MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
DES UNIVERSITE « Abbés LAGHROUR »DE KHENCHELA
FACULTE SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE

Département de Génie Mécanique

N° de série : …

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Spécialité : Génie Mécanique
Option : Génie des matériaux

Contribution à l'optimisation de la paroi d'une citerne de transport GPL

Réalisé par *: Rebiai Sabrina*

Dirigé par *: Dr. HAMMOUYA Amel*

Membres de jury

Mr Messaoudi I	*M.C.B*	Université Khenchla	Président
Mr Bouali Hicham	*M.A.A*	Université Khenchla	Examinateur

2025 /2026

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu le Tout-Puissant de m'avoir accordé la santé, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à mon encadreur, ***Dr Hammouya****, pour son accompagnement, ses précieux conseils, sa disponibilité et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

J'exprime également ma profonde gratitude aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et de m'enrichir par leurs remarques et recommandations.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des enseignants du Département de Génie Mécanique pour la qualité de la formation qu'ils m'ont dispensée tout au long de mon parcours universitaire.

Enfin, je tiens à remercier ma famille et mes proches pour leur soutien moral, leur confiance et leurs encouragements constants, qui ont constitué une source essentielle de motivation pour l'aboutissement de ce travail.

À toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire, j'adresse mes plus sincères remerciements.

Dédicace

Je dédie ce travail à mes très chers parents, mon père et ma mère, qui ont été, tout au long de mon parcours, une source inestimable de force, de confiance et de persévérance. Qu'Allah les préserve et les récompense pour l'ensemble de leurs sacrifices.

À mes chers frères Moussa et Haroun, pour leur présence bienveillante, leur soutien indéfectible et leur affection constante.

À la femme de mon frère, à qui j'adresse mes sentiments de respect et de profonde gratitude.

À mon adorable neveu Taha Amir, à qui je souhaite une vie empreinte de bonheur, de réussite et d'épanouissement.

À ma chère sœur, arrachée trop tôt à notre affection. Qu'Allah lui accorde Sa miséricorde infinie et l'accueille dans Son vaste paradis. Son souvenir demeure une présence éternelle dans mon cœur.

À ma cousine Nora, pour sa bienveillance, son soutien et sa générosité.

À ma petite Sidra, dont l'innocence et la joie illuminent nos vies.

Enfin, à toutes celles et ceux qui m'ont soutenu(e), encouragé(e) et accompagné(e) de près ou de loin tout au long de ce parcours.

Je dédie ce modeste travail avec une profonde reconnaissance, respect et affection.

Résumé

Dans le contexte de la sécurité des équipements sous pression, les citernes de transport de GPL représentent des structures critiques dont l'intégrité doit être rigoureusement assurée afin d'éviter tout risque de défaillance.
Cette étude porte sur la contribution à l'optimisation de la paroi d'une citerne de transport de GPL afin d'améliorer son comportement mécanique et de réduire les risques de rupture. L'objectif principal est d'identifier les principales causes de défaillance et de proposer une solution d'amélioration des performances structurales de la paroi.
Pour atteindre cet objectif, une méthodologie intégrée a été adoptée. Elle repose sur une analyse des causes racines (RCA) associée au diagramme d'Ishikawa pour l'identification des mécanismes de défaillance, ainsi que sur une modélisation numérique par la méthode des éléments finis (MEF) à l'aide du logiciel ABAQUS pour l'étude du comportement mécanique et l'évaluation de la solution proposée.
Les résultats montrent que la corrosion est la principale cause de défaillance (40 %), suivie de la fatigue (25 %), des chocs mécaniques (20 %), des défauts de fabrication (10 %) et d'autres facteurs (5 %). Les simulations numériques indiquent que l'augmentation de la pression interne entraîne une élévation des contraintes de Von Mises, tandis que l'ajout d'un renforcement en matériau composite permet une réduction significative des contraintes, confirmant l'efficacité de la solution d'optimisation.
Mots-clés : GPL, citerne, RCA, diagramme d'Ishikawa, corrosion, MEF, Abaqus, matériau, optimisation.

Abstract

In the context of pressure equipment safety, LPG transport tanks are critical structures whose integrity must be rigorously ensured to prevent any risk of failure.
This study focuses on the optimization of the wall of an LPG transport tank in order to improve its mechanical behaviour and reduce the risk of rupture. The main objective is to identify the principal causes of failure and to propose a solution for enhancing the structural performance of the tank wall.
To achieve this objective, an integrated methodology was adopted. It is based on Root Cause Analysis (RCA) combined with the Ishikawa diagram for identifying failure mechanisms, as well as numerical modelling using the Finite Element Method (FEM) through ABAQUS software to analyse the mechanical behaviour and evaluate the proposed solution.
The results show that corrosion is the main cause of failure (40%), followed by fatigue (25%), mechanical impacts (20%), manufacturing defects (10%), and other factors (5%). Numerical simulations indicate that increasing internal pressure leads to higher Von Mises stresses, whereas the addition of a composite material reinforcement significantly reduces these stresses, confirming the effectiveness of the proposed optimization solution.

Keywords: LPG, transport tank, RCA, Ishikawa diagram, corrosion, FEM, Abaqus, composite material, optimization.

عربية

في إطار ضمان سلامة المعدات الخاضعة للضغط، تُعد صهاريج نقل غاز البترول المميع (GPL) من المنشآت الحساسة التي تتطلب المحافظة على سلامتها الهيكلية لتفادي مخاطر الفشل والانهيار. تهدف هذه الدراسة إلى المساهمة في تحسين جدار صهريج مخصص لنقل غاز البترول المميع من خلال دراسة سلوكه الميكانيكي واقتراح حل يحد من احتمالات حدوث الفشل ويعزز أداءه الهيكل. ولتحقيق هذا الهدف، تم اعتماد منهجية متكاملة ترتكز على تحليل الأسباب الجذرية (RCA)باستخدام مخطط إيشيكاوا لتحديد أهم آليات الفشل المحتملة، إضافة إلى النمذجة العددية باستعمال طريقة العناصر المحددة (FEM) من خلال برنامج Abaqus لدراسة السلوك الميكانيكي للصهريج وتقييم فعالية الحل المقترح.
أظهرت نتائج التحليل أن التآكل يمثل السبب الرئيسي للفشل بنسبة 40٪، يليه التعب الميكانيكي بنسبة 25٪، ثم الصدمات الميكانيكية بنسبة 20٪، وعيوب التصنيع بنسبة 10٪، بينما تمثل العوامل الأخرى نسبة 5٪. كما بينت نتائج المحاكاة العددية أن زيادة الضغط الداخلي تؤدي إلى ارتفاع إجهادات فون ميزس، في حين يسمح تدعيم الجدار بمادة مركبة بتخفيض هذه الإجهادات بشكل ملحوظ، مما يؤكد فعالية الحل المقترح في تحسين الأداء الميكانيكي للصهريج وزيادة مستوى سلامته التشغيلية.
الكلمات المفتاحية: غاز البترول المميع(GPL) ، صهريج نقل، تحليل الأسباب الجذرية(RCA) ، مخطط إيشيكاوا، التآكل، التعب الميكانيكي، طريقة العناصر المحددة(FEM) ، Abaqus، مادة مركبة، التحسين الهيكلي.

Table des matières

Remerciements ..... **Erreur ! Signet non défini.**I
Dédicace III
Résumé IV
Abstract IVV
عربية V

Introduction générale 1
1. Chapitre 1 : Recherche Bibliographique 3
1.1. Introduction : 3
1.2. Les caractéristiques de GPL : 3
1.2.1. Définition de GPL : 3
1.2.2. Les propriétés physiques et chimiques du GPL 3
1.3. Mode de transport du GPL en Algérie 4
1.3.1. GPL en Algérie 4
1.3.2. Les modes de transport de GPL 5
1.4. Présentation des citernes de transport de GPL : 6
1.4.1. Définition des camions citernes de GPL 6
1.4.2. Types des camions citernes 7
1.4.3. Constitution générale d'un camion-citerne 9
1.5. Paroi de citerne 11
1.5.1. Fonction de la paroi de la citerne 11
1.5.2. Matériaux utilisés pour la paroi de la citerne 12
1.5.3. Exemples des matériaux utilisés 13
1.6. Retour d'expérience et analyse des défaillances des citernes routières GPL 13
1.6.1. Principales causes de défaillance de la paroi 14
1.6.2. Principales conséquences de défaillance de la paroi 15
1.7. Normes et règlements appliqués aux citernes GPL 16

1.7.1. Réglementation Internationale (L'ADR 2023) 16
1.7.2. Normes de Conception Technique 17
1.7.3. Réglementation Nationale (Algérie) 17
1.8. Conclusion 17
Bibliographie du chapitre 1 18
Chapitre 2 : méthodologie de travail 20
2. Chapitre 2 : méthodologie de travail 20
2.1. Introduction 20
2.2. Cas d'étude 20
2.2.1. Description 20
2.2.2. Les accessoires de la citerne : 20
2.3. Les paramètres d'étude 23
2.3.1. Le matériau de construction 23
2.3.2. La géométrie de la structure 23
2.4. Méthodologies de l'étude structurelle 24
2.4.1. Méthodes analytique (Méthode RCA) 25
2.4.2. Méthode numérique 27
2.5. Conclusion 32
2.6. Bibliographie de chapiter 2 33
3. Chapitre 3 : résultats et discussion 34
3.1. Introduction 34
3.2. Application de la méthode RCA 34
3.2.1. Définition du problème 34
3.2.2. Collecte des données et Analyse Statistique 34
3.2.3. Identification des causes racines à l'aide du diagramme d'Ishikawa 36
3.3. Analyse numérique par Abaqus 38
3.3.1. Vérifications 38
3.3.2. Optimisation 44
3.4. Conclusion 51
Conclusion générale 54

Liste des figures

Figure 1.1 : Les pipelines	5
Figure 1.2 : Wagons-citernes	5
Figure 1.3 : Bateaux transport GPL	6

Figure 1.4 : Camion-citerne de GPL	6
Figure 1.5 : Camions-citernes	7
Figure 1.6 : Citernes à paroi simple	7
Figure 1.7 : Citernes à double paroi	8
Figure 1.8 : Composants de la citerne	9
Figure 1.9 : Châssis du camion-citerne	9
Figure 1.10 : Dispositifs de sécurité	10
Figure 1.11 : Réservoir de la citerne	11
Figure 1.12 : Principales causes de défaillance	14
Figure 1.13 : Conséquences dévastatrices de l'explosion BLEVE de Los Alfaques	15
Figure 1.14 : Signalisation Transport ADR	16
Figure 2.1 : Schéma technique détaillé des équipements de sécurité (active et passive)	21
Figure 2.2 : Schéma technique de l'instrumentation de mesure de la citerne	22
Figure 2.3 : Détails techniques du circuit de chargement et des interfaces d'inspection	23
Figure 2.4 : Géométrie générale de la citerne de transport de GPL	24
Figure 2.5 : Schéma de principe du diagramme d'Ishikawa (méthode des 5M)	26
Figure 2.6 : Modélisation d'une structure par la méthode des éléments finis	27
Figure 2.7 : Logiciel Abaqus	28
Figure 2.8 : Représentation de la pièce (Part) sur Abaqus	28
Figure 2.9 : Représentation de la pièce (Propriétés) sur Abaqus	29
Figure 2.10 : Représentation de la pièce (Assemblage) sur Abaqus	29
Figure 2.11 : Représentation de la pièce (Step) sur Abaqus	30
Figure 2.12 : Représentation de la pièce (Load) sur Abaqus	30
Figure 2.13 : Représentation de la pièce (Mesh) sur Abaqus	31
Figure 2.14 : Représentation de la pièce (Job) sur Abaqus	31
Figure 2.15 : Représentation de la pièce (Visualization) sur Abaqus	32
Figure 3.1 : Répartition des facteurs principaux responsables des accidents de citernes GPL	35
Figure 3.2 : Répartition des principales causes de dégradation de la paroi de la citerne	36
Figure 3.3 : Diagramme d'Ishikawa des causes de dégradation de la paroi d'une citerne GPL	37
Figure 3.4 : Géométrie de la citerne saine modélisée sous Abaqus	39
Figure 3.5 : Distribution des contraintes de Von Mises et des déplacements de la citerne saine sous différentes pressions internes	40
Figure 3.6 : Géométrie de la citerne présentant un défaut de corrosion	41
Figure 3.7 : Distribution des contraintes de Von Mises et des déplacements de la citerne corrodée sous différentes pressions internes	43
Figure 3.8 : Géométrie de la citerne corrodée renforcée par une couche de CFRP	44
Figure 3.9 : Assemblage du modèle de la citerne renforcée par CFRP	44
Figure 3.10 : Conditions aux limites et chargement appliquées au modèle renforcé	45
Figure 3.11 : Maillage du modèle CFRP	45

Figure 3.12 : Maillage du modèle (CFRP + acier P355)	46
Figure 3.13 : Distribution des contraintes de Von Mises et des déplacements de la citerne renforcée par CFRP sous différentes pressions internes	47
Figure 3.14: Évolution de la contrainte maximale de Von Mises en fonction de la pression interne pour les trois cas étudiés	48
Figure 3.15 : Évolution du déplacement maximal en fonction de la pression interne pour les trois cas étudiés	48

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Limites d'explosivité (LIE et LSE) du butane et du propane	4
Tableau 1.2 : Propriétés mécaniques de l'acier pour citernes	13
Tableau 2.1 : Fonctions des principaux composants de sécurité de la citerne	20
Tableau 2.2 : Éléments composants de sécurité de la citerne	21
Tableau 2.3 : Caractéristiques et rôles des instruments de mesure	21
Tableau 2.4 : Nomenclature des éléments de tuyauterie et de chargement	22
Tableau 2.5 : Éléments de tuyauterie et de chargement	23
Tableau 2.6 : Propriétés mécaniques et caractéristiques techniques de l'acier P355GH	24
Tableau 3.1 : Répartition statistique des facteurs fréquents des accidents de citernes GPL	34
Tableau 3.2 : Répartition statistique des principales causes de dégradation de la paroi de la citerne	36
Tableau 3.3 : Différents niveaux de pression interne appliqués	38
Tableau 3.4 : Propriétés mécaniques de l'acier P355 utilisées dans la modélisation numérique	39
Tableau 3.5 : Propriétés mécaniques du matériau composite CFRP utilisé pour le renforcement	44
Tableau 3.6 : Résultats des contraintes maximales et des déplacements maximaux pour les trois cas étudiés	47

Introduction générale

L'ingénierie des matériaux joue un rôle essentiel dans le développement industriel moderne, notamment dans les secteurs soumis à des conditions de service sévères tels que l'aéronautique, l'automobile et surtout l'industrie pétrolière et gazière. Elle contribue à améliorer la fiabilité, la sécurité et la durabilité des équipements industriels. L'industrie pétrolière et gazière constitue un secteur stratégique de l'économie mondiale, particulièrement en Algérie, où elle représente une source majeure d'énergie et de revenus. Elle repose non seulement sur l'extraction des hydrocarbures, mais aussi sur leur transport vers les zones de consommation.

Plusieurs modes de transport sont utilisés, notamment les pipelines, les navires, le transport ferroviaire et les camions-citernes. Parmi eux, le camion-citerne est largement utilisé en raison de sa flexibilité et de sa capacité à desservir des zones difficiles d'accès. Ce véhicule est équipé d'une citerne sous pression destinée au transport sécurisé des hydrocarbures et du GPL. La paroi de cette citerne constitue l'élément structural principal, devant résister à diverses sollicitations mécaniques afin de garantir l'intégrité et la sécurité du système.

Malgré les nombreux avantages qu'il présente, le camion-citerne demeure exposé à plusieurs phénomènes susceptibles de compromettre sa sécurité de fonctionnement. Parmi ces phénomènes figurent les variations climatiques, les sollicitations mécaniques répétitives dues aux conditions de circulation, les défauts de fabrication, le vieillissement des matériaux, la corrosion, la fatigue mécanique ainsi que les surpressions internes. Ces dégradations peuvent progressivement affaiblir la paroi de la citerne et conduire à des défaillances critiques pouvant aller jusqu'à la rupture ou à l'explosion.

Les conséquences de telles défaillances sont particulièrement graves puisqu'elles engendrent des pertes humaines, des dommages matériels importants ainsi que des impacts environnementaux considérables. Plusieurs accidents survenus à travers le monde illustrent l'ampleur de ces risques.

À titre d'exemple, l'accident de Skikda en Algérie en janvier 2004 a provoqué la mort de 27 personnes et causé d'importants dégâts matériels. En Espagne, l'accident de Los Alfaques en 1978, impliquant un camion transportant du propylène liquéfié, a entraîné plus de 200 décès et plusieurs centaines de blessés. De même, au Pakistan en 2017, l'explosion d'un camion-citerne transportant du carburant près de Baha Wal pur a causé plus de 150 morts et de nombreux blessés. Ces événements démontrent la nécessité de comprendre les mécanismes de dégradation pouvant conduire à la défaillance des citernes de transport.

Face à ces constats, la problématique de ce travail porte sur l'intégrité des citernes de transport de GPL et s'articule autour des questions suivantes :

- Quelle est la principale cause de défaillance de la paroi d'une citerne de transport de GPL ?
- Quels sont les mécanismes de dégradation les plus critiques ?

- Dans quelle mesure l'amélioration des caractéristiques de la paroi ou l'utilisation de matériaux plus performants peut-elle réduire les risques de rupture ?

Afin de répondre à ces questions, ce travail a pour objectif d'identifier les principales causes de défaillance des citernes de transport de GPL, d'analyser leur influence sur l'intégrité structurale de la paroi, et de proposer des solutions d'amélioration permettant d'augmenter la sécurité ainsi que la durée de vie de ces équipements.

Pour atteindre ces objectifs, une méthodologie combinant des approches qualitatives et numériques a été adoptée. Dans un premier temps, une analyse des causes racines (Root Cause Analysis 'RCA') a été réalisée. Cette démarche s'est appuyée sur des études documentaires, des analyses statistiques ainsi que des séances de brainstorming permettant d'identifier l'ensemble des facteurs susceptibles de conduire à la rupture de la citerne. L'utilisation du diagramme d'Ishikawa a permis de structurer et de classer ces causes selon différentes catégories afin de mettre en évidence les mécanismes les plus influents.

Dans un second temps, une étude numérique par la Méthode des Éléments Finis (MEF) a été réalisée à l'aide du logiciel Abaqus. Ce logiciel est largement utilisé dans le domaine de l'ingénierie pour l'analyse et la simulation du comportement mécanique des structures soumises à différentes sollicitations. Grâce à ses capacités de modélisation et de calcul, il permet d'évaluer l'influence des défauts sur l'intégrité structurale des équipements industriels.

Trois cas sont étudiés : une citerne saine, une citerne corrodée, et une citerne corrodée renforcée par un matériau composite.

Ce mémoire est organisé en plusieurs parties, comprenant une introduction générale, trois chapitres complémentaires et une conclusion. Dans le but d'apporter une contribution scientifique, il est structuré en deux grandes parties.

La première partie, consacrée à l'apport scientifique, est composée de deux chapitres. Le premier chapitre présente un état de l'art sur les camion-citerne, en mettant en évidence les différentes causes de dégradation ainsi que leurs conséquences sur le système. Le deuxième chapitre aborde les méthodes et les moyens utilisés dans ce travail.

La deuxième partie de ce mémoire est dédiée à l'étude pratique et est présentée dans le troisième chapitre, où sont exposés les résultats de ce travail.

Chapitre 1 : Recherche Bibliographique

Chapitre 1 : Recherche Bibliographique

1.1. Introduction :

L'utilisation du gaz de pétrole liquéfié (GPL) s'est largement développée en raison de sa facilité de stockage et de transport. Initialement distribué en bouteilles dès les années 1930, son usage s'est considérablement étendu avec le développement du stockage en citernes à partir des années 1960. Aujourd'hui, le GPL est largement utilisé aussi bien dans le secteur industriel que domestique, notamment grâce à ses avantages énergétiques et à ses émissions relativement faibles en polluants par rapport à d'autres combustibles fossiles.

Dans ce chapitre, nous présentons dans un premier temps les caractéristiques générales du GPL ainsi que ses modes de transport. Ensuite, nous abordons les citernes de transport du GPL, en mettant l'accent sur leurs modes de défaillance.

1.2. Les caractéristiques de GPL :

1.2.1. Définition de GPL :

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) est un mélange d'hydrocarbures légers appartenant principalement à la famille des alcanes, constitué essentiellement de propane (C_3H_8) et de butane (C_4H_{10}). Ces composés sont formés uniquement d'atomes de carbone (C) et d'hydrogène (H). À température ambiante et pression atmosphérique, le GPL se présente à l'état gazeux ; toutefois, il peut être facilement liquéfié sous des pressions relativement faibles, généralement comprises entre 4 et 18 bars, ce qui facilite son stockage et son transport (REDJIL 2026).

La composition du GPL peut varier selon les normes et les conditions d'exploitation. En plus du propane et du butane, il peut contenir de faibles quantités d'autres hydrocarbures tels que le propylène, le butène, ainsi que des traces de méthane, d'éthylène ou de pentane.(Choukha and Taki Eddine Refis 2021)

1.2.2. Les propriétés physiques et chimiques du GPL

1.2.2.1. Propriétés physiques du GPL

Le GPL possède plusieurs propriétés physiques importantes (KHA Ouiam, 2022):

• **Couleur** : Le GPL est un gaz incolore, aussi bien à l'état liquide qu'à l'état gazeux.

• **Odeur** : À l'état naturel, le GPL est inodore. Pour des raisons de sécurité, un composé odorant appelé mercaptan est ajouté afin de faciliter la détection des fuites.

• **Masse volumique** : À l'état gazeux, le GPL est plus lourd que l'air, ce qui favorise son accumulation dans les zones basses en cas de fuite. À l'état liquide, sa densité reste inférieure à celle de l'eau.

• **Fluidité** : Le GPL possède une grande fluidité, ce qui facilite son écoulement dans les canalisations et les systèmes de transport.

• **Température d'ébullition** : La température d'ébullition du propane est d'environ −42 °C, tandis que celle du butane est proche de 0 °C.

• **Pouvoir calorifique** : Le GPL possède un pouvoir calorifique élevé, ce qui en fait une source d'énergie très efficace pour les applications industrielles et domestiques.

1.2.2.2. Propriétés chimiques du GPL

Le GPL possède également plusieurs propriétés chimiques liées à sa composition et à son comportement lors des réactions chimiques.

• **Composition chimique :** Le GPL appartient à la famille des hydrocarbures saturés, constitués uniquement d'atomes de carbone et d'hydrogène. Le propane possède la formule chimique C_3H_8, tandis que le butane possède la formule C_4H_{10}.

• **Combustion :** La combustion du GPL avec l'oxygène de l'air produit du dioxyde de carbone (CO_2), de la vapeur d'eau (H_2O) et une grande quantité de chaleur.

• **Combustion incomplète :** Lorsque l'oxygène est insuffisant, la combustion peut être incomplète et produire du monoxyde de carbone (CO), un gaz toxique.

• **Inflammabilité** : Le GPL est un gaz hautement inflammable pouvant former des mélanges explosifs au contact de l'air(KHA Ouiam 2022)..

• **Limites d'explosivité** : Le GPL devient inflammable lorsque sa concentration dans l'air se situe entre deux limites appelées :

– Limite Inférieure d'Explosivité (LIE)

– Limite Supérieure d'Explosivité (LSE) (Hammouya 2021)

Tableau 1.1 : Les Limites d'explosivité (LIE et LES) du butane et propane.

Gaz	LIE	LES
Butane	1.8 %	8.4 %
Propane	2.1 %	9.5 %

1.3. Mode de transport du GPL en Algérie

1.3.1. GPL en Algérie

En Algérie, la production de GPL provient principalement des gisements pétroliers, représentant environ 79 % de la production totale, issue du traitement du pétrole brut et du gaz associé. Une partie de la production provient également des raffineries, notamment celles de Skikda et d'Arzew.

La production nationale repose sur deux axes principaux :

- Le développement des gisements gaziers, notamment dans la région de Hassi R'Mel,
- L'extension des unités de traitement et de récupération du GPL dans plusieurs sites, tels que Hassi Messaoud, Hassi Berkine, Adrar et d'autres zones du sud algérien.

Cette production importante nécessite un réseau de transport efficace pour assurer la distribution du GPL à l'échelle nationale (Yousfi Alla Eddine 2019).

1.3.2. Les modes de transport de GPL

Le transport de GPL est classé selon les différents modes suivants :

1.3.2.1. Le transport par pipelines (canalisations) :

Cette méthode est employée lorsqu'il s'agit de déplacer de grandes quantités de GPL depuis leur point de récupération vers des unités de séparation ou vers des installations de stockage importantes. Ce mode de transport est également choisi pour le transport de GPL sur de longues distances, offrant un coût plus réduit(HAMMOUYA et al. 2025).



Figure 1.1 : Les pipelines (Tissot, Bernard 2010)

1.3.2.2. Transport par wagons-citernes :

Pour des volumes plus modestes, le transport ferroviaire est recommandé. Dans cette configuration, le train est composé de plusieurs wagons-citernes, chacun ayant une capacité de 50 tonnes. Ces wagons sont pressurisés et fabriqués selon des normes strictement contrôlées. Ce mode est principalement utilisé pour acheminer des GPL des raffineries vers des stockages primaires, ou bien des stockages primaires vers des stockages secondaires(Mr.AMRANI Rabah 2011; REDJIL 2026).



Figure 1. 2 : wagons-citernes (Mr. AMRANI Rabah, 2011)

1.3.2.3. Le transport par bateaux (transport maritime) :

Cette méthode est couramment utilisée pour le commerce international. Dans cette approche, les GPL sont conservés dans des réservoirs réfrigérés (descendant jusqu'à -50°) ou sont maintenus sous pression.



Figure 1. 3 : bateaux transport GPL (Mr. AMRANI Rabah, 2011)

Le transport par camions-citernes :

C'est la méthode la plus courante pour le transport de petites quantités de GPL sur de courtes distances, allant des centres de stockage vers les consommateurs.(Mr. AMRANI Rabah, 2011)



Figure 1.4 : camion-citerne de GPL (Mr. AMRANI Rabah, 2011)

1.4. Présentation des citernes de transport de GPL :

1.4.1. Définition des camions citernes de GPL

Les camions-citernes de GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) sont des véhicules spécialisés destinés au transport de gaz liquéfiés sous pression, tels que le propane, le butane ou leurs mélanges. Ils sont équipés de réservoirs cylindriques conçus pour résister aux pressions internes et aux sollicitations mécaniques liées aux conditions de transport.

Ces citernes, généralement fabriquées en acier à haute résistance, sont solidement fixées au châssis du véhicule afin d'assurer la sécurité et la stabilité lors du transport entre les centres de production, de stockage et les points de distribution.

Pour garantir un niveau élevé de sécurité, ces équipements sont conçus conformément aux réglementations relatives au transport des matières dangereuses (notamment l'ADR, classe 2). Ils intègrent plusieurs dispositifs de sécurité, tels que des soupapes de décharge, des vannes de contrôle et des indicateurs de niveau, permettant de maîtriser la pression interne et de prévenir les risques d'accident (IMEDOURENE & Ouahioune., 2021).

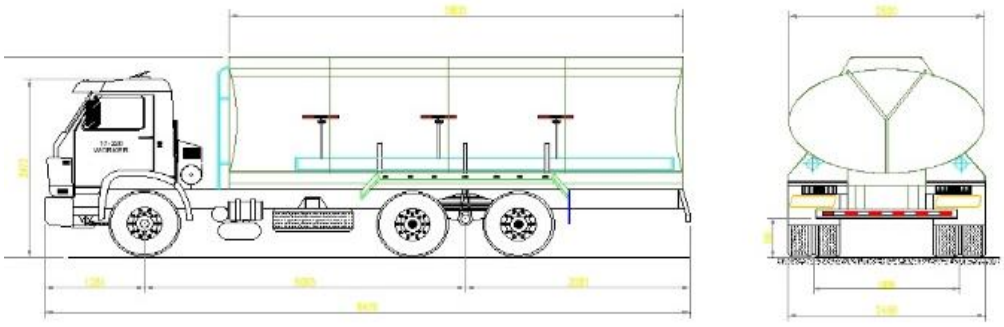


Figure 1.5 : camions-citernes (BENACHOUR ABDERRAHMANE and AID MOHAMED 2023)

1.4.2. Types des camions citernes

Les citernes se distinguent selon plusieurs critères, notamment la configuration de la paroi et les conditions de température de service.

1.4.2.1. Selon le type des parois

- **Citernes à Paroi Simple :**

Ces citernes sont constituées d'une seule enveloppe métallique assurant à la fois l'étanchéité et la résistance mécanique face à la pression interne.

Du point de vue métallurgique, la paroi doit présenter :

- Une résistance mécanique élevée,
- Une bonne ténacité,
- Une aptitude au soudage.

Ce type de citerne est largement utilisé en raison de sa simplicité de conception et de son coût réduit…

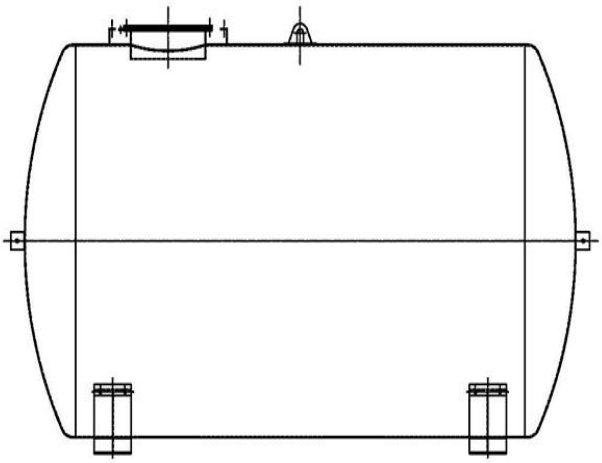


Figure 1.6 Citernes à Paroi Simple (lapesa 2022)

- **Citernes à Double Paroi :**

Les citernes à double paroi sont composées d'un réservoir interne contenant le GPL et d'une enveloppe externe jouant un rôle de protection.

Elles présentent plusieurs avantages :

- Sécurité accrue : l'espace entre les deux parois permet la détection des fuites et offre une protection supplémentaire en cas de choc.
- Protection mécanique : la paroi externe absorbe une partie de l'énergie d'impact.
- Isolation thermique : réduction des échanges thermiques avec l'environnement extérieur.

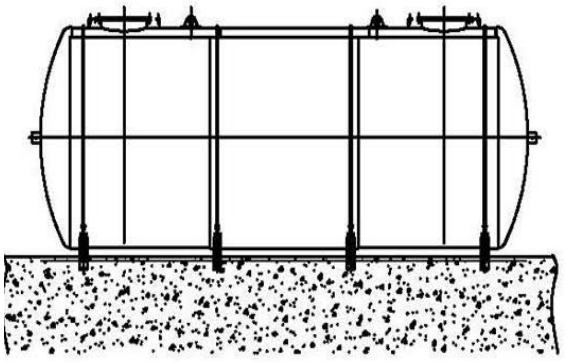


Figure 1.7 Citernes à Double Paroi (lapesa , 2022)

1.4.2.2. Selon les conditions de température

La température de service influence directement la conception structurelle de la paroi du camion-citerne. Selon les exigences thermiques du produit transporté (GPL ou autres), on distingue :

- **Citernes non-calorifugées (Température ambiante) :**

Ce sont les citernes les plus utilisées pour le transport du GPL. Elles ne possèdent pas d'isolation thermique. La température du liquide dépend des conditions climatiques

extérieures. La paroi doit être conçue en acier à haute limite élastique (type P355) pour supporter les variations de pression liées aux changements de température ambiante.

- **Citernes calorifugées (Isothermes) :**

Ces citernes sont équipées d'une enveloppe isolante (laine de roche ou mousse de polyuréthane) recouverte d'une jaquette de protection. L'objectif est de maintenir le produit à une température stable, soit pour éviter qu'il ne se refroidisse (ex : bitume chaud), soit pour limiter son réchauffement par le soleil (ex : gaz liquéfiés réfrigérés).

- **Citernes cryogéniques (Très basses températures) :**

Elles sont destinées au transport de gaz à des températures extrêmement basses (inférieures à 150°C). Elles utilisent une structure à double paroi avec un vide d'air entre elles pour assurer une isolation thermique maximale et garantir la sécurité structurelle face au froid extrême (lapesa, 2022).

1.4.3. Constitution générale d'un camion-citerne

La structure générale d'un camion-citerne destiné au transport des liquides ou des gaz est composée de plusieurs éléments mécaniques et dispositifs de sécurité assurant le bon fonctionnement du système et la sécurité durant le transport. Ces éléments peuvent être divisés en trois catégories principales : les composants de la citerne, les composants du camion et les dispositifs de sécurité.

A. Composants de la citerne

Les principaux composants de la citerne sont :

- La cuve (citerne) : réservoir métallique destiné au stockage et au transport du produit.
- Le manhole ou manlid : ouverture supérieure permettant l'inspection, le nettoyage et la maintenance.
- Les adaptateurs API : raccords utilisés pour connecter la citerne aux systèmes de chargement et de déchargement.



Figure 1.8 composants de la citerne (Réalisation personnelle (par IA)

B. Composants du camion

Le camion comprend plusieurs éléments mécaniques assurant le déplacement et le fonctionnement du système :

- Le châssis : structure supportant la citerne et les équipements.

- Le moteur : assure la propulsion du véhicule.
- Le système de freinage : garantit le contrôle et la sécurité du déplacement.
- Les systèmes de commande pneumatique : dispositifs utilisant l'air comprimé pour commander les vannes et les équipements.

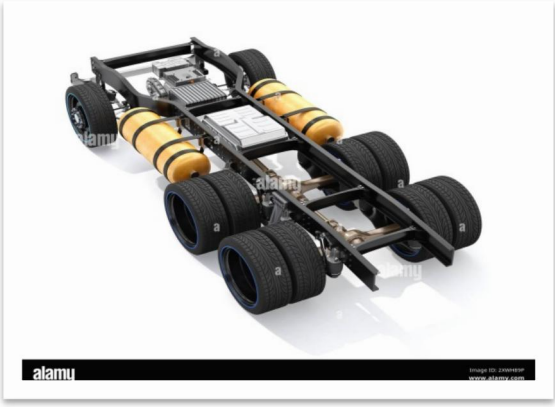


Figure 1.9 :Le châssis du camion-citerne (Tahar, Zakaria, and Mechri 2026)

C. Dispositifs de sécurité

Les dispositifs de sécurité permettent de prévenir les accidents et d'assurer la protection du système :

- Les vannes d'urgence (Emergency Valves) : arrêt rapide de l'écoulement du produit en cas d'urgence.
- Le système de récupération des vapeurs (Vapour Recovery System) : réduction des émissions de vapeurs durant le chargement et le déchargement.
- Les évents ou soupapes de ventilation (Vents) : équilibrage de la pression à l'intérieur de la citerne.
- Les capteurs de surremplissage (Overfill Sensors) : détection du niveau maximal de remplissage afin d'éviter le débordement.(Corken 2005)

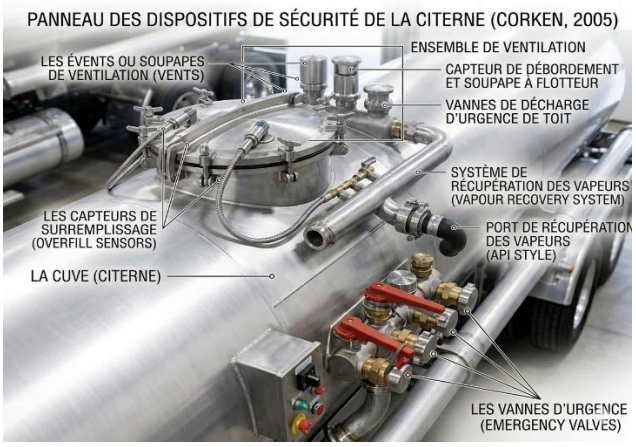


Figure 1.10 dispositifs de sécurité (Réalisation personnelle (par IA)

1.5. Paroi de citerne

La paroi de la citerne constitue l'enveloppe métallique du réservoir contenant le fluide sous pression. Elle assure le confinement du GPL en toute sécurité tout en résistant aux sollicitations mécaniques et thermiques liées aux conditions de transport.

Du point de vue métallurgique et structural, la paroi représente l'élément critique de la citerne. Sa conception, ainsi que le choix des matériaux, doivent répondre aux exigences des normes internationales afin de garantir la sécurité, la durabilité et la fiabilité en service (OMAR NOUI 2020).



Figure 1.11 : réservoir de la citerne (BENACHOUR ABDERRAHMANE and AID MOHAMED 2023)

1.5.1. Fonction de la paroi de la citerne

1.5.1.1. Sollicitations mécaniques de la paroi de la citerne

La paroi de la citerne est soumise, durant son fonctionnement et son transport, à diverses sollicitations mécaniques qui influencent directement sa sécurité et sa durabilité. En effet, le GPL étant stocké sous pression, il génère des contraintes circonférentielles et longitudinales dans la paroi.

Par ailleurs, lors du transport, la citerne subit des vibrations continues et des chocs intermittents liés aux conditions routières, aux phases d'accélération et de freinage, ce qui impose à la structure de résister à des sollicitations dynamiques répétées.

De plus, le mouvement du fluide à l'intérieur du réservoir, notamment les phénomènes de ballottement, entraîne une répartition variable des charges sur la paroi. Ainsi, la conception de cette dernière doit intégrer l'ensemble de ces effets combinés afin d'assurer la stabilité structurelle du réservoir et de prévenir tout risque de défaillance mécanique (Ozan Hikmet Arıcan and Ali Umut Ünal 2025).

1.5.1.2. Rôle structural de la paroi de la citerne

La paroi de la citerne constitue l'élément principal assurant le confinement du GPL sous pression. Sa fonction générale est de garantir l'intégrité structurelle du réservoir en résistant

aux sollicitations mécaniques, thermiques et dynamiques rencontrées durant le transport et l'exploitation.

Elle doit notamment :

- Assurer l'étanchéité du système,
- Supporter la pression interne du fluide,
- Résister aux charges externes (vibrations, chocs),
- Maintenir la stabilité géométrique de la citerne,
- Prévenir les phénomènes de défaillance tels que la fissuration ou la rupture. (Benachour abderrahmane & aid mohamed, 2023).

1.5.2. Matériaux utilisés pour la paroi de la citerne

La conception de la paroi des citernes GPL repose sur l'utilisation d'aciers alliés présentant une résistance mécanique élevée ainsi qu'une bonne ductilité. Les matériaux choisis doivent garantir la résistance aux pressions internes et assurer la sécurité en service.

Le choix des matériaux utilisés dans la fabrication des citernes GPL repose sur plusieurs critères techniques et mécaniques permettant d'assurer la sécurité, la durabilité et la résistance de la structure dans des conditions de service sévères.

- **Critère de sécurité**

Le rapport Re/RM doit rester inférieur à 0,85 afin de garantir une déformation plastique avant rupture et d'éviter les ruptures fragiles.

- **Propriétés mécaniques principales**

Les matériaux utilisés pour la paroi des citernes doivent posséder plusieurs propriétés mécaniques importantes, notamment la résistance mécanique, la ductilité, la ténacité et la résistance à la corrosion.

- *La résistance mécanique* représente la capacité du matériau à supporter les charges et les contraintes sans se rompre. Par exemple, les aciers à grains fins tels que le P355NL1 ou le P460NH, conformément à la norme EN 10028-3, sont largement utilisés pour ce type d'application.
- *La ductilité correspond* à l'aptitude du matériau à se déformer avant rupture, ce qui permet d'éviter une défaillance soudaine. Un taux d'allongement après rupture supérieur à 22 % est généralement exigé pour les tôles de virole.
- *La ténacité* désigne la capacité du matériau à absorber l'énergie des chocs sans fissuration. Une résilience minimale de 27 Joules lors de l'essai Charpy est souvent requise afin d'assurer un bon comportement aux basses températures.
- *La résistance à la corrosion* constitue également une propriété essentielle pour garantir la durabilité du réservoir face aux environnements agressifs et aux fluides transportés. Cette protection peut être assurée par l'application de revêtements externes de type époxy/polyuréthane ou par l'utilisation d'aciers inoxydables pour certains composants comme la robinetterie. (Yousfi Alla Eddine, 2019)

1.5.3. Exemples des matériaux utilisés

A. Acier au carbone-manganèse (P355 NL1 / NL2)

L'acier P355 NL1/NL2 constitue l'un des matériaux de référence utilisés dans la fabrication des réservoirs sous pression grâce à ses bonnes propriétés mécaniques et sa résistance aux basses températures. La désignation P355 correspond à un acier destiné aux appareils à pression présentant une limite d'élasticité minimale de 355 MPa.

Cet acier possède une structure à grains fins, ce qui améliore sa ténacité ainsi que sa soudabilité. Sa composition chimique est principalement caractérisée par une teneur en carbone inférieure ou égale à 0,18 % et une teneur en manganèse comprise entre 0,90 % et 1,65 %. Cette composition assure une excellente aptitude au soudage ainsi qu'une bonne résistance mécanique, ce qui le rend particulièrement adapté aux conditions de service sévères des citernes et réservoirs sous pression.(Yousfi Alla Eddine 2019)

Tableau 1.2 : Propriétés mécaniques de l'acier pour citernes

Propriétés mécaniques	Limite d'élasticité MPa	Résistance à la traction MPa	Allongement	Résilience (essai Charpy) (NL1)	Résilience (essai Charpy) (NL2)
Valeur	≥355	= 490 à 630	≥ 22 %	≥ 27 J à -40 °C	≥ 27 J à -50 °C

B. Acier à haute limite d'élasticité (HLE) – S460 QL

Les aciers à haute limite d'élasticité (HLE), tels que le S460 QL, sont utilisés dans une approche d'optimisation structurelle afin de réduire la masse des structures tout en conservant une résistance mécanique élevée. La lettre « S » désigne un acier de construction, tandis que le nombre 460 correspond à une limite d'élasticité minimale de 460 MPa.

Cet acier bénéficie d'un traitement thermique de trempe et revenu (Quenched and Tempered), ce qui améliore ses performances mécaniques, sa ténacité ainsi que sa résistance aux contraintes. Grâce à ces caractéristiques, il est possible de réduire l'épaisseur des parois et de diminuer la masse totale de la citerne tout en maintenant une bonne résistance à la pression et aux sollicitations mécaniques.(Yousfi Alla Eddine 2019)

1.6. Retour d'expérience et analyse des défaillances des citernes routières GPL

L'analyse des retours d'expérience issus d'accidents réels constitue une étape essentielle pour comprendre les mécanismes de défaillance des citernes de transport de GPL.

À titre d'exemple, on peut citer l'accident survenu en janvier 2024 à Aïn Defla, où le renversement d'un camion-citerne transportant du GPL sur l'autoroute Est-Ouest a provoqué un incendie important. Cet événement met en évidence les risques associés à l'instabilité des véhicules et souligne l'importance de la conception mécanique de la paroi pour limiter les fuites en situation accidentelle.

1.6.1. Principales causes de défaillance de la paroi

La défaillance de la paroi d'une citerne GPL résulte généralement de la combinaison de facteurs mécaniques, environnementaux et opérationnels.

1.6.1.1. Collisions et impacts mécaniques

Les collisions avec d'autres véhicules ou obstacles fixes génèrent des ondes de choc massives. Ces impacts provoquent souvent des déformations plastiques instantanées qui dépassent la limite élastique (Re) du matériau. Lorsque l'énergie d'impact excède la ténacité du matériau, une rupture brutale de la paroi peut se produire, conduisant à une perte d'étanchéité.

1.6.1.2. Renversement de l'ensemble routier

Le renversement lors d'un accident induit des forces d'écrasement et de flambement sur les viroles du réservoir. Le déplacement brusque de la cargaison liquide (effet de ballant) crée des pics de pression hydrostatique localisés. Ces contraintes extrêmes peuvent provoquer la déchirure des soudures de raccordement ou la perforation de la paroi par contact direct avec le sol ou des structures tranchantes.

1.6.1.3. Erreurs humaines et facteurs opérationnels

Les erreurs humaines, telles qu'une vitesse excessive ou le non-respect des procédures de sécurité, peuvent générer des sollicitations non prévues lors de la conception. De plus, une mauvaise gestion des opérations de remplissage peut entraîner une surpression interne dépassant les limites admissibles, augmentant ainsi le risque de défaillance structurale(Hammouya and Chaib 2020).

1.6.1.4. Dégradation des infrastructures routières

Les défauts de la chaussée (irrégularités, nids-de-poule) génèrent des vibrations répétées, conduisant à des phénomènes de fatigue mécanique. Ces sollicitations cycliques favorisent l'initiation et la propagation de fissures, notamment dans les zones sensibles comme les zones affectées thermiquement (ZAT) au voisinage des soudures.

1.6.1.5. Défaillances techniques et corrosion

L'intégrité de la paroi est gravement compromise par les phénomènes de corrosion (interne ou externe) et d'usure érosive. La corrosion réduit localement l'épaisseur nominale (e) de l'acier, créant des concentrateurs de contraintes. Une épaisseur insuffisante ne permet plus de contenir la pression interne, ce qui mène inévitablement à des fuites ou à un éclatement structurel si la maintenance préventive fait défaut (Le Floch, R. and Mahé, P.J. 2022).

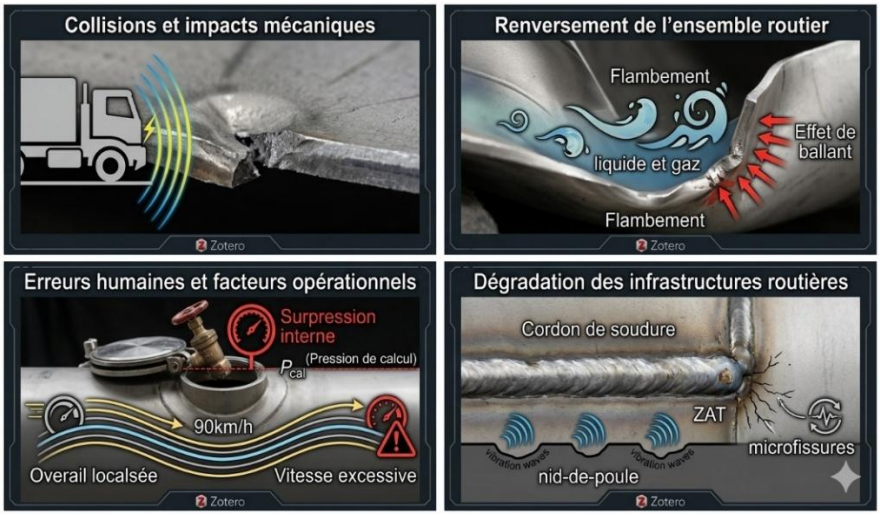


Figure 1.12 : Principales causes [Réalisation personnelle (par IA)]

1.6.2. Principales conséquences de défaillance de la paroi

La rupture ou la défaillance de la paroi d'une citerne transportant du GPL peut entraîner des conséquences graves sur la sécurité des personnes, des installations et de l'environnement. Ces événements sont généralement associés à des phénomènes dangereux tels que les incendies ou les explosions.

Les principales conséquences peuvent être :

- Fuite massive du GPL ou du carburant due à la rupture de la paroi.
- Formation d'un nuage inflammable susceptible de s'enflammer en présence d'une source d'ignition.
- Incendie après fuite du produit inflammable.
- Explosion du type BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) résultant de l'élévation de la pression et de la température.
- Dommages matériels et pertes humaines importantes causés par les effets thermiques et les ondes de choc.
- Environnement : Les fuites ou accidents liés aux citernes GPL peuvent entraîner une pollution de l'air et affecter l'écosystème, y compris les plantes et les animaux. Ces effets peuvent dégrader la qualité de l'environnement et représenter un danger pour les zones avoisinantes.(Le Floch, R. and Mahé, P.J. 2022)



Figure 1.13 : Conséquences dévastatrices de l'explosion (BLEVE) de Los Alfaques (1978).

L'image suivante illustre une étude de cas réelle illustrant les conséquences d'une défaillance structurelle. En 1978, un camion-citerne transportant du propylène liquéfié a explosé en Espagne devant un camping bondé (Catastrophe de Los Alfaques).

L'analyse technique a révélé que l'accident a été causé par une défaillance structurelle de la paroi de la citerne. Ce défaut n'était pas dû à un impact externe, mais à un sur remplissage (taux de remplissage excessif) combiné à l'absence de soupapes de sécurité. Cela a provoqué une augmentation drastique de la pression interne sous l'effet de la chaleur extérieure, dépassant la résistance mécanique de la paroi et entraînant une explosion de type BLEVE.

1.7. Normes et règlements appliqués aux citernes GPL

L'application des normes et des réglementations aux citernes de transport de GPL constitue une exigence fondamentale pour garantir la sécurité, l'intégrité structurale et la fiabilité en service. Ces référentiels définissent les règles de conception, de fabrication, de contrôle et d'exploitation des équipements sous pression.

1.7.1. Réglementation Internationale (L'ADR 2023)

L'accord ADR répond au besoin critique de sécuriser le transport routier des matières dangereuses à l'échelle mondiale. Il définit :

- La Section 6.8.2.1 : Les exigences de construction, notamment l'épaisseur minimale de la paroi pour résister aux pressions de service et aux chocs.
- Le Chapitre 9.2 : Les critères de conformité du véhicule (châssis et réservoir) pour prévenir les risques d'incendie ou d'explosion.(Commission Économique pour l'Europe (UNECE). 2023)

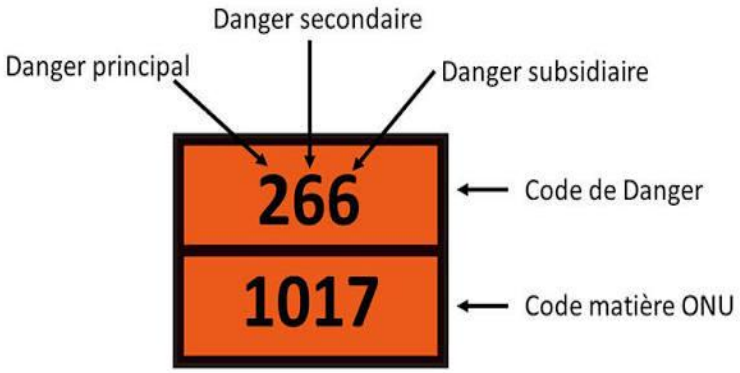


Figure1.14 : Signalisation Transport ADR [(United nation 2023) **]**

La signalisation des unités de transport routier de marchandises dangereuses est régie par l'accord européen ADR. Elle repose sur l'utilisation de plaques orangées réfléchissantes (Figure 1.14) qui permettent une identification rapide et univoque des dangers.

A. Le Numéro d'Identification du Danger (Code de Danger)

Situé dans la partie supérieure de la plaque, ce code (généralement de 2 ou 3 chiffres) indique la nature des risques :

- *Le premier chiffre* représente le danger principal (Ex : 2 pour les gaz, 3 pour les liquides inflammables).
- *Les chiffres suivants* indiquent les dangers subsidiaires (Ex : 6 pour la toxicité, 3 pour l'inflammabilité).
- *Le redoublement d'un chiffre* (comme le 66 dans l'exemple) signale une intensification du risque correspondant (matière très toxique).
- *La lettre "X"* placée devant le code (ex : X423) indique que la matière réagit de manière dangereuse avec l'eau.

B. Le Numéro ONU (Code Matière)

Situé dans la partie inférieure, ce numéro à quatre chiffres est attribué par l'Organisation des Nations Unies. Il identifie précisément la substance chimique transportée.

Exemple du schéma : Le code 1017 correspond au Chlore, un gaz hautement toxique et oxydant.

1.7.2. Normes de Conception Technique

Ces normes répondent au besoin de standardisation des calculs mécaniques :

- EN 12493 : Spécifique aux équipements GPL, elle définit les critères de conception, les méthodes de calcul ainsi que les essais de pression.
- EN 14025 : Relative aux réservoirs métalliques sous pression, elle fixe les exigences de conception visant à prévenir les défaillances structurelles.
- EN 13445 : Concerne la conception des réservoirs sous pression non soumis à la flamme.(Commission Économique pour l'Europe (UNECE). 2023)

1.7.3. Réglementation Nationale (Algérie)

En Algérie, le besoin de lois nationales permet d'encadrer le secteur via (Hammouya 2021):

- Le Décret exécutif n° 03-452 : Qui fixe les conditions de transport des matières dangereuses.
- Loi n° 05-07 relative aux hydrocarbures : Encadre les activités liées à l'exploration, la production, le transport et la distribution des hydrocarbures, y compris le GPL.

1.8. Conclusion

Ce chapitre a présenté les éléments essentiels liés aux citernes de transport du GPL, en mettant l'accent sur la paroi et les contraintes auxquelles elle est soumise, ce qui permet de mieux comprendre son comportement en service.

Sur cette base, le chapitre suivant est consacré à la méthodologie adoptée pour son étude et son optimisation.

Bibliographie du chapitre 1

Abdi, Mohamed and Azzouzi, Lotfi Ahmed. 2019. “Analyse de l’effet de l’humidité Sur Le Comportement En Rupture Des Pipelines Réparés Par Patch En Composite.” Université d’Oran 2 (Ahmed Ben Ahmed).

Autar K. Kaw. 2005. *Mechanics of Composite Materials*. 2nd Edition. Boca Raton.

BENACHOUR ABDERRAHMANE and AID MOHAMED. 2023. “ÉTUDE ET CONCEPTION D’UNE CITERNE SUR CAMION DE TRANSPORT DE GPL.”

Berdji, Mohamed El Bachir and Gheribi, Noureddine. 2019. “Modélisation d’une Structure En Matériaux Isotropes Par La Méthode Des Éléments Finis.” Université Kasdi Merbah Ouargla.

Bouleftour, Abderrahmane. 2014. “Evaluation d’éléments Finis Volumiques Dans ABAQUS Sur Des Cas Tests Non Linéaires Géométriques.” Université Mohamed Khider – Biskra.

Bounouala, Nada and Mezaghchia, Amel. 2021. “La Faisabilité Du Polycarbonate Comme Un Nouveau Matériau Pour La Bouteille Du Gaz GPL.” Université Badji Mokhtar - Annaba.

Choukha, Abd El Mounaim, and Taki Eddine Refis Taki Eddine Refis. 2021. “GPL, DEFINITIONS, GESTION ET PREVENTIONS.” Memoire de master. UNIVERSITE Mostefa Ben Boulaïd – Batna 2.

Comagine Health. 2020. “Root Cause Analysis Process.”

Commission Économique pour l’Europe (UNECE). 2023. “ADR 2023 : Accord Relatif Au Transport International Des Marchandises Dangereuses Par Route.”

Corken. 2005. “LPG Accessories Sales Catalog(LPG600A).”

DJAARIRI, Ala, and Ouail BAKHOUCHE. 2024. “Analyse Du Comportement Mécanique Des Matériaux Composites.” memoire de master. ABBES LAGHROUR university.

Ewbank, Clifton, Shailvi Gupta, Barclay T. Stewart, Adam L. Kushner, and Anthony Charles. 2019. “A Systematic Review of Oil Tanker Truck Disasters: Identifying Prevention Targets.” *Burns* 45(4): 905–13.

Green Gas oil. “LBG Basic Principales and Practices.”

Green Gas oil. “LPG.”

Hammouya, Amel. 2021. “Contribution à l’amélioration Des Barrières de Sécurité Dans Un Système Industriel.” badji mokhtar annaba university.

Hammouya, Amel, and Rachid Chaib. 2020. “Human Factor: A Key Element in A Fire Safety System Of Hydrocarbon Storage Tank.” In *2020 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, IEEE, 1–10. doi:10.1109/ISCV49265.2020.9204292.

HAMMOUYA, Amel, Ali REDJIL, Wafia BENHAMLAOUI, and Rachid CHAIB. 2025. “Advanced Engineering Approach to Analyse Pipeline Failure Consequences.” In turkie.

IMEDOURENE, Salah Eddine, and Hakim. Ouahioune . 2021. “Etude et Conception d’une Citerne GPL/c 10 M3.”

Infraspeak. “Root Cause Analysis Tools: A Complete Guide.”

KHA Ouiam. 2022. “Production Du GPL/Unité de GLA-Haoud Berkaoui : Contraintes et Résolutions.”

lapesa. 2022.

Le Floch, R., P. J. Mahé, and P. Perrot. 2022. “Catastrophes Liées À Une Explosion De Camionciterne Entre 2000 Et 2020. Deux Groupes Distincts.” *Annals of Burns and Fire Disasters* 35(1): 3.

Le Floch, R. and Mahé, P.J. 2022. “Catastrophes Liées à Une Explosion de Camion-Citerne Entre 2000 et 2020. Deux Groupes Distincts.”

Mr.AMRANI Rabah, Nabil. 2011. “Transport Du Gaz de Pétrole Liquéfié Par Pipeline Application Au Projet « Skikda – Berrahal ».”

Okes, Duke. 2019. *Root Cause Analysis: The Core of Problem Solving and Corrective Action*. Quality Press. https://books.google.com/books?hl=ar&lr=&id=remPDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT6&dq=Root+Cause+Analysis+definition+thesis&ots=mBxe4Pi9ha&sig=KGwbuGu65ZSS8KGfEAvG1CO7HC4 (April 15, 2026).

OMAR NOUI. 2020. “DÉVELOPPEMENT D’UN MODÈLE DYNAMIQUE 3D POUR LA CONCEPTION DES CITERNES TRANSPORTANT DES LIQUIDES.” UNIVERSITÉ DU QUÉBEC.

Ozan Hikmet Arıcan and Ali Umut Ünal. 2025. “Risk Assessment in LPG and LNG Operation Processes in Maritime Transport: Delphi and Fault Tree Analysis Approach.”

REDJIL, Ali. 2026. “Data-Driven Condition-Based Maintenance for LNG Transport Systems via Pipeline.” ABBES LAGHROUR university.

Seshu, P. 2012. “Textbook of Finite Element Analysis.”

Sid Ali, Mahdi and Belgomri, Abderrahmane. 2020. “Contribution à l’optimisation de La Paroi d’une Citerne de Transport de GPL.”

SRAOUI, Oussama, and Ayoub AGDI. 2024. “Contributions à l’analyse des principales défaillances D’un système industriel (ventilateur industriel).” memoire de master. ABBES LAGHROUR university.

Tahar, LEDMI, MIMOUNE Zakaria, and Ala Eddine Mechri. 2026. “Failure Analysis of Road Tanker Transportation.” memoire. ABBES LAGHROUR university.

Tissot, Bernard. 2010. “Transport Des Hydrocarbures Par Canalisations.”

United nation. 2023. “Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR).”

Yousfi Alla Eddine, Chakri Mohamed Zine. 2019. “Procédé et Caractérisation Du GPL Au Niveau Du Champ MLE (Hassi Messaoud).”

Chapitre 2 : méthodologie de travail

Chapitre 2 : méthodologie de travail

2.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude technique et à l'analyse d'une citerne routière exploitée par l'entreprise nationale NAFTAL, leader dans la distribution des produits pétroliers en Algérie. Le choix de ce cas d'étude nous permet d'analyser une structure soumise à des conditions d'exploitation réelles sur le territoire national. Nous présentons d'abord les caractéristiques générales de la citerne de transport de GPL, suivies des propriétés du matériau et des paramètres géométriques. Enfin, nous introduisons les approches d'analyse adoptées pour évaluer le comportement mécanique et la sécurité de cette paroi sous pression.

2.2. Cas d'étude

2.2.1. Description

Dans le secteur énergétique algérien, la société nationale NAFTAL détient le monopole de la distribution du Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL). Pour assurer cette mission, elle exploite une flotte importante de camions-citernes conformes aux normes de sécurité internationales et aux réglementations nationales. Les citernes routières utilisées sont des réservoirs à pression, généralement de forme cylindrique horizontale, conçus pour supporter des contraintes mécaniques et thermiques élevées. La conception de ces structures doit garantir une étanchéité parfaite et une résistance optimale aux phénomènes de ballottement du liquide lors du transport. L'exploitation par NAFTAL impose un suivi rigoureux de la maintenance et des contrôles périodiques pour prévenir tout risque industriel ou environnemental lié à la nature inflammable du produit (Bounouala, Nada and Mezaghchia, Amel 2021)

2.2.2. Les accessoires de la citerne :

Pour garantir une exploitation sécurisée et efficace du camion-citerne GPL, le réservoir est équipé d'un ensemble d'accessoires technologiques. Ces éléments ne sont pas de simples ajouts, mais des organes vitaux qui permettent de contrôler l'état du produit, d'assurer la protection de la structure et de faciliter les opérations de transfert. Afin de mieux comprendre leur rôle, nous pouvons classer ces équipements en trois catégories principales :

2.2.2.1. Les composants de sécurité

Cette catégorie regroupe les dispositifs essentiels pour protéger la citerne contre les risques de surpression et les accidents. Le tableau 2.1 et la figure 2.1 présentent ces composants ainsi que leurs fonctions.

Tableau 2.1 : Fonctions des principaux composants de sécurité de la citerne (BENACHOUR ABDERRAHMANE and AID MOHAMED 2023; lapesa 2022)

Accessoire	Rôle
Soupapes (Sécurité/Vide)	Empêchent l'éclatement ou l'écrasement de la paroi.
Soupape PSV	Libère le surplus de pression en cas de dépassement du seuil.

Accessoire	Rôle
Arrêt d'urgence	Coupe instantanément le flux de gaz en cas d'accident.
Interlock	Bloque le pompage si la sécurité (ex : mise à la terre) n'est pas assurée.
Arrêt-flammes	Bloque le passage d'une flamme vers l'intérieur du réservoir.

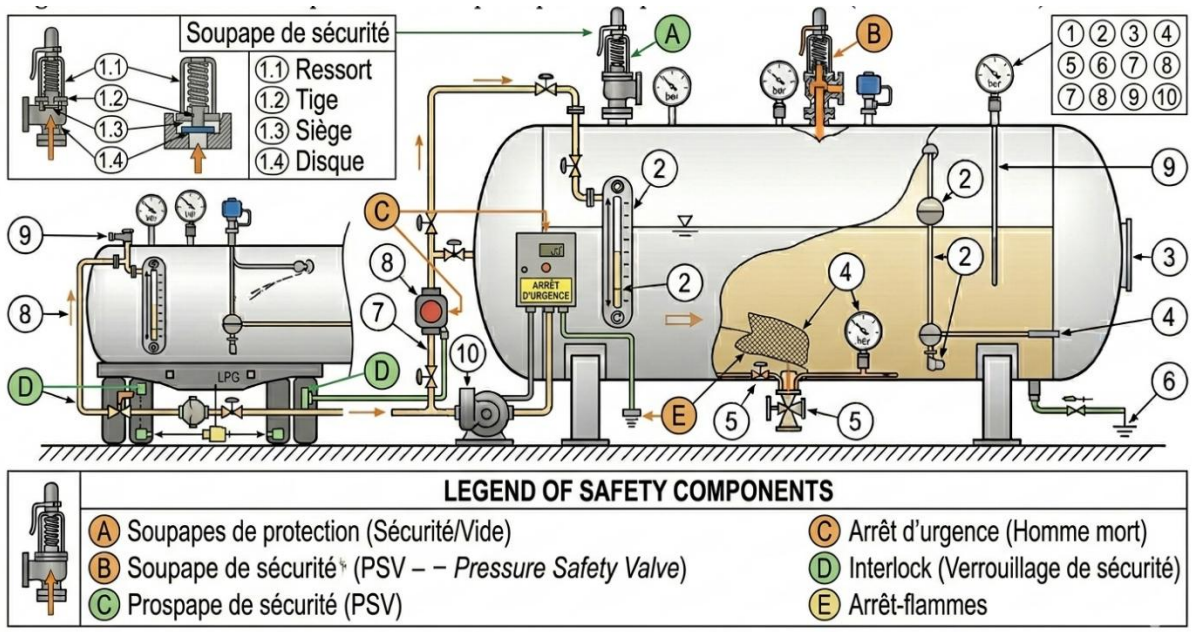


Figure 2.1 : Schéma technique détaillé des équipements de sécurité (Active et Passive).

Tableau 2.2 : Des élément composants de sécurité de la citerne

N°	Élément
1	Soupape de de sécurité
2	Indicateur / jauge de niveau du GPL
3	Trou d'homme (manhole) ou bride d'accès du réservoir
4	Phase liquide du GPL stocké dans le réservoir
5	Vannes d'isolement et de vidange
6	Mise à la terre (système de mise à la masse)
7	Bouton d'arrêt d'urgence
8	Débitmètre
9	Ligne d'équilibrage /évent
10	Pompe

2.2.2.2. L'instrumentation de mesure

L'instrumentation de mesure joue un rôle clé dans la surveillance en temps réel des conditions internes de la citerne. Le tableau 2. 3 et la figure 2.2 détaillent ces instruments ainsi que leurs rôles respectifs.

Tableau 2.3 : Caractéristiques et rôles des instruments de mesure.(lapesa 2022)

Accessoire	Rôle
Jauge de niveau	Indique le niveau de remplissage pour éviter le sur-remplissage (souvent couplée à une alarme de haut niveau).
Manomètre / Capteur de pression	Surveille la pression à l'intérieur de la citerne.
Thermomètre / Sonde de température	Important pour les produits sensibles à la température.

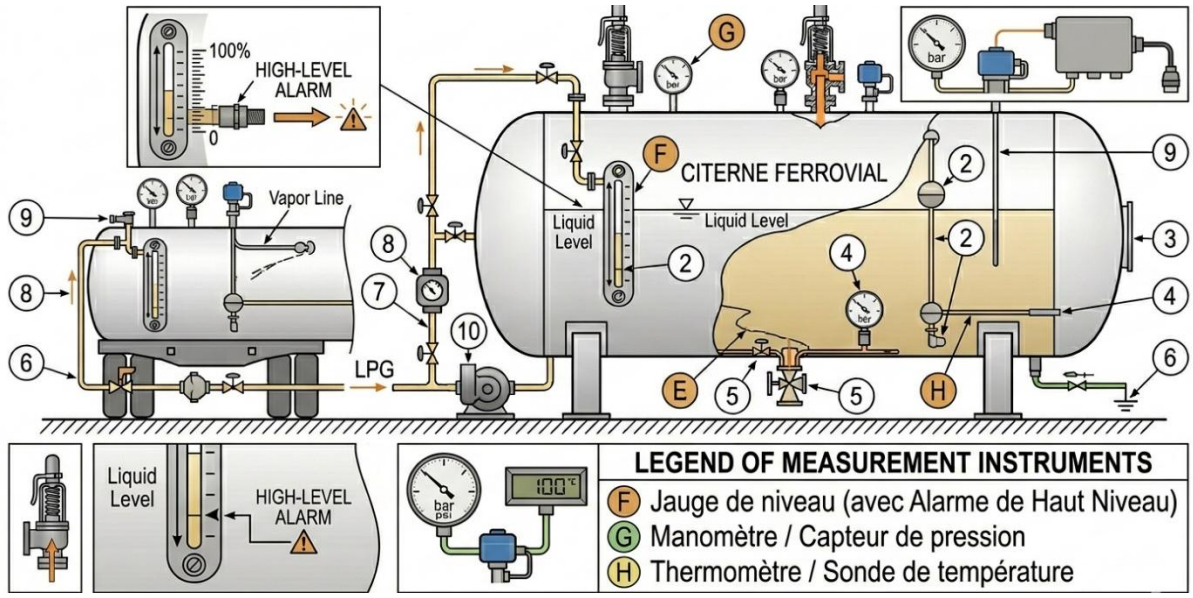


Figure 2.2 : Schéma technique de l'instrumentation de mesure de la citerne

2.2.2.3. Les éléments de tuyauterie et de chargement

Cette section décrit les composants structurels nécessaires au fonctionnement opérationnel de la citerne. Le tableau 2.3 et la figure 2.3 récapitulent ces éléments et leurs fonctions dans le circuit de transfert.

Tableau 2.4 : Nomenclature des éléments de tuyauterie et de chargement (BENACHOUR ABDERRAHMANE and AID MOHAMED 2023)

Accessoire	Rôle
Trou d'homme	Ouverture de diamètre DN500 pour l'inspection et la maintenance interne.
Vannes de fond / Vannes de sécurité	Vannes de sécurité situées au point bas pour la vidange totale du GPL.
Armoire de distribution	Compartiment regroupant les vannes, les raccords et les instruments de contrôle.

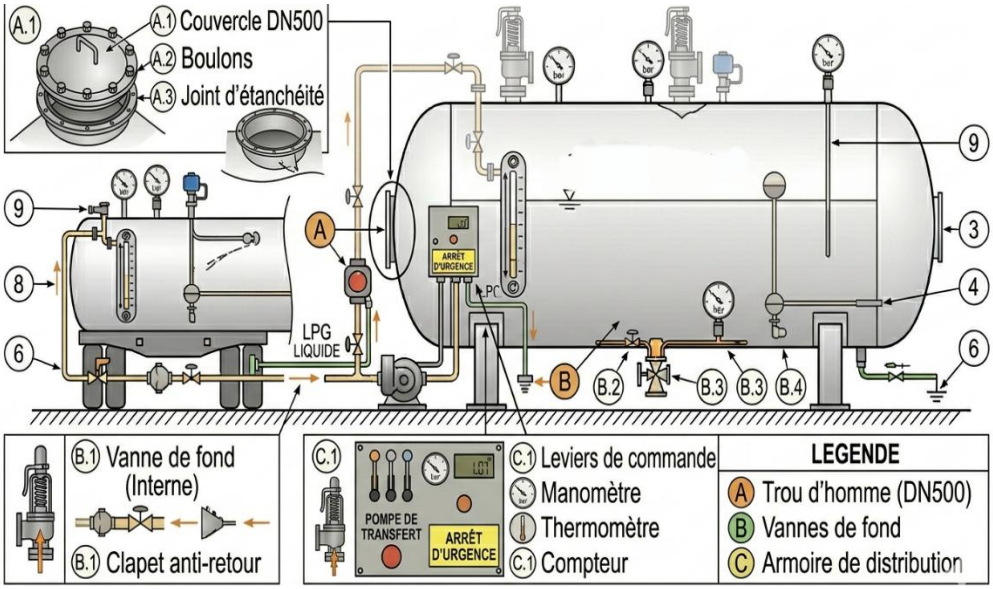


Figure 2.3 : Détails techniques du circuit de chargement et des interfaces d'inspection.

2.3. Les paramètres d'étude

2.3.1. Le matériau de construction

Le choix du matériau utilisé pour la fabrication de la citerne est un élément essentiel pour garantir la sécurité lors du transport du GPL. La citerne étudiée est réalisée en acier au carbone, adapté aux équipements soumis à des pressions élevées (Green Gas oil n.d.).
Le matériau utilisé est l'acier P355GH. Il s'agit d'un acier à grains fins, conforme aux normes européennes (EN 10028), reconnu pour sa bonne résistance mécanique et sa capacité à supporter des contraintes importantes tout en gardant une bonne ductilité (Green Gas oil n.d.).

Tableau 2.4 : Propriétés mécaniques et caractéristiques techniques de l'acier P355GH.(Green Gas oil n.d.)

Propriété Technique	Valeur / Description
Résistance mécanique	Limite d'élasticité de 355 MPa.
Le module de Young	Environ 210 000 MPa (Assure la rigidité).
Le coefficient de Poisson	0.3 (Stabilité de la structure).
Soudabilité	Excellente (Acier facilement soudable).
Ténacité	Bonne résistance à la rupture fragile (même à basse température).

2.3.2. La géométrie de la structure

La conception géométrique de la citerne est réalisée selon des dimensions standardisées permettant d'optimiser la capacité de transport tout en respectant les contraintes de sécurité routière. Pour notre cas d'étude chez NAFTAL, la structure suit les paramètres géométriques suivants :

- **Forme et dimensions :** Cylindrique horizontale.
- **Diamètre extérieur (D) :** 2 550 mm (paramètre standard pour les citernes de grande capacité).
- **Longueur totale (L) :** 11 500 mm.

- **Épaisseur de la paroi (e) :** 12 mm (déterminée pour résister à la pression de service).
- **Fonds bombés :** Le réservoir est fermé par deux fonds elliptiques conformes aux codes de calcul (ASME/EN), assurant une transition douce des contraintes aux extrémités.
- **Compartimentage interne (brise-lames) :** La géométrie intègre des cloisons transversales perforées. Ces éléments sont cruciaux pour réduire l'impact dynamique du liquide (ballottement) sur les parois lors du freinage ou des virages.
- **Éléments de visite :** Un trou d'homme (manhole) de diamètre DN500 est positionné pour permettre l'inspection interne de la structure (lapesa 2022).

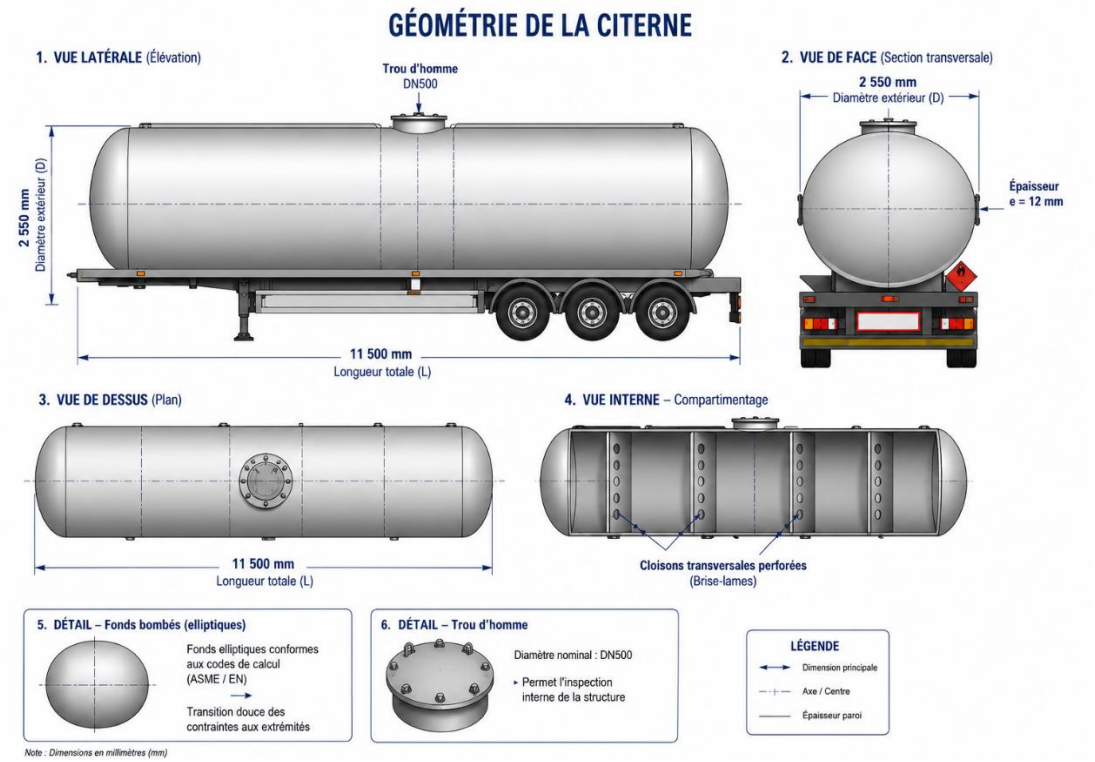


Figure 2. 4: Géométrie générale de la citerne de transport de GPL

2.4. Méthodologies de l'étude structurelle

L'étude de l'optimisation de la citerne GPL repose sur une démarche scientifique qui combine la vérification mécanique. Cette méthodologie nous permet de passer d'une compréhension théorique des défaillances à une validation numérique rigoureuse. Pour ce faire, deux méthodes fondamentales sont adoptées :

- **L'approche qualitative (RCA) :** Elle consiste à identifier les sources potentielles de défaillances et à analyser les causes racines des problèmes structurels. C'est une étape essentielle pour orienter les choix de conception.
- **L'approche numérique (FEA) :** Elle s'appuie sur la simulation par ordinateur pour calculer les contraintes et les déformations de la structure sous l'effet de la pression. C'est l'outil principal pour valider l'intégrité de la citerne.

Ces deux approches seront détaillées dans les sections suivantes afin d'expliquer comment elles contribuent à l'optimisation finale de notre structure.

Afin de traduire cette approche théorique en étapes concrètes, nous avons synthétisé notre démarche dans l'organigramme suivant. Ce processus illustre le cheminement allant de l'analyse des risques jusqu'à la validation par simulation.

2.4.1. Méthodes analytique (Méthode RCA)

La méthode RCA (Root Cause Analysis) est une approche d'analyse systématique utilisée pour identifier les causes profondes d'un problème ou d'une défaillance. Elle consiste à définir précisément le problème, analyser les relations de cause à effet et déterminer l'origine réelle du dysfonctionnement afin d'éviter sa réapparition.
Contrairement aux analyses superficielles, la méthode RCA s'appuie sur une démarche structurée basée sur des données et des preuves, permettant de remonter aux causes fondamentales plutôt que de se limiter aux symptômes visibles.(Okes 2019)

2.4.1.1. Objectifs de la méthode RCA

La méthode RCA a pour objectif principal d'identifier les causes profondes des défaillances afin de corriger les erreurs à leur origine. Elle permet également d'améliorer la fiabilité des systèmes, de réduire les risques et de mettre en place des actions préventives pour éviter la répétition des problèmes.(Okes 2019)

2.4.1.2. Les étapes de l'Analyse des Causes Racines (RCA)

- **Définition du problème :** Identifier précisément l'événement (l'accident) et déterminer l'élément technique à corriger.
- **Collecte des données :** Rassembler toutes les preuves (rapports, photos, maintenance) et établir la chronologie des faits.
- **Identification des causes racines :** Analyser les conditions ayant permis la défaillance pour atteindre la source réelle du problème (ex : défaut de conception).
- **Élaboration du plan d'action :** Concevoir des stratégies correctives axées sur l'amélioration du système technique plutôt que sur l'erreur humaine.
- **Mise en œuvre et suivi :** Appliquer les solutions recommandées et évaluer leur efficacité pour prévenir toute récurrence.(Comagine Health 2020)

2.4.1.3. Les principaux outils de la RCA

L'analyse des causes racines (RCA) s'appuie sur un ensemble d'outils méthodologiques permettant d'identifier les causes profondes d'un problème. Ainsi, on distingue les outils suivants :

a) Diagramme d'Ishikawa (5M) :

Outil d'analyse causale permettant de structurer et de classifier les causes potentielles d'un problème en catégories (Méthode, Main-d'œuvre, Matière, Machine, Milieu) afin d'identifier les origines des défaillances.

b) Méthode des 5 Pourquoi (5 Why) :

Technique d'investigation consistant à poser successivement la question « pourquoi ? » pour remonter de l'effet observé à la cause racine du problème.

c) Arbre de Défaillances (FTA) :

Méthode déductive et logique utilisant des portes booléennes pour modéliser les combinaisons d'événements conduisant à une défaillance ou un accident.

d) AMDEC (FMEA) :

Outil d'analyse préventive visant à identifier, évaluer et hiérarchiser les modes de défaillance d'un système selon leur criticité (gravité, occurrence, détection).

e) Analyse des données (courbe ABC):

Processus d'exploitation et d'interprétation des données techniques et expérimentales afin de détecter les tendances, anomalies et points critiques du système.(Infraspeak. n.d.)

2.4.1.4. Diagramme d'Ishikawa

Le diagramme d'Ishikawa, également appelé diagramme de causes à effet ou "arête de poisson", est un outil de gestion de la qualité utilisé pour identifier ىclasser l'ensemble des causes potentielles menant à un effet précis (comme la défaillance d'une paroi). Il permet de structurer la réflexion en analysant cinq dimensions principales (les 5M) : Matière, Matériel, Méthode, Main-d'œuvre et Milieu.(Sid Ali, Mahdi and Belgomri, Abderrahmane 2020)

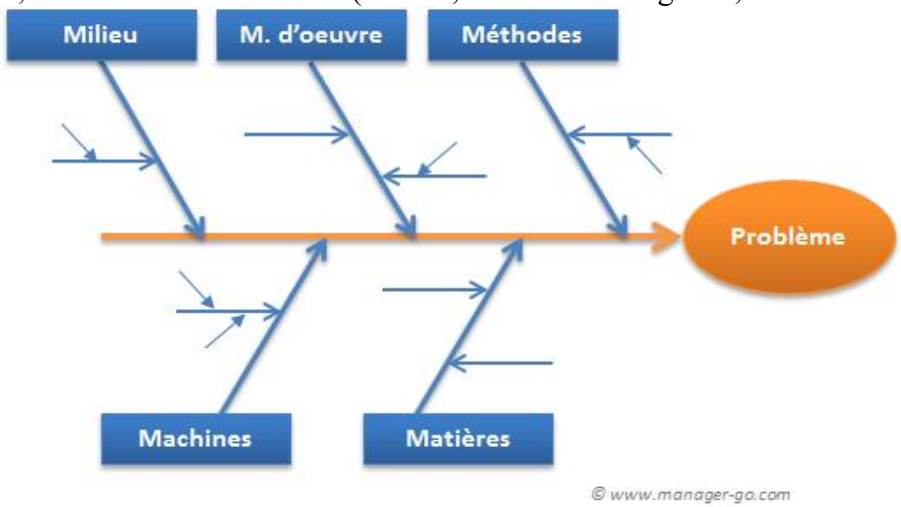


Figure 2.5 Schéma de principe du diagramme d'Ishikawa (méthode des 5M) : (Sid Ali, Mahdi and Belgomri, Abderrahmane 2020)

Objectif du Diagramme d'Ishikawa

L'objectif principal est de lister, classer et hiérarchiser les facteurs d'influence afin de remonter à la cause racine d'un problème. Dans le cadre d'une expertise technique, il sert à visualiser les interactions entre les contraintes physiques ex :(fatigue du métal) et les facteurs externes pour prévenir la récurrence des accidents.(Sid Ali, Mahdi and Belgomri, Abderrahmane 2020)

Principe du diagramme d'Ishikawa

Le diagramme d'Ishikawa, également appelé diagramme causes-effets ou diagramme en arêtes de poisson, est un outil d'analyse permettant d'identifier, de structurer et de visualiser l'ensemble des causes potentielles liées à un problème donné.

Son principe repose sur l'identification d'un effet ou d'un problème principal, placé à la tête du diagramme, puis sur la recherche des différentes causes susceptibles de l'engendrer. Ces causes sont généralement regroupées en plusieurs catégories afin de faciliter l'analyse et de mettre en évidence les facteurs les plus influents.

Dans cette étude, le diagramme d'Ishikawa a été utilisé pour analyser les causes possibles des défauts observés et identifier les paramètres ayant un impact significatif sur le comportement de la structure étudiée.(Sid Ali, Mahdi and Belgomri, Abderrahmane 2020)

Les 5M du Diagramme d'Ishikawa

- **Main-d'œuvre :** Se rapporte à l'équipe, aux compétences, aux savoir-faire et aux interventions humaines liées à l'événement.
- **Matières :** Désigne les matières premières (acier, gaz GPL) ainsi que leur niveau de qualité et leurs propriétés physiques.
- **Matériel :** Concerne les équipements, les machines, les outils et les moyens techniques requis pour le fonctionnement du système.
- **Méthodes :** Fait référence à l'organisation du travail, aux procédures de sécurité (normes ADR), aux processus et aux techniques utilisées.
- **Milieu :** Concerne l'environnement de travail, les conditions climatiques, l'état des routes (autoroute) et le contexte extérieur (SRAOUI and AGDI 2024).

2.4.2. Méthode numérique

2.4.2.1. Méthode des Éléments Finis (MEF) :

La Méthode des Éléments Finis (MEF) est une technique numérique largement utilisée en ingénierie pour résoudre des équations aux dérivées partielles décrivant des systèmes physiques complexes. Elle permet de transformer un domaine continu en un modèle discret afin d'en faciliter la résolution numérique

Cette méthode repose sur la discrétisation du domaine étudié en sous-domaines appelés « éléments », reliés entre eux par des « nœuds ». Le problème global est ainsi converti en un système d'équations algébriques permettant d'évaluer avec précision les contraintes, déformations et comportements mécaniques des structures soumises à différentes sollicitations.

Dans le domaine de la mécanique des structures, la MEF est particulièrement adaptée à l'analyse des composants critiques, notamment les réservoirs sous pression GPL, pour lesquels elle permet de prédire efficacement la réponse structurelle (Seshu, P. 2012).

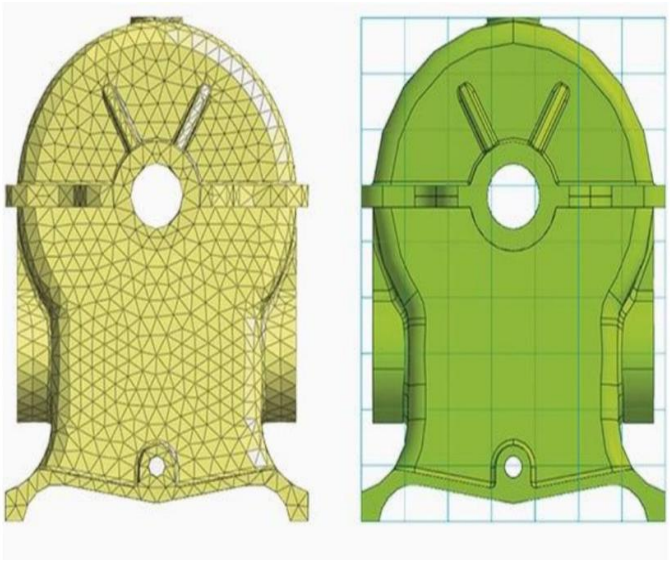


Figure 2.6 : Modélisation d'une structure par la méthode des éléments finis(Seshu, P. 2012)

2.4.2.2. Présentation du Logiciel Abaqus

Abaqus est une suite logicielle d'ingénierie assistée par ordinateur de premier plan, basée sur la Méthode des Éléments Finis (FEM). Il est conçu pour la simulation réaliste de problèmes physiques complexes, couvrant une vaste gamme d'applications allant des analyses linéaires de routine aux simulations non linéaires les plus avancées. Le logiciel se distingue par son architecture modulaire intégrée dans l'environnement Abaqus/CAE, qui permet la création de modèles, la soumission des calculs et la visualisation des résultats. (Berdji, Mohamed El Bachir and Gheribi, Noureddine 2019; DJAARIRI and BAKHOUCHE 2024)

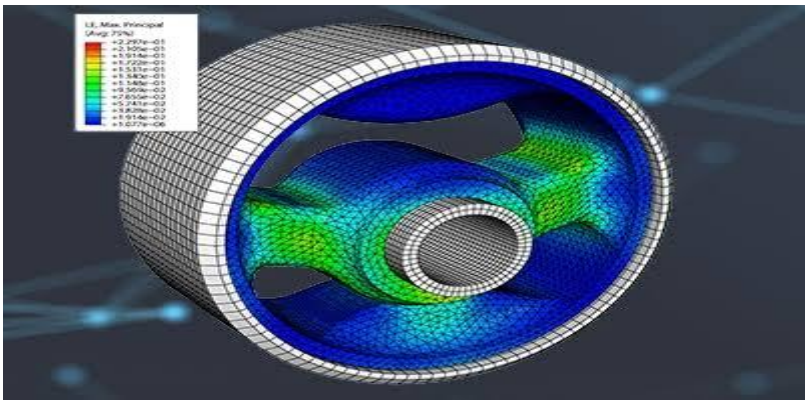


Figure 2.7 : Logiciel Abaqus(Berdji, Mohamed El Bachir and Gheribi, Noureddine 2019)

2.4.2.3. Procédure de simulation avec ABAQUS

La mise en œuvre d'une simulation numérique sous Abaqus suit un flux de travail structuré, articulé autour de l'interface Abaqus/CAE, qui permet de transformer un problème physique en un modèle mathématique résolu par la méthode des éléments finis. Ce processus se divise généralement en trois étapes fondamentales (REDJIL 2026) :

Le Pré-traitement (Pre-processing) :

Cette phase consiste à définir l'ensemble des données du problème dans l'environnement Abaqus/CAE. Elle inclut :

- PART : Création ou importation de pièces (Parts) en 2D ou 3D. (Bouleftour, Abderrahmane 2014)

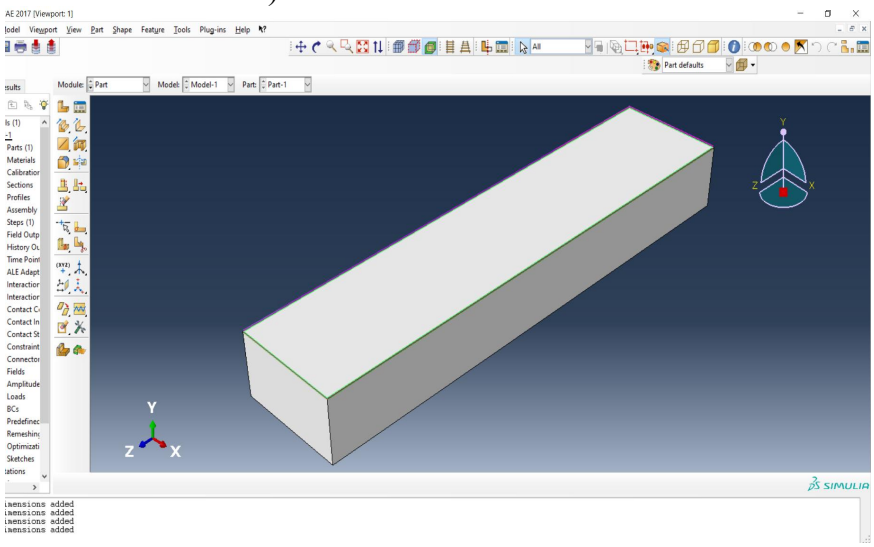


Figure 2.8 Représentation de la pièce (Part) sur Abaqus

- La définition des propriétés matérielles : Attribution des comportements élastiques, plastiques ou thermiques aux sections. (Bouleftour, Abderrahmane 2014)

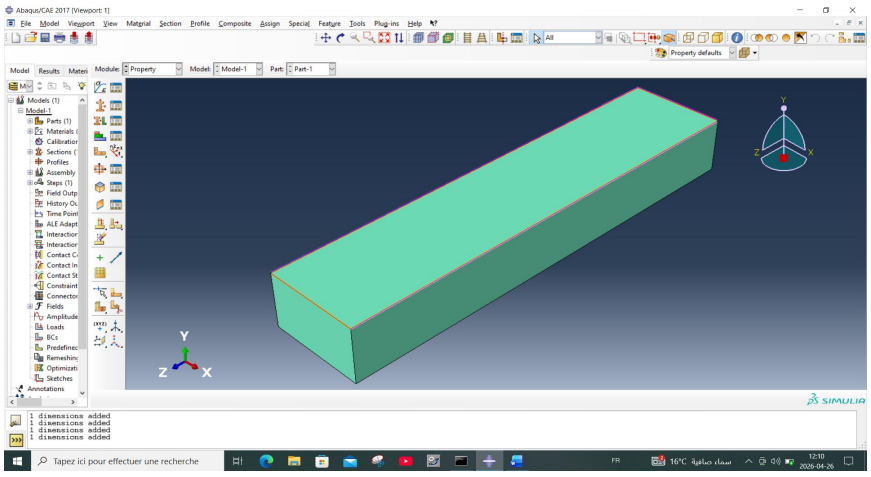


Figure 2.9 Représentation de la pièce (propriétés) sur Abaqus

- L'assemblage : Positionnement des différentes instances dans un repère global. (Bouleftour, Abderrahmane 2014)

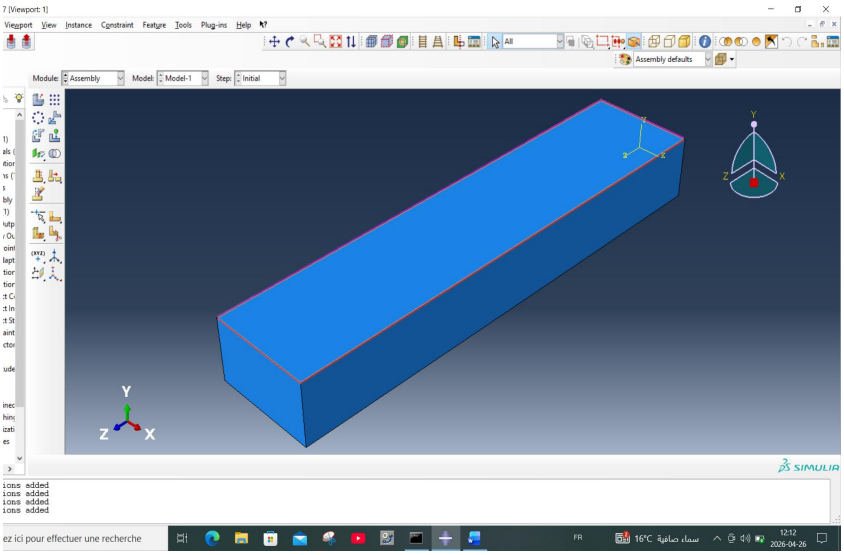


Figure 2.10 Représentation de la pièce (L'assemblage) sur Abaqus

- La définition des étapes (Step) : Configuration des types d'analyses (statique, dynamique, linéaire ou non linéaire) et des sorties de données souhaitées. (Bouleftour, Abderrahmane 2014)

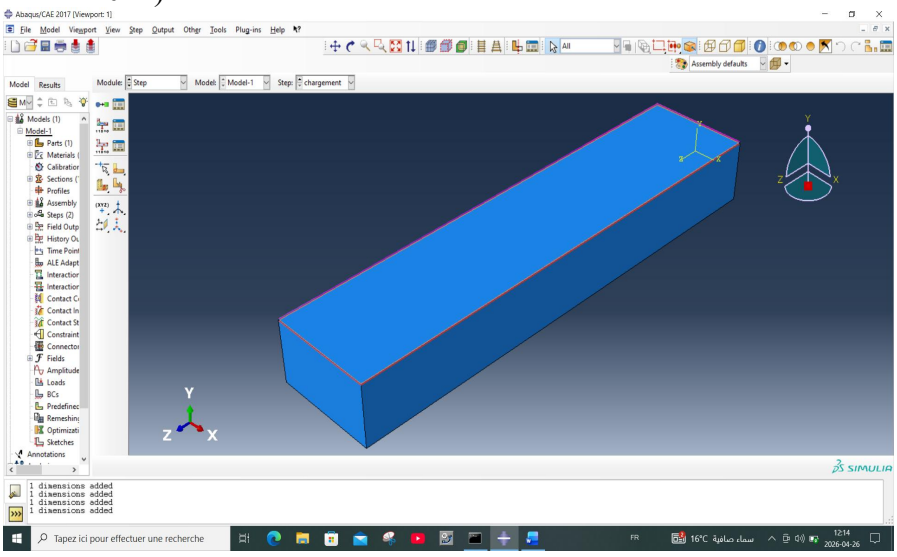


Figure 2.11 Représentation de la pièce (Step) sur Abaqus

- L'application des chargements et conditions aux limites : Définition des forces, pressions et fixations. (Bouleftour, Abderrahmane 2014)

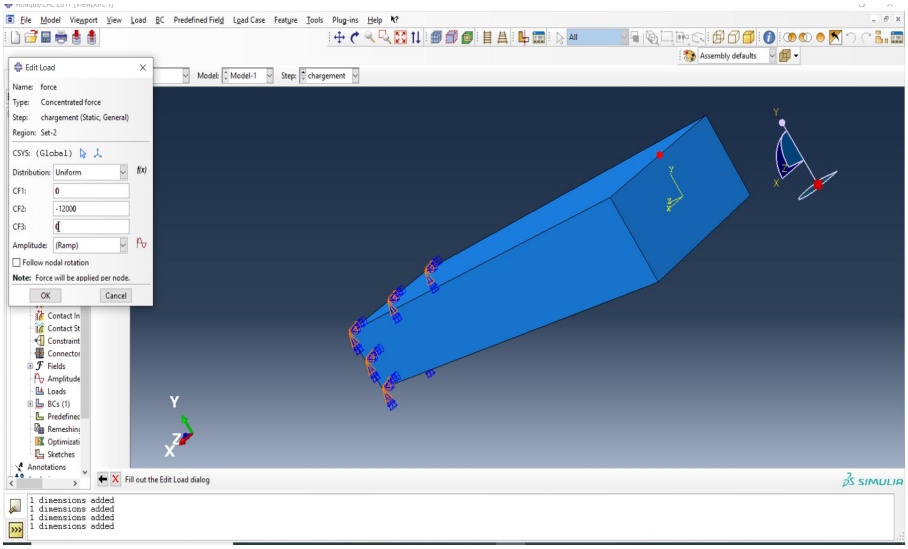


Figure 2.12 Représentation de la pièce (Loed) sur Abaqus

- Le maillage (Mesh) : Discrétisation de la géométrie en éléments finis pour la résolution numérique.(Bouleftour, Abderrahmane 2014)

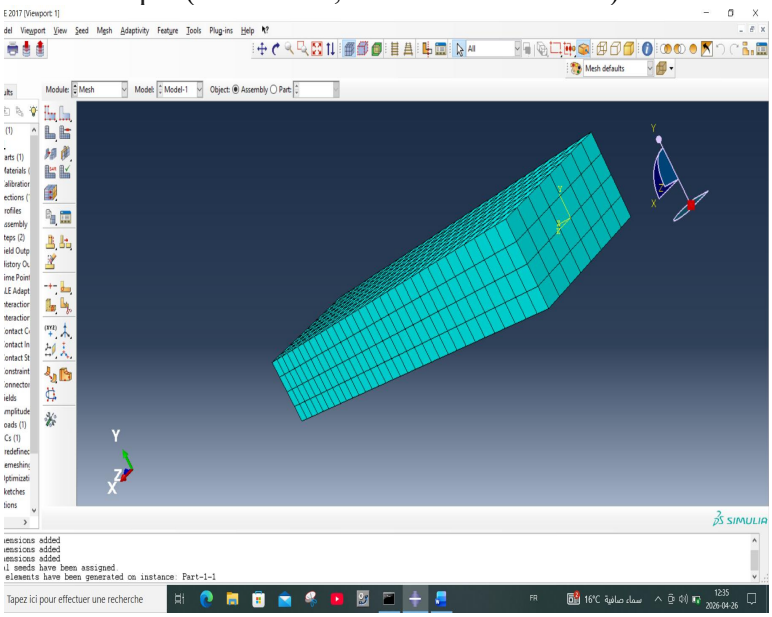


Figure 2.13 Représentation de la pièce (Mesh) sur Abaqus

Le Traitement ou Résolution (Simulation/Job) :

Une fois le modèle établi, un fichier d'entrée (input file) est généré. Le calcul est alors confié aux solveurs Abaqus/Standard (pour les analyses implicites) ou Abaqus/Explicit (pour les analyses dynamiques rapides). Le gestionnaire de tâches (Job Manager) permet de surveiller la convergence et la progression du calcul en temps réel. (Abdi, Mohamed and Azzouzi, Lotfi Ahmed 2019)

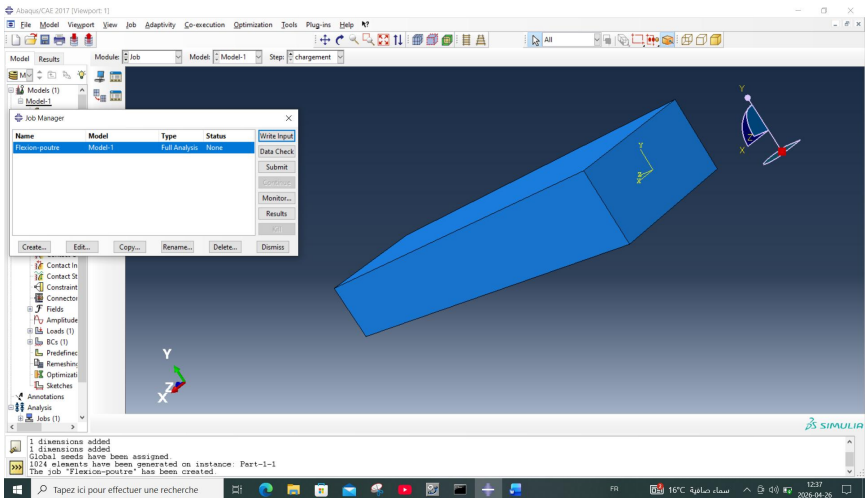


Figure 2.14 Représentation de la pièce (Job) sur Abaqus

Le Post-traitement (Post-processing) :

L'étape finale s'effectue dans le module Visualization. Elle permet d'interpréter les résultats sous forme de tracés de contours (contraintes de Von Mises, déformations), de graphiques d'évolution et d'animations, afin de valider l'intégrité structurelle du modèle étudié. (Abdi, Mohamed and Azzouzi, Lotfi Ahmed 2019)

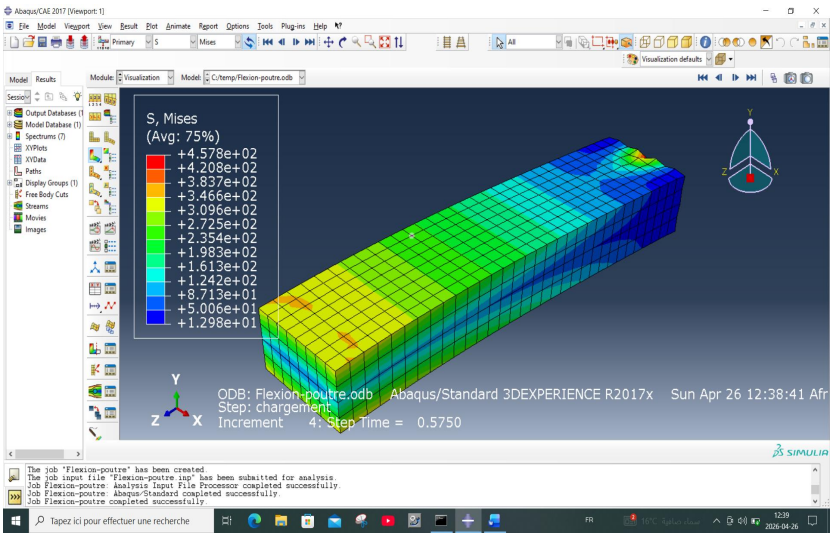


Figure 2.15 Représentation de la pièce (Visualization) sur Abaqus

2.5. Conclusion

Ce chapitre a présenté la méthodologie adoptée, fondée sur l'association de la méthode RCA et de la méthode des éléments finis (FEA). La méthode RCA a permis de structurer l'analyse des défaillances, tandis que la présentation de la MEF et du logiciel ABAQUS a mis en évidence l'apport des outils numériques dans l'évaluation du comportement mécanique des structures.

Le cas d'étude portant sur la citerne de transport du GPL a également été introduit, en précisant les caractéristiques du matériau utilisé. L'ensemble de ces éléments constitue une base essentielle pour les analyses et simulations développées dans le chapitre suivant.

2.6. Bibliographie de chapiter 2

Abdi, Mohamed and Azzouzi, Lotfi Ahmed. 2019. "Analyse de l'effet de l'humidité Sur Le Comportement En Rupture Des Pipelines Réparés Par Patch En Composite." Université d'Oran 2 (Ahmed Ben Ahmed).

Autar K. Kaw. 2005. *Mechanics of Composite Materials*. 2nd Edition. Boca Raton.

BENACHOUR ABDERRAHMANE and AID MOHAMED. 2023. "ÉTUDE ET CONCEPTION D'UNE CITERNE SUR CAMION DE TRANSPORT DE GPL."

Berdji, Mohamed El Bachir and Gheribi, Noureddine. 2019. "Modélisation d'une Structure En Matériaux Isotropes Par La Méthode Des Éléments Finis." Université Kasdi Merbah Ouargla.

Bouleftour, Abderrahmane. 2014. "Evaluation d'éléments Finis Volumiques Dans ABAQUS Sur Des Cas Tests Non Linéaires Géométriques." Université Mohamed Khider – Biskra.

Bounouala, Nada and Mezaghchia, Amel. 2021. "La Faisabilité Du Polycarbonate Comme Un Nouveau Matériau Pour La Bouteille Du Gaz GPL." Université Badji Mokhtar - Annaba.

Choukha, Abd El Mounaim, and Taki Eddine Refis Taki Eddine Refis. 2021. "GPL, DEFINITIONS, GESTION ET PREVENTIONS." Memoire de master. UNIVERSITE Mostefa Ben Boulaïd – Batna 2.

Comagine Health. 2020. "Root Cause Analysis Process."

Commission Économique pour l'Europe (UNECE). 2023. "ADR 2023 : Accord Relatif Au Transport International Des Marchandises Dangereuses Par Route."

Corken. 2005. "LPG Accessories Sales Catalog(LPG600A)."

DJAARIRI, Ala, and Ouail BAKHOUCHE. 2024. "Analyse Du Comportement Mécanique Des Matériaux Composites." memoire de master. ABBES LAGHROUR university.

Ewbank, Clifton, Shailvi Gupta, Barclay T. Stewart, Adam L. Kushner, and Anthony Charles. 2019. "A Systematic Review of Oil Tanker Truck Disasters: Identifying Prevention Targets." *Burns* 45(4): 905–13.

Green Gas oil. "LBG Basic Principales and Practices."

Green Gas oil. "LPG."

Hammouya, Amel. 2021. "Contribution à l'amélioration Des Barrières de Sécurité Dans Un Système Industriel." badji mokhtar annaba university.

Hammouya, Amel, and Rachid Chaib. 2020. "Human Factor: A Key Element in A Fire Safety System Of Hydrocarbon Storage Tank." In *2020 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, IEEE, 1–10. doi:10.1109/ISCV49265.2020.9204292.

HAMMOUYA, Amel, Ali REDJIL, Wafia BENHAMLAOUI, and Rachid CHAIB. 2025. "Advanced Engineering Approach to Analyse Pipeline Failure Consequences." In turkie.

IMEDOURENE, Salah Eddine, and Hakim. Ouahioune . 2021. “Etude et Conception d’une Citerne GPL/c 10 M3.”

Infraspeak. “Root Cause Analysis Tools: A Complete Guide.”

KHA Ouiam. 2022. “Production Du GPL/Unité de GLA-Haoud Berkaoui : Contraintes et Résolutions.”

lapesa. 2022.

Le Floch, R., P. J. Mahé, and P. Perrot. 2022. “Catastrophes Liées À Une Explosion De Camionciterne Entre 2000 Et 2020. Deux Groupes Distincts.” *Annals of Burns and Fire Disasters* 35(1): 3.

Le Floch, R. and Mahé, P.J. 2022. “Catastrophes Liées à Une Explosion de Camion-Citerne Entre 2000 et 2020. Deux Groupes Distincts.”

Mr.AMRANI Rabah, Nabil. 2011. “Transport Du Gaz de Pétrole Liquéfié Par Pipeline Application Au Projet « Skikda – Berrahal ».”

Okes, Duke. 2019. *Root Cause Analysis: The Core of Problem Solving and Corrective Action*. Quality Press. https://books.google.com/books?hl=ar&lr=&id=remPDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT6&dq=Root+Cause+Analysis+definition+thesis&ots=mBxe4Pi9ha&sig=KGwbuGu65ZSS8KGfEAvG1CO7HC4 (April 15, 2026).

OMAR NOUI. 2020. “DÉVELOPPEMENT D’UN MODÈLE DYNAMIQUE 3D POUR LA CONCEPTION DES CITERNES TRANSPORTANT DES LIQUIDES.” UNIVERSITÉ DU QUÉBEC.

Ozan Hikmet Arıcan and Ali Umut Ünal. 2025. “Risk Assessment in LPG and LNG Operation Processes in Maritime Transport: Delphi and Fault Tree Analysis Approach.”

REDJIL, Ali. 2026. “Data-Driven Condition-Based Maintenance for LNG Transport Systems via Pipeline.” ABBES LAGHROUR university.

Seshu, P. 2012. “Textbook of Finite Element Analysis.”

Sid Ali, Mahdi and Belgomri, Abderrahmane. 2020. “Contribution à l’optimisation de La Paroi d’une Citerne de Transport de GPL.”

SRAOUI, Oussama, and Ayoub AGDI. 2024. “Contributions à l’analyse des principales défaillances D’un système industriel (ventilateur industriel).” memoire de master. ABBES LAGHROUR university.

Tahar, LEDMI, MIMOUNE Zakaria, and Ala Eddine Mechri. 2026. “Failure Analysis of Road Tanker Transportation.” memoire. ABBES LAGHROUR university.

Tissot, Bernard. 2010. “Transport Des Hydrocarbures Par Canalisations.”

United nation. 2023. “Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR).”

Yousfi Alla Eddine, Chakri Mohamed Zine. 2019. “Procédé et Caractérisation Du GPL Au Niveau Du Champ MLE (Hassi Messaoud).”

Chapitre 3 : résultats et discussion

Chapitre 3 : résultats et discussion

3.1. Introduction

Ce troisième chapitre présente les résultats obtenus à travers l'analyse des causes de dégradation d'une citerne de transport de GPL ainsi que l'étude numérique réalisée sous Abaqus. Après l'identification des causes principales à l'aide de la méthode RCA et du diagramme d'Ishikawa, une modélisation par éléments finis a été effectuée afin d'évaluer le comportement mécanique de la citerne sous différentes pressions internes. Trois configurations ont été étudiées : une citerne saine, une citerne corrodée et une citerne corrodée renforcée par une couche de CFRP.

3.2. Application de la méthode RCA

3.2.1. Définition du problème

Cette première étape consiste à identifier précisément l'événement critique et à déterminer l'élément technique à corriger. Dans le cadre de notre étude, le problème majeur est défini comme suit :

L'événement (L'accident) : Le risque de rupture ou de dégradation sévère de la paroi de la citerne de transport de GPL sous l'effet des contraintes opérationnelles.

L'élément technique à corriger : L'épaisseur, la géométrie ou la protection de la paroi en acier (P355) afin de maximiser sa résistance face à la fatigue mécanique et à la corrosion.

3.2.2. Collecte des données et Analyse Statistique

3.2.2.1. Analyse des facteurs de dégradation de la paroi

De la même manière, et en nous basant sur le dépouillement et l'analyse approfondie des rapports d'accidents présents dans les mémoires de fin d'études et les articles de revue (Le Floch, Mahé, and Perrot 2022) (Ewbank et al. 2019) consultés, nous avons pu identifier les causes les plus récurrentes des accidents liés aux citernes GPL.

Les résultats de notre Facteurs classification statistique sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.1 : Répartition statistique des facteurs fréquents des accidents de citernes GPL

Facteurs	**Pourcentage**
Erreur humaine	35
Défaut matériel	30
Accidents routiers	20
Surchauffe externe	10
Autres causes	5
Autres causes	5

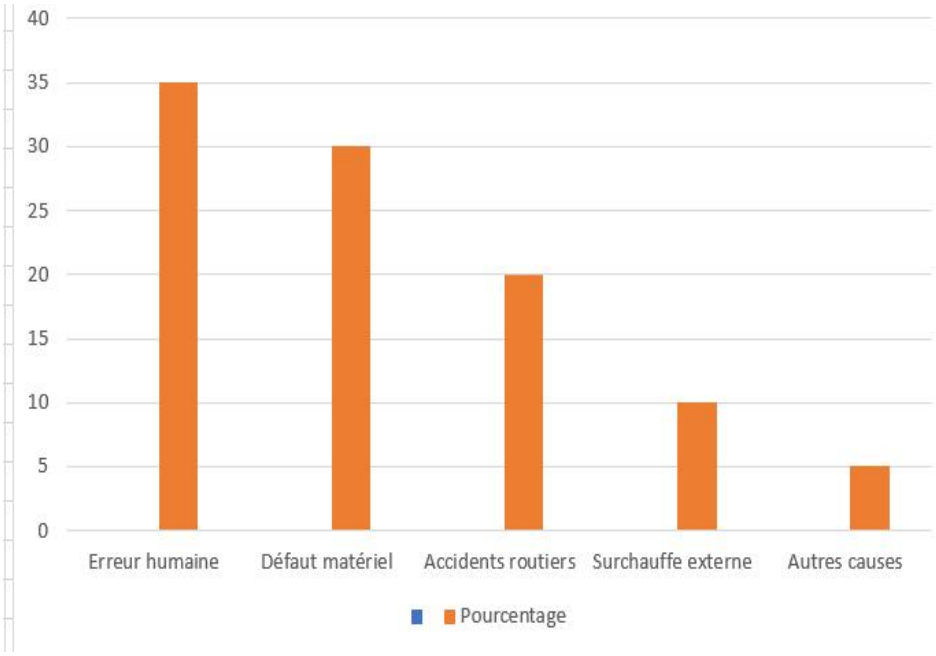


Figure 3.1 : Répartition des facteurs principaux responsables des accidents de citernes GPL

Interprétation :

L'analyse des résultats illustrés par la Figure 3.1 révèle que l'erreur humaine constitue la cause majeure des accidents de citernes GPL avec un taux de 35%, suivie de près par les défauts matériels et structurels qui représentent 30%. Le reste des données se répartit entre les accidents routiers (20%), la surchauffe externe (10%) et, enfin, les autres causes diverses (5%).

Bien que le facteur humain enregistre le pourcentage statistique le plus élevé dans la survenue de ces accidents, l'analyse des aspects comportementaux ou opérationnels dépasse le cadre de notre spécialité technique. Par conséquent, notre travail de recherche se focalise exclusivement sur l'étude des défauts matériels (tels que la fatigue mécanique, la dégradation des parois ou les défaillances structurelles), afin d'optimiser la sécurité passive de la citerne et de minimiser les risques d'origine purement mécanique.

3.2.2.2. Analyse des causes principales des accidents

Afin d'identifié et de quantifier les facteurs qui affectent le plus l'intégrité de la citerne, nous avons réalisé une recherche documentaire approfondie. Cette analyse statistique est basée sur la collecte et l'exploitation de données réelles provenant exclusivement de deux sources principales :

Des articles de revue et synthèses scientifiques (Reviews) : Notamment des études systématiques mondiales portant sur l'analyse des risques, des défaillances et des catastrophes liées aux camions-citernes .(Le Floch, R. and Mahé, P.J. 2022)

Des thèses et mémoires de fin d'études (Mémoires de Master/Doctorat) : Des travaux académiques antérieurs ayant traité de la tenue mécanique, de la fatigue et de la dégradation des réservoirs sous pression.

Synthétisées et analysées, ces sources nous ont permis d'établir les données quantitatives suivantes :

Tableau 3.2 : **Répartition statistique des principales causes de dégradation de la paroi de la citerne**

Causes	**Pourcentage**
Corrosion	40
Fatigue mec	25
Chocs	20
Défaut fabrication	10
Autres	5

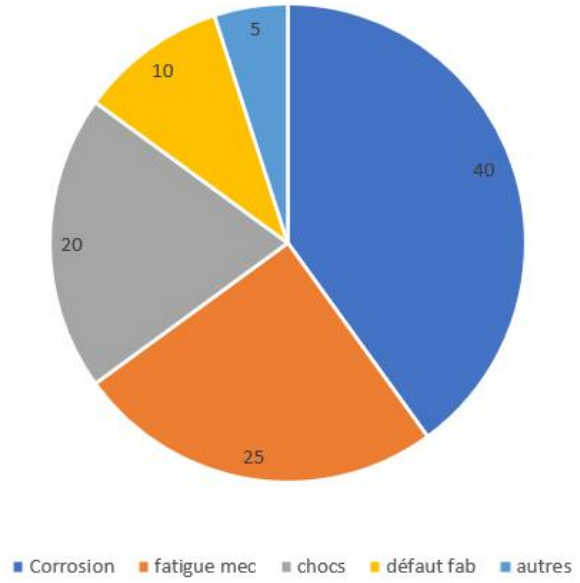


Figure 3.2 : Répartition des principales causes de dégradation de la paroi de la citerne.

Interprétation :

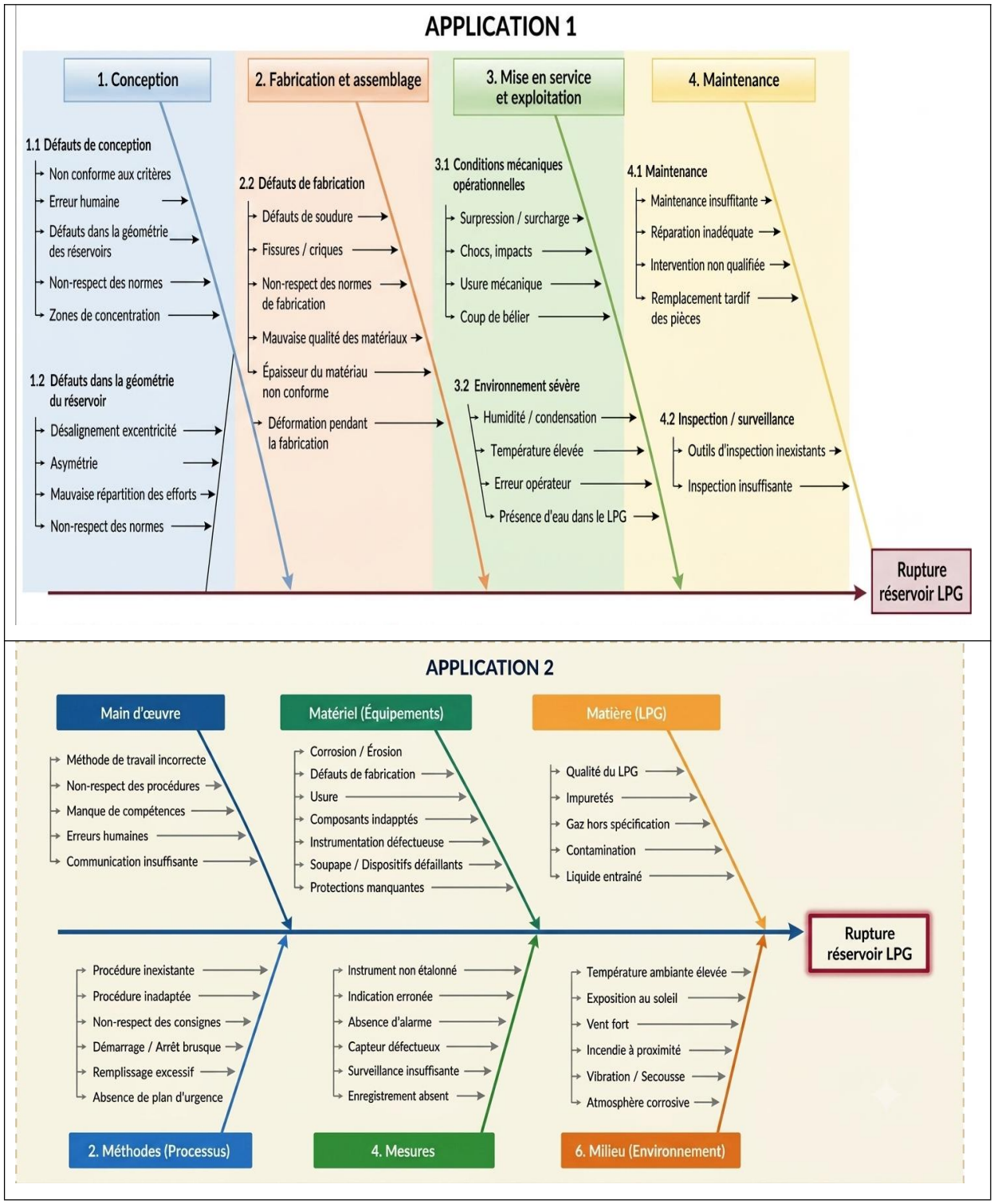
D'après le Tableau 3.1 et la Figure 3.1, nous remarquons que la corrosion représente le facteur de dégradation le plus prédominant avec un pourcentage majeur (40%). Elle est suivie par la fatigue mécanique (25%) et les chocs (20%), ce qui confirme que la paroi de la citerne subit des contraintes environnementales et opérationnelles sévères, tandis que les défauts de fabrication (10%) occupent une part moins importante. Enfin, la catégorie « Autres » qui représente 5% englobe simplement des facteurs secondaires et environnementaux, tels que les vibrations continues de la route pendant le transport, les variations de la température ambiante, ou encore les micro-dommages superficiels.

3.2.3. Identification des causes racines à l'aide du diagramme d'Ishikawa

Dans cette partie, les résultats de l'analyse par la méthode d'Ishikawa sont présentés afin d'identifier et de structurer les causes de rupture de la paroi de la citerne, illustrées dans la figure suivante.

L'analyse a été réalisée en trois étapes : une approche globale du cycle de vie du réservoir (Application 1), une classification selon les 5M pour structurer les causes (Application 2), et

une analyse détaillée permettant d'identifier les causes racines de dégradation (Application 3).



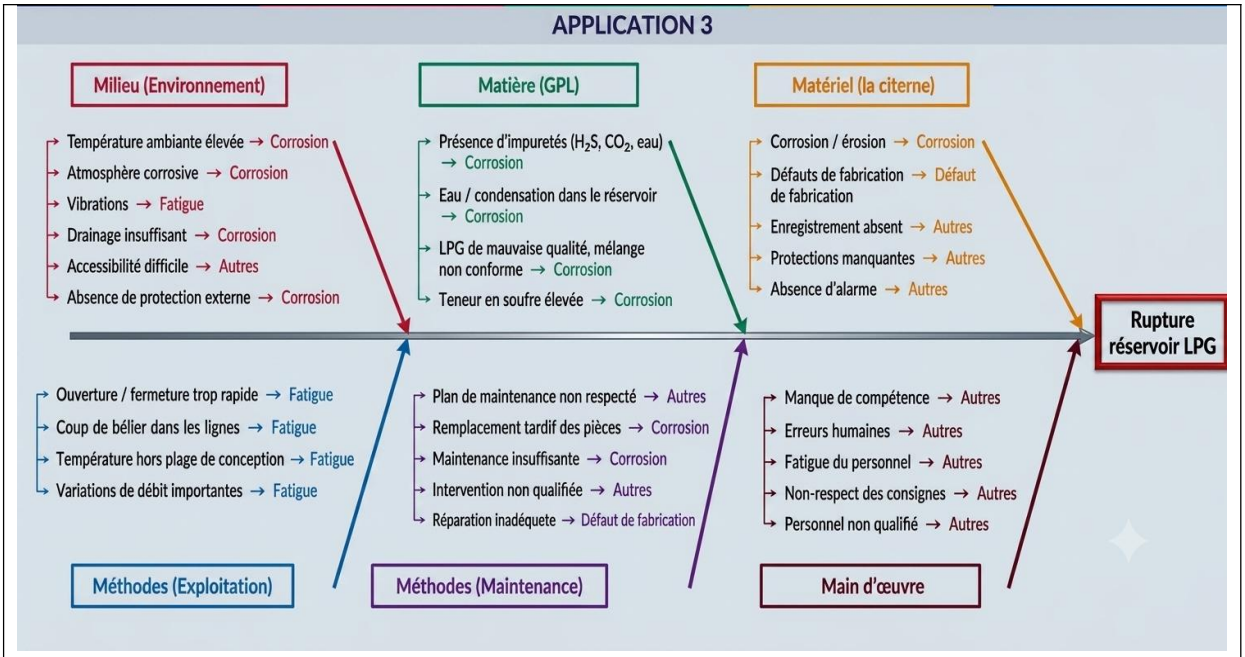


Figure 3.3 : Diagramme d'Ishikawa des causes de dégradation de la paroi d'une citerne GPL

Interprétation :

Après analyse des diagrammes présentés dans la figure, les résultats obtenus sont les suivants

Application 1 : l'analyse globale montre que les causes de rupture peuvent être liées à la conception, à la fabrication, à l'exploitation ou à la maintenance. La corrosion et la fatigue apparaissent comme des mécanismes de dégradation dominants.

Application 2 : l'analyse selon l'approche des 6M met en évidence l'influence des facteurs liés à la main d'œuvre, au matériel, à la méthode, à la matière, au milieu et aux mesures sur l'intégrité du réservoir.

Application 3 : l'analyse détaillée permet d'identifier de manière plus précise la corrosion et la fatigue comme principales causes racines pouvant conduire à la rupture du réservoir de GPL.

L'application de la méthode d'Ishikawa a permis une identification progressive et structurée des causes de défaillance du réservoir GPL, en mettant en évidence la corrosion et la fatigue comme mécanismes principaux.

Ces résultats constituent une base pour une étude numérique par éléments finis sous ABAQUS, afin d'évaluer le comportement mécanique du réservoir, d'identifier les zones critiques et d'analyser l'influence de ces phénomènes sur l'intégrité de la structure.

3.3. Analyse numérique par Abaqus

3.3.1. Vérifications

Une phase de vérification a été réalisée sur l'acier P355 afin de valider le modèle numérique. Deux cas d'étude ont été considérés, avec l'application de quatre niveaux de pression interne. Le choix de ces pressions correspond aux conditions de service (0,7 à 0,9 MPa) ainsi qu'aux

conditions critiques (1,2 à 2,4 MPa), représentatives du stockage du propane, l'un des principaux constituants du GPL transporté.

Tableau 3.3 : Les différents niveaux de pression interne appliqués

Pression	Valeur
P1	0.7 MPa
P2	0.9 MPa
P3	1.2 MPa
P4	2.4 MPa

3.3.1.1. CAS 1 : Citerne saine (sans défaut)

A. Modélisation de cas 1

La modélisation numérique a été réalisée sous Abaqus en suivant les différentes étapes présentées dans le chapitre 2. La même démarche a été appliquée aux cas étudiés afin d'analyser le comportement mécanique de la structure sous les chargements imposés.

- **Part**

La citerne a été modélisée sous forme de slice afin de simplifier l'analyse tout en conservant la représentativité du comportement mécanique global du système.

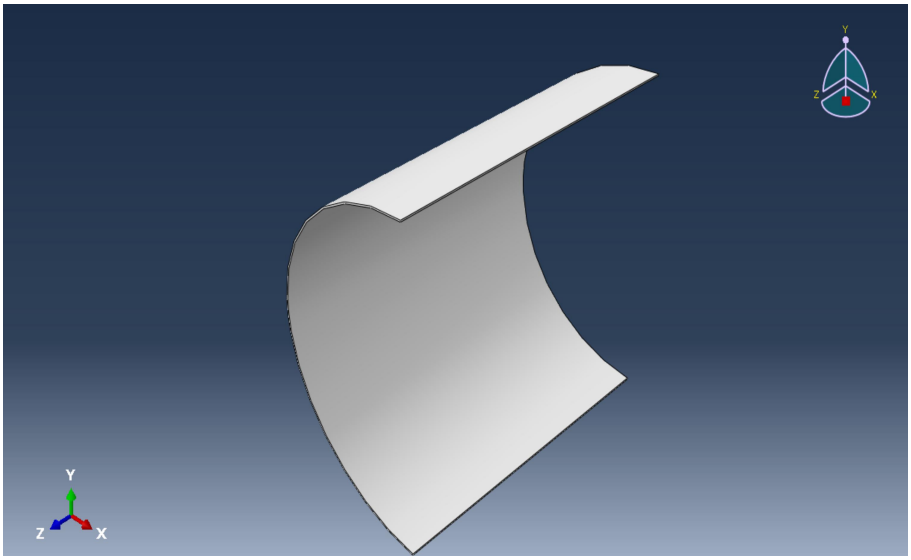


Figure 3.4 : **Géométrie de la citerne saine modélisée sous Abaqus**

- **Propriétés des matériaux Acier P355**

Tableau 3.4 : Propriétés mécaniques de l'acier P355 utilisées dans la modélisation numérique

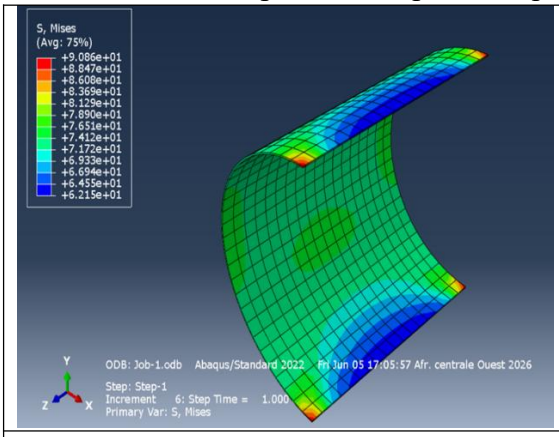
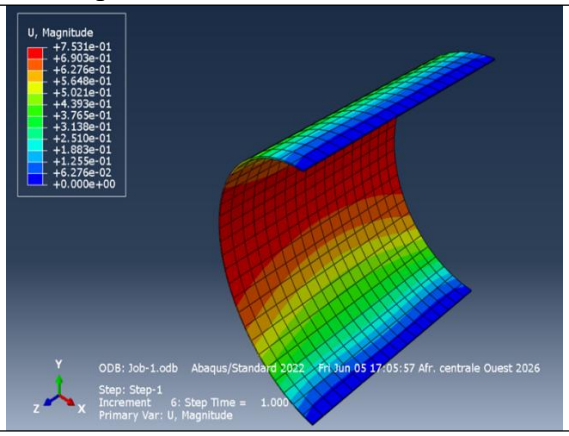
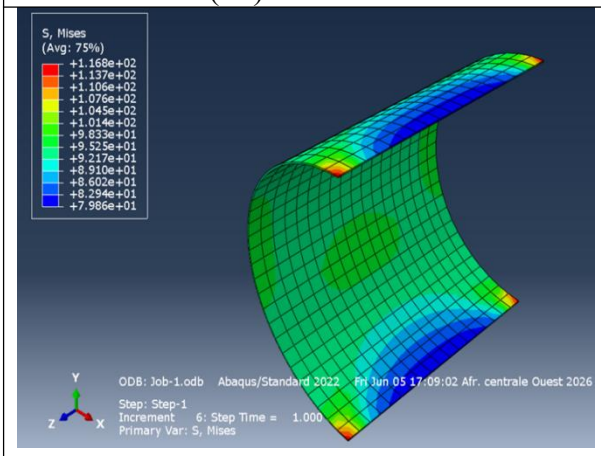
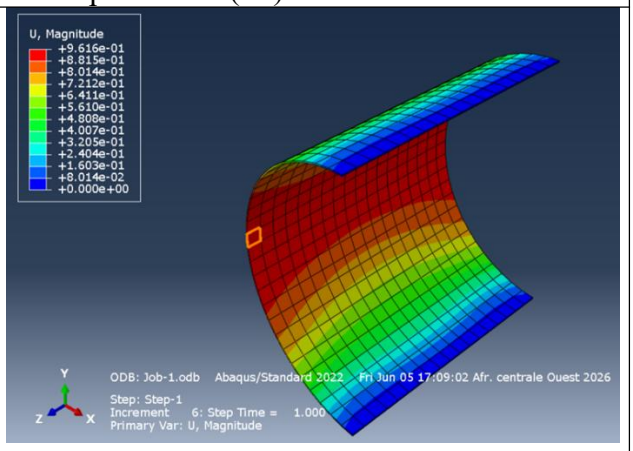
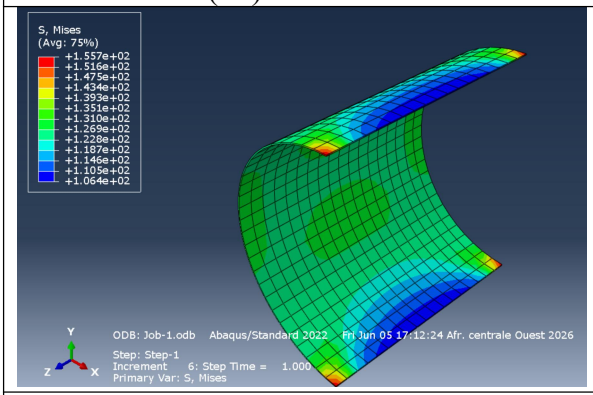
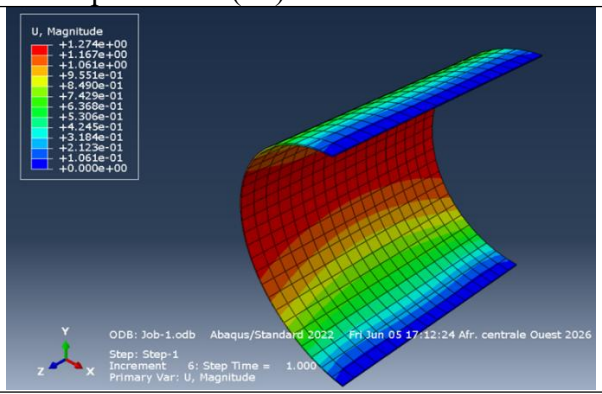
Propriété	Valeur
Module d'Young (E)	210000 MPA
Coefficient de Poisson (ν)	0.3
Limite d'élasticité (Re)	355 MPA
Densité (ρ)	7850 kg/m³

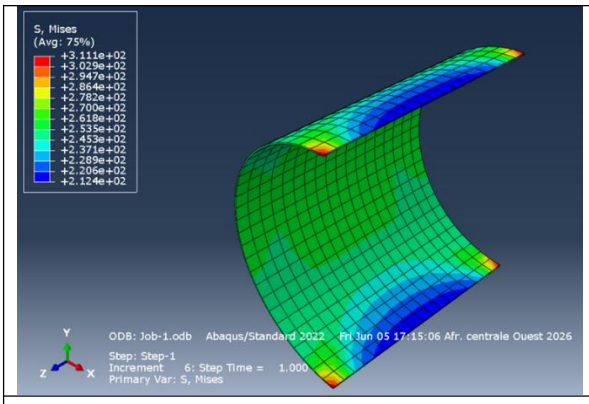
- **Conditions aux limites et chargement**

Une pression interne uniforme a été appliquée sur la paroi interne de la citerne. Plusieurs niveaux de pression ont été étudiés : P1=0,7 MPa, P2= 0,9 MPa, P3= 1,2 MPa et P4= 2,4 MPa.

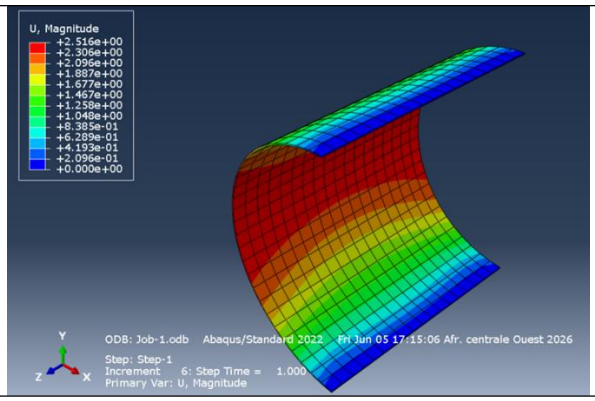
B. Les résultats de cas 1 :

Les résultats issus des simulations sont présentés sous forme de distributions de contraintes de Von Mises et de déplacements pour chaque niveau de pression :

<table>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>A : Contrainte (P1)</td><td>B : Déplacement (P1)</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>C : Contrainte (P2)</td><td>D : Déplacement (P2)</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>E : Contrainte (P3)</td><td>F Déplacement:(P3)</td></tr>
</table>



G : Contrainte (P4)



H : Déplacement:(P4)

Figure 3.5 : Distribution des contraintes de Von Mises et des déplacements de la citerne saine sous différentes pressions internes

C. **Interprétation :**

Les résultats montrent que les contraintes de Von Mises augmentent progressivement avec la pression interne, passant de 90 MPa à 311,1 MPa pour 2,4 MPa. Ces valeurs restent inférieures à la limite élastique du matériau (355 MPa), ce qui indique que la citerne saine travaille uniquement en régime élastique sans plastification.

Les déplacements augmentent globalement avec la pression, ce qui traduit une déformation progressive mais maîtrisée de la structure. Cela confirme que la structure est globalement sûre dans la plage de chargement étudiée.

Dans cette première étape, nous analysons le comportement mécanique de la paroi de la citerne dans un état sain, c'est-à-dire sans présence de défauts géométriques ou de corrosion. L'objectif est d'évaluer les contraintes principales générées par la pression interne.

$$\sigma_\theta = \frac{p.d}{2e}$$

P : pression interne (MPa)

D : diamètre extérieur (mm)

e : épaisseur de la paroi (mm)

σθ : contrainte circonférentielle (MPa)

3.3.1.2. Cas 2 : avec défaut 'Corrosion'

A. Modélisation

- **Part**

Dans ce cas, un défaut de corrosion a été introduit afin de représenter la cause racine du dommage. Il a été modélisé par une réduction locale de l'épaisseur de la paroi, celle-ci passant à 6 mm dans la zone affectée.

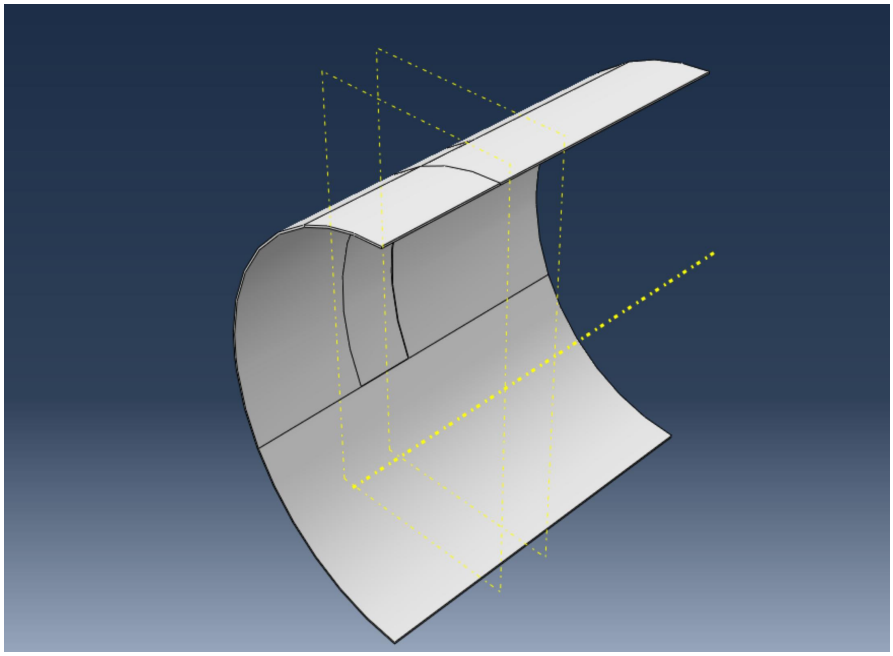
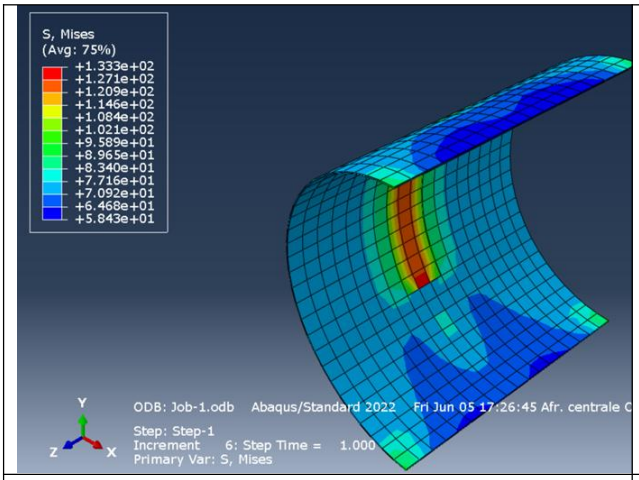
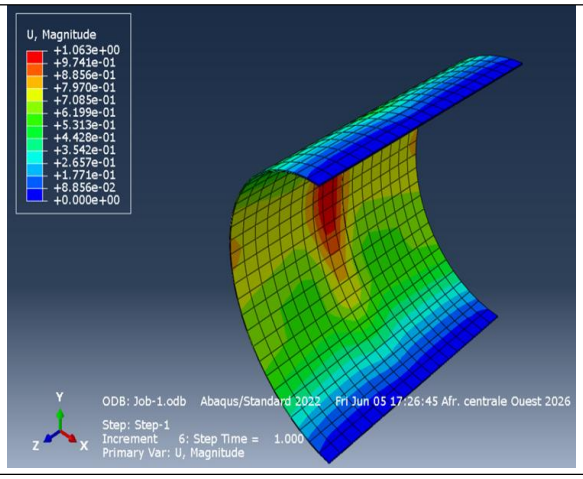


Figure 3.6 : Géométrie de la citerne présentant un défaut de corrosion

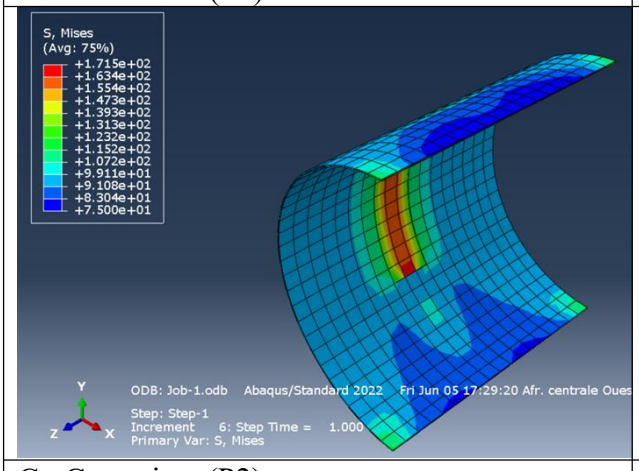
B. Les résultats



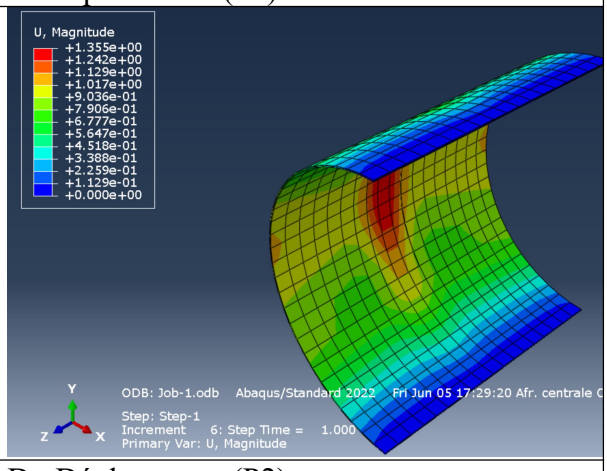
A : Contrainte (P1)



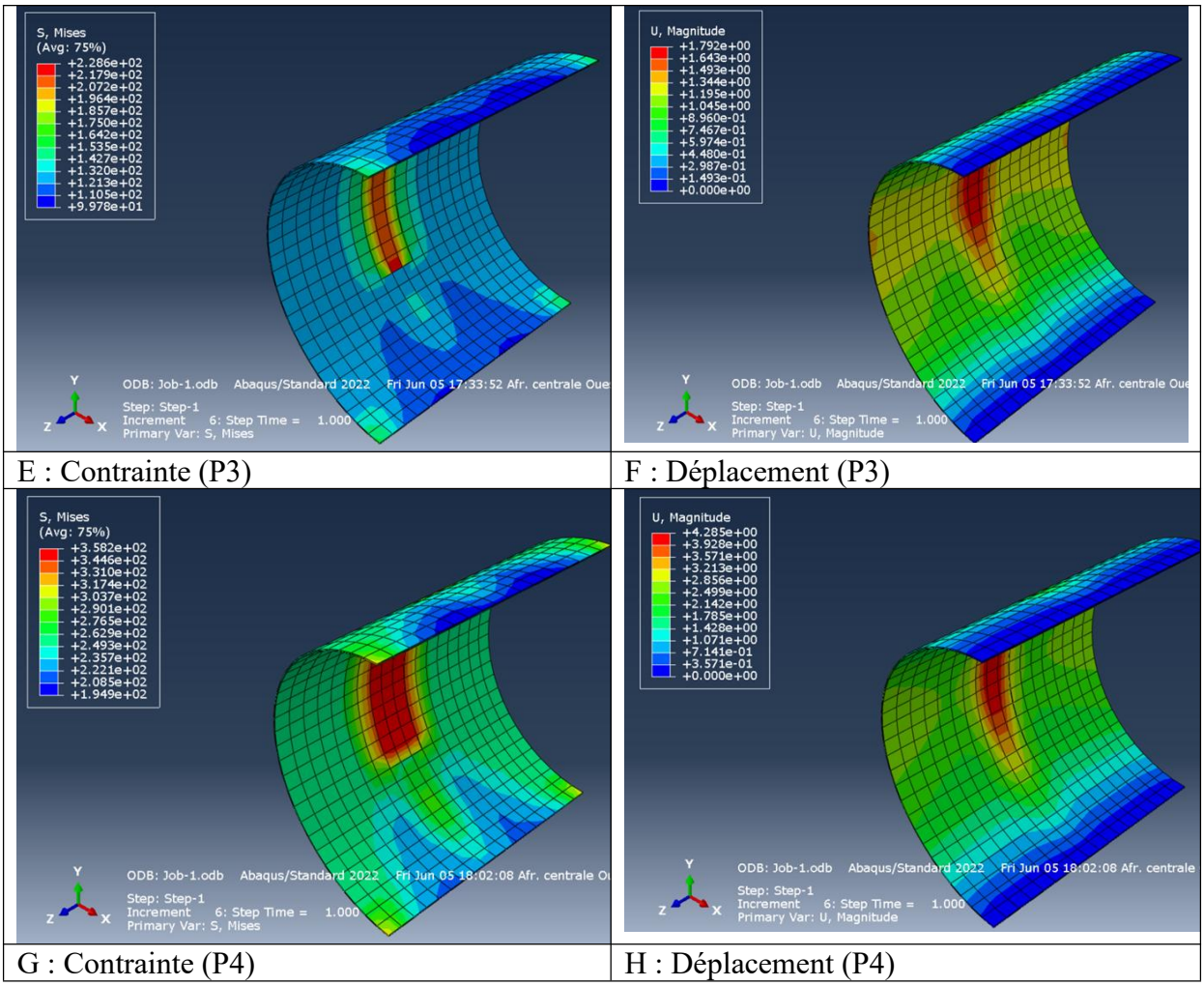
B: Déplacement (P1)



C : Contrainte (P2)



D : Déplacement (P2)



E : Contrainte (P3)	F : Déplacement (P3)
G : Contrainte (P4)	H : Déplacement (P4)

Figure 3.7: Distribution des contraintes de Von Mises et des déplacements de la citerne corrodée sous différentes pressions internes

C. **Interprétation** :

La présence du défaut de corrosion entraîne une augmentation significative des contraintes et des déplacements par rapport au cas sain. Les contraintes de Von Mises évoluent de 133,3 MPa à 358,2 MPa lorsque la pression passe de 0,7 à 2,4 MPa, atteignant ainsi la limite élastique du matériau (355 MPa) à la pression maximale, ce qui traduit un comportement critique avec un risque de début de plastification.

Les déplacements augmentent également de manière plus marquée que dans le cas sain, passant de 1,06 mm à 4,28 mm, ce qui confirme une perte de rigidité locale liée à l'amincissement de la paroi. Enfin, la zone corrodée concentre fortement les contraintes, ce qui en fait une région critique susceptible de favoriser l'endommagement et l'initiation de fissures sous chargement interne.

Dans cette configuration, nous introduisons un défaut local représentant une perte d'épaisseur causée par la corrosion ou l'endommagement mécanique.
Ce défaut influence directement la répartition des contraintes.

$$\sigma_{\theta x} = \frac{p.d}{2(e - De)}$$

De : profondeur du défaut

σθ cc: contrainte avec défaut

Vérification par critère de Von Mises

Afin d'évaluer le risque de plastification, le critère de Von Mises est utilisé.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \sigma_L^2 - \sigma_\theta \sigma_L} \leq Re$$

σVM : contrainte équivalente

σL: contrainte longitudinale

Re: limite élastique

3.3.2. Optimisation

Après la phase de vérification, une optimisation de la structure est réalisée par l'ajout d'une couche de matériau composite CFRP (époxy renforcé par fibres de carbone) d'une épaisseur de 2 mm. Ce matériau est largement utilisé en renforcement structural en raison de sa forte résistance mécanique, de sa rigidité élevée et de sa faible masse volumique.

La présence du défaut de corrosion est également prise en compte afin d'évaluer son influence sur le comportement global du réservoir renforcé. La même procédure de modélisation est ensuite appliquée pour comparer les résultats et analyser l'effet du renforcement sur la performance mécanique de la structure.

A. Modélisation

- **Part**

La figure suivante présente la couche de CFRP ajoutée sur la citerne corrodée.

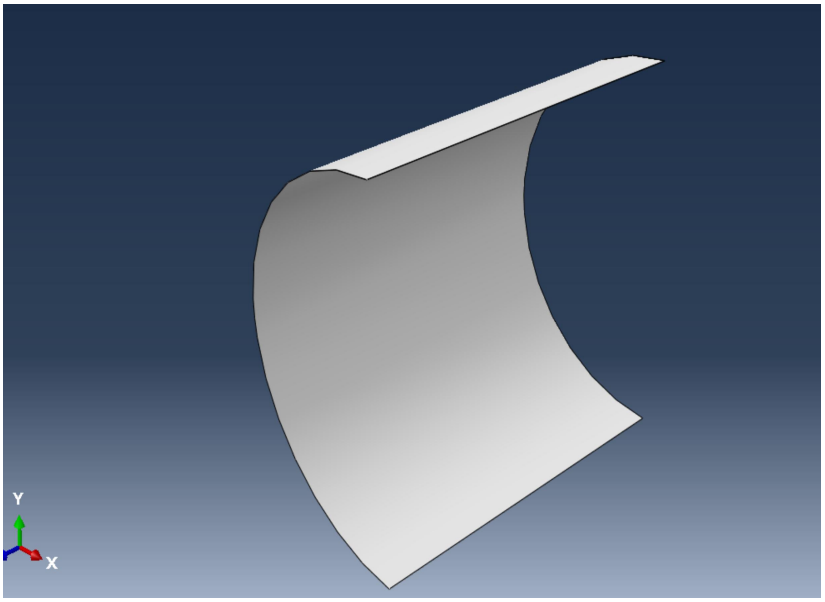


Figure 3.8 : Géométrie de la citerne corrodée renforcée par une couche de CFRP

- **Propriété**

Les propriétés mécaniques du CFRP utilisées dans la modélisation sont regroupées dans le tableau suivant(Autar K. Kaw 2005) :

Tableau 3.5: Propriétés mécaniques du matériau composite CFRP utilisé pour le renforcement

Propriété	CFRP
E (MPa)	210000
ν_{12}	0,34
ν_{23}	0,34
G_{12} (MPa)	900
G_{23} (MPa)	900
G_{13} (MPa)	500
σ_1 (MPa)	500
σ_2 (MPa)	500
σ_3 (MPa)	500

- **Assemblage**

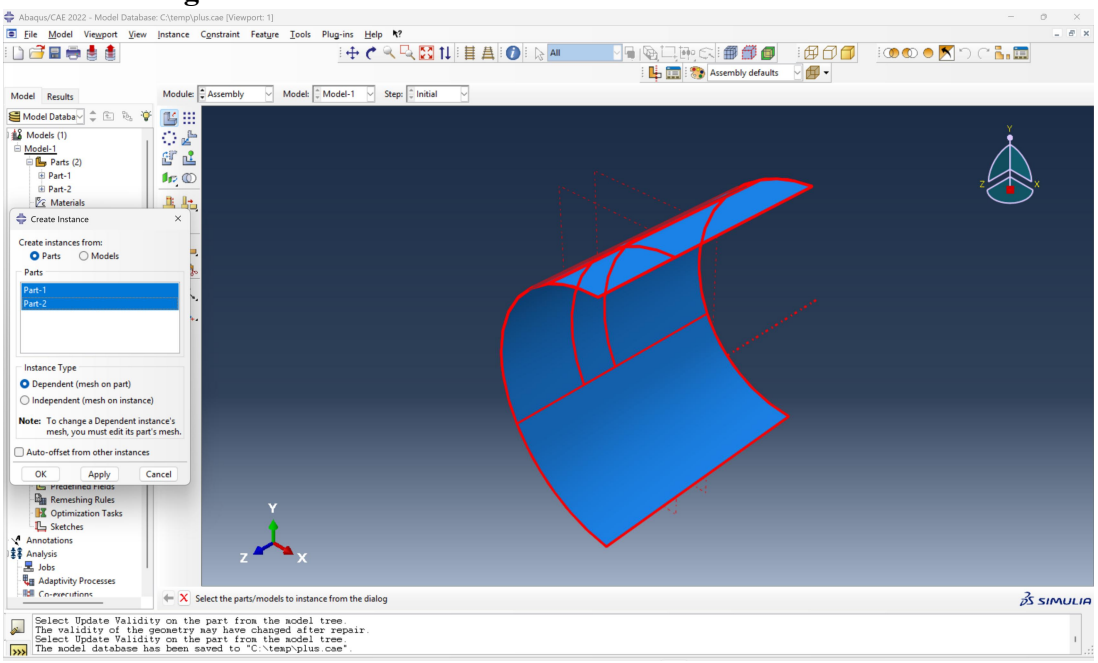


Figure 3.9 : **Assemblage du modèle de la citerne renforcée par CFRP**

- **Conditions aux limites et chargement**

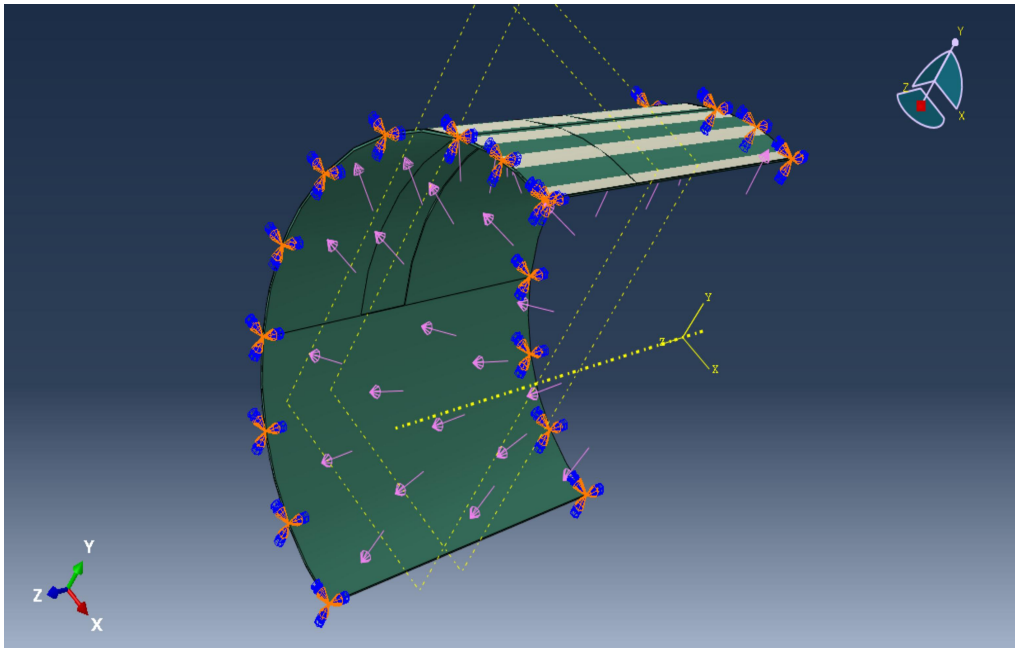


Figure 3.10 : Conditions aux limites et chargement appliquées au modèle renforcé

- **Maillage**

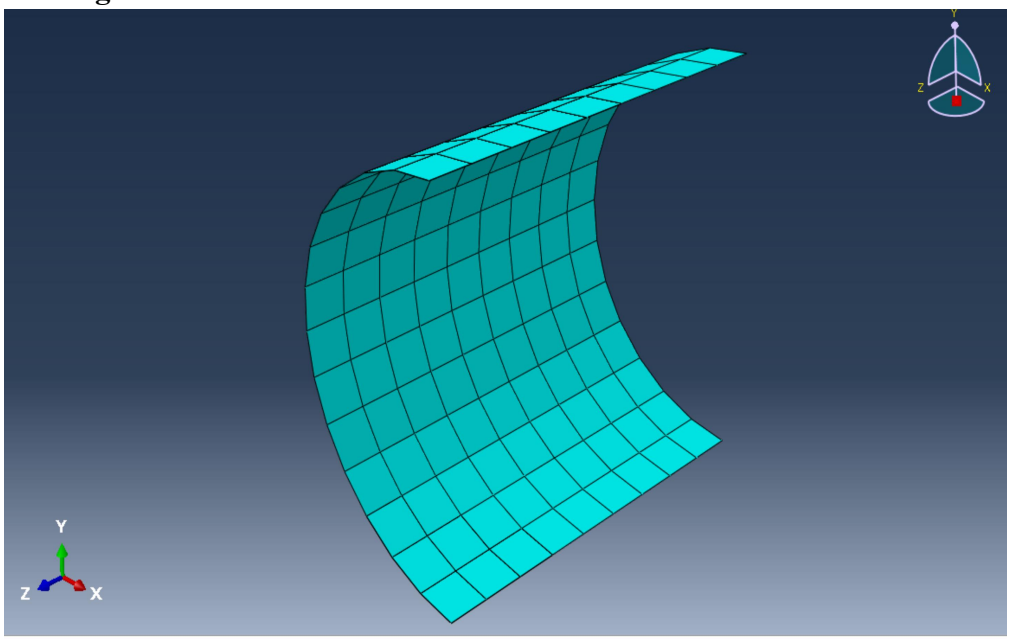


Figure 3.11 : Maillage du modèle CFRP

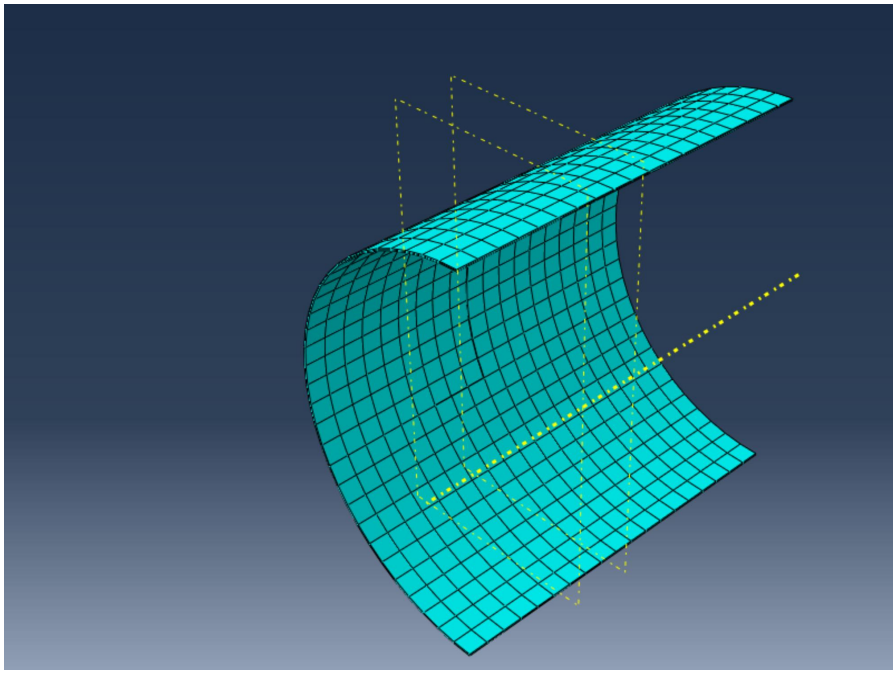
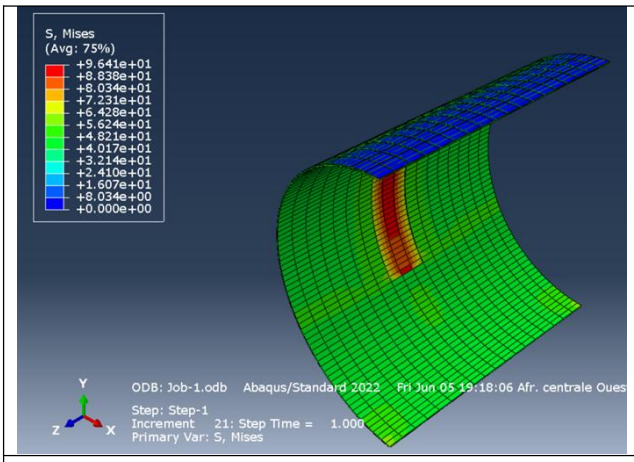
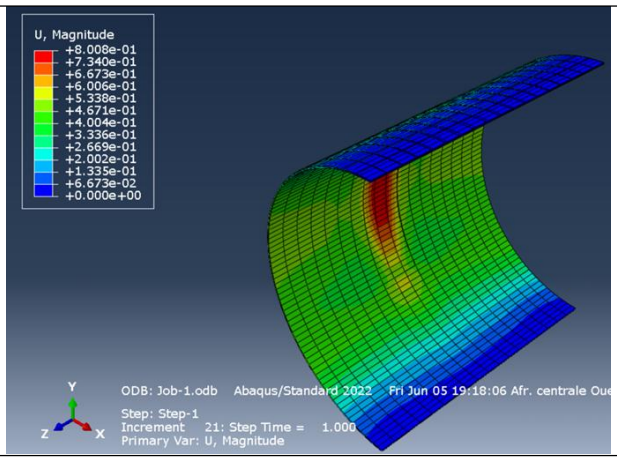


Figure 3.12 : Maillage du modèle (CFRP+ acier P355)

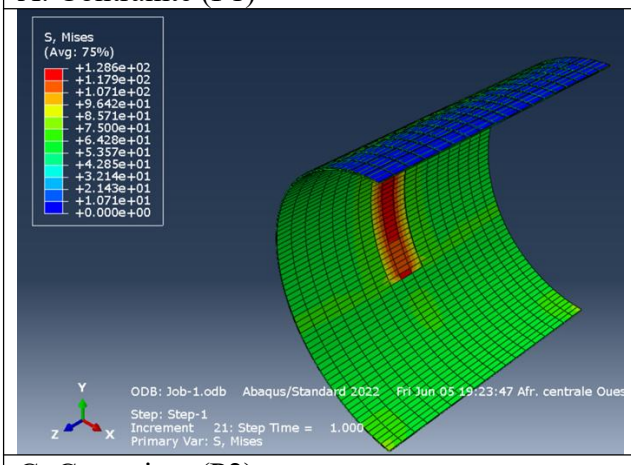
B. Les résultats



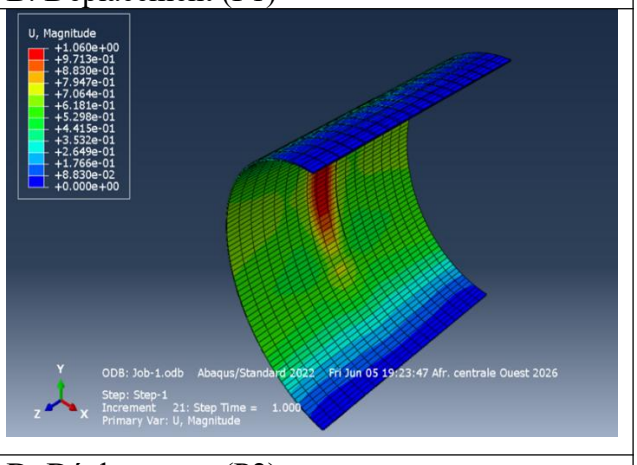
A: Contrainte (P1)



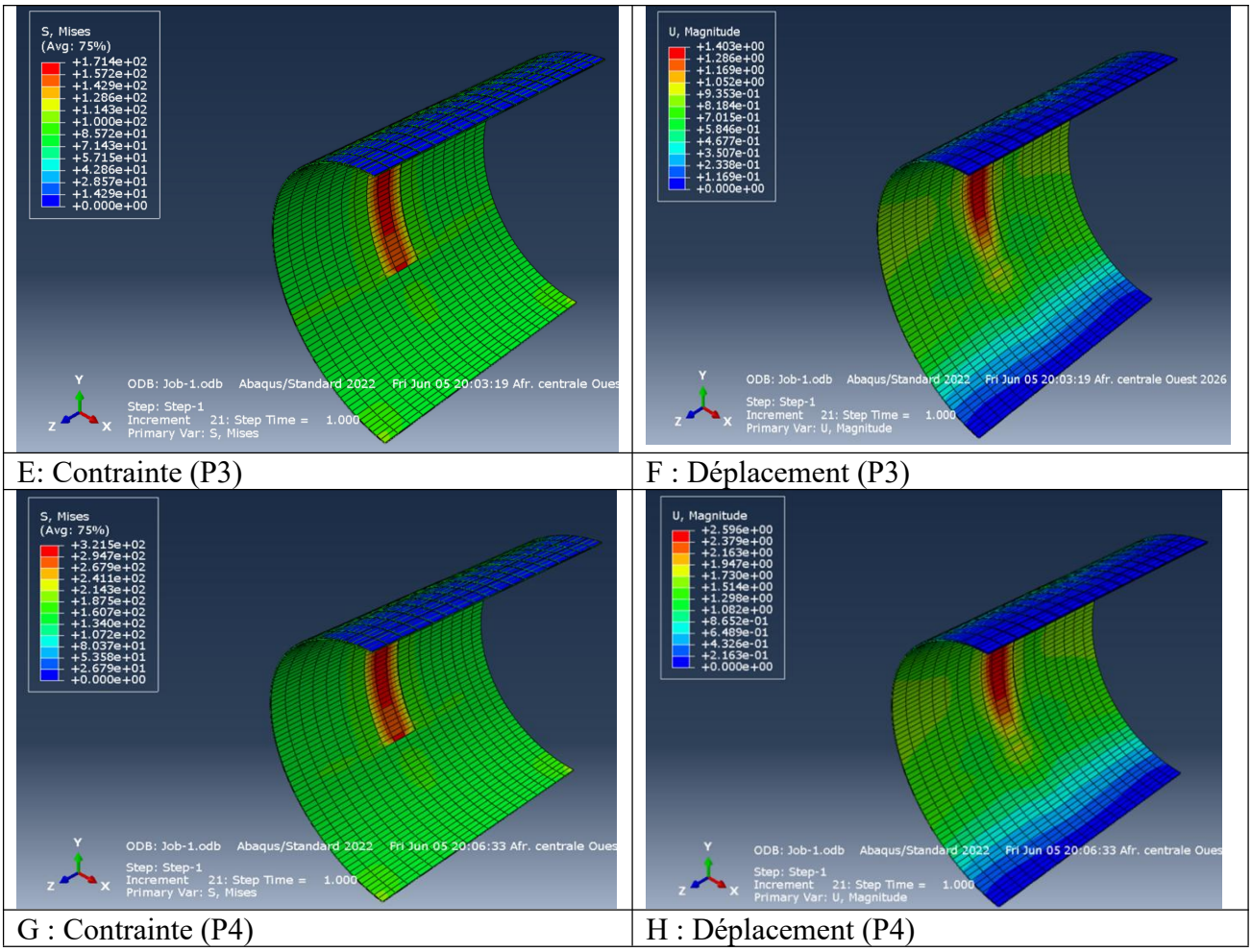
B: Déplacement (P1)



C: Contrainte (P2)



D: Déplacement (P2)



E: Contrainte (P3)	F : Déplacement (P3)
G : Contrainte (P4)	H : Déplacement (P4)

Figure 3.13 : Application de la pression interne et résultats des contraintes et déplacements de la citerne

C. Interprétation :

Les résultats montrent que l'ajout du renforcement en CFRP améliore le comportement mécanique de la structure par rapport au cas avec corrosion non renforcé. Les contraintes et les déplacements sont globalement réduits, malgré l'augmentation progressive de la pression interne.

Les contraintes de Von Mises évoluent de 96,4 MPa à 321,5 MPa lorsque la pression passe de 0,7 à 2,4 MPa, restant ainsi inférieures à la limite élastique du matériau. Cela indique un comportement globalement élastique et stable de la structure renforcée.

Les déplacements restent également limités (0,8 mm à 2,6 mm), ce qui confirme l'apport du CFRP dans l'augmentation de la rigidité globale du système.

Donc, le composite CFRP joue un rôle efficace dans la reprise des efforts mécaniques, en réduisant les déformations et en améliorant la résistance globale de la citerne corrodée.

Afin d'améliorer la résistance mécanique de la zone endommagée, un renforcement en matériau composite CFRP est appliqué.

$$\sigma_{total} = \sigma_s \frac{A_s}{A_{total}} \sigma_c \frac{A_c}{A_{total}}$$

3.4.2.3 Comparaison

Dans cette partie de l'étude, une comparaison est réalisée entre les résultats obtenus dans les sections précédentes afin de mettre en évidence l'effet de la dégradation par corrosion ainsi que l'efficacité du renforcement proposé. Les résultats présentés dans le tableau et les figures suivantes.

Tableau 3.6 : Résultats des contraintes maximales et des déplacements maximaux pour les trois cas étudiés

Cas	**Pression (MPa)**	**Contrainte maximale (MPa)**	**Déplacement maximal (mm)**
Cas 1 (sans défaut)	0.7	172.4	2.453
	0.9	221.6	3.154
	1.2	295.5	4.206
	2.4	370.7	11.24
Cas 2 (avec corrosion)	0.7	142.8	1.414
	0.9	183.6	1.818
	1.2	244.8	2.424
	2.4	369.8	7.562
Cas 3 (corrosion + renforcement CFRP 5 mm)	0.7	50.88	0.974
	0.9	81.41	1.558
	1.2	101.8	1.948
	2.4	305.3	5.843

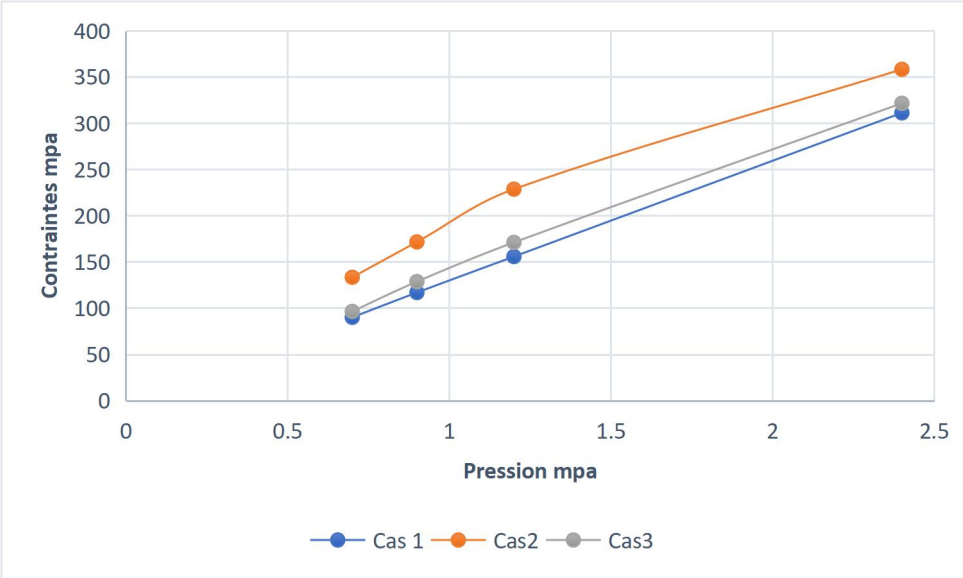


Figure 3.14: **Évolution de la contrainte maximale de Von Mises en fonction de la pression interne pour les trois cas étudiés**

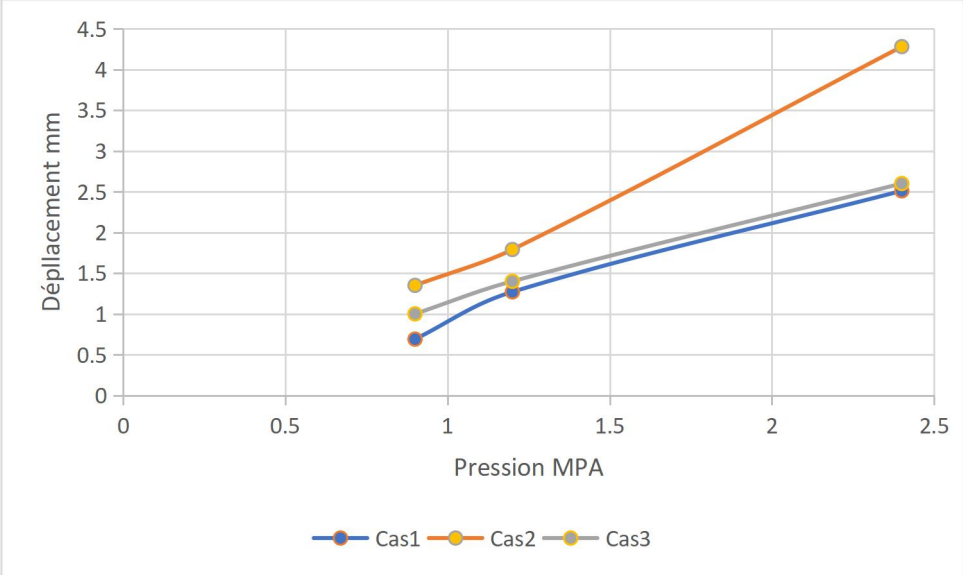


Figure 3.15 : **Évolution du déplacement maximal en fonction de la pression interne pour les trois cas étudiés**

Interprétation :

Les résultats montrent que l'augmentation de la pression interne entraîne une hausse progressive des contraintes de Von Mises et des déplacements pour les trois cas étudiés. La présence de corrosion provoque une augmentation des contraintes et des déformations en raison de la réduction locale de l'épaisseur, ce qui rend la structure plus vulnérable aux sollicitations mécaniques.

L'ajout d'un renforcement en CFRP permet de diminuer les contraintes et les déplacements par rapport au cas corrodé, grâce à une meilleure répartition des efforts et à une augmentation

de la rigidité de la structure. L'efficacité du renforcement devient plus marquée aux niveaux de pression élevés.

Ainsi, la corrosion détériore les performances mécaniques de la citerne, tandis que le renforcement par CFRP améliore sa résistance et limite les déformations, contribuant à prolonger sa durée de vie en service.

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, l'analyse des causes racines (RCA) a mis en évidence que la corrosion et la fatigue sont les principaux mécanismes responsables de la dégradation de la citerne de GPL.

Une étude numérique sous Abaqus a ensuite été réalisée afin d'évaluer l'effet de ces dégradations sur le comportement mécanique de la structure. Les résultats montrent que la corrosion augmente les contraintes et les déplacements, traduisant une diminution de la performance mécanique de la citerne.

Enfin, le renforcement par CFRP s'est révélé efficace en réduisant les sollicitations et en améliorant la rigidité globale de la structure. Ces résultats confirment l'intérêt de la combinaison RCA–simulation numérique pour l'analyse et l'amélioration de l'intégrité des réservoirs de GPL.

Bibliographie de chapitre 3

Abdi, Mohamed and Azzouzi, Lotfi Ahmed. 2019. "Analyse de l'effet de l'humidité Sur Le Comportement En Rupture Des Pipelines Réparés Par Patch En Composite." Université d'Oran 2 (Ahmed Ben Ahmed).

Autar K. Kaw. 2005. *Mechanics of Composite Materials*. 2nd Edition. Boca Raton.

BENACHOUR ABDERRAHMANE and AID MOHAMED. 2023. "ÉTUDE ET CONCEPTION D'UNE CITERNE SUR CAMION DE TRANSPORT DE GPL."

Berdji, Mohamed El Bachir and Gheribi, Noureddine. 2019. "Modélisation d'une Structure En Matériaux Isotropes Par La Méthode Des Éléments Finis." Université Kasdi Merbah Ouargla.

Bouleftour, Abderrahmane. 2014. "Evaluation d'éléments Finis Volumiques Dans ABAQUS Sur Des Cas Tests Non Linéaires Géométriques." Université Mohamed Khider – Biskra.

Bounouala, Nada and Mezaghchia, Amel. 2021. "La Faisabilité Du Polycarbonate Comme Un Nouveau Matériau Pour La Bouteille Du Gaz GPL." Université Badji Mokhtar - Annaba.

Choukha, Abd El Mounaim, and Taki Eddine Refis Taki Eddine Refis. 2021. "GPL, DEFINITIONS, GESTION ET PREVENTIONS." Memoire de master. UNIVERSITE Mostefa Ben Boulaïd – Batna 2.

Comagine Health. 2020. "Root Cause Analysis Process."

Commission Économique pour l'Europe (UNECE). 2023. "ADR 2023 : Accord Relatif Au Transport International Des Marchandises Dangereuses Par Route."

Corken. 2005. “LPG Accessories Sales Catalog(LPG600A).”

DJAARIRI, Ala, and Ouail BAKHOUCHE. 2024. “Analyse Du Comportement Mécanique Des Matériaux Composites.” memoire de master. ABBES LAGHROUR university.

Ewbank, Clifton, Shailvi Gupta, Barclay T. Stewart, Adam L. Kushner, and Anthony Charles. 2019. “A Systematic Review of Oil Tanker Truck Disasters: Identifying Prevention Targets.” *Burns* 45(4): 905–13.

Green Gas oil. “LBG Basic Principales and Practices.”

Green Gas oil. “LPG.”

Hammouya, Amel. 2021. “Contribution à l’amélioration Des Barrières de Sécurité Dans Un Système Industriel.” badji mokhtar annaba university.

Hammouya, Amel, and Rachid Chaib. 2020. “Human Factor: A Key Element in A Fire Safety System Of Hydrocarbon Storage Tank.” In *2020 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, IEEE, 1–10. doi:10.1109/ISCV49265.2020.9204292.

HAMMOUYA, Amel, Ali REDJIL, Wafia BENHAMLAOUI, and Rachid CHAIB. 2025. “Advanced Engineering Approach to Analyse Pipeline Failure Consequences.” In turkie.

IMEDOURENE, Salah Eddine, and Hakim. Ouahioune . 2021. “Etude et Conception d’une Citerne GPL/c 10 M3.”

Infraspeak. “Root Cause Analysis Tools: A Complete Guide.”

KHA Ouiam. 2022. “Production Du GPL/Unité de GLA-Haoud Berkaoui : Contraintes et Résolutions.”

lapesa. 2022.

Le Floch, R., P. J. Mahé, and P. Perrot. 2022. “Catastrophes Liées À Une Explosion De Camionciterne Entre 2000 Et 2020. Deux Groupes Distincts.” *Annals of Burns and Fire Disasters* 35(1): 3.

Le Floch, R. and Mahé, P.J. 2022. “Catastrophes Liées à Une Explosion de Camion-Citerne Entre 2000 et 2020. Deux Groupes Distincts.”

Mr.AMRANI Rabah, Nabil. 2011. “Transport Du Gaz de Pétrole Liquéfié Par Pipeline Application Au Projet « Skikda – Berrahal ».”

Okes, Duke. 2019. *Root Cause Analysis: The Core of Problem Solving and Corrective Action*. Quality Press. https://books.google.com/books?hl=ar&lr=&id=remPDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT6&dq=Root+Cause+Analysis+definition+thesis&ots=mBxe4Pi9ha&sig=KGwbuGu65ZSS8KGfEAvG1CO7HC4 (April 15, 2026).

OMAR NOUI. 2020. “DÉVELOPPEMENT D’UN MODÈLE DYNAMIQUE 3D POUR LA CONCEPTION DES CITERNES TRANSPORTANT DES LIQUIDES.” UNIVERSITÉ DU QUÉBEC.

Ozan Hikmet Arıcan and Ali Umut Ünal. 2025. “Risk Assessment in LPG and LNG Operation Processes in Maritime Transport: Delphi and Fault Tree Analysis Approach.”

REDJIL, Ali. 2026. “Data-Driven Condition-Based Maintenance for LNG Transport Systems via Pipeline.” ABBES LAGHROUR university.

Seshu, P. 2012. “Textbook of Finite Element Analysis.”

Sid Ali, Mahdi and Belgomri, Abderrahmane. 2020. “Contribution à l’optimisation de La Paroi d’une Citerne de Transport de GPL.”

SRAOUI, Oussama, and Ayoub AGDI. 2024. “Contributions à l’analyse des principales défaillances D’un système industriel (ventilateur industriel).” memoire de master. ABBES LAGHROUR university.

Tahar, LEDMI, MIMOUNE Zakaria, and Ala Eddine Mechri. 2026. “Failure Analysis of Road Tanker Transportation.” memoire. ABBES LAGHROUR university.

Tissot, Bernard. 2010. “Transport Des Hydrocarbures Par Canalisations.”

United nation. 2023. “Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR).”

Yousfi Alla Eddine, Chakri Mohamed Zine. 2019. “Procédé et Caractérisation Du GPL Au Niveau Du Champ MLE (Hassi Messaoud).”

Conclusion générale

La présente étude s'inscrit dans le cadre de l'optimisation structurale d'une citerne de transport de GPL, avec pour objectif l'amélioration de sa performance mécanique et de sa résistance aux sollicitations opérationnelles. L'approche développée vise à identifier les mécanismes de défaillance susceptibles d'affecter l'intégrité du réservoir et à proposer une solution de renforcement appropriée.

Afin d'atteindre cet objectif, une approche combinée a été adoptée. D'une part, une analyse des causes racines (RCA), appuyée par le diagramme d'Ishikawa, a permis d'identifier et de hiérarchiser les facteurs contribuant à la dégradation de l'intégrité de la citerne. D'autre part, une modélisation par éléments finis (MEF), réalisée sous Abaqus, a été utilisée pour évaluer la réponse mécanique de la structure sous différentes conditions de chargement, notamment l'influence de la pression interne sur les champs de contraintes et de déplacements, ainsi que l'efficacité d'un renforcement par matériau composite appliqué à la paroi.

Les résultats obtenus mettent en évidence que les mécanismes dominants de dégradation sont principalement associés à la corrosion et à la fatigue, en interaction avec des facteurs de conception, de fabrication, d'exploitation et environnementaux. Les simulations numériques montrent que l'augmentation de la pression interne induit une élévation significative des contraintes équivalentes ainsi que des déplacements structuraux. Par ailleurs, l'introduction d'un matériau composite en renforcement de la paroi entraîne une réduction notable des champs de contraintes et de déplacements, traduisant une amélioration du comportement mécanique global de la structure.

Ces résultats confirment la pertinence de l'approche de renforcement adoptée et démontrent l'efficacité du matériau composite dans l'amélioration de la tenue mécanique des citernes de transport de GPL.

Enfin, cette étude ouvre des perspectives de recherche relatives à l'optimisation d'autres architectures composites, à l'intégration de critères de rupture en fatigue, ainsi qu'à la validation expérimentale .