


Figure 3.10: Distribution verticale des contraintes circonférentielles en cas accidentel.

Analyse du scénario 4 :

Dans ce cas nous pouvons constater d'après les résultats obtenus que l'effet combiné de la pression hydrostatique du GNL et de la surpression provoque des contraintes de traction circonférentielles très importantes avec un maximum de 8.7 MPa au niveau de la jupe à une hauteur de 10.65 m soit près du tier de la hauteur de cette dernière et des contraintes de compression avec un maximum de 3.77 MPa à la base. La surpression provoque également des contraintes de compression allant jusqu'à 2.92 MPa au niveau de la poutre annulaire.

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

3.3.2 Dans la direction axiale :

On reprend le scénario 2 et 3, mais cette fois ci sans prendre en considération le poids propre de la structure, on s'intéressera uniquement à l'effet de la surpression qui développera des contraintes de traction dans la jupe.

3.3.2.1 Scénario 2 : Tests Pneumatiques

Nous allons uniquement prendre en considération la surpression de +378.5 mbarg en négligeant l'effet de la gravité, on se concentrera sur la surface médiane pour tirer les contraintes axiales en plusieurs points.

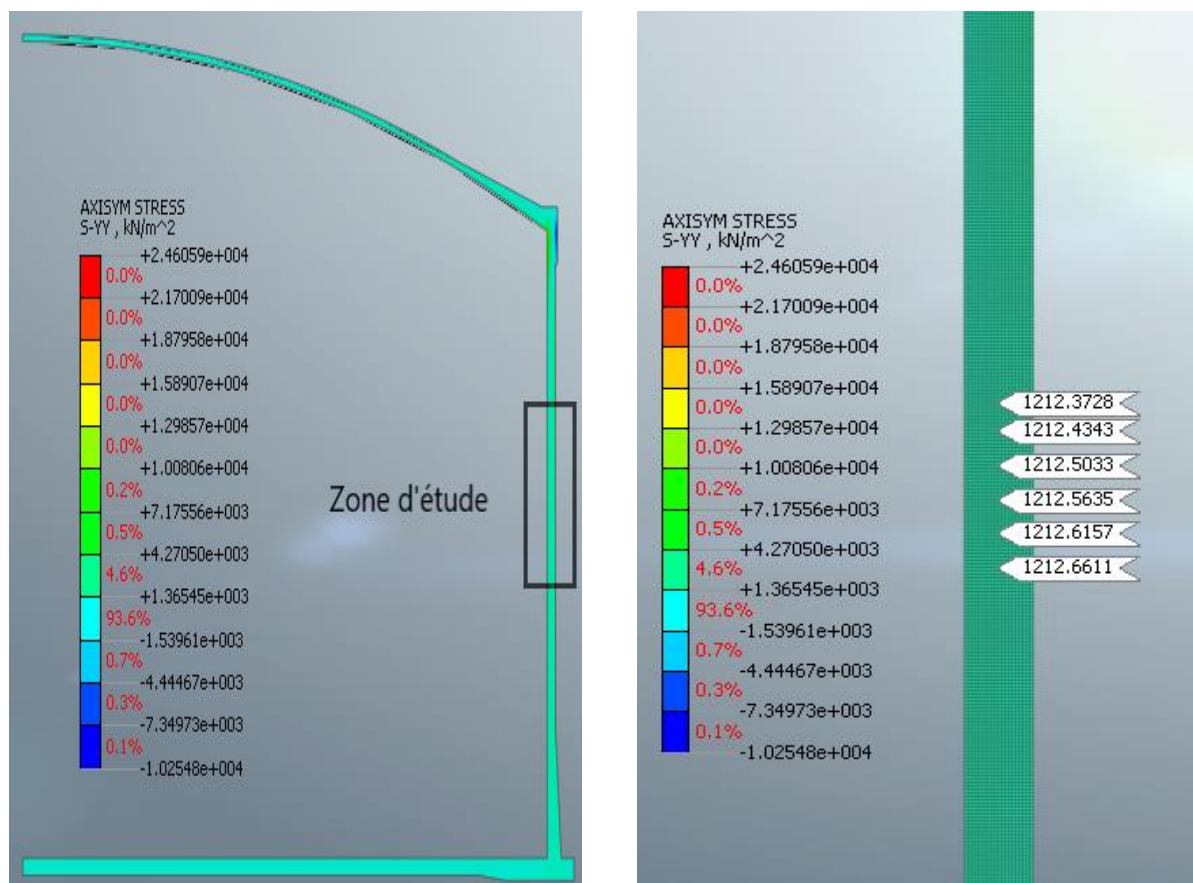


Figure 3.11: Résultat numérique du réservoir soumis à une surpression de +387.5 mbarg.

Analyse du scénario 2 :

La zone d'étude est située au niveau de la jupe où son épaisseur est constante soit de 0.65 m. les résultats obtenus au niveau de la surface médiane nous donne 1.213 MPa comme contrainte de traction et qui est quasi constante sur la longueur de la partie courante de la zone étudiée. On peut vérifier ce résultat en faisant un calcul de RDM pour les récipients sous pression.

Nous avons :

$$\sigma_{Axial} = \frac{P \cdot r}{2t}; \sigma_{Axial} = \frac{38.75 * 41}{1.3}; \sigma_{Axial} = 1.222 \text{ Mpa}$$

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

Où :

- P Pression appliquée.
- r Rayon interne du cylindre.
- t Epaisseur de la paroi.

Soit 0.742% de plus par rapport aux résultats obtenus par simulation.

3.3.2.2 Scénario 3 : Fonctionnement normal du réservoir avec surpression.

Comme précédemment nous allons uniquement considérer la surpression maximale admise en fonctionnement de +310 mbarg et négliger l'effet de la gravité.

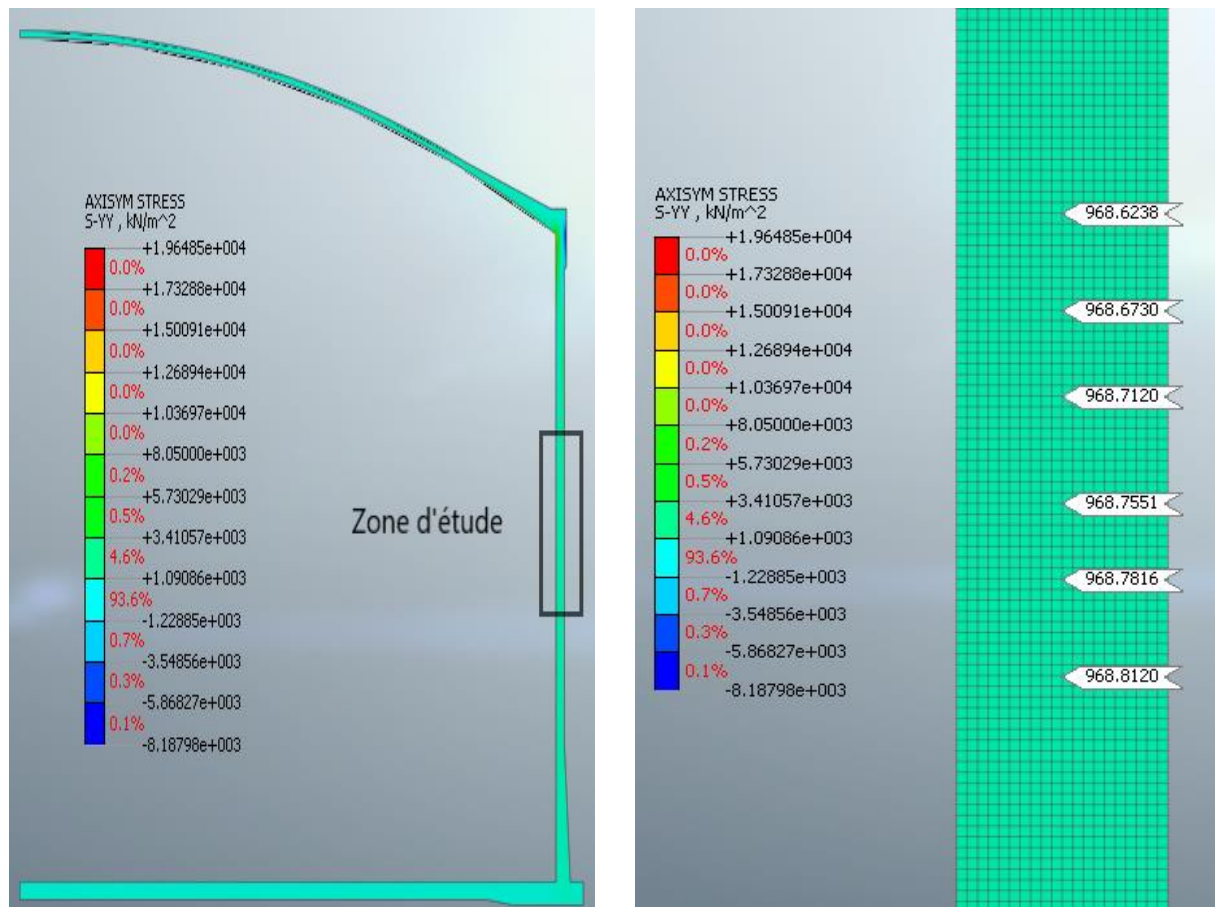


Figure 3.12: Résultat numérique du réservoir soumis à une surpression de +310 mbarg.

Analyse du scénario 3 :

Sur la même zone d'étude, au niveau de la surface médiane nous pouvons constater une valeur de contrainte de traction égale à 0.969 MPa et qui reste constante sur la longueur de la partie étudiée.

En faisant une vérification via la RDM nous obtenons :

$$\sigma_{Axial} = \frac{P \cdot r}{2t}; \sigma_{Axial} = \frac{31 * 41}{1.3}; \sigma_{Axial} = 0.978 \text{ MPa}$$

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

Soit 0.897% de plus par rapport à la simulation.

3.4 Synthèse des résultats :

3.4.1 Dans la direction circonférentielle :

D'après les résultats obtenus à partir des 4 scénarios que nous avons choisi dans notre étude, nous constatons que les contraintes maximales de traction dans la jupe du réservoir sont développées au scénario 4 avec un maximum de 8.7 MPa et de 3.24 MPa au niveau de la poutre annulaire lors du scénario 2 (dépression).

3.4.2 Dans la direction axiale :

À partir des résultats obtenus, nous pouvons dire que la contrainte axiale de traction maximale est développée sous les conditions du scénario 2 avec un maximum de 1.213 MPa.

Il est noté que pour une imperméabilité totale du réservoir en condition d'opération normale ou en cas accidentel de rupture du conteneur primaire, il est exigé par l'ACI-376 et le BS EN-14620 d'avoir un minimum de 1 MPa de contrainte de compression au niveau de la jupe du réservoir dans le pire cas possible.

3.5 Estimation du nombre de câbles de Précontraintes Horizontaux et verticaux :

3.5.1 Câbles Horizontaux :

Nous allons estimer le nombre de câbles au niveau de la jupe et la poutre annulaire séparément.

3.5.1.1 La poutre annulaire : cet élément structurel reprend intégralement la composante horizontale de la poussée du dôme. La contrainte circonférentielle maximale de traction à laquelle elle était soumise était de 3.24 MPa, en prenant en compte la contrainte de compression minimale de 1 MPa, on se retrouve avec un minimum de 4.24 MPa à balancer à l'aide des câbles de précontrainte horizontaux (19T15s).

Pour une section égale à :

$$S_p = 0,8 \times 3,25 + (0,65 + 0,8) \times \frac{0,15}{2} = 2.70875 \text{ m}^2$$

On prend une valeur de 6 MPa comme contrainte à balancer qui est supérieure à 4.24 MPa.

La résultante de force à appliquer est égale à :

$$F_1 = 13.54375 \text{ MN}$$

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

On déduit le nombre de câbles en prenant comme valeur P_0 , 80 % de la tension maximale admise du câble qui est de 4.2408 MN et en considérant 30 % de pertes soit 2.9687 MN :

$$N_{\text{cables RB}} = 5$$

3.5.1.2 La jupe du réservoir : d'après nos précédentes analyses nous avons pu constater que la contrainte de traction circonférentielle maximale développée était égale à 8.7 MPa, seulement cette contrainte n'est pas étalée sur tout la hauteur de la jupe, si on fait une analyse de la distribution des contraintes au niveau de cette dernière à partir des résultats fournis par le software, et en considérant uniquement la section totale de la jupe qui est de $S_{\text{jupe}} = 24.014 \text{ m}^2$ nous pouvons tirer les informations suivantes :

Distribution de contraintes	De 7 à 8.7 MPa (R1)	De 5 à 7 MPa (R2)	< 5 MPa (R3)
% de la surface de la jupe	26.7	21	52.3

En prenant en compte la condition minimale de contrainte circonférentielle de compression de 1 MPa nous allons considérer les contraintes à balancer via la précontrainte comme suit :

- 10 MPa sur 26.7% de la section de la jupe.
- 9 MPa sur 21% de la section.
- 6 MPa sur le reste de la section.

Nous pouvons désormais calculer la résultante de force à appliquer à la totalité de la section :

$$F_2 = 184.85977 \text{ MN}$$

On déduit le nombre de câbles en prenant comme précédent $0.7.P_0$ soit 2.9687 MN :

$$N_{\text{cables Wall}} = 63$$

Le nombre total de câbles horizontaux supposé est :

$$N_{\text{cables Hor}} = 68$$

Pour avoir la contrainte moyenne du béton, nous considérons un espacement de 0.35m du point le plus haut soit à $(37.7 - 0.35 \text{ m})$ au niveau du dernier câble et à partir de la base soit à $+0.35 \text{ m}$ au niveau du premier câble, on calcul en premier lieu l'espacement moyen des câbles :

$$e_1 = 0.544 \text{ m}$$

La section moyenne est calculée comme suit :

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

$$S_m = 0.544 * 0.65 \text{ soit } 0.3536 \text{ m}^2$$

Donc la contrainte moyenne du béton considérée est :

$$\sigma_{ci} = 8.396 \text{ MPa}$$

3.5.2 Câbles Verticaux :

D'après l'analyse que nous avons faite, la contrainte axiale maximale de traction développée au niveau de la surface médiane de la partie de jupe d'épaisseur de 0.65 m était égale à 1.213 MPa. On considère une valeur de 1.44 MPa à balancer à l'aide des câbles de précontraintes verticaux (12T15s).

La section annulaire est égale à :

$$S_a = 168.774 \text{ m}^2$$

Donc la résultante des forces de traction axiale est :

$$F_3 = 239.659 \text{ MN}$$

On obtient le nombre de câbles en prenant une valeur P_0 égale à 80 % de la tension maximale admise du câble qui est de 2.6784 MN et en considérant 25 % de pertes soit 2.0088 MN :

$$N_{\text{cable, Ver}} = 60$$

La déformée des câbles verticaux est sous forme de U, donc 2 ancrages actif/actif.

On a 120 points d'ancrage, soit 3° qui sépare chaque point, avec un rayon de 41.325 m, l'espacement moyen est égal à :

$$e_2 = 2.16377 \text{ m}$$

La section moyenne est calculée comme suit :

$$S_m = 2.16377 * 0.65 \text{ soit } 1.40645 \text{ m}^2$$

La contrainte moyenne du béton considérée est :

$$\sigma_{ci} = 1.42827 \text{ MPa}$$

3.6 Géométrie des câbles horizontaux et verticaux :

Il est à noter qu'on a uniquement représenté la demie géométrie du câble horizontal figure 3 qui est symétrique. Un câble horizontal complet est composé de deux câbles semi circonférentiels ancrés dans deux contreforts opposés comme indiqué dans la figure 3.13.

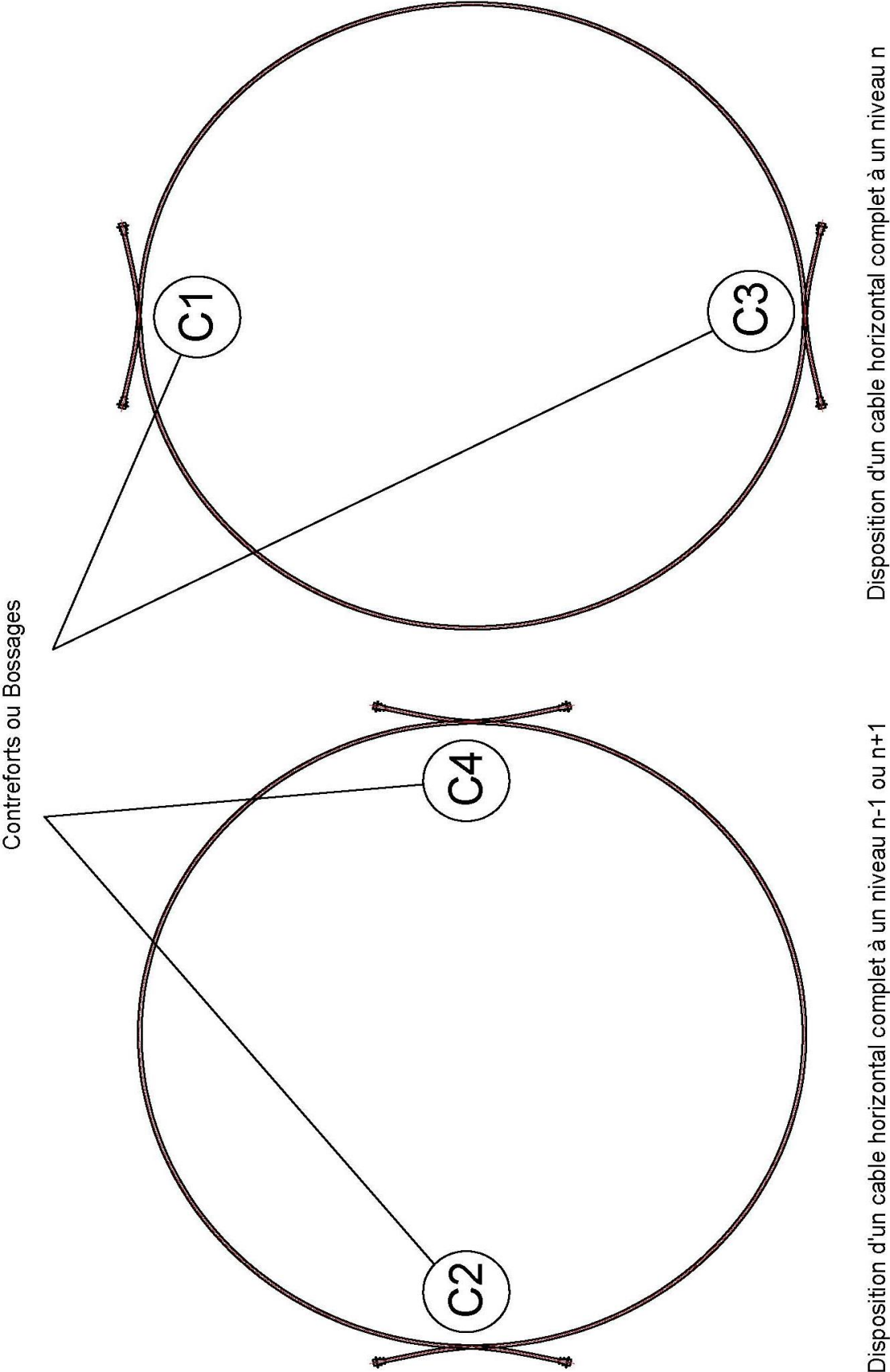


Figure 3.13: Dispositions des câbles horizontaux

GEOMETRIE D'UN CABLE HORIZONTAL TYPE EN ZONE COURANTE DE LA JUPE

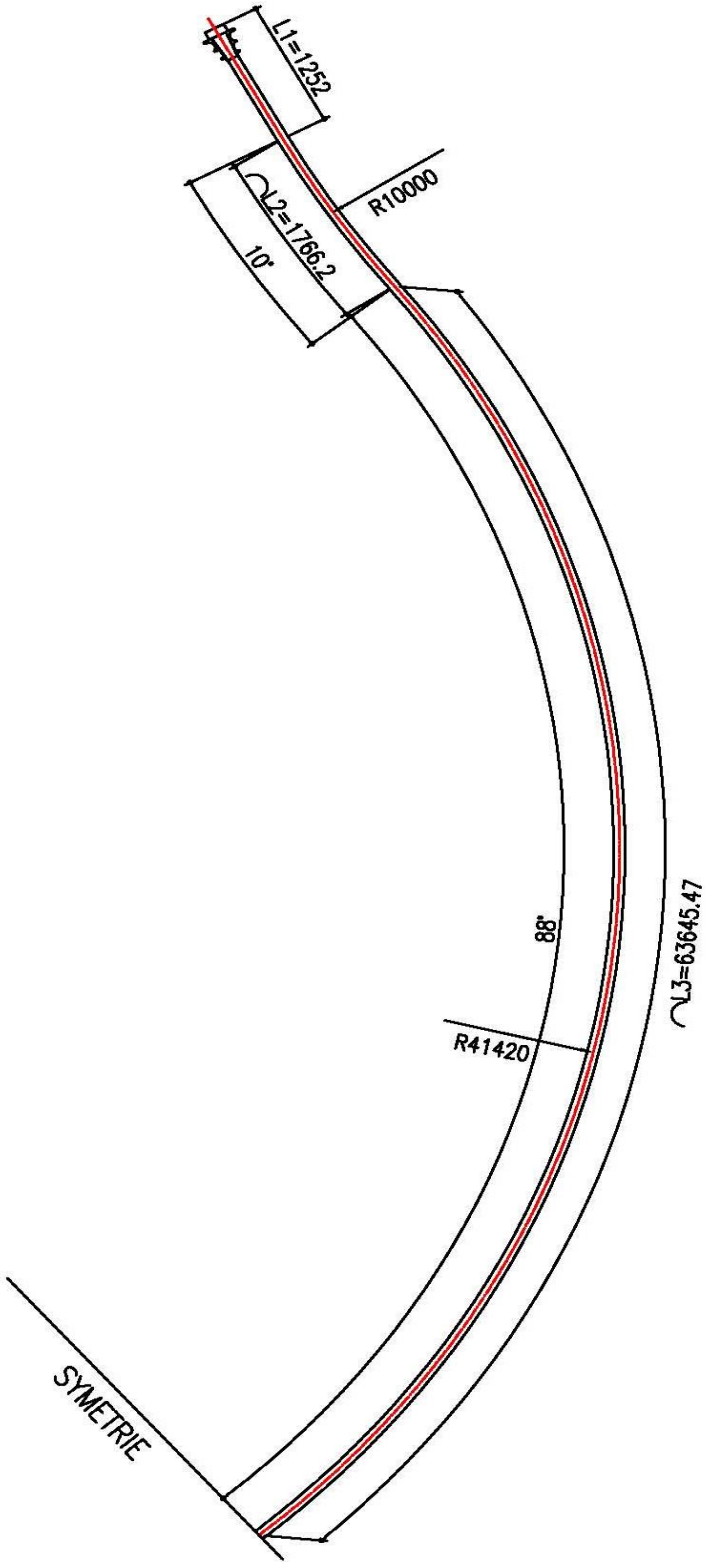
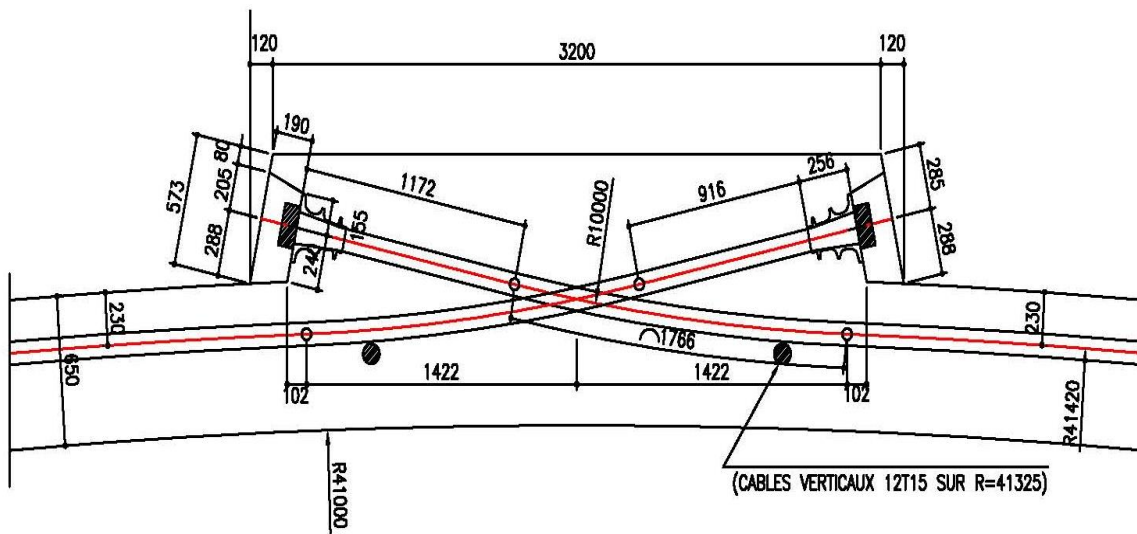


Figure 3.14: Semi géométrie d'un câble horizontal type.

COUPE TYPE SUR BOSSAGE ZONE COURANTE EPAISSEUR JUPE 650
(Ech: 1/25)



COUPE TYPE SUR BOSSAGE HAUT DE LA JUPE 800
(Ech: 1/25)

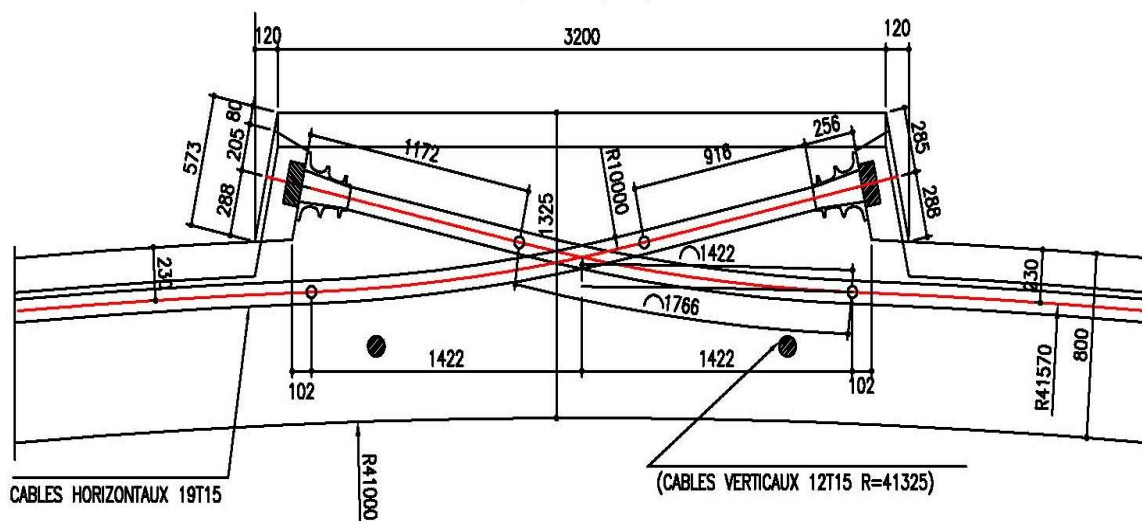


Figure 3.15: Coupe type sur bossage en zone courante de la jupe et au niveau de la poutre annulaire.

ELEVATION DEVELOPPEE

(Ech: 1/50)

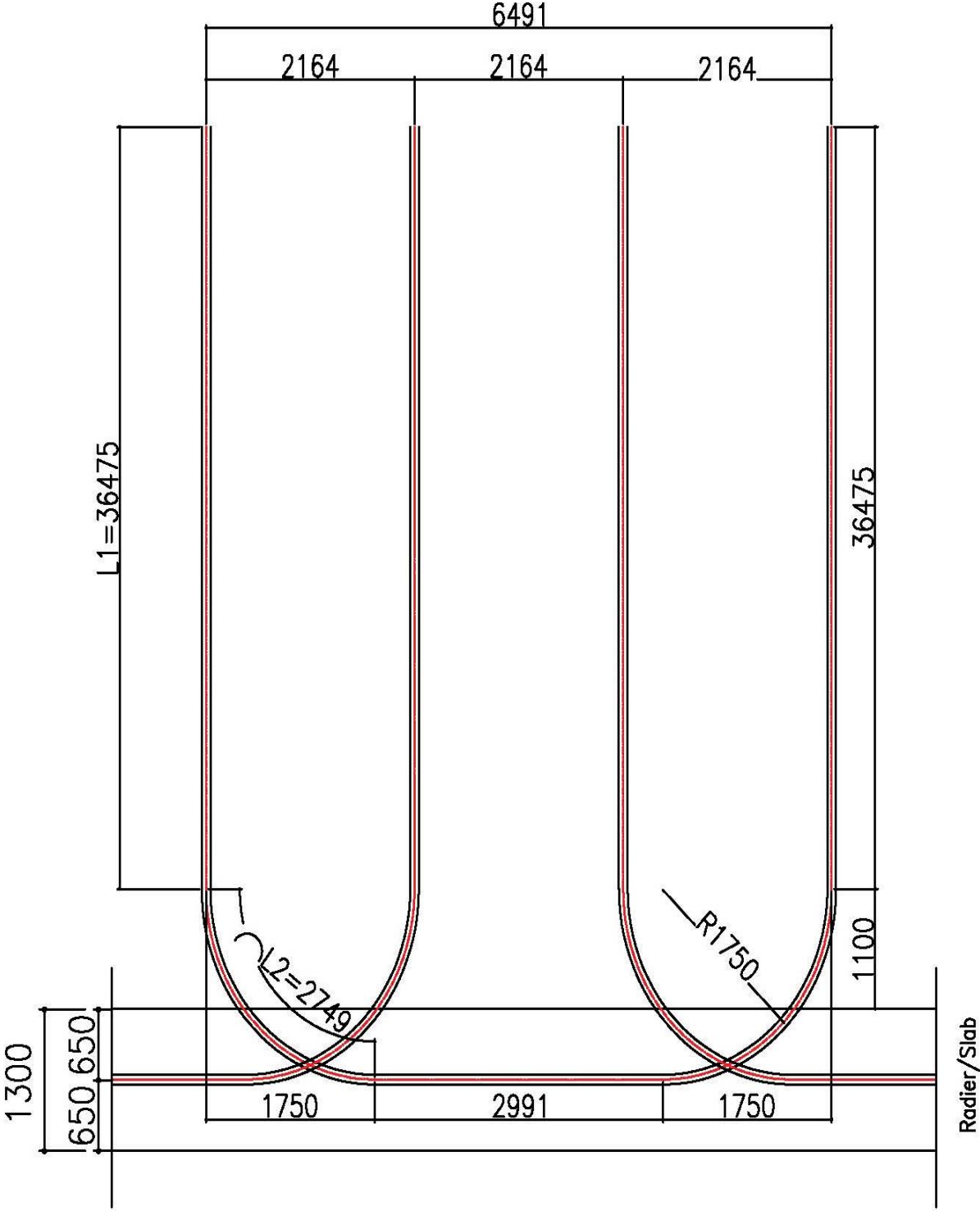


Figure 3.16: Coupe type sur bossage en zone courante de la jupe et au niveau de la poutre annulaire.

SYSTEME D'ANCRAGE EN HAUT DE LA JUPE

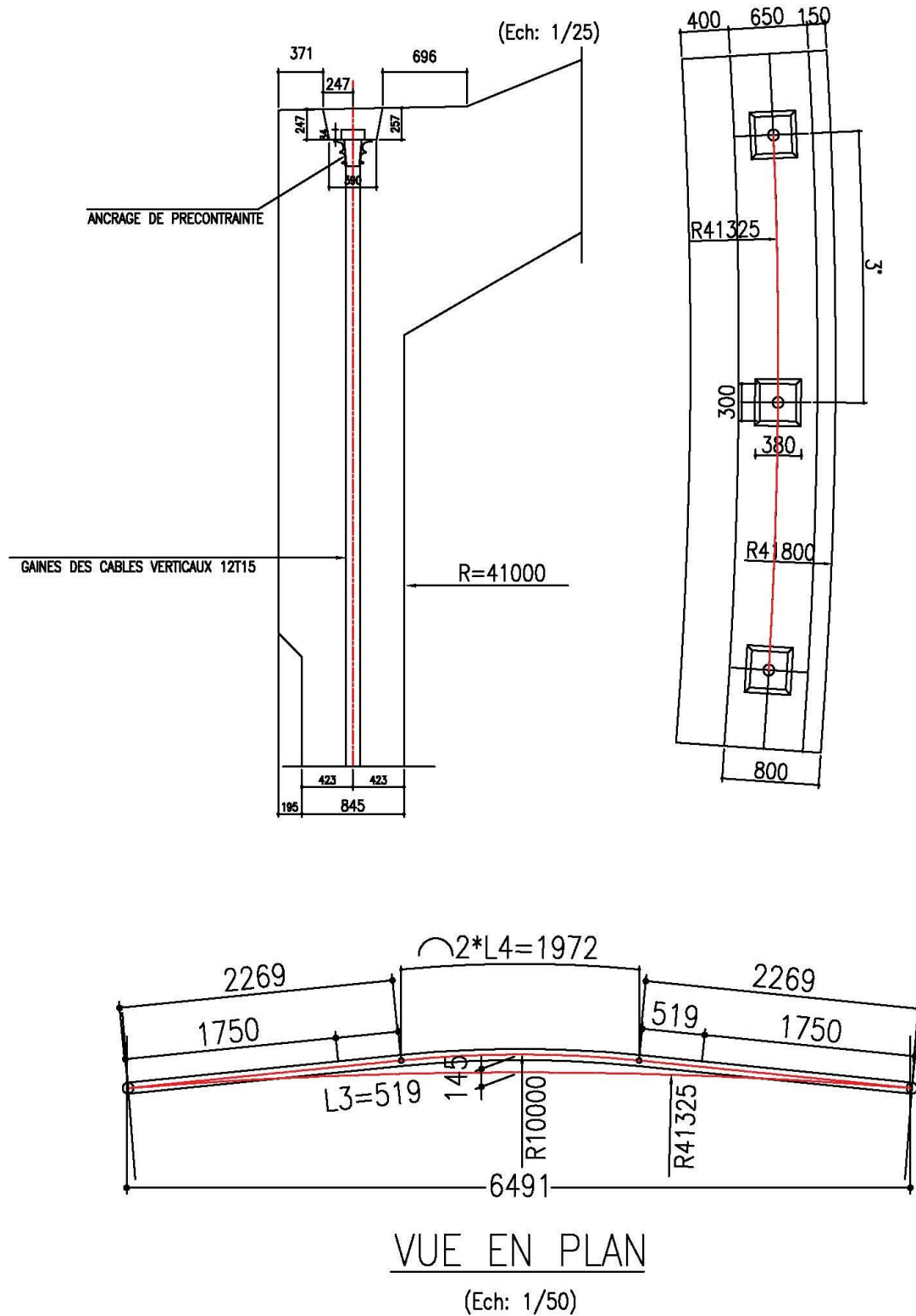


Figure 3.17: Détails sur les positions des points d'ancrages des câbles verticaux et leurs géométries au niveau du radier.

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

3.7 Calcul de la Précontrainte :

3.7.1 Matériaux : Selon le BS EN 1992-1-1 :

3.7.1.1 Béton :

Les résistances caractéristiques f_{ck} et les caractéristiques mécaniques correspondantes nécessaires à la conception, sont données dans le tableau 3.1 P-29.

Afin de spécifier la résistance à la compression du béton, $f_{ck}(t)$, à l'instant t pour un certain nombre d'étapes, nous utilisons les expressions suivantes :

- $f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8$ (MPa) pendant $3 < t < 28$ jours .
- $f_{ck}(t) = f_{ck}$ pour $t \geq 28$ jours.

Des valeurs plus précises doivent être basées sur des tests en particulier pour $t \leq 3$ jours.

La résistance à la compression du béton à un âge t dépend du type de ciment, de la température et des conditions de cure. Pour une température moyenne de 20°C et une cure conforme à la norme EN 12390, la résistance à la compression du béton à différents âges $f_{cm}(t)$ peut être estimée à partir des expressions suivantes :

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm}$$
$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s * \left[1 - \sqrt{\left(\frac{28}{t} \right)} \right] \right\}$$

Où:

$f_{cm}(t)$ Résistance moyenne à la compression du béton à un âge de t jours.

f_{cm} Résistance moyenne à la compression à 28 jours selon le tableau 3.1 P-29.

$\beta_{cc}(t)$ Coefficient qui dépend de l'âge du béton t .

t L'âge du béton en jours.

s Coefficient qui dépend du type de ciment :

= 0,20 pour le ciment des classes de résistance CEM 42,5 R, CEM 52,5 N et CEM 52,5 R (Classe R)

= 0,25 pour ciment de classes de résistance CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (Classe N)

= 0,38 pour le ciment des classes de résistance CEM 32,5 N (classe S).

3.7.1.1a Déformation élastique :

Le module d'élasticité d'un béton est contrôlé par les modules d'élasticité de ses composants. Valeurs approximatives du module d'élasticité E_{cm} , les valeurs de la sécante comprises entre $\sigma_c = 0$ et $0,4 f_{cm}$, pour les bétons à granulats de quartzite, sont données dans le tableau 3.1. Pour les agrégats de calcaire et de grès, la valeur doit être réduite de 10 % et 30 % respectivement. Pour les granulats de basalte, la valeur doit être augmentée de 20 %.

La variation du module d'élasticité avec le temps peut être estimée par :

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0.3} \cdot E_{cm}$$

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAÎNTE.

Selon l'ACI-376 8.4, 8.5 & EN-14620-part 3, la classe de béton choisie pour cette étude est f_{ck} 40. D'après le tableau 3.1 de la norme BS EN 1992-1-1 section 3 :

La résistance caractéristique à la compression déterminée par des essais au cube à 28 jours :

$$f_{ck,cube} = 50 \text{ N/mm}^2$$

La résistance caractéristique à la compression déterminée par des essais au cylindre à 28 jours :

$$f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$$

La résistance moyenne à la compression à 28 jours :

$$f_{cm} = 48 \text{ N/mm}^2$$

Le module d'élasticité :

$$E_{cm} = 35000 \text{ N/mm}^2$$

La masse volumique du béton considérée dans cette étude est :

$$\rho = 25000 \text{ N/m}^3$$

3.7.1.2 Aciers de précontrainte :

3.7.1.2a Torons :

Les torons sont des torons à très faible relaxation, assemblés à partir de sept fils d'acier de type "Super" à haute résistance conformément à la norme prEN 10138-3 de classe de relaxation 2, avec les propriétés mécaniques suivantes à température ambiante :

Section nominale :

$$S = 150 \text{ mm}^2$$

Résistance caractéristique à la traction :

$$f_{pu} = 1860 \text{ N/mm}^2$$

Module d'élasticité :

$$E_P = 195000 \text{ N/mm}^2$$

3.7.1.2b Câbles :

Les câbles sont des unités de 12 torons pour les câbles verticaux et de 19 torons pour les câbles horizontaux.

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

Les propriétés mécaniques sont (1^{ère} valeur pour le câble de 12 torons **12T15s** & 2^{ème} valeur pour le câble de 19 torons **19T15s**) :

Section nominale A_p :

$$1800 / 2850 \text{ mm}^2$$

Force caractéristique de traction ($f_{pu} \cdot A_p$) :

$$3348 / 5301 \text{ kN}$$

Force de vérinage maximale autorisée ($0,80 \cdot f_{pu} \cdot A_p$) :

$$2678 / 4241 \text{ kN}$$

Force de traction maximale au transfert ($0,75 \cdot f_{pu} \cdot A_p$) :

$$2511 / 3976 \text{ kN}$$

Gaines:

- Câbles horizontaux : gaine en acier.
- Câbles verticaux : tube en acier (partie inférieure) et gaine en acier (partie supérieure).

Les paramètres de mise en tension du câble sont :

Coefficient de frottement :

$$k = 0.002 \text{ m}^{-1}$$

Coefficient de frottement angulaire :

$$\mu = 0.20 \text{ rad}^{-1} = 0.003491 \text{ deg}^{-1}$$

Recul d'ancrage :

$$\delta = 6.0 \text{ mm}$$

Les paramètres de relaxation sont :

Relaxation à 1000 heures à 20°C sous 70% de la résistance maximale à la traction (Classe 2) :

$$\rho_{1000} = 2.5 \%$$

3.7.2 Calcul des pertes instantanées :

Note* : Tous les calculs relatifs aux pertes instantanées et différées sont résumés dans les tableaux A1 pour les câbles horizontaux et A2 pour les câbles verticaux.

3.7.2.1 Pertes par frottement :

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

Les pertes par frottements lors du procédé de précontrainte par post-tension peut être estimée par la formule donnée par les BS EN 1992-1-1 section 5.10.5.2 :

$$\Delta p_{\mu}(x) = P_{\max}(1 - e^{-\mu(\theta+kx)})$$

Où :

- θ Somme des déviations angulaire le long d'une distance x .
- μ Coefficient de frottement en rad^{-1} .
- k Coefficient de déplacement angulaire en rad/m^{-1} .
- x Abscisse curviligne à partir de l'ancrage actif.
- P_{\max} Valeur de tension maximale à l'ancrage.

Les calculs des pertes par frottement sont donnés dans les tableaux A1 et A2.

3.7.2.2 Pertes par recul d'ancrage :

Les valeurs de recul d'ancrage sont données par l'ETA selon le constructeur, dans notre cas ça sera FREYSSINET avec $\delta = 6.0$ mm.

$$S_m = g \cdot E_p ; S_m = 1170 \text{ MPa.m}$$

Pour les câbles verticaux :

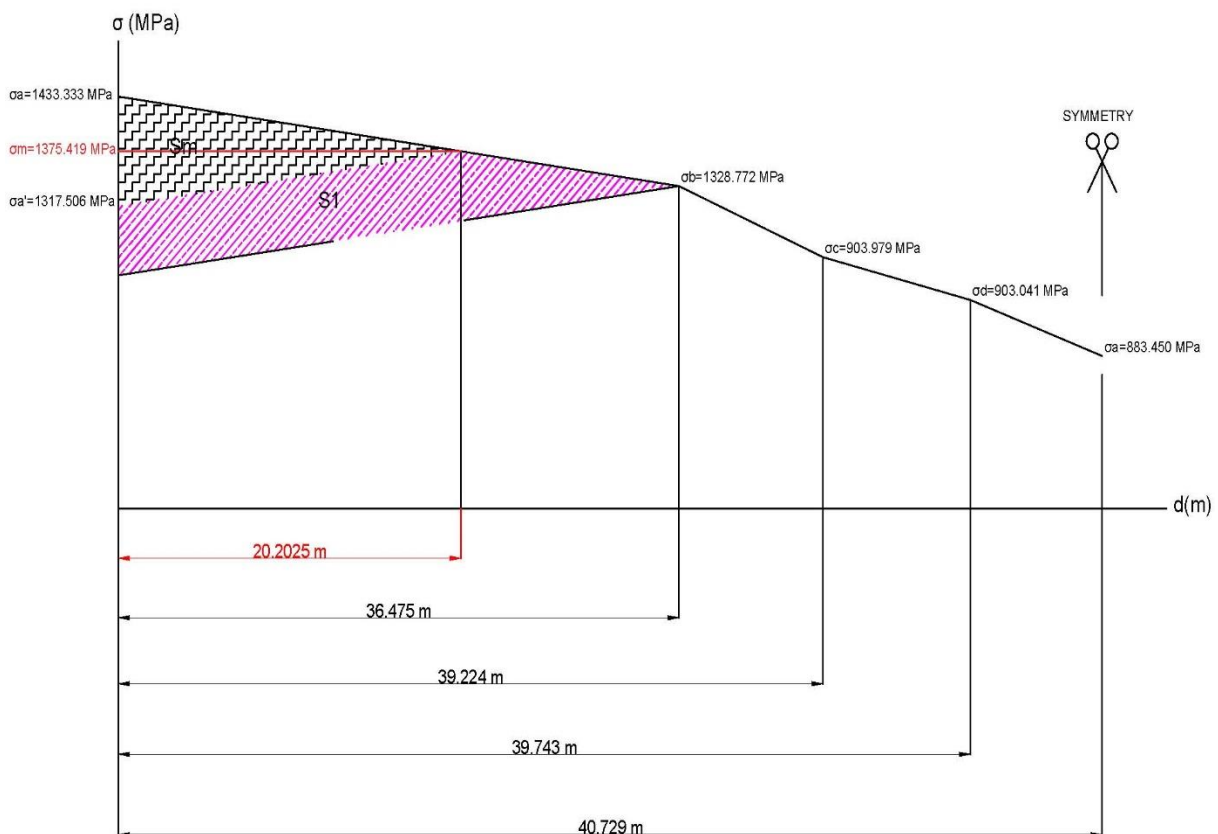


Figure 3.18 : Détermination de la longueur intéressée par le recul d'ancrage pour un câble vertical type.

On a $S_m \in S1$ donc:

$$d = 20.203 \text{ m}$$

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

Pour les câbles Horizontaux :

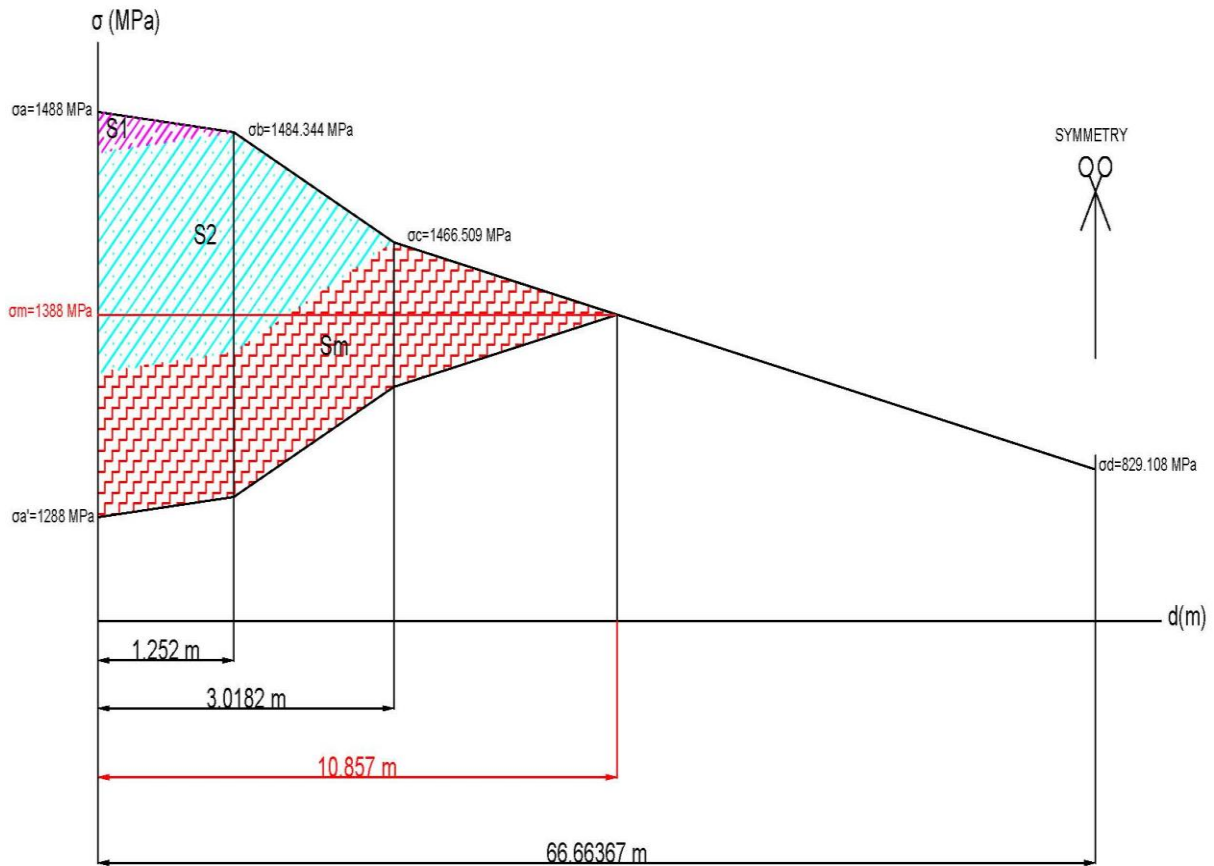


Figure 3.19 : Détermination de la longueur intéressée par le recul d'ancrage pour un câble horizontal type.

On a $S_m \in S3$ donc:

$$d = 10.857 \text{ m}$$

3.7.2.3 Raccourcissement élastique du béton :

Selon les BS EN 1992-1-1 Section 5.10.5.1 les pertes dues au raccourcissement élastique du béton sont estimées en utilisant cette formule :

$$\Delta P_{el} = A_p \cdot E_p \cdot \Sigma \left[\frac{j \cdot \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} \right]$$

Où :

$\Delta \sigma_c(t)$ Contrainte du béton lors du transfert.

j Coefficient égal à $(n-1)/2n$ quand les torons sont tirés successivement
(n est le nombre de torons) on prend $j=1/2$.

À 120 jours on a :

$$E_{cm}(t) = 36102.61527 \text{ MPa}$$

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

Les contraintes moyennes du béton au transfert son donnée en 3.5.1.2 & 3.5.2.
Pour les câbles horizontaux on a :

$$\Delta P_{el} = 0.064622 \text{ MN}$$

Pour les câbles verticaux on a :

$$\Delta P_{el} = 0.006943 \text{ MN}$$

3.7.3 Pertes dépendantes du temps (différées) :

3.7.3.1 Relaxation des aciers :

Le calcul des pertes dues à la relaxation des aciers doit être basé sur la valeur de ρ_{1000} en % selon les BS EN 1992-1-1 section 3.3.2, pour les aciers de classe 2 on prend 2.5%.

Dans le cas des aciers de classe 2 nous calculerons les pertes suivant cette formule :

$$\Delta \sigma_{Pr} = \sigma_{Pi} \cdot 0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1\mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5}$$

Où :

- F_{pi} Valeur de la tension du câble après pertes instantanées.
- t Le temps écoulé après mise en tension du câble.
- ρ_{1000} Relaxation à 1000 heures. (2.5%)
- μ Est égale à σ_{pi}/f_{pk} , f_{pk} est la résistance caractéristique à la traction (1860 MPa).

3.7.3.2 Retrait :

Tous les calculs sont basés sur BS-8110 Part 2 :

Selon les données fournies, l'humidité relative mensuelle moyenne est de 72% pour le toit et le mur, qui sont exposés à l'extérieur aux conditions atmosphériques.

L'ampleur du retrait dépend de l'épaisseur de section effective, déterminée par deux fois la surface de section transversale divisée par le périmètre exposé, comme indiqué dans la section 7.3 de la norme BS 8110-2. Étant donné que la face interne du mur et du toit est protégée par le revêtement en acier, l'épaisseur effective de la section est égale au près du double de l'épaisseur de l'élément structural. Par conséquent, l'épaisseur de section efficace h_0 dépasse 600 mm pour toute partie du réservoir extérieur en béton. Ainsi, l'épaisseur de section efficace h_0 est limitée à 600 mm.

Le retrait est également influencé par le rapport de renforcement selon :

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{sh}}{1 + K \cdot \rho}$$

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

Où:

- ϵ_{sh} est le retrait du béton brut déterminé à partir de BS 8110-2, Figure 7.2.
- ρ est le rapport de section d'acier à celle du béton : ρ pris égal à 0,26 % au minimum pour le béton armé (BS 8110-1, Tableau 3.25).
- K est un coefficient pris égal à 25 pour une exposition intérieure à 45 % d'humidité relative et à 15 pour une exposition extérieure à 85 % d'humidité relative : K pris égal à 18 pour la jupe et le toit à 72 % d'humidité relative.

D'après BS 8110-2, Figure 7.2, les déformations de retrait ϵ sont obtenues comme suit :

Humidité relative ambiante (HR%) : 72 %

Épaisseur de section efficace h_0 donnée selon :

$$h_0 = \frac{2.A_c}{u} = \frac{2 \cdot 34300 \cdot 650}{650 + 34300} = 1275.822604 \text{ mm} > 600 \text{ mm}$$

Où:

- A_c : Section transversale de l'élément (en mm²).
- u : Périmètre de la partie en contact avec l'atmosphère (en mm).

On prend $h_0 = 600$ mm.

Retrait sur 6 mois de la figure 7.2 (10^{-6} m/m) : 32,50

Retrait 6 mois corrigé du ferrailage (10^{-6} m/m) : 31,04

Retrait sur 30 ans de la figure 7.2 (10^{-6} m/m) : 220

Retrait 30 ans corrigé du ferrailage (10^{-6} m/m) : 210,16

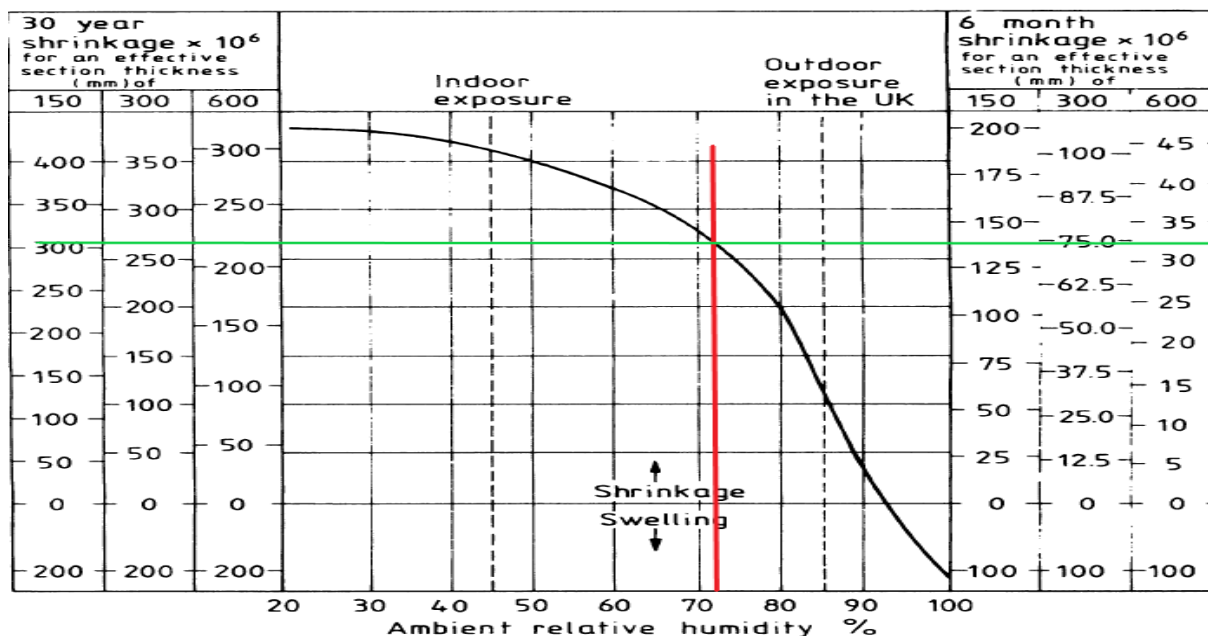


Figure 3.20 : Drying shrinkage of normal-weight concrete - BS-8110-2 fig.7.2.

À partir des résultats ci-dessus, on définit une fonction $\epsilon(t) = a \cdot t^b$ pour des dates différentes de 6 mois (180 j) & 30 ans (10950 j), où :

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

$$\begin{cases} \varepsilon(180) = a \cdot 180^b \\ \varepsilon(10950) = a \cdot 10950^b \end{cases} \quad \begin{cases} 31.04 = a \cdot 180^b \\ 210.16 = a \cdot 10950^b \end{cases} \quad \begin{cases} a = 2.76664099 \\ b = 0.4655618792 \end{cases}$$

$$\varepsilon(t) = 2.76664099 \cdot t^{0.4655618792}$$

En utilisant MATLAB, on trace la fonction $\varepsilon(t)$:

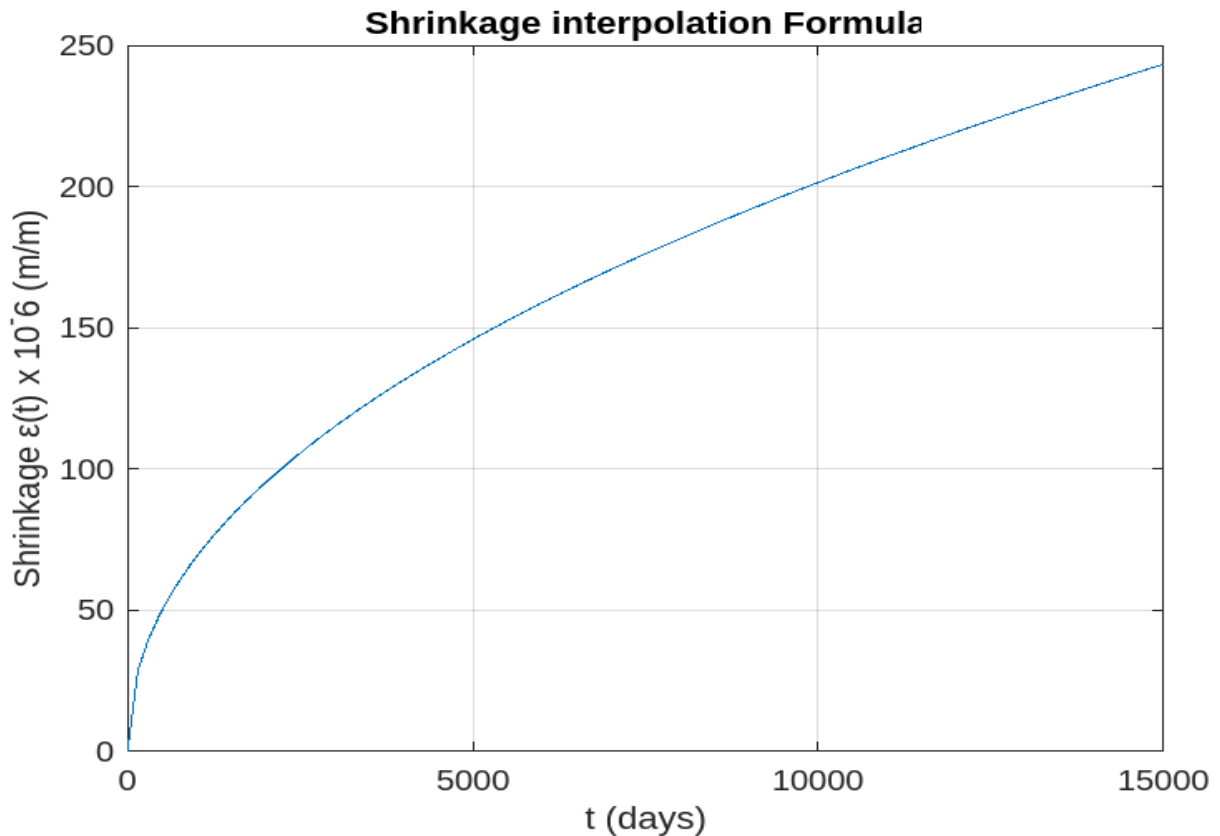


Figure 3.21 : Graphe de la fonction d'interpolation du retrait $\varepsilon(t)$.

Pour calculer la perte due au retrait, nous utilisons cette expression :

$$\Delta F_{psh} = \varepsilon_{sh} * E_p * A_p$$

➤ Pour les câbles horizontaux :

$$\Delta F_{psh} = \mathbf{0.116708 \text{ MN}}$$

➤ Pour les câbles verticaux :

$$\Delta F_{psh} = \mathbf{0.073766 \text{ MN}}$$

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

3.7.3.3 Fluage :

Selon BS EN 1992-1-1, 3.1.4.2, 3.1.4.3, 3.1.4.4, Annexe B & B1, la déformation par fluage est calculée selon la formule suivante :

$$\varepsilon_{CC}(t, t_0) = K * \varphi(t, t_0) * \frac{\sigma_c}{E_c}$$

Où :

t : âge du béton à l'instant considéré (en jours).

t_0 : âge du béton au chargement (en jours).

σ_c : contrainte de compression appliquée (en N/mm²).

E_c : module d'élasticité tangent (en N/mm²), pris comme :

$$E_c = 1.05 E_{cm}.$$

E_{cm} : Module d'élasticité sécant à 28 jours (en N/mm²).

K : Facteur de fluage non linéaire :

- $K=1$ si $\sigma_c \leq 0,45 f_{ck}(t_0)$.
- $K = e^{1,5(k_\sigma - 0,45)}$ si $\sigma_c > 0,45 f_{ck}(t_0)$.

k_σ : Rapport de contrainte : $k_\sigma = \sigma_c / f_{cm}(t_0)$.

$f_{ck}(t_0)$: Résistances caractéristiques à la compression du cylindre à la date t_0 (N/mm²).

$f_{cm}(t_0)$: Valeur moyenne de la résistance à la compression du cylindre à la date t_0 (N/mm²).

Le coefficient de fluage $\varphi(t, t_0)$ est calculé à partir de :

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta(t, t_0)$$

φ_0 : Coefficient de fluage notionnel.

$\beta(t, t_0)$: Développement du fluage avec le temps après facteur de chargement.

Le coefficient de fluage φ_0 est calculé à partir de :

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$$

φ_{RH} : Coefficient d'humidité relative :

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - RH/100}{0.1 * \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2$$

$\beta(f_{cm})$: Coefficient de résistance du béton :

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}}$$

$\beta(t_0)$: Age du béton au coefficient de chargement :

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,2}}$$

Le facteur de chargement $\beta(t, t_0)$ est calculé à partir de :

$$\beta(t, t_0) = \left[\frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right]^{0,3}$$

β_H : Coefficient d'humidité relative :

$$\beta_H = [1.5. [1+(0.012. RH(\%))^{18}].h_0 + 250. \alpha_3] \leq 1500. \alpha_3$$

h_0 : Epaisseur efficace de la section .

Coefficients $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$:

$$\alpha_1 = \min \left[\left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7} ; 1 \right]$$

$$\alpha_2 = \min \left[\left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,2} ; 1 \right]$$

$$\alpha_3 = \min \left[\left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,5} ; 1 \right]$$

La déformation totale par fluage est estimée selon le BS EN 1992-1-1 selon :

$$\varepsilon(t, t_0) = \sigma_c / E_{c,28} + \varepsilon_{cc}(t, t_0)$$

On définit le module d'Young apparent $E(t, t_0)$ à l'instant t dû à la charge σ_c appliquée à l'instant t_0 comme suit :

$$E(t, t_0) = \sigma_c / \varepsilon(t, t_0)$$

Pour calculer la perte due au fluage à l'instant t à partir de t_0 on utilise cette expression :

$$\Delta F_{p_{cr}} = \varepsilon_{cc}(t, t_0).E_p.A_p$$

On commence par calculer les paramètres du fluage :

On a : $h_0 = 600\text{mm}$, $f_{cm} = 48\text{ N/mm}^2$, et l'humidité relative $RH = 72\%$,

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

On calcul les coefficients $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$

$$\alpha_1 = 0.802$$

$$\alpha_2 = 0.939$$

$$\alpha_3 = 0.854$$

Coefficient d'humidité relative :

$$\varphi_{RH} = 1.189$$

Coefficient de résistance du béton :

$$\beta(f_{cm}) = 2.425$$

Age du béton au coefficient de chargement :

$$\beta(t_0) = 0.370$$

Coefficient d'humidité relative :

$$\beta_H = 1178 \leq 1281$$

Calcul du fluage à long terme (30 ans) :

Le facteur de chargement $\beta(t, t_0)$:

$$\beta(t, t_0) = 0.969$$

Le coefficient de fluage $\varphi(t, t_0)$:

$$\varphi(t, t_0) = 1.033$$

La déformation par fluage : ($K=1$) et $E_c = 36750$ MPa.

- Pour les câbles horizontaux : $\sigma_{ci}=8.396$ MPa

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = 236.001 * 10^{-6}$$

$$\varepsilon(t, t_0) = 475.857 * 10^{-6}$$

$$\Delta F_{pr} = 0.131157 \text{ MN}$$

- Pour les câbles verticaux : $\sigma_{ci}=1.42827$ MPa

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = 40.147 * 10^{-6}$$

$$\varepsilon(t, t_0) = 80.95 * 10^{-6}$$

$$\Delta F_{pr} = 0.014091 \text{ MN}$$

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

X (m)	Δx (m)	K(m ⁻¹)	$\Delta\theta$ (deg)	μ (deg ⁻¹)	F _{p1} après frottements (MN)	F _{p2} après recul d'ancrage (MN)	F _{pt} Pertes instantannées (MN)	σ_{pt} Pertes instantannées (Mpa)	ΔF_{poc} Pertes Différées Totales (MN)	F _{poc} Pertes long termes (MN)
0.000					4,241	3,6708	3.606178	1265.325603	0.285295	3.320883
0.626	0,626	0.002	0	0.003491	4,2356903	3,6761097	3.6114871	1267.188445	0.285663	3.325824
1.252	0,626	0.002	0	0.003491	4,2303806	3,6814194	3.6167962	1269.051287	0.286035	3.330761
1.69355	0,44155	0.002	0.60747	0.003491	4,2176736	3,6941264	3.6295032	1273.509884	0.286939	3.342564
2.1351	0,44155	0.002	0.60747	0.003491	4,2049666	3,7068334	3.6422102	1277.968480	0.287865	3.354345
2.57665	0,44155	0.002	0.60747	0.003491	4,1922596	3,7195404	3.6549172	1282.427077	0.288812	3.366105
3.0182	0,44155	0.002	0.60747	0.003491	4,17955260	3,7322474	3.6676242	1286.885673	0.289780	3.377844
3.6546547	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	4,16138665	3,75041335	3.68579015	1293.259691	0.291204	3.394586
4.2911094	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	4,14322070	3,76857930	3.70395610	1299.633708	0.292675	3.411281
4.9275641	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	4,12505475	3,78674525	3.72212205	1306.007726	0.294195	3.427927
5.5640188	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	4,10688880	3,80491120	3.74028800	1312.381743	0.295766	3.444522
6.2004735	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	4,08872285	3,82307715	3.75845395	1318.755761	0.297388	3.461066
6.8369282	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	4,07055690	3,84124310	3.77661990	1325.129778	0.299065	3.477555
7.4733829	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	4,05239095	3,85940905	3.79478585	1331.503796	0.300796	3.49399
8.1098376	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	4,03422500	3,87757500	3.81295180	1337.877813	0.302586	3.510366
8.7462923	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	4,01605905	3,89574095	3.83111775	1344.251831	0.304434	3.526684
9.382747	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	3,99789310	3,91390690	3.84928370	1350.625848	0.306343	3.542941
10.0192017	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	3,97972715	3,93207285	3.86744965	1356.999866	0.308316	3.559134
10.6556564	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	3,96156120	3,95023880	3.88561560	1363.373883	0.310353	3.575263
10.8569958	0,20133948	0.002	0,27851	0,003491	3,9560187	3,9557812	3.89115808	1365.318613	0.310988	3.58017
11.2921111	0,43511522	0.002	0,60189	0,003491	3,94339525	3,94339525	3.87977213	1361.323543	0.309691	3.570081
11.9285658	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	3,92522930	3,92522930	3.86160618	1354.949525	0.307674	3.553932
12.5650205	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	3,90706335	3,90706335	3.84344023	1348.575508	0.305722	3.537718
13.2014752	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	3,88889740	3,88889740	3.82527428	1342.201490	0.303833	3.521441
13.8379299	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	3,87073145	3,87073145	3.80710833	1335.827473	0.302004	3.505104
14.4743846	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	3,85256550	3,85256550	3.78894238	1329.453455	0.300233	3.488709
15.1108393	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	3,83439955	3,83439955	3.77077643	1323.079438	0.298520	3.472256
15.747294	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	3,81623360	3,81623360	3.75261048	1316.705420	0.296861	3.455749

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

16.3837487	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.79806765	3.79806765	3.79806765	3.73444453	1310.331403	0.295255	3.43919
17.0202034	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.77990170	3.77990170	3.77990170	3.71627858	1303.957385	0.293701	3.422578
17.6566581	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.76173575	3.76173575	3.76173575	3.69811263	1297.583368	0.292197	3.405916
18.2931128	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.74356980	3.74356980	3.74356980	3.67994668	1291.209350	0.290741	3.389206
18.9295675	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.72540385	3.72540385	3.72540385	3.66178073	1284.835333	0.289332	3.372449
19.5660222	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.70723790	3.70723790	3.70723790	3.64361478	1278.461315	0.287968	3.355647
20.2024769	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.68907195	3.68907195	3.68907195	3.62544883	1272.087298	0.286649	3.3388
20.8389316	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.67090600	3.67090600	3.67090600	3.60728288	1265.713280	0.285371	3.321912
21.4753863	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.65274005	3.65274005	3.65274005	3.58911693	1259.339263	0.284135	3.304982
22.111841	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.63457410	3.63457410	3.63457410	3.57095098	1252.965245	0.282939	3.288012
22.7482957	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.61640815	3.61640815	3.61640815	3.55278503	1246.591228	0.281781	3.271004
23.3847504	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.59824220	3.59824220	3.59824220	3.53461908	1240.217211	0.280661	3.253958
24.0212051	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.58007625	3.58007625	3.58007625	3.51645313	1233.843193	0.279576	3.236877
24.6576598	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.56191030	3.56191030	3.56191030	3.49828718	1227.469176	0.278527	3.21976
25.2941145	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.54374435	3.54374435	3.54374435	3.48012123	1221.095158	0.277512	3.202609
25.9305692	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.52557840	3.52557840	3.52557840	3.46195528	1214.721141	0.276529	3.185426
26.5670239	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.50741245	3.50741245	3.50741245	3.44378933	1208.347123	0.275579	3.16821
27.2034786	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.48924650	3.48924650	3.48924650	3.42562338	1201.973106	0.274659	3.150964
27.8399333	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.47108055	3.47108055	3.47108055	3.40745743	1195.599088	0.273769	3.133688
28.476388	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.45291460	3.45291460	3.45291460	3.38929148	1189.225071	0.272908	3.116383
29.1128427	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.43474865	3.43474865	3.43474865	3.37112553	1182.851053	0.272075	3.099051
29.7492974	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.41658270	3.41658270	3.41658270	3.35295958	1176.477036	0.271268	3.081692
30.3857521	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.39841675	3.39841675	3.39841675	3.33479363	1170.103018	0.270488	3.064306
31.0222068	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.38025080	3.38025080	3.38025080	3.31662768	1163.729000	0.269733	3.046895
31.6586615	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.36208485	3.36208485	3.36208485	3.29846173	1157.354983	0.269003	3.029459
32.2951162	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.34391890	3.34391890	3.34391890	3.28029578	1150.980966	0.268297	3.011999
32.9315709	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.32575295	3.32575295	3.32575295	3.26212983	1144.606948	0.267614	2.994516
33.5680256	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.30758700	3.30758700	3.30758700	3.24396388	1138.232931	0.266953	2.977011
34.20448	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.28942105	3.28942105	3.28942105	3.22579793	1131.858913	0.266313	2.959485
34.8409347	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.27125510	3.27125510	3.27125510	3.20763198	1125.484896	0.265694	2.941938
35.4773894	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.25308915	3.25308915	3.25308915	3.18946603	1119.110878	0.265096	2.92437
36.1138441	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.23492320	3.23492320	3.23492320	3.17130008	1112.736861	0.264517	2.906783

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

36.7502988	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.21675725	3.21675725	3.15313413	1106.362843	0.263957	2.889177
37.3867535	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.19859130	3.19859130	3.13496818	1099.988826	0.263415	2.871553
38.0232082	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.18042535	3.18042535	3.11680223	1093.614808	0.262891	2.855911
38.6596629	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.16225940	3.16225940	3.09863628	1087.240791	0.262384	2.836252
39.2961176	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.14409345	3.14409345	3.08047033	1080.866773	0.261894	2.818576
39.9325723	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.12592750	3.12592750	3.06230438	1074.492756	0.261420	2.800884
40.569027	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.10776155	3.10776155	3.04413843	1068.118738	0.260961	2.783177
41.2054817	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.08959560	3.08959560	3.02597248	1061.744721	0.260518	2.765454
41.8419364	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.07142965	3.07142965	3.00780653	1055.370703	0.260089	2.747718
42.4783911	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.05326370	3.05326370	2.98964058	1048.996686	0.259674	2.729967
43.1148458	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.03509775	3.03509775	2.97147463	1042.622668	0.259273	2.712202
43.7513005	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	3.01693180	3.01693180	2.95330868	1036.248651	0.258885	2.694424
44.3877552	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.99876585	2.99876585	2.93514273	1029.874633	0.258510	2.676633
45.0242099	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.98059990	2.98059990	2.91697678	1023.500616	0.258147	2.65883
45.6606646	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.96243395	2.96243395	2.89881083	1017.126598	0.257796	2.641015
46.2971193	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.94426800	2.94426800	2.88064488	1010.752581	0.257456	2.623189
46.933574	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.92610205	2.92610205	2.86247893	1004.378563	0.257129	2.60535
47.5700287	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.90793610	2.90793610	2.84431298	998.004546	0.256812	2.587501
48.2064834	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.88977015	2.88977015	2.82614703	991.630528	0.256505	2.569642
48.8429381	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.87160420	2.87160420	2.80798108	985.256511	0.256209	2.551772
49.4793928	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.85343825	2.85343825	2.78981513	978.882493	0.255922	2.533893
50.1158475	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.83527230	2.83527230	2.77164918	972.508476	0.255645	2.516004
50.7523022	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.81710635	2.81710635	2.75348323	966.134458	0.255377	2.498106
51.3887569	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.79894040	2.79894040	2.73531728	959.760441	0.255118	2.480199
52.0252116	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.78077445	2.78077445	2.71715133	953.386423	0.254868	2.462283
52.6616663	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.76260850	2.76260850	2.69898538	947.012406	0.254626	2.444359
53.298121	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.74444255	2.74444255	2.68081943	940.638388	0.254392	2.426427
53.9345757	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.72627660	2.72627660	2.66265348	934.264371	0.254166	2.408487
54.5710304	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.70811065	2.70811065	2.64448753	927.890354	0.253947	2.390541
55.2074851	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.68994470	2.68994470	2.62632158	921.516336	0.253736	2.372586
55.8439398	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.67177875	2.67177875	2.60815563	915.142319	0.253531	2.354625
56.4803945	0.6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.65361280	2.65361280	2.58998968	908.768301	0.253334	2.336656

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

57.1168492	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.63544685	2.63544685	2.57182373	902.394284	0.253143	2.318681
57.7533039	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.61728090	2.61728090	2.55365778	896.020266	0.252959	2.300699
58.3897586	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.59911495	2.59911495	2.53549183	889.646249	0.252781	2.282711
59.0262133	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.58094900	2.58094900	2.51732588	883.272231	0.252609	2.264717
59.662668	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.56278305	2.56278305	2.49915993	876.898214	0.252442	2.246718
60.2991227	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.54461710	2.54461710	2.48099398	870.524196	0.252281	2.228713
60.9355774	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.52645115	2.52645115	2.46282803	864.150179	0.252126	2.210702
61.5720321	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.50828520	2.50828520	2.44466208	857.776161	0.251976	2.192686
62.2084868	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.49011925	2.49011925	2.42649613	851.402144	0.251831	2.174665
62.8449415	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.47195330	2.47195330	2.40833018	845.028127	0.251691	2.156639
63.4813962	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.45378735	2.45378735	2.39016423	838.654109	0.251555	2.138609
64.11785	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.43562140	2.43562140	2.37199828	832.280091	0.251424	2.120574
64.75431	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.41745545	2.41745545	2.35383233	825.906074	0.251298	2.102534
65.39077	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.39928950	2.39928950	2.33566638	819.532056	0.251176	2.08449
66.02724	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.38112355	2.38112355	2.31750043	813.158039	0.251058	2.066442
66.66367	0,6364547	0.002	0.8804	0.003491	2.36295760	2.36295760	2.29933448	806.784021	0.250944	2.04839

Tableau A1 : Résultats des calculs des pertes instantanées et différées de précontraintes pour un câble 19T1 5s horizontal type.

Maximum	3,9560187	3,9557812	3,89115808	1365.318613
Minimum	2.36295760	2.36295760	2.29933448	806.784021
Average	3,15948815	3,1593694	3,09524628	1086,051317

3.58017
2,04839
2,81428

x (m) : Abscisse curviligne à partir de l'ancrage actif en mètres.

Δx (m) : Longueur du segment considéré en mètres.

K (m^{-1}) : Coefficient de frottement linéaire par mètre.

$\Delta\theta$ (deg) : Somme de déviations angulaires en degrés.

μ (deg^{-1}) : Coefficient de frottement angulaire par degré.

F_{p1} : Valeur de la tension appliquée après pertes par frottements en MN.

F_{p2} : Valeur de la tension appliquée après pertes par frottements et recul d'ancrage en MN.

F_{pi} : Valeur de la tension appliquée après pertes instantanées (Frottements, recul d'ancrage et raccourcissement élastique du béton) en MN.

σ_{pi} : Valeur de la contrainte après pertes instantanées en MPa.

$F_{p\infty}$: Valeur de la tension appliquée après pertes instantanées et différées en MN.

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

x (m)	Δx (m)	K(m ⁻¹)	$\Delta\theta$ (deg)	μ (deg ⁻¹)	F _{p1} après frottements (MN)	F _{p2} après recul d'ancrage (MN)	F _{pi} Pertes instantannées (MN)	σ_{pi} Pertes instantannées (Mpa)	ΔF_{p02} Pertes Différées Totales (MN)	F _{p02} Pertes long termes (MN)
0					2.58	2.371510577	2.364568	1313.648654	0.118311	2.246256
0.7295	0,7295	0,002	0	0,003491	2.57623578	2.375274797	2.368332	1315.739887	0.118646	2.249686
1.4590	0,7295	0,002	0	0,003491	2.57247156	2.379039017	2.372096	1317.831121	0.118984	2.253112
2.1885	0,7295	0,002	0	0,003491	2.56870734	2.382803237	2.375860	1319.922354	0.119326	2.256534
2.9180	0,7295	0,002	0	0,003491	2.56494312	2.386567457	2.379624	1322.013587	0.119672	2.259953
3.6475	0,7295	0,002	0	0,003491	2.56117890	2.390331677	2.383389	1324.104821	0.120021	2.263368
4.3770	0,7295	0,002	0	0,003491	2.55741468	2.394095897	2.387153	1326.196054	0.120374	2.266779
5.1065	0,7295	0,002	0	0,003491	2.55365046	2.397860117	2.390917	1328.287287	0.120731	2.270186
5.8360	0,7295	0,002	0	0,003491	2.54988624	2.401624337	2.394681	1330.378521	0.121092	2.273590
6.5655	0,7295	0,002	0	0,003491	2.54612202	2.405388557	2.398446	1332.469754	0.121456	2.276989
7.2950	0,7295	0,002	0	0,003491	2.54235780	2.409152777	2.402210	1334.560987	0.121825	2.280385
8.0245	0,7295	0,002	0	0,003491	2.53859358	2.412916997	2.405974	1336.652221	0.122197	2.283777
8.7540	0,7295	0,002	0	0,003491	2.53482936	2.416681217	2.409738	1338.743454	0.122574	2.287165
9.4835	0,7295	0,002	0	0,003491	2.53106514	2.420445437	2.413502	1340.834687	0.122954	2.290548
10.2130	0,7295	0,002	0	0,003491	2.52730092	2.424209657	2.417267	1342.925921	0.123339	2.293928
10.9425	0,7295	0,002	0	0,003491	2.52353670	2.427973877	2.421031	1345.017154	0.123727	2.297303
11.6720	0,7295	0,002	0	0,003491	2.51977248	2.431738097	2.424795	1347.108387	0.124120	2.300675
12.4015	0,7295	0,002	0	0,003491	2.51600826	2.435502317	2.428559	1349.199621	0.124517	2.304042
13.1310	0,7295	0,002	0	0,003491	2.51224404	2.439266537	2.432324	1351.290854	0.124919	2.307405
13.8605	0,7295	0,002	0	0,003491	2.50847982	2.443030757	2.436088	1353.382087	0.125324	2.310763
14.5900	0,7295	0,002	0	0,003491	2.50471560	2.446794977	2.439852	1355.473321	0.125734	2.314118
15.3195	0,7295	0,002	0	0,003491	2.50095138	2.450559197	2.443616	1357.564554	0.126149	2.317467
16.0490	0,7295	0,002	0	0,003491	2.49718716	2.454323417	2.447380	1359.655787	0.126568	2.320813
16.7785	0,7295	0,002	0	0,003491	2.49342294	2.458087637	2.451145	1361.747021	0.126991	2.324154
17.5080	0,7295	0,002	0	0,003491	2.48965872	2.461851857	2.454909	1363.838254	0.127419	2.327490
18.2375	0,7295	0,002	0	0,003491	2.48589450	2.465616077	2.458673	1365.929487	0.127851	2.330822
18.9670	0,7295	0,002	0	0,003491	2.48213028	2.469380297	2.462437	1368.020721	0.128288	2.334149
19.6965	0,7295	0,002	0	0,003491	2.47836606	2.473144517	2.466202	1370.111954	0.128730	2.337471
20,2025	0,506	0,002	0	0,003491	2,475858134	2,475652443	2,468709	1371,505246	0,129027	2,339682

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

20.4260	0,2235	0,002	0	0,003491	2.47460184	2.47460184	2.467659	1370.921578	0.128902	2.338756
21.1555	0,7295	0,002	0	0,003491	2.47083762	2.47083762	2.463895	1368.830344	0.128459	2.335436
21.8850	0,7295	0,002	0	0,003491	2.46707340	2.46707340	2.460130	1366.739111	0.128020	2.332111
22.6145	0,7295	0,002	0	0,003491	2.46330918	2.46330918	2.456366	1364.647878	0.127586	2.328781
23.3440	0,7295	0,002	0	0,003491	2.45954496	2.45954496	2.452602	1362.556644	0.127156	2.325446
24.0735	0,7295	0,002	0	0,003491	2.45578074	2.45578074	2.448838	1360.465411	0.126731	2.322107
24.8030	0,7295	0,002	0	0,003491	2.45201652	2.45201652	2.445073	1358.374178	0.126310	2.318763
25.5325	0,7295	0,002	0	0,003491	2.44825230	2.44825230	2.441309	1356.282944	0.125894	2.315415
26.2620	0,7295	0,002	0	0,003491	2.44448808	2.44448808	2.437545	1354.191711	0.125483	2.312062
26.9915	0,7295	0,002	0	0,003491	2.44072386	2.44072386	2.433781	1352.100478	0.125075	2.308706
27.7210	0,7295	0,002	0	0,003491	2.43695964	2.43695964	2.430017	1350.009244	0.124672	2.305344
28.4505	0,7295	0,002	0	0,003491	2.43319542	2.43319542	2.426252	1347.918011	0.124274	2.301979
29.1800	0,7295	0,002	0	0,003491	2.42943120	2.42943120	2.422488	1345.826778	0.123879	2.298609
29.9095	0,7295	0,002	0	0,003491	2.42566698	2.42566698	2.418724	1343.735544	0.123489	2.295235
30.6390	0,7295	0,002	0	0,003491	2.42190276	2.42190276	2.414960	1341.644311	0.123103	2.291857
31.3685	0,7295	0,002	0	0,003491	2.41813854	2.41813854	2.411196	1339.553078	0.122720	2.288475
32.0980	0,7295	0,002	0	0,003491	2.41437432	2.41437432	2.407431	1337.461844	0.122342	2.285089
32.8275	0,7295	0,002	0	0,003491	2.41061010	2.41061010	2.403667	1335.370611	0.121968	2.281699
33.5570	0,7295	0,002	0	0,003491	2.40684588	2.40684588	2.399903	1333.279378	0.121598	2.278304
34.2865	0,7295	0,002	0	0,003491	2.40308166	2.40308166	2.396139	1331.188144	0.121232	2.274906
35.0160	0,7295	0,002	0	0,003491	2.39931744	2.39931744	2.392374	1329.096911	0.120870	2.271504
35.7455	0,7295	0,002	0	0,003491	2.39555322	2.39555322	2.388610	1327.005678	0.120512	2.268098
36.4750	0,7295	0,002	0	0,003491	2.39178900	2.39178900	2.384846	1324.914444	0.120157	2.264689
37.0248	0,5498	0,002	18	0,003491	2.238863752	2.238863752	2.231921	1239.955973	0.108542	2.123379
37.5746	0,5498	0,002	18	0,003491	2.085938504	2.085938504	2.078996	1154.997502	0.101041	1.977955
38.1244	0,5498	0,002	18	0,003491	1.933013256	1.933013256	1.926070	1070.039031	0.096215	1.829856
38.6742	0,5498	0,002	18	0,003491	1.780088008	1.780088008	1.773145	985.08056	0.093122	1.680023
39.2240	0,5498	0,002	18	0,003491	1.62716276	1.62716276	1.620220	900.122089	0.091149	1.529071
39.743	0,519	0,002	0	0,003491	1.625473765	1.625473765	1.618531	899.183758	0.091132	1.527399
40.236	0,493	0,002	2.8246819	0,003491	1.607842309	1.607842309	1.600899	889.388505	0.090957	1.509942
40.729	0,493	0,002	2.8246819	0,003491	1.590210853	1.590210853	1.583268	879.593252	0.090792	1.492476

Tableau A2 : Résultats des calculs des pertes instantanées et différées de précontraintes pour un câble 12T15s vertical type.

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAİNTE.

Maximum	2,475858134	2,475652443	2,468709	1371,505246
Minimum	1,590210853	1,590210853	1,583268	879,593252
Average	2,033034494	2,032931648	2,0259885	1125,549249

2,339682
1,492476
1,916079

- x (m) : Abscisse curviligne à partir de l'ancrage actif en mètres.
- Δx (m) : Longueur du segment considéré en mètres.
- K(m⁻¹) : Coefficient de frottement linéaire par mètre.
- $\Delta\theta$ (deg) : Somme de déviations angulaires en degrés.
- μ (deg⁻¹) : Coefficient de frottement angulaire par degré.
- F_{p1} : Valeur de la tension appliquée après pertes par frottements en MN.
- F_{p2} : Valeur de la tension appliquée après pertes par frottements et recul d'ancrage en MN.
- F_{pi} : Valeur de la tension appliquée après pertes instantanées (Frottements, recul d'ancrage et raccourcissement élastique du béton) en MN.
- σ_{pi} : Valeur de la contrainte après pertes instantanées en MPa.
- $\Delta F_{p\infty}$: Valeur des pertes différées en MN.
- F_{p ∞} : Valeur de la tension appliquée après pertes instantanées et différées en MN.

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

3.8 Discussion et vérification des résultats obtenus :

3.8.1 Câbles horizontaux 19T15s :

À partir du tableau A1, la tension du câble après pertes instantanées est :

$$F_{pi}=3.89115808 \text{ MN}$$

Soit 73.404% de la tension maximale caractéristique de 5.301 MN, étant donné qu'on n'est pas autorisé à dépasser 75% de cette valeur soit 3.97575 MN lors du transfert, donc la valeur obtenue après pertes instantanées est acceptable.

La moyenne de la valeur de la tension du câble après pertes instantanées est :

$$F_{pi}=3,09524628 \text{ MN}$$

Soit un total de 27.0126% de pertes de la tension maximale appliquée, sachant que nous avons considéré 30 % de pertes au début.

3.8.2 Câbles Verticaux 12T15s :

À partir du tableau A2 nous obtenons après pertes instantanées une tension maximale de :

$$F_{pi}=2.468709 \text{ MN}$$

La tension maximale caractéristique est de 3.348 MN, donc on a 73.736% de cette valeur, qui est inférieur à 75% du maximum à ce dont nous sommes autorisés, autrement dit le résultat est acceptable.

La moyenne de la valeur de la tension du câble après pertes instantanées est :

$$F_{pi}=2,0259885 \text{ MN}$$

Soit 78.526 % de la tension appliquée, on a 21.4733% de pertes, qui est inférieur à ce que nous avons supposé au début soit 25%.

3.9 Répartitions des câbles horizontaux et verticaux :

3.9.1 Câbles horizontaux :

3.9.1.1 Dans la poutre annulaire : d'après les résultats obtenus dans 3.5.1.1 nous avons 5 câbles à répartir sur une hauteur de 3.4 m en considérant un espacement en haut du dernier câble et en bas du premier câble de 0.25 m.

$$d_{RB} = (3.4-0.5)/5=0.58 \text{ m}$$

3.9.1.2 Dans la jupe :

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

Nous allons répartir les câbles de façon optimale afin de balancer efficacement les contraintes circonférentielles de traction dans chacune des 3 régions citée en 3.5.1.2.

Dans la première région R1 :

Nous devons avoir une contrainte de compression moyenne supérieure ou égale à 10 MPa, sur une aire de 6.41174 m² soit un équivalent de 64.1174 MN de force à appliquer.

Donc le nombre de câbles à répartir dans cette région est :

$$N_{\text{cables R1,Wall}} = 21$$

La région R1 s'étale sur une hauteur moyenne de 9.85 m d'après les résultats obtenus sur MIDAS, donc l'espacement moyen des câbles dans cette région est égal à :

$$d_{R1} = 9.35/21 = 0.445 \text{ m}$$

Dans la région R2 :

Nous devons obtenir une contrainte de compression moyenne supérieure ou égale à 9 MPa, 5.04294 m² soit un équivalent de 45.38646 MN de force à appliquer, et le nombre moyen des câbles dans cette région est :

$$N_{\text{cables R2,Wall}} = 15$$

Cette région est divisée en deux, de part et d'autre de la région R1 :

L'une se situe en zone avec une épaisseur constante de 0.65 m sur une hauteur de 5.85 m R2a et l'autre en zone avec section variable sur une hauteur de 1.65 m R2b, donc le nombre de câbles à placer dans chacune des deux régions est :

$$N_{\text{cables R2a,Wall}} = 11$$

$$N_{\text{cables R2b,Wall}} = 4$$

L'espacement moyen des câbles dans les deux régions est :

$$d_{R2a} = 5.6/11 = 0.5091 \text{ m}$$

$$d_{R2b} = 1.4/4 = 0.35 \text{ m}$$

Dans la région R3 :

Cette région est aussi divisée en deux parties la R3a d'une section de 7.37 m² et une hauteur de 11.34 m avec épaisseur constante qui s'étale jusqu'à la limite de la jupe en haut et la région R3b de 5.19 m² d'une section variable. Jusqu'à la base. La contrainte de compression minimale à obtenir est 6 MPa donc le nombre de câbles à placer est :

$$N_{\text{cables R3a,Wall}} = 16$$

$$N_{\text{cables R3b,Wall}} = 11$$

L'espacement moyen est :

$$d_{R3a} = 11.09/16 = 0.693 \text{ m}$$

$$d_{R3b} = 5.29/11 = 0.4809 \text{ m}$$

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

3.9.1.3 Vérification des contraintes :

3.9.1.3a Poutre annulaire :

La section moyenne est égale à :

$$S_{RB} = 0.58 * 0.8 = 0.464 \text{ m}^2$$

La contrainte circonférentielle moyenne de compression est égale à :

$$\sigma_{cRB} = 6.6707 \text{ MPa} > 6 \text{ MPa}$$

D'après les résultats obtenus par MIDAS nous avons constaté une contrainte de compression maximale de 5.29 MPa au cours de scénario 3, et en considérant la contrainte du béton en état limite de service qui est égal à $0.6 f_{ck}$ soit 24 MPa.

Nous obtenons la contrainte circonférentielle maximale de compression égale à :

$$\sigma_{cRB} = 11.9607 \text{ MPa} < 24 \text{ MPa}$$

3.9.1.3b Jupe :

Région 1 :

La section moyenne est égale à :

$$S_{R1} = 0.445 * 0.65 = 0.2894 \text{ m}^2$$

La contrainte circonférentielle moyenne de compression est égale à :

$$\sigma_{cR1} = 10.695 \text{ MPa} > 10 \text{ MPa}$$

Région 2 :

La section moyenne est égale à :

$$S_{R2a} = 0.5091 * 0.65 = 0.331 \text{ m}^2$$

$$S_{R2b} = 0.35 * 0.735 = 0.2573 \text{ m}^2$$

La contrainte circonférentielle moyenne de compression est égale à :

$$\sigma_{cR2a} = 9.35 \text{ MPa} > 9 \text{ MPa}$$

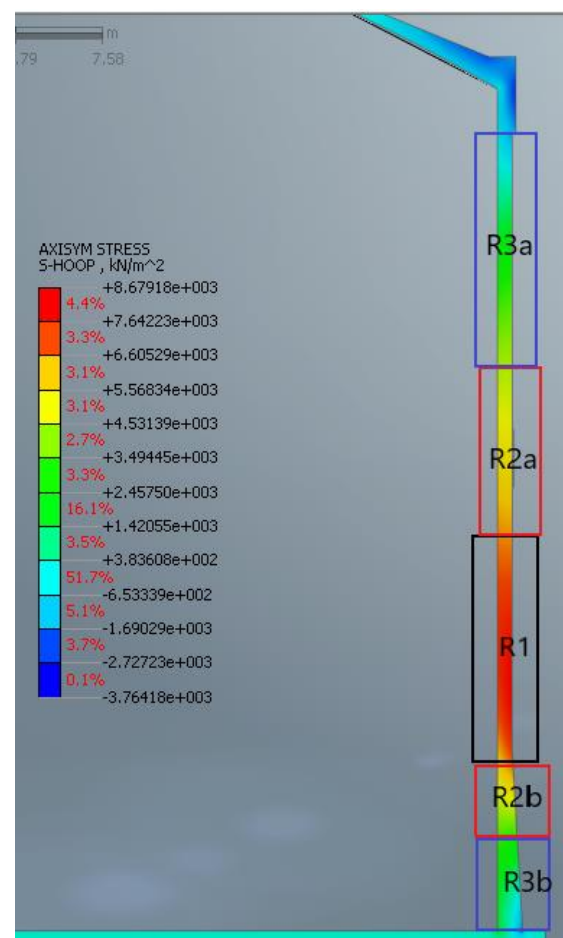


Figure 3.22: Illustration des régions R1, R2 et R3.

CHAPITRE III : ÉTUDE LINÉAIRE STATIQUE ET CALCUL DE LA PRECONTRAINTE.

Région 3 :

$$\sigma_{cR2b}=12.029 \text{ MPa} > 10 \text{ MPa}$$

La section moyenne est égale à :

$$S_{R3a}= 0.693*0.65=0.45 \text{ m}^2$$

$$S_{R3b}= 0.4809*0.937=0.4505 \text{ m}^2$$

La contrainte circonférentielle moyenne de compression est égale à :

$$\sigma_{cR3a}=6.88 \text{ MPa} > 6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cR3b}=6.87 \text{ MPa} > 6 \text{ MPa}$$

D'après les résultats obtenus auparavant par MIDAS, nous avons pu constater une contrainte circonférentielle de compression à la base de 3.77 MPa en région 3b lors du scénario 4.

Donc la contrainte circonférentielle maximale est obtenue dans la région 2b :

$$\sigma_{cj,max}=12.029 \text{ MPa} < 24 \text{ MPa}$$

Tous les résultats obtenus dans la section verticale (Poutre annulaire et Jupe) sont vérifiés et répondent aux exigences minimales et limites imposées.

3.9.2 Câbles verticaux :

Nous avons 60 câbles verticaux disposés en U, donc avec deux points d'ancrage pour chaque câble en haut de la Jupe à la hauteur de 37.7 m, une distance sur arc de 6.491 m sépare les deux points d'ancrages du même câble.

Un total de 120 points d'ancrages sont disposés en haut de la jupe, espacés sur arc d'une distance 2.16377 m.

3.9.2a Vérification des contraintes :

La section moyenne est égale à :

$$S= 2.1637*0.65=1.4064 \text{ m}^2$$

La contrainte axiale moyenne de compression est égale à :

$$\sigma_{cAxial}=1.4405 \text{ MPa} > 1.44 \text{ MPa}$$

Les résultats obtenus sont vérifiés et obéissent aux exigences demandées.

3.10 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons pu analyser les contraintes induites par les efforts membranaires dans la jupe et la poutre annulaire du réservoir sous différents chargements axisymétriques, et nous avons proposé une étude de précontrainte pour balancer ces contraintes en utilisant le BS-EN-1992-1, tout en vérifiant les contraintes obtenues dans le béton à l'ELS.

CHAPITRE IV:

ETUDE AU VENT.

4.1 Introduction :

Le vent est une force naturelle omniprésente qui exerce une influence significative sur les structures et les infrastructures. Dans le domaine de l'ingénierie, il est crucial de prendre en compte les effets du vent lors de la conception et de l'exploitation de diverses installations telles que les réservoirs.

Ce chapitre se concentre sur l'étude au vent du réservoir de GNL, en se basant sur les principes et les directives énoncés dans le règlement algérien neige et vent RNV 2013. L'objectif principal est d'identifier les zones de surpression et de dépression, ainsi que d'analyser les éléments du réservoir qui peuvent être soumis à des forces aérodynamiques, telles que la portance.

4.2 Direction du vent :

Pour une construction circulaire on considérera une seule direction du vent.

La wilaya de Skikda se trouve dans la zone II suivant le tableau A.2 donné par le RNV 2013 p108.

4.3 Hauteur de référence z_e :

Nous avons un réservoir de forme cylindrique avec un toit en dôme sphérique, donc on prend la hauteur de référence égale à la hauteur maximale de l'élément considéré comme indiqué en section 2.3.2.

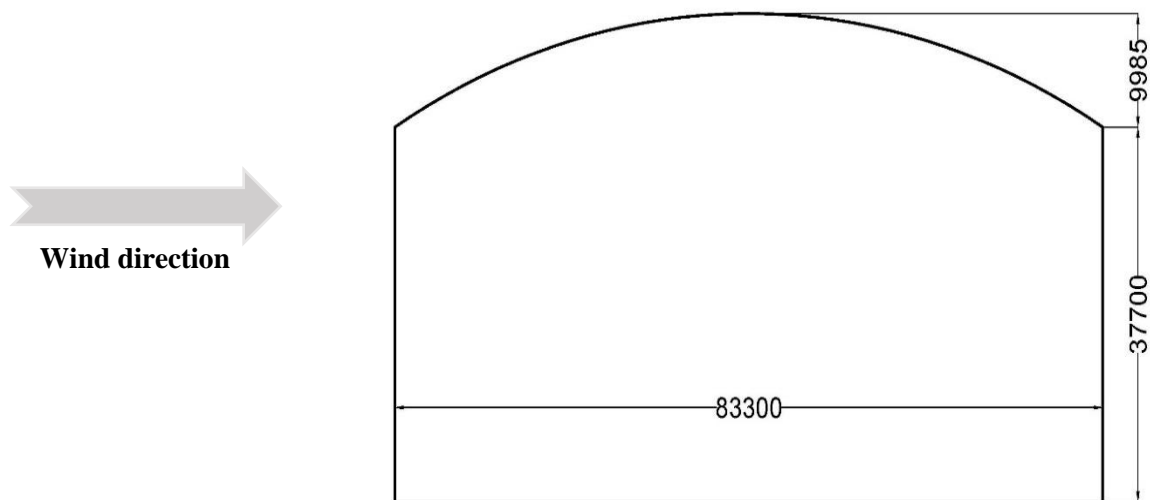


Figure 4.1 Géométrie de la section verticale simplifiée du réservoir.

4.4 Catégorie du terrain :

La zone de l'implantation de notre réservoir répond à la catégorie de terrain 0 :

Catégorie de terrain	K_t	$z_0(m)$	$z_{min} (m)$	ϵ
0 Mer ou zone côtière exposée aux vents de mer	0.156	0.003	1	0.38

Tableau 4.1 : Catégorie du terrain du projet.

4.5 Coefficient de topographie $C_t(z)$:

Le réservoir est implémenté en zone plane $\phi < 0.05$

Donc on prend :

$$C_t(z)=1$$

4.6 Coefficient de rugosité $C_r(z)$:

Défini comme suit :

$$\begin{cases} c_r(z) = k_t \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & z_{min} \leq z \leq 200m \\ c_r(z) = k_t \times \ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right) & z < z_{min} \end{cases}$$

On obtient les valeurs suivantes :

Tronçon	z_e (m)	$C_r(z_e)$
0 à 1 m	1	0.906
1 à 5 m	5	1.157
5 à 10 m	10	1.265
10 à 15 m	15	1.329
15 à 20 m	20	1.373
20 à 25 m	25	1.408
25 à 30 m	30	1.437
30 à 35 m	35	1.461
35 à 37.7 m	37.7	1.473

Tableau 4.2 : Résultats du calcul du coefficient de rugosité pour chaque bande.

4.7 Intensité de turbulence $I_v(z)$:

$$\begin{cases} I_v(z) = \frac{1}{C_t(z) \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} & \text{pour } z > z_{min} \\ I_v(z) = \frac{1}{C_t(z) \times \ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right)} & \text{pour } z \leq z_{min} \end{cases}$$

On obtient les valeurs suivantes :

Tronçon	z_e (m)	$I_v(z_e)$
0 à 1 m	1	0.172
1 à 5 m	5	0.135
5 à 10 m	10	0.123

CHAPITRE IV : ETUDE AU VENT.

10 à 15 m	15	0.117
15 à 20 m	20	0.114
20 à 25 m	25	0.111
25 à 30 m	30	0.109
30 à 35 m	35	0.107
35 à 37.7 m	37.7	0.106

Tableau 4.3 : Résultats du calcul de l'intensité de turbulence pour chaque bande.

4.8 Coefficient d'exposition $C_e(z_e)$:

$$C_e(z_e) = C_t(z)^2 \cdot C_r(z)^2 \cdot [1+7 I_v(z)]$$

Tronçon	z_e (m)	$C_e(z_e)$
0 à 1 m	1	1.997
1 à 5 m	5	2.250
5 à 10 m	10	2.354
10 à 15 m	15	2.417
15 à 20 m	20	2.469
20 à 25 m	25	2.502
25 à 30 m	30	2.533
30 à 35 m	35	2.555
35 à 37.7 m	37.7	2.566

Tableau 4.4 : Résultats du calcul du coefficient d'exposition pour chaque bande.

4.9 Pression dynamique de pointe :

La pression dynamique de pointe $q_p(z_e)$ à la hauteur de référence z_e est donnée par :

$$q_p(z_e) = q_{réf} \cdot C_e(z_e) \quad [N/m^2]$$

La wilaya de Skikda se trouve dans la zone II suivant le tableau A.2 donné par le RNV 2013 p108.

$q_{réf}=435 [N/m^2]$ Pression dynamique de référence donnée par le tableau 2.2 pour la zone II.

$$q_{réf} = 0.5 \cdot \rho \cdot V_{réf}^2$$

- $V_{réf}$ Vitesse de référence du vent.
- ρ Masse volumique de l'air prise 1.2 kg/m^3 .
- C_e Coefficient d'exposition au vent.
- z_e hauteur de référence.

Les valeurs de $q_p(z_e)$ sont données dans le tableau suivant :

Tronçon	z_e (m)	$C_r(z_e)$	$C_t(z_e)$	$I_v(z_e)$	$C_e(z_e)$	$q_p(z_e) [N/m^2]$
0 à 1 m	1	0.906		0.172	1.997	868.695
1 à 5 m	5	1.157		0.135	2.250	978.75

CHAPITRE IV : ETUDE AU VENT.

5 à 10 m	10	1.265	1	0.123	2.354	1023.99
10 à 15 m	15	1.329		0.117	2.417	1051.395
15 à 20 m	20	1.373		0.114	2.469	1074.015
20 à 25 m	25	1.408		0.111	2.502	1088.37
25 à 30 m	30	1.437		0.109	2.533	1101.855
30 à 35 m	35	1.461		0.107	2.555	1111.425
35 à 37.7 m	37.7	1.473		0.106	2.566	1116.21

Tableau 4.5 : Les valeurs de $q_p(z_e)$

4.10 Coefficient dynamique C_a :

4.10.1 Hauteur équivalente :

Pour le calcul de C_d , la hauteur équivalente est prise égale à :

$$z_{eq}=0.6.h ; z_{eq}= 0.6*47.685 ; z_{eq}=28.611 \text{ m}$$

4.10.2 Fréquence fondamentale :

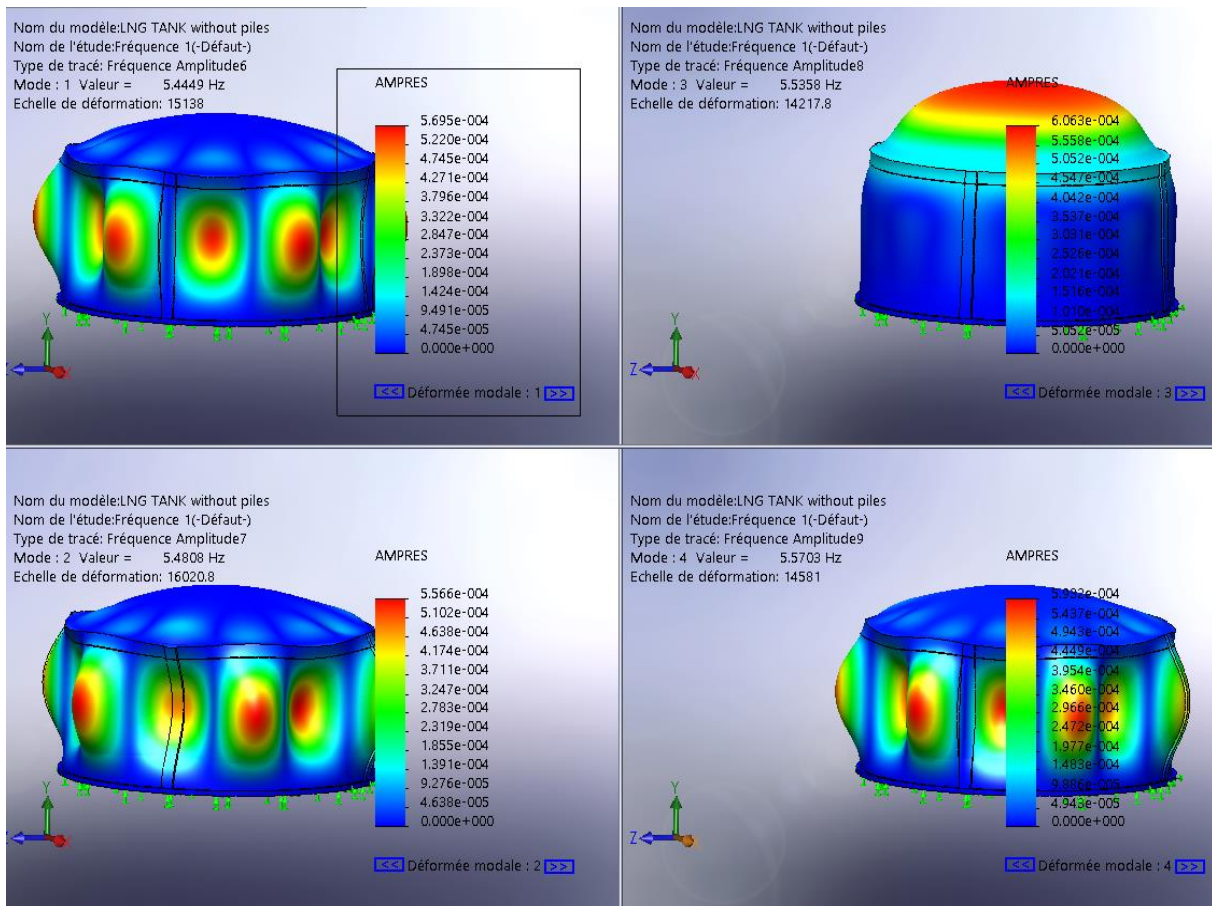


Figure 4.2 : Résultats obtenus par simulation sur SolidWorks.

La fréquence fondamentale est celle qui correspond à la plus grande période donc la plus petite fréquence autrement dit du mode 1.

$$n_{1,x} = f = 5.4449 \text{ Hz}$$

4.10.3 Echelle de turbulence $L_i(z_{eq})$:

$$L_i(z_{eq}) = 300 \times \left[\frac{z}{200} \right]^\varepsilon ; L_i(z_{eq}) = 300 \times \left[\frac{28.611}{200} \right]^{0.38} ; L_i(z_{eq}) = 143.2889$$

4.10.4 Partie quasi-statique :

$$Q^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \times \left[\frac{(b+h)}{L_i(z_{eq})} \right]^{0.63}} ; Q^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \times \left[\frac{(83.3 + 47.685)}{143.2889} \right]^{0.63}} ; Q^2 = 0.54039$$

4.10.5 Vitesse moyenne : (Annexe 2 P-111) :

$$V_m(z_{eq}) = C_r(z_e) \cdot C_t(z_e) \cdot V_{réf}$$

- $z_e = 28.611$ m
- $C_r(z_e) = 1.4264$
- $V_{réf} = 27$ m/s.

$$V_m(z_{eq}) = 38.594 \text{ m/s.}$$

4.10.6 Fréquence adimensionnelle :

$$N_x = \frac{n_{1,x} \times L_i(z_{eq})}{V_m(z_{eq})} ; N_x = \frac{5.4449 \times 143.2889}{38.594} ; N_x = 20.2154$$

4.10.7 Densité spectrale de puissance :

$$R_N = \frac{6,8 N_x}{(1 + 10,2 N_x)^{5/3}} ; R_N = \frac{6,8 * 20.2154}{(1 + 10,2 * 20.2154)^{5/3}} ; R_N = 0.018947$$

4.10.8 Admittances aérodynamiques :

$$\eta_b = \frac{4,6 \cdot N_x \cdot b}{L_i(z_{eq})} ; \eta_b = \frac{4,6 * 20.2154 * 83.3}{143.2889} ; \eta_b = 54.0595$$

$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot N_x \cdot h}{L_i(z_{eq})} ; \eta_h = \frac{4,6 * 20.2154 * 47.685}{143.2889} ; \eta_h = 30.9463$$

$$R_h = \left(\frac{1}{\eta_h} \right) - \left(\frac{1}{2\eta_h^2} \right) \times (1 - e^{-2\eta_h}) ; R_h = 0.031792$$

$$R_b = \left(\frac{1}{\eta_b}\right) - \left(\frac{1}{2\eta_b^2}\right) \times (1 - e^{-2\eta_b}); R_b = 0.01833$$

4.10.9 Décrément logarithmique d'amortissement :

$$\delta = \delta_s + \delta_a$$

À partir du tableau 3.1 P-66 :

- $\delta_s = 0.03$ (Tours en béton armé).
- $\delta_a = 0$ par défaut.

$$\delta = 0.03$$

4.10.10 Partie résonante :

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2\delta} R_N \cdot R_{\mu} \cdot R_b ; R^2 = 0.001816$$

4.10.11 Fréquence moyenne :

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{Q + R^2}} ; v = 5.4449 \sqrt{\frac{0.001816}{0.54039 + 0.001816}} ; v = 0.31511 \text{ Hz} \geq 0.08$$

4.10.12 Facteur de pointe :

$$g = \sqrt{2 \times \ln(600v)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \times \ln(600v)}} = 3.42323 \geq 3$$

4.10.13 Intensité de turbulence :

$$I_v(z) = \frac{1}{C_t(z) \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = 0.109 \text{ pour } z > z_{\min}$$

4.10.14 Coefficient dynamique :

$$C_d = \frac{1 + 2 \cdot g \cdot I_v(z_{eq}) \times \sqrt{Q^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_{eq})} ; C_d = 0.8789$$

4.11 Pression dynamique du vent :

On résume les résultats obtenus précédemment dans le tableau suivant :

Tronçon	$C_r(z_e)$	$C_e(z_e)$	$q_p(z_e)$ [N/m ²]	$C_d \cdot q_p(z_e)$ [N/m ²]
0 à 1 m	0.906	1.997	868.695	763.496
1 à 5 m	1.157	2.250	978.75	860.223
5 à 10 m	1.265	2.354	1023.99	899.984
10 à 15 m	1.329	2.417	1051.395	924.071
15 à 20 m	1.373	2.469	1074.015	943.952
20 à 25 m	1.408	2.502	1088.37	956.570
25 à 30 m	1.437	2.533	1101.855	968.420
30 à 35 m	1.461	2.555	1111.425	976.831
35 à 37.7 m	1.473	2.566	1116.21	981.037

Tableau 4.6 : Résultats de calcul de la pression dynamique du vent pour chaque bande.

4.12 Coefficient de pression C_p :

4.12.1 Parois verticales des constructions à base circulaire :

Les coefficients de pression $C_{p,e}$ des parois verticales des constructions à bases circulaires sont données par :

$$\begin{cases} C_{p,e} = C_{p,0} & \text{pour } 0^{\circ} \leq \alpha \leq \alpha_{min} \\ C_{p,e} = C_{p,0} \cdot \left[\Psi_{\lambda} + (1 + \Psi_{\lambda}) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{\alpha - \alpha_{min}}{\alpha_A - \alpha_{min}}\right)\right) \right] & \text{pour } \alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_A \\ C_{p,e} = C_{p,0} \cdot \Psi_{\lambda} & \text{pour } \alpha_A \leq \alpha \leq 180^{\circ} \end{cases}$$

- $C_{p,0}$ Coefficient de pression extérieure pour un élancement infini (figure 5.11 P-93)
- α_A Position du point de décollement de l'écoulement.
- α_{min} Position de la pression minimale.
- Ψ_{λ} Facteur d'élancement.

Facteur d'élancement (figure 4.1 P-69) :

On a un coefficient de remplissage $\varphi=1$ (pour une structure fermée).

D'après le tableau 4.1 de l'élancement effectif λ_e en prenant b égal au diamètre du réservoir, nous obtenons :

$$\Psi_{\lambda}=1$$

Pour un paramètre $b \cdot \sqrt{q_p} = 130$ nous avons :

$$\begin{cases} C_{p,e} = C_{p,0} & \text{pour } 0^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ \\ C_{p,e} = C_{p,0} \cdot \left[\psi_\lambda + (1 + \psi_\lambda) \cdot \cos \left(90^\circ \left(\frac{\alpha - 75^\circ}{135^\circ - 75^\circ} \right) \right) \right] & \text{pour } 75^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ \\ C_{p,e} = C_{p,0} \cdot \psi_\lambda & \text{pour } 135^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \end{cases}$$

Les coefficients de pression pour les différents angles de 0° à 180° sont donnés dans le tableau suivant :

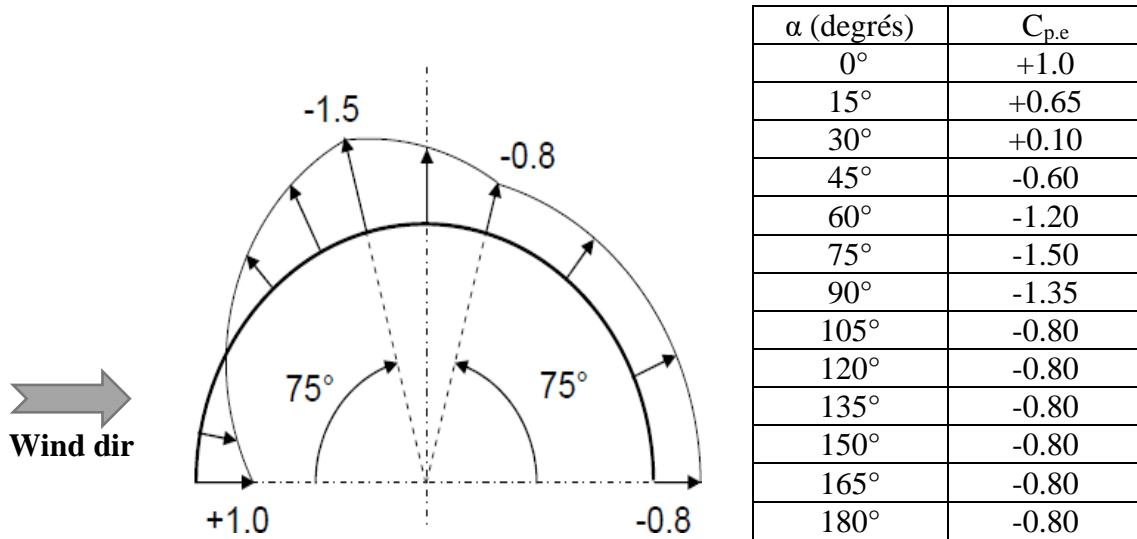


Figure 4.3 : Distribution des $C_{p,e}$ dans la direction radiale.

4.12.2 Toiture en forme de sphère ou calotte sphérique :

D'après le RNV 2013 5.1.12 il convient de diviser la toiture comme indiqué si dessous :

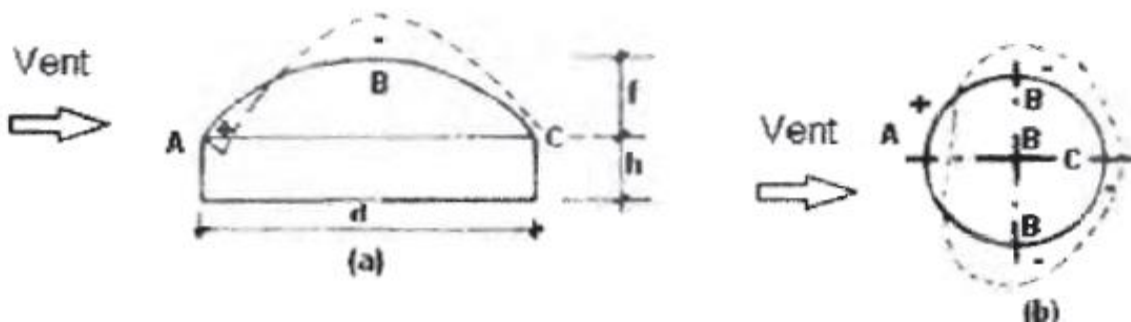


Figure 4.4 : Division des toitures en forme de calottes sphériques -RNV 2013-

Les coefficients de pression $C_{p,e}$ sont obtenus pour :

- Un diamètre $d = 83.3$ m.
- Une hauteur du cylindre $h = 37.7$ m.
- Une flèche $f = 9.985$ m.

On calcul les paramètres f/d et h/d :

$$\frac{f}{d} \approx 0.12$$

$$\frac{h}{d} \approx 0.45$$

En utilisant l'abaque donné à la page 95 et en faisant une interpolation linéaire, nous calculons les $C_{p,e}$ en A, B & C (figure 5.12 P-95).

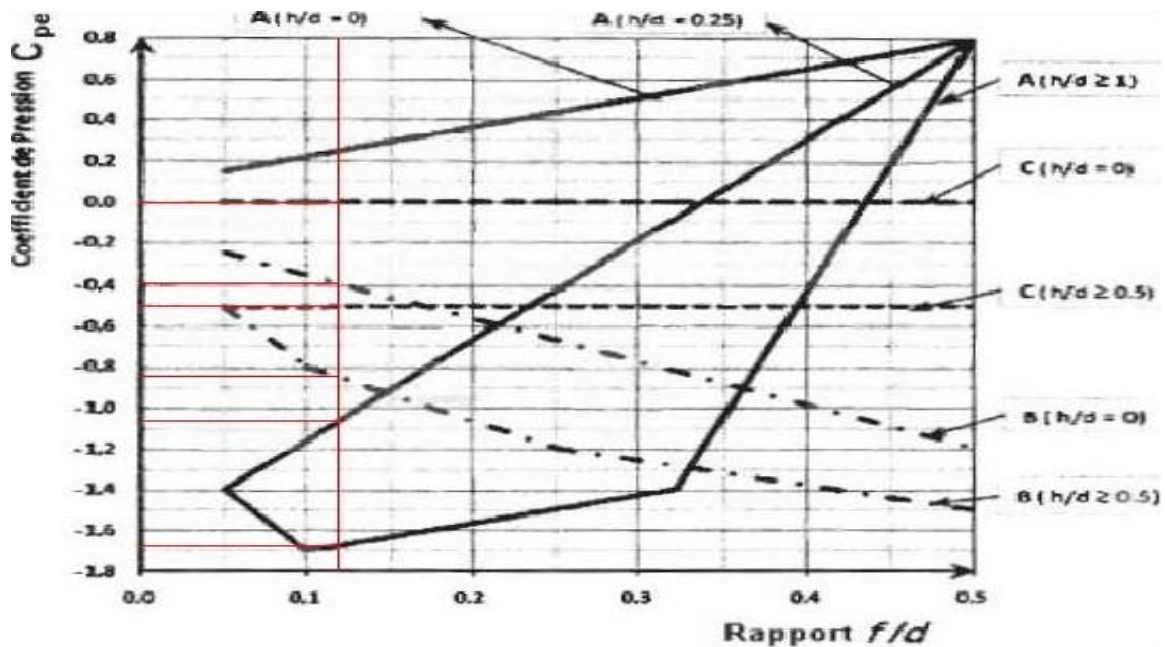


Figure 4.5 : Coefficient $C_{p,e}$ pour toitures en dômes à base circulaire.

Points	$C_{p,e}$
A	-1.225
B	-0.8
C	-0.45

Tableau 4.7 : Valeur des $C_{p,e}$ aux points A.B.C

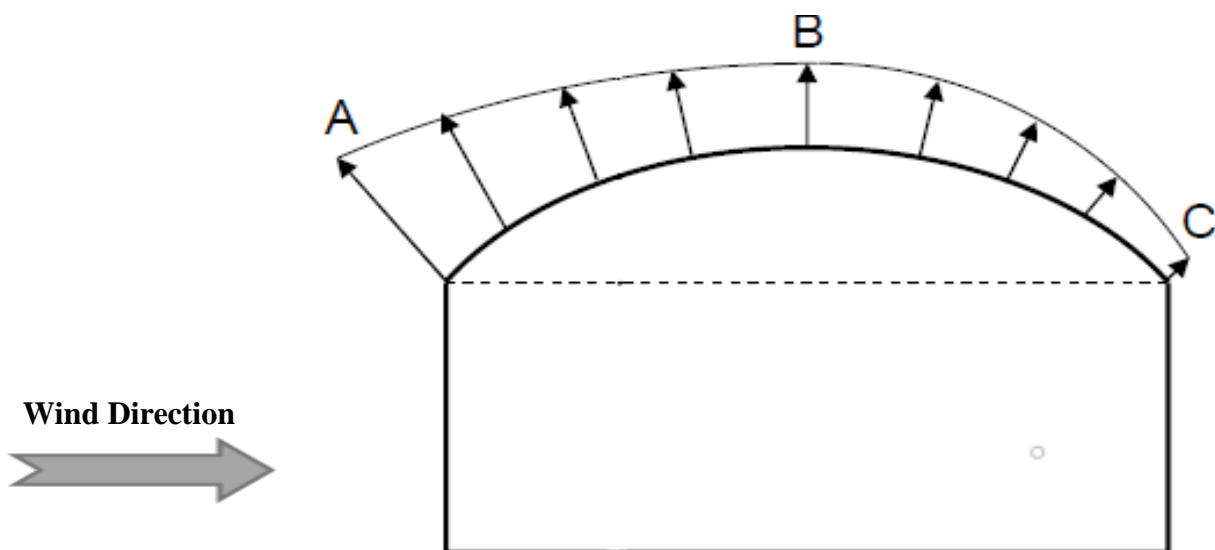


Figure 4.6 : Distribution des $C_{p,e}$ sur le dôme.

CHAPITRE IV : ETUDE AU VENT.

La pression du vent appliquée sur la structure est égale à :

$$q(z) = C_d \cdot q_p(z) \cdot C_{p.net}$$

On a une structure fermée donc on aura : $C_{p.net} = C_{p.e}$

Sur le tronçon 35 à 37.7 m par exemple on obtient les résultats suivants :

α (degrés)	$C_{p.e}$	$C_{p.e} \cdot C_d \cdot q_p(z_e)$ [N/m ²]
0°	+1.0	+981.037
15°	+0.65	+638.172
30°	+0.10	+98.104
45°	-0.60	-588.622
60°	-1.20	-1177.244
75°	-1.50	-1471.555
90°	-1.35	-1325.751
105°	-0.80	-785.628

Tableau 4.8 : Résultats de calcul de la pression du vent appliquée en haut du réservoir.

4.13 Discussion des résultats :

Après avoir calculer le coefficient dynamique nous constatons que le vent n'a pas une grande influence sur la structure étant donné que sa valeur est inférieure à 1.2 les résultats concernant les coefficients de pression indiquent qu'il y a un effet de soulèvement du dôme, une surpression sur la paroi verticale du réservoir sur 30° et une dépression sur le reste de la circonférence, variable de 30° à 105° et d'une valeur constante égale à -0.8 de 105° à 180°.

4.14 Conclusion :

En conclusion, l'étude au vent du réservoir GNL souligne l'importance de comprendre et d'évaluer avec précision les charges de vent. Les zones de surpression et de dépression identifiées ainsi que la portance du toit doivent être prises en compte dans la conception structurelle pour assurer la sécurité et la stabilité de la structure conformément aux règlements en vigueur.

CHAPITRE V:
ÉTUDE THERMIQUE LINÉAIRE.

5.1 Introduction :

Le présent chapitre se concentre sur l'analyse du calcul thermique linéaire dans le cadre d'une étude visant à évaluer les températures moyennes et les gradients linéaires de température dans différentes parties du réservoir, notamment le radier, la jupe et le dôme, lors de son fonctionnement normal. L'objectif de ce chapitre sera aussi de présenter les standards utilisés pour la conception et le dimensionnement de l'isolation thermique ainsi que les différents types de matériaux utilisés.

5.2 Hypothèses et considérations :

Les calculs sont effectués en prenant en compte la température du GNL soit -162 °C , les conductivités thermiques des matériaux d'isolations, les températures maximales et minimales en été et en hiver soit de $+38\text{ °C}$ et $+3\text{ °C}$ respectivement, ainsi que le coefficient de convection de l'air pris à $20\text{ W/m}^2\text{. °C}$ à une vitesse de vent fréquente de 18 km/h , il est pris en considération lors des calculs effectués pour la jupe et le dôme.

La température du radier est contrôlée par le système de chauffage localisé à environ 0.3 m sous la face supérieure du radier. Celui-ci est calibré de manière à maintenir une température minimale $T_{\text{slab}} = +8\text{ °C}$ en sous-face du radier en zone courante en hiver et en été, et en zone périphérique, une température de $T_{\text{slab}} = +8\text{ °C}$ en hiver et $T_{\text{slab}} = +20\text{ °C}$ en été.

Les tôles en acier ne sont pas prises en compte dans les calculs thermiques car la conductivité thermique élevée de l'acier n'influe pas sur les gradients thermiques dans les autres matériaux. Dans le contexte d'hypothèse conservatrice, nous prenons la température de la vapeur du gaz naturel égale à celle du GNL et sa conductivité thermique très élevée donc une résistance quasi nulle.

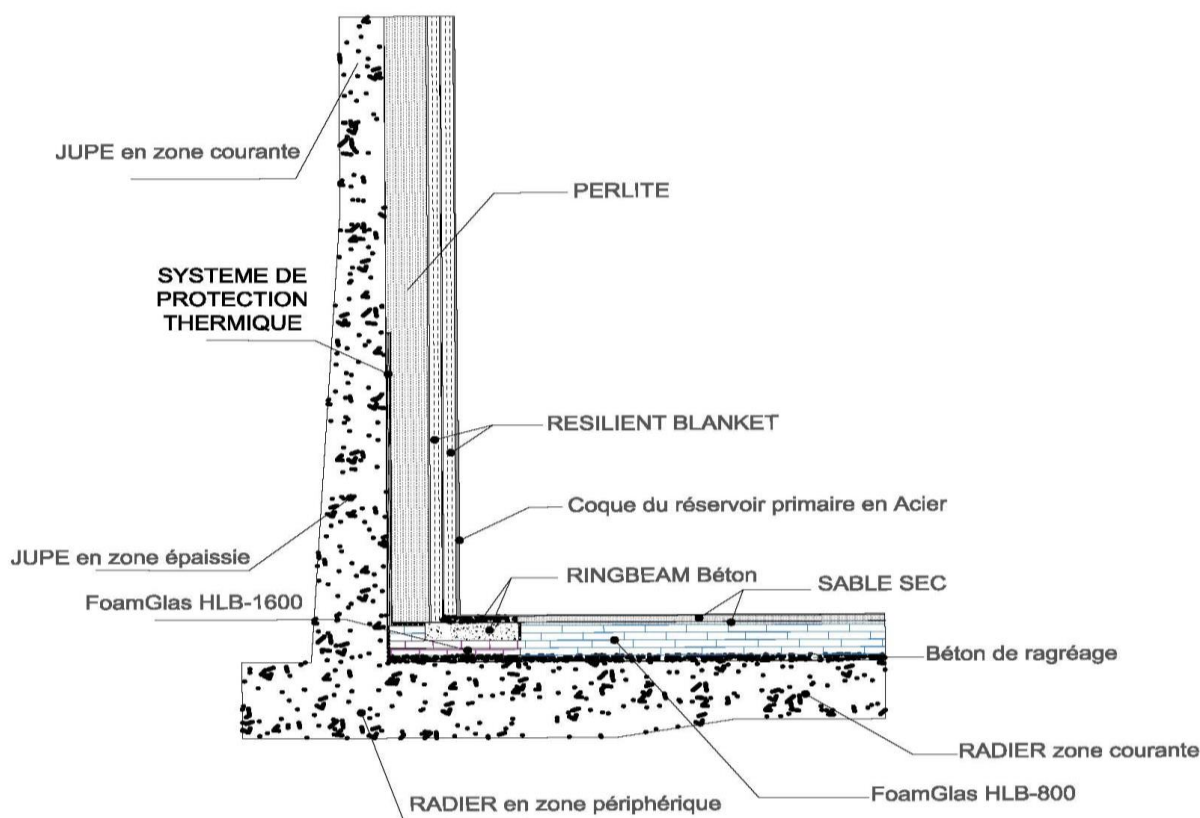


Figure 5.1 : Section verticale type de la partie inférieure du réservoir.

5.3 Standards utilisés pour la conception de l'isolation thermique :

La conception du système d'isolation de réservoir de GNL conformément à la norme BS EN 14620-4 et l'API-625 section 9, doit reposer sur des exigences structurelles et thermiques.

La conception thermique doit prendre en compte :

- La quantité maximale de gaz évaporée autorisée (boil-off)
- La température minimale de conception des composants externes du réservoir
- La prévention de la formation de gel/condensation sur les surfaces externes du réservoir
- La prévention du gel du sol.

La conception structurelle du système d'isolation doit être basée sur les états limites.

Certaines parties de l'isolation du réservoir doivent être soumises à des charges de compression et de cisaillement telles que :

- L'isolation du fond du réservoir pour tous les types de réservoirs.
- Le système de protection thermique (TPS) pour le fond et la paroi.

L'épaisseur de l'isolation du fond du réservoir ainsi que l'espace annulaire coque/paroi doit être déterminée en fonction de la quantité maximale totale de chaleur autorisée spécifiée et de la nécessité de minimiser la condensation/la formation de glace.

Une attention particulière doit être accordée pour éviter le soulèvement par le gel sous le fond du réservoir, pour cela, nous utilisons un système de chauffage installé dans le radier.

Material	Ring-beam	Bottom (normal service)	Roof insulation		Shell/wall insulation (normal service)		Thermal protection system	
			On susp. deck	On inner tank dome	In inter-space	On inside of wall	Without 9 % nickel steel plate	With 9 % nickel steel plate
Hard wood	X							
Perlite concrete blocks/beam	X							
Lightweight concrete blocks/beam	X							
Reinforced concrete	X ^a							
Cellular glass	X ^b	X						X
Expanded perlite			X	X	X			
Mineral wool blankets			X	X	X ^c			
PVC foam - MD		X						X
- HD	X ^b	X						X
PUF/PIR - ND BL-SPR-FIP								
- MD BL-SPR						X ^d	X ^d	X
- HD BL-SPR	X ^b	X				X ^d	X ^d	X
- GR BL	X ^b	X					X ^d	X
^a To be used as load distribution plate over the underlying thermal insulation material. ^b To be used underneath a load distribution plate. ^c Mineral wool blanket can be used as resilient blanket between perlite insulation and inner tank shell. ^d Only special grades of spray-applied, jointless, vapour tight, liquid tight systems.							Symbols/Abbreviations BL = block-type FIP = pour-in-place GR = glass fibre reinforced HD = high density MD = medium density ND = normal density SPR = spray-type	

Figure 5.2 : Utilisation des matériaux d'isolation dans le cas d'un réservoir à confinement intégral – BS EN 14620-4 2006 ANNEX A-

5.4 Caractéristiques des matériaux utilisés dans l'étude :

Matériaux	Conductivité thermique (W/m. °C)	Chaleur spécifique (J/kg.°C)	Densité (kg/m ³)
Tôles en acier	47,0000	450	7850
Béton de la coque	2,0000	900	2300
Béton de ragréage	2,0000	900	2300
Béton de la poutre annulaire de support	2,0000	900	2300
Sable sec	0.3300	840	1500
Fibre de glasses	0.0143 / 0.0383	1030	12
Resillient Blanket	0.0093 / 0.0143	1030	16
FoamGlass HLB-800	0.0259 / 0.0267	840	120
FoamGlass HLB-1600	0.0309	840	160
Perlite	0.0290	900	60
Vapeur de GN	100,000	1700	0.79

Table 5.1 : Propriétés thermiques et densité des matériaux d'isolation utilisés.

5.5 Calculs au niveau du radier :

5.5.1 En zone courante (épaisseur de 1.1m) :

Le flux de chaleur total Φ traversant les couches de matériaux d'isolation est égal à :

$$\Phi = \lambda_1/t_1 \cdot (T_1 - T_{GNL})$$

$$\Phi = \lambda_2/t_2 \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\Phi = \lambda_3/t_3 \cdot (T_3 - T_2)$$

$$\Phi = \lambda_4/t_4 \cdot (T_4 - T_3)$$

$$\Phi = \lambda_5/t_5 \cdot (T_{slab} - T_4)$$

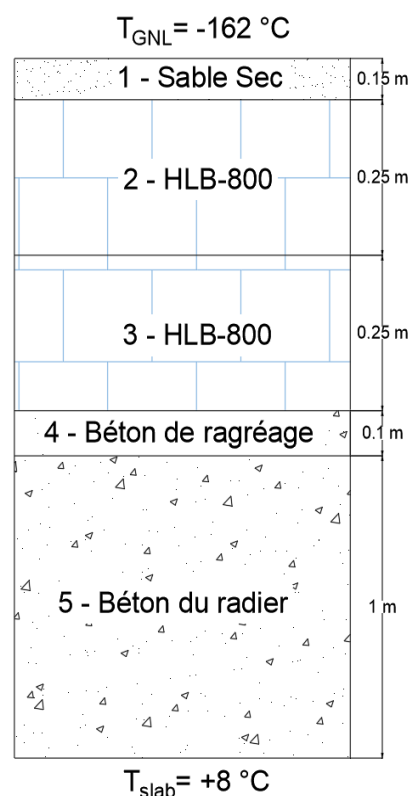
Où t_i et λ_i ($i=1,5$) sont les épaisseurs et les conductivités thermiques des matériaux respectivement et T_i ($i=1,4$) les températures aux interfaces entre ces matériaux.

Donc on a un flux égal à :

$$\Phi = \frac{1}{\frac{t_1}{\lambda_1} + \frac{t_2}{\lambda_2} + \frac{t_3}{\lambda_3} + \frac{t_4}{\lambda_4} + \frac{t_5}{\lambda_5}} (T_{slab} - T_{GNL})$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{0.15}{0.33} + \frac{0.25}{0.0259} + \frac{0.25}{0.0267} + \frac{0.1}{2} + \frac{1}{2}} (8 - (-162))$$

$$\Phi = 8.49135 \text{ W/m}^2$$



Matériau	t (m)	λ (W/m. °C)	λ/t (W/m ² . °C)	Temp (°C)	Φ (W/m ²)
				$T_{\text{GNL}} = -162$	
1	0.15	0.3300	2,2000		8,49135
				$T_1 = -158.14$	
2	0.25	0.0259	0,1036		8,49135
				$T_2 = -76.177$	
3	0.25	0.0267	0,1068		8,49135
				$T_3 = +3.33$	
4	0.1	2,0000	20,0000		8,49135
				$T_4 = +3.7545$	
5	1	2,0000	2,0000		8,49135
				$T_{\text{Slab}} = +8.00$	

Table 5.2 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone courante du radier.

Température moyenne (T_m) : est calculée en prenant la moyenne de la température des deux faces du radier +8.00 °C et +3.7545 °C, $T_m = +5.877$ °C.

Gradient thermique (ΔT) : est calculé en soustrayant la température de la face interne de la température de la face externe, $\Delta T = 4.245$ °C.

5.5.2 En zone périphérique (épaissement de 1.3 m) : 'hiver'

Le flux de chaleur total Φ traversant les couches de matériaux d'isolation est égal à :

$$\Phi = \lambda_1/t_1 \cdot (T_1 - T_{\text{GNL}})$$

$$\Phi = \lambda_2/t_2 \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\Phi = \lambda_3/t_3 \cdot (T_3 - T_2)$$

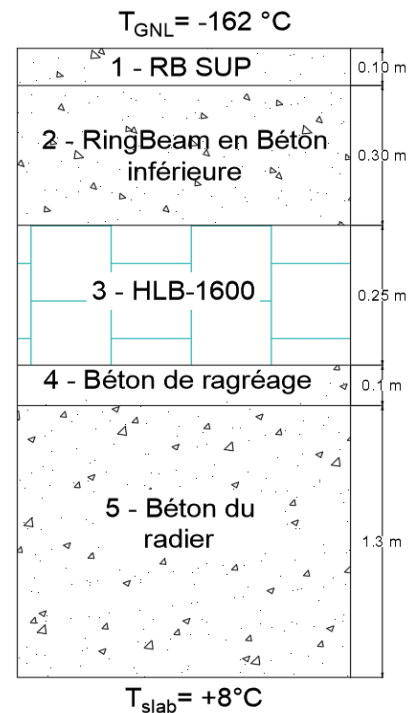
$$\Phi = \lambda_4/t_4 \cdot (T_4 - T_3)$$

$$\Phi = \lambda_5/t_5 \cdot (T_{\text{Slab}} - T_4)$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{t_1}{\lambda_1} + \frac{t_2}{\lambda_2} + \frac{t_3}{\lambda_3} + \frac{t_4}{\lambda_4} + \frac{t_5}{\lambda_5}} (T_{\text{slab}} - T_{\text{GNL}})$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{0.10}{2} + \frac{0.30}{2} + \frac{0.25}{0.0309} + \frac{0.1}{2} + \frac{1.3}{2}} (8 - (-162))$$

$$\Phi = 18.9086 \text{ W/m}^2$$



Matériau	t (m)	λ (W/m. °C)	λ/t (W/m ² . °C)	Temp (°C)	Φ (W/m ²)
				$T_{\text{GNL}} = -162$	
1	0.10	2	20.0000		18.9086

				$T_1 = -161.054$	
2	0.30	2	6.6667		18.9086
				$T_2 = -158.217$	
3	0.25	0.0309	0,1236		18.9086
				$T_3 = -5.2348$	
4	0.1	2,0000	20,0000		18.9086
				$T_4 = -4.289$	
5	1.3	2,0000	1.5384		18.9086
				$T_{\text{Slab}} = +8.00$	

Table 5.3 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone périphérique du radier -Hiver-.

Température moyenne (T_m) : est calculée en prenant la moyenne de la température des deux faces du radier $+8.00$ °C et -4.289 °C, $T_m = +1.855$ °C.

Gradient thermique (ΔT) : est calculé en soustrayant la température de la face interne de la température de la face externe, $\Delta T = 12.289$ °C.

5.5.3 En zone périphérique (épaissement de 1.3 m) : 'été'

Le flux de chaleur total Φ traversant les couches de matériaux d'isolation est égal à :

$$\Phi = \lambda_1/t_1 \cdot (T_1 - T_{\text{GNL}})$$

$$\Phi = \lambda_2/t_2 \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\Phi = \lambda_3/t_3 \cdot (T_3 - T_2)$$

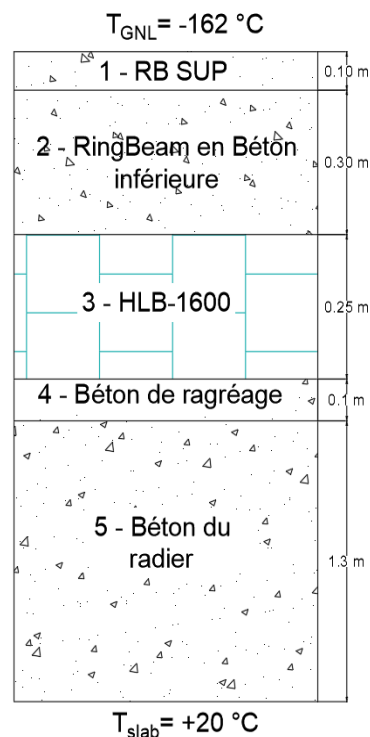
$$\Phi = \lambda_4/t_4 \cdot (T_4 - T_3)$$

$$\Phi = \lambda_5/t_5 \cdot (T_{\text{Slab}} - T_4)$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{t_1}{\lambda_1} + \frac{t_2}{\lambda_2} + \frac{t_3}{\lambda_3} + \frac{t_4}{\lambda_4} + \frac{t_5}{\lambda_5}} (T_{\text{slab}} - T_{\text{GNL}})$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{0.10}{2} + \frac{0.30}{2} + \frac{0.25}{0.0309} + \frac{0.1}{2} + \frac{1.3}{2}} (20 - (-162))$$

$$\Phi = 20.2433 \text{ W/m}^2$$



Matériau	t (m)	λ (W/m. °C)	λ/t (W/m ² . °C)	Temp (°C)	Φ (W/m ²)
				$T_{\text{GNL}} = -162$	
1	0.10	2	20.0000		20.2433
				$T_1 = -160.987$	
2	0.30	2	6.6667		20.2433
				$T_2 = -157.950$	
3	0.25	0.0309	0,1236		20.2433
				$T_3 = +5.8307$	

CHAPITRE V : ÉTUDE THERMIQUE LINÉAIRE.

4	0.1	2,0000	20,0000		20.2433
				$T_4 = +6.8428$	
5	1.3	2,0000	1.5384		20.2433
				$T_{\text{Slab}} = +20$	

Table 5.4 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone périphérique du radier -été-.

Température moyenne (T_m) : est calculée en prenant la moyenne de la température des deux faces du radier $+20$ °C et $+6.8428$ °C, $T_m = 13.4214$ °C.

Gradient thermique (ΔT) : est calculé en soustrayant la température de la face interne de la température de la face externe, $\Delta T = 13.1572$ °C.

5.6 Calculs au niveau de la jupe :

5.6.1 En zone courante : 'hiver'

Le flux de chaleur total Φ traversant la jupe :

$$\Phi = \lambda_1/t_1 \cdot (T_1 - T_{\text{GNL}})$$

$$\Phi = \lambda_2/t_2 \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\Phi = \lambda_3/t_3 \cdot (T_3 - T_2)$$

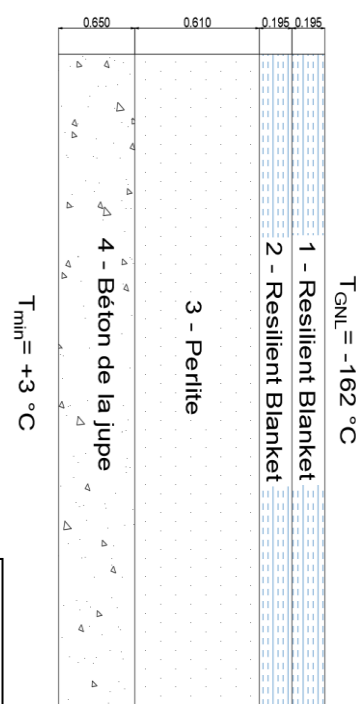
$$\Phi = \lambda_4/t_4 \cdot (T_4 - T_3)$$

$$\Phi = h_{\text{air}} \cdot (T_{\text{min}} - T_4)$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{t_1}{\lambda_1} + \frac{t_2}{\lambda_2} + \frac{t_3}{\lambda_3} + \frac{t_4}{\lambda_4} + \frac{1}{h_{\text{air}}}} (T_{\text{slab}} - T_{\text{GNL}})$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{0.195}{0.0093} + \frac{0.195}{0.0143} + \frac{0.61}{0.029} + \frac{0.65}{2} + \frac{1}{20}} (3 - (-162))$$

$$\Phi = 2.9457 \text{ W/m}^2$$



Matériau	t (m)	λ (W/m. °C)	λ/t (W/m ² . °C)	Temp (°C)	Φ (W/m ²)
				$T_{\text{GNL}} = -162$	
1	0.195	0.0093	0.04769		2.9457
				$T_1 = -100.232$	
2	0.195	0.0143	0.07333		2.9457
				$T_2 = -60.062$	
3	0.610	0.0290	0.04754		2.9457
				$T_3 = +1.900$	
4	0.65	2,0000	3.0769		2.9457
				$T_4 = +2.857$	

CHAPITRE V : ÉTUDE THERMIQUE LINÉAIRE.

5	h_{air}	20,0000		2.9457
			$T_{min} = +3$	

Table 5.5 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone courante de la jupe -Hiver-.

Température moyenne (T_m) : est calculée en prenant la moyenne de la température des deux faces du radier +3 °C et +2.857 °C, $T_m = 2.9285$ °C.

Gradient thermique (ΔT) : est calculé en soustrayant la température de la face interne de la température de la face externe, $\Delta T = 0.143$ °C.

5.6.2 En zone courante : 'été'

Le flux de chaleur total Φ traversant la jupe :

$$\Phi = \lambda_1/t_1 \cdot (T_1 - T_{GNL})$$

$$\Phi = \lambda_2/t_2 \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\Phi = \lambda_3/t_3 \cdot (T_3 - T_2)$$

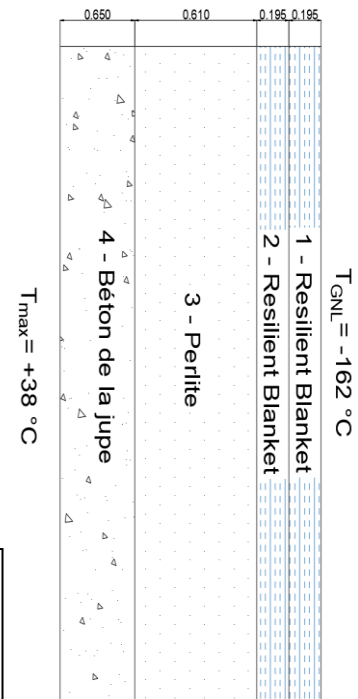
$$\Phi = \lambda_4/t_4 \cdot (T_4 - T_3)$$

$$\Phi = h_{air} \cdot (T_{min} - T_4)$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{t_1}{\lambda_1} + \frac{t_2}{\lambda_2} + \frac{t_3}{\lambda_3} + \frac{t_4}{\lambda_4} + \frac{1}{h_{air}}} (T_{slab} - T_{GNL})$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{0.195}{0.0093} + \frac{0.195}{0.0143} + \frac{0.61}{0.029} + \frac{0.65}{2} + \frac{1}{20}} (38 - (-162))$$

$$\Phi = 3.57056 \text{ W/m}^2$$



Matériau	t (m)	λ (W/m. °C)	λ/t (W/m ² . °C)	Temp (°C)	Φ (W/m ²)	
					$T_{GNL} = -162$	
1	0.195	0.0093	0.04769		3.57056	
					$T_1 = -87.130$	
2	0.195	0.0143	0.07333		3.57056	
					$T_2 = -38.438$	
3	0.610	0.0290	0,04754		3.57056	
					$T_3 = +36.668$	
4	0.65	2,0000	3.0769		3.57056	
					$T_4 = +37.829$	
5	h_{air}	20,0000			3.57056	
					$T_{max} = +38$	

Table 5.6 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone courante de la jupe -été-.

CHAPITRE V : ÉTUDE THERMIQUE LINÉAIRE.

Température moyenne (T_m) : est calculée en prenant la moyenne de la température des deux faces du radier +38 °C et +37.829 °C, $T_m = 37.9145$ °C.

Gradient thermique (ΔT) : est calculé en soustrayant la température de la face interne de la température de la face externe, $\Delta T = 0.171$ °C.

5.6.3 En zone d'épaissement : 'hiver'

L'épaisseur moyenne de la coque en béton de la jupe en cette zone sera prise égale à 0.875 m.

Le système de protection thermique est obligatoire dans le cas de réservoir à système de confinement intégral contenant du GNL.

On utilise de la fibre de verre, son épaisseur et sa hauteur son dimensionnée de telle manière à protéger efficacement la paroi en béton en zone de jonction Jupe-Radier en cas de rupture du réservoir primaire.

Le flux de chaleur total Φ traversant la jupe :

$$\Phi = \lambda_1/t_1 \cdot (T_1 - T_{\text{GNL}})$$

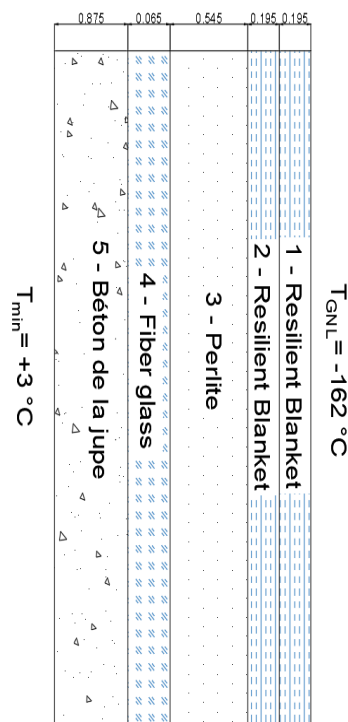
$$\Phi = \lambda_2/t_2 \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\Phi = \lambda_3/t_3 \cdot (T_3 - T_2)$$

$$\Phi = \lambda_4/t_4 \cdot (T_4 - T_3)$$

$$\Phi = \lambda_5/t_5 \cdot (T_5 - T_4)$$

$$\Phi = h_{\text{air}} \cdot (T_{\text{min}} - T_5)$$



$$\Phi = \frac{1}{\frac{t_1}{\lambda_1} + \frac{t_2}{\lambda_2} + \frac{t_3}{\lambda_3} + \frac{t_4}{\lambda_4} + \frac{t_5}{\lambda_5} + \frac{1}{h_{\text{air}}}} (T_{\text{slab}} - T_{\text{GNL}})$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{0.195}{0.0093} + \frac{0.195}{0.0143} + \frac{0.545}{0.029} + \frac{0.065}{0.0383} + \frac{0.875}{2} + \frac{1}{20}} (3 - (-162))$$

$$\Phi = 2.9683 \text{ W/m}^2$$

Matériau	t (m)	λ (W/m. °C)	λ/t (W/m ² . °C)	Temp (°C)	Φ (W/m ²)
				$T_{\text{GNL}} = -162$	
1	0.195	0.0093	0.04769		2.9683
				$T_1 = -99.758$	
2	0.195	0.0143	0.07333		2.9683
				$T_2 = -59.279$	
3	0.545	0.0290	0.0532		2.9683
				$T_3 = -3.4838$	
4	0.065	0.0383	0.5892		2.9683

				$T_4 = +1.554$	
5	0.875	2.0000	2.2857		2.9683
				$T_5 = +2.8526$	
6		h_{air}	20,0000		2.9683
				$T_{min} = +3$	

Table 5.7 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone d'épaissement de la jupe -Hiver-.

Température moyenne (T_m) : est calculée en prenant la moyenne de la température des deux faces du radier +3 °C et +2.8526 °C, $T_m = 2.9263$ °C.

Gradient thermique (ΔT) : est calculé en soustrayant la température de la face interne de la température de la face externe, $\Delta T = 0.147$ °C.

5.6.4 En zone d'épaissement : 'été'

Le flux de chaleur total Φ traversant la jupe :

$$\Phi = \lambda_1/t_1 \cdot (T_1 - T_{GNL})$$

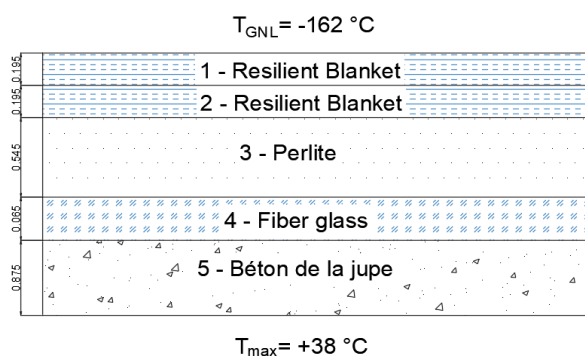
$$\Phi = \lambda_2/t_2 \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\Phi = \lambda_3/t_3 \cdot (T_3 - T_2)$$

$$\Phi = \lambda_4/t_4 \cdot (T_4 - T_3)$$

$$\Phi = \lambda_5/t_5 \cdot (T_5 - T_4)$$

$$\Phi = h_{air} \cdot (T_{min} - T_5)$$



$$\Phi = \frac{1}{\frac{t_1}{\lambda_1} + \frac{t_2}{\lambda_2} + \frac{t_3}{\lambda_3} + \frac{t_4}{\lambda_4} + \frac{t_5}{\lambda_5} + \frac{1}{h_{air}}} (T_{slab} - T_{GNL})$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{0.195}{0.0093} + \frac{0.195}{0.0143} + \frac{0.545}{0.029} + \frac{0.065}{0.0383} + \frac{0.875}{2} + \frac{1}{20}} (38 - (-162))$$

$$\Phi = 2.9683 \text{ W/m}^2$$

Matériau	t (m)	λ (W/m. °C)	λ/t (W/m ² . °C)	Temp (°C)	Φ (W/m ²)
				$T_{GNL} = -162$	
1	0.195	0.0093	0.04769		3.5979
				$T_1 = -86.556$	
2	0.195	0.0143	0.07333		3.5979
				$T_2 = -37.492$	
3	0.545	0.0290	0.0532		3.5979
				$T_3 = +30.137$	
4	0.065	0.0383	0.5892		3.5979
				$T_4 = +36.244$	

CHAPITRE V : ÉTUDE THERMIQUE LINÉAIRE.

5	0.875	2.0000	2.2857		3.5979
				$T_5 = +37.818$	
6	h_{air}		20,0000		3.5979
				$T_{min} = +38$	

Table 5.8 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone d'épaississement de la jupe -été-.

Température moyenne (T_m) : est calculée en prenant la moyenne de la température des deux faces du radier $+37.818$ °C et $+38$ °C, $T_m = 37.909$ °C.

Gradient thermique (ΔT) : est calculé en soustrayant la température de la face interne de la température de la face externe, $\Delta T = 0.182$ °C.

5.7 Calculs au niveau du dôme :

5.7.1 En zone courante : 'hiver'

Dans ce qui suit nous allons considérer la vapeur de gaz naturel comme étant un conducteur parfait pour des raisons conservatrices, donc sa résistance sera nulle.

Le flux de chaleur total Φ traversant les couches de matériaux d'isolation est égal à :

$$\Phi = \lambda_1/t_1 \cdot (T_1 - T_{GNL})$$

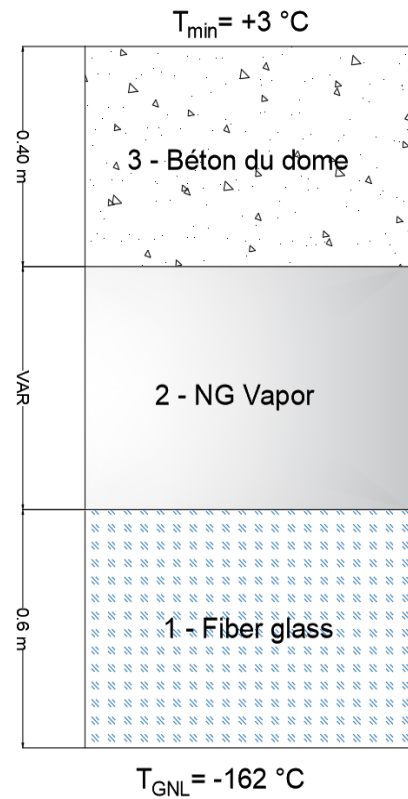
$$\Phi = \lambda_3/t_3 \cdot (T_3 - T_1).$$

$$\Phi = h_{air} \cdot (T_{min} - T_3)$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{t_1}{\lambda_1} + \frac{t_3}{\lambda_3} + \frac{1}{h_{air}}} (T_{slab} - T_{GNL})$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{0.6}{0.0143} + \frac{0.4}{2} + \frac{1}{20}} (3 - (-162))$$

$$\Phi = 3.9092 \text{ W/m}^2$$



Matériau	t (m)	λ (W/m. °C)	λ/t (W/m ² . °C)	Temp (°C)	Φ (W/m ²)
				$T_{GNL} = -162$	
1	0.600	0.0143	0.02383		3.9092
				$T_1 = +2.0453$	
3	0.400	2.0000	5		3.9092
				$T_2 = +2.8271$	
4	h_{air}		20,0000		3.9092
				$T_{min} = +3$	

Table 5.9 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone courante du dôme -été-.

CHAPITRE V : ÉTUDE THERMIQUE LINÉAIRE.

Température moyenne (T_m) : est calculée en prenant la moyenne de la température des deux faces du radier +3 °C et +2.8271 °C, $T_m = +2.9135$ °C.

Gradient thermique (ΔT) : est calculé en soustrayant la température de la face interne de la température de la face externe, $\Delta T = 0.173$ °C.

5.7.2 En zone courante : ‘été’.

Le flux de chaleur total Φ traversant les couches de matériaux d'isolation est égal à :

$$\Phi = \lambda_1/t_1 \cdot (T_1 - T_{GNL})$$

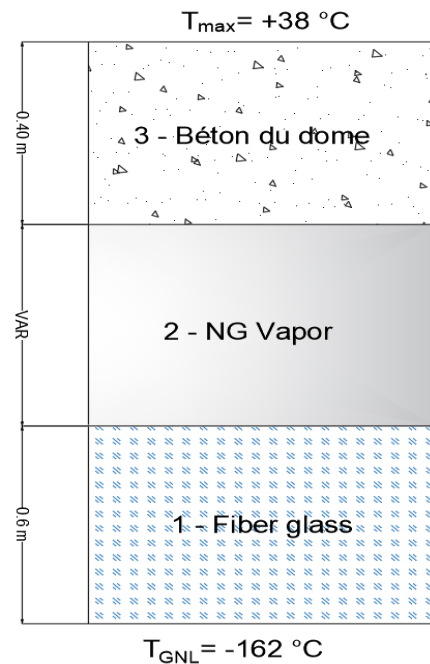
$$\Phi = \lambda_3/t_3 \cdot (T_3 - T_1).$$

$$\Phi = h_{air} \cdot (T_{min} - T_3)$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{t_1}{\lambda_1} + \frac{t_3}{\lambda_3} + \frac{1}{h_{air}}} (T_{slab} - T_{GNL})$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{0.6}{0.0143} + \frac{0.4}{2} + \frac{1}{20}} (38 - (-162))$$

$$\Phi = 4.738 \text{ W/m}^2$$



Matériau	t (m)	λ (W/m. °C)	λ/t (W/m ² . °C)	Temp (°C)	Φ (W/m ²)
				$T_{GNL} = -162$	
1	0.600	0.0143	0.02383		4.738
				$T_1 = +36.825$	
3	0.400	2.0000	5		4.738
				$T_2 = +37.773$	
4		h_{air}	20,0000		4.738
				$T_{min} = +38$	

Table 5.10 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone courante du dôme -été-.

Température moyenne (T_m) : est calculée en prenant la moyenne de la température des deux faces du radier +3 °C et +2.8271 °C, $T_m = +2.9135$ °C.

Gradient thermique (ΔT) : est calculé en soustrayant la température de la face interne de la température de la face externe, $\Delta T = 0.173$ °C.

5.7.3 En zone d'épaissement : ‘hiver’

L'épaisseur moyenne de la coque en béton du dôme en cette zone sera prise égale à 0.8 m.

Le flux de chaleur total Φ traversant les couches de matériaux d'isolation est égal à :

CHAPITRE V : ÉTUDE THERMIQUE LINÉAIRE.

$$\Phi = \lambda_1/t_1 \cdot (T_1 - T_{GNL})$$

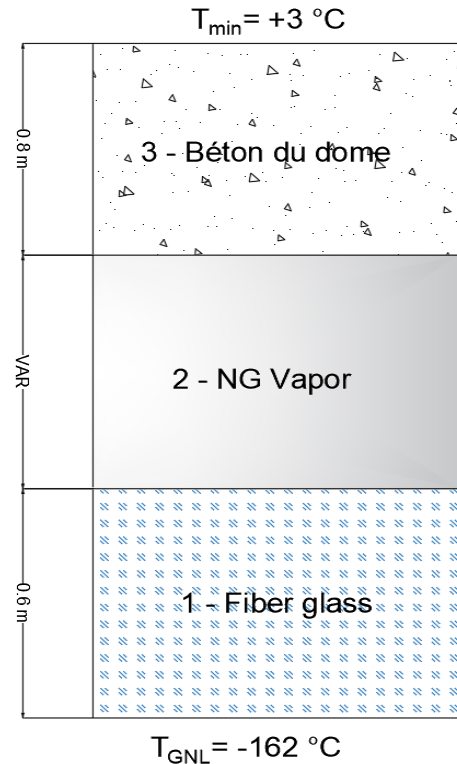
$$\Phi = \lambda_3/t_3 \cdot (T_3 - T_1).$$

$$\Phi = h_{air} \cdot (T_{min} - T_3)$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{t_1}{\lambda_1} + \frac{t_3}{\lambda_3} + \frac{1}{h_{air}}} (T_{slab} - T_{GNL})$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{0.6}{0.0143} + \frac{0.8}{2} + \frac{1}{20}} (3 - (-162))$$

$$\Phi = 3.89077 \text{ W/m}^2$$



Matériau	t (m)	λ (W/m. °C)	λ/t (W/m ² . °C)	Temp (°C)	Φ (W/m ²)
				$T_{GNL} = -162$	
1	0.600	0.0143	0.02383		3.89077
				$T_1 = +1.2719$	
3	0.800	2.0000	2.5		3.89077
				$T_2 = +2.828$	
4		h_{air}	20,0000		3.89077
				$T_{min} = +3$	

Table 5.11 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone d'épaissement du dôme -Hiver-.

Température moyenne (T_m) : est calculée en prenant la moyenne de la température des deux faces du radier $+3 \text{ °C}$ et $+2.828 \text{ °C}$, $T_m = +2.914 \text{ °C}$.

Gradient thermique (ΔT) : est calculé en soustrayant la température de la face interne de la température de la face externe, $\Delta T = 0.172 \text{ °C}$.

5.7.4 En zone d'épaissement : 'été'

L'épaisseur moyenne de la coque en béton du dôme en cette zone sera prise égale à 0.8 m.

Le flux de chaleur total Φ traversant les couches de matériaux d'isolation est égal à :

$$\Phi = \lambda_1/t_1 \cdot (T_1 - T_{GNL})$$

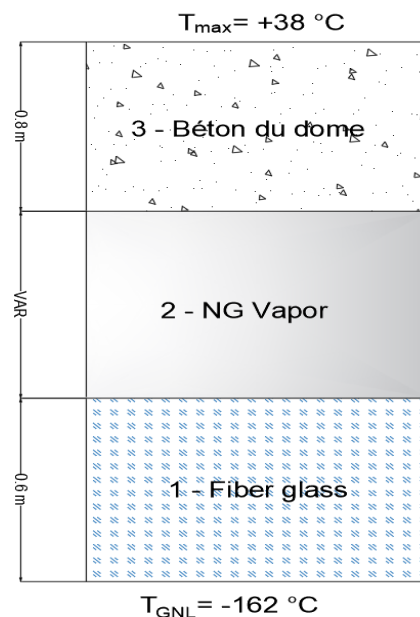
$$\Phi = \lambda_3/t_3 \cdot (T_3 - T_1).$$

$$\Phi = h_{air} \cdot (T_{min} - T_3)$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{t_1}{\lambda_1} + \frac{t_3}{\lambda_3} + \frac{1}{h_{\text{air}}}} (T_{\text{slab}} - T_{\text{GNL}})$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{0.6}{0.0143} + \frac{0.8}{2} + \frac{1}{20}} (3 - (-162))$$

$$\Phi = 4.716 \text{ W/m}^2$$



Matériau	t (m)	λ (W/m. °C)	λ/t (W/m ² . °C)	Temp (°C)	Φ (W/m ²)
				T _{GNL} = -162	
1	0.600	0.0143	0.02383		4.716
				T ₁ = +35.901	
3	0.800	2.0000	2.5		4.716
				T ₂ = +37.788	
4		h _{air}	20,0000		4.716
				T _{min} = +38	

Table 5.12 : Valeurs de flux thermique et de températures aux interfaces en zone d'épaississement du dôme -été-.

Température moyenne (T_m) : est calculée en prenant la moyenne de la température des deux faces du radier +38 °C et +37.788 °C, T_m = +37.894 °C.

Gradient thermique (ΔT) : est calculé en soustrayant la température de la face interne de la température de la face externe, ΔT = 0.212 °C.

5.8 Discussion des résultats :

D'après les résultats obtenus nous constatons que le radier est la zone où il y a le plus d'échanges thermiques, vu que le flux et les gradients de températures sont les plus importants par rapport au dôme et à la jupe, ceci nous amène à dire que le radier et plus précisément la zone périphérique de ce dernier présentera un pont thermique.

5.9 Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a présenté une analyse du calcul thermique linéaire pour évaluer les températures moyennes et les gradients de température dans différentes parties du réservoir. Les normes de conception et les types de matériaux d'isolation thermique ont également été abordés. Les résultats obtenus peuvent servir d'input pour une étude thermique non linéaire et le calcul du Boil-Off.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire m'a permis d'explorer certains aspects structurels et thermiques des réservoirs GNL. Nous avons examiné l'évolution du GNL en tant que source d'énergie et son rôle croissant dans la chaîne d'approvisionnement énergétique mondiale. Les normes de conception des réservoirs de GNL ont été examinées afin d'avoir un aperçu sur les lignes directrices de conception et d'apprendre plus sur les types de réservoirs et les critères d'utilisation de chaque type en termes de sécurité.

Le type de structure que nous avons étudié requiert des bases solides en mécanique des coques et une bonne compréhension des états membranaires et flexionnels afin de savoir comment interpréter les différentes sollicitations et différencier leurs natures.

Durant ce travail j'ai eu l'occasion d'apprendre et de m'initier à travailler avec différents standards tels que les BS 8110, les EN 14620 et EN 1992-1, les API 625 ce qui m'a aidé à avoir une vision plus large sur différentes considérations, hypothèses et paramètres importants pour l'étude de ce genre de structure.

L'étude au vent m'a donné un aperçu de l'action de ce dernier sur le réservoir, malgré que dans notre cas l'action du vent n'était pas importante, néanmoins une étude CFD approfondie devrait être faite afin d'avoir des résultats très précis qu'on injectera lors d'une étude structurelle intégrale tout en prenant en considération les chargements dynamiques, l'interaction sol-structure et fluide-structure qui sont exigés par les standards notamment l'ACI 376.

En raison des gradients de température immenses en cas d'incendie ou en cas de rupture du réservoir primaire pour un réservoir à confinement intégral, il est nécessaire de faire une étude thermomécanique non-linéaire afin d'avoir des résultats réalistes et mieux cerner le comportement de la coque en cas de chargements extrêmes.

Enfin, cette étude souligne la nécessité de poursuivre les efforts de recherche et de développement dans le domaine des réservoirs de GNL, en vue d'améliorer continuellement les normes de conception, les techniques d'analyse et les matériaux utilisés. Ce faisant, nous pourrions exploiter de manière plus efficace et durable le potentiel du GNL en tant que source d'énergie propre et polyvalente dans un avenir énergétique en constante évolution.

RÉFÉRENCES

Webographie :

- [1] ExxonMobil. (s.d.). Natural Gas. <https://corporate.exxonmobil.com/en/energy/natural-gas>.
- [2] Skikda LNG New Train. <https://www.kbr.com/en/experience/skikda-lng-new-train>
- [3] Sonatrach Skikda LNG Project. Récupéré de : <https://www.hydrocarbons-technology.com/projects/sonatrach/>
- [4] Office national de la météorologie <https://www.meteo.dz/home>.

Articles de recherche :

- [5] Heymann, M. (2006). Engineers, Markets and Visions: The Turbulent History of Natural-Gas Liquefaction. Piper, Munich.
- [6] Journal of University of Babylon for Engineering Sciences, Vol. (26), No. (6): 2018.
- [7] LNG Journal. (2013). Overview on Import and Export Terminals and LNG Projects. Juillet/Août.
- [8] LNG Journal. (2013). Australia Can Continue LNG Boom with Controls on Cost and Taxes. Juillet/Août, pp. 1–3.

Règlements et standards:

- [9] API 625: Tank Systems for Refrigerated Liquid Gas Storage. 1ère édition, août 2010.
- [10] ACI 376-10: Code Requirements for Design and Construction of Concrete Structures for the Containment of Refrigerated Liquefied Gases and Commentary, édition du 1er janvier 2010.
- [11] API 620 - Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks, février 2002, 10ème édition.
- [12] National Fire Protection Association (NFPA). (2016). NFPA 59A: Standard for the Production, Storage, and Handling of Liquefied Natural Gas (LNG), édition 2016.
- [13] Engineering Equipment & Material Users Association (EEMUA). (1986). Recommendations for the Design and Construction of Refrigerated Liquefied Gas Storage Tanks. Pub. No. 147, 1986.

- [14] EN 14620-1: Design and Manufacture of Site Built, Vertical, Cylindrical, Flat-Bottomed Steel Tanks for the Storage of Refrigerated, Liquefied Gases with Operating Temperatures between 0°C and -165°C – Part 1: General. Beuth Verlag, décembre 2006.
- [15] EN 14620-2: Design and Manufacture of Site Built, Vertical, Cylindrical, Flat-Bottomed Steel Tanks for the Storage of Refrigerated, Liquefied Gases with Operating Temperatures between 0°C and -165°C – Part 2: Metallic components. Beuth Verlag, décembre 2006.
- [16] EN 14620-3: Design and Manufacture of Site Built, Vertical, Cylindrical, Flat-Bottomed Steel Tanks for the Storage of Refrigerated, Liquefied Gases with Operating Temperatures between 0°C and -165°C – Part 3: Concrete components. Beuth Verlag, décembre 2006.
- [17] EN 14620-4: Design and Manufacture of Site Built, Vertical, Cylindrical, Flat-Bottomed Steel Tanks for the Storage of Refrigerated, Liquefied Gases with Operating Temperatures between 0°C and -165°C – Part 4: Insulation components. Beuth Verlag, décembre 2006.
- [18] EN 14620-5: Design and Manufacture of Site Built, Vertical, Cylindrical, Flat-Bottomed Steel Tanks for the Storage of Refrigerated, Liquefied Gases with Operating Temperatures between 0°C and -165°C – Part 5: Testing, drying, purging and cool-down. Beuth Verlag, décembre 2006.
- [19] EN 1992-1-1 Design of concrete structures - Part 1: General rules and rules for buildings
Brussels, Belgique: CEN
- [20] Le Delliou, P. (2003). Béton précontraint aux Eurocodes. Presses Universitaires Lyon.
- [21] prEN 10138-1: Prestressing steels - Part 1: General requirements - septembre 2000.
- [22] prEN 10138-1: Prestressing steels - Part 2: Wire - septembre 2000.
- [23] prEN 10138-1: Prestressing steels - Part 3: Strand - septembre 2000.
- [24] BS 8110: Structural use of concrete - Part 1: Code of practice for design and construction.
Londres, Royaume-Uni, 1985.
- [25] Document technique règlementaire. DTR-C-2-47. Règlement Neige et Vent RNV 2013.
- [26] Document technique règlementaire. DTR B C 2 48. Règles parasismiques Algériennes.
RPA 99 / Ver 2003.