



# BIBLIOTHÈQUE

CÉGEP DE L'ABITIBI-TÉMISCAMINGUE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

## Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans [Depositum](#), site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

## Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives [Depositum](#), which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

**Analyse des défaillances mécaniques dans les systèmes industriels**

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

MOHAMED CHADI YAKOUBI

Décembre 2024

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué au succès de ce mémoire et m'ont soutenu tout au long de ce parcours.

Tout d'abord, je remercie sincèrement mon directeur de recherche, le Professeur **Hatem MRAD**, pour sa patience, sa disponibilité et ses précieux conseils, qui ont grandement enrichi ma réflexion. Je lui suis particulièrement reconnaissant pour son encadrement attentif et le temps qu'il a consacré à m'accompagner, en me fournissant les outils méthodologiques nécessaires à la réussite de ce projet.

Je souhaite également exprimer ma gratitude à l'équipe pédagogique de l'UQAT et à l'intervenant professionnel responsable de la maîtrise en ingénierie. Leur enseignement de qualité et leur engagement ont été des éléments clés de ma progression.

Mes remerciements s'adressent également aux représentants industriels de CANEX Aluminium et Norda Stelo pour l'accès aux ressources documentaires indispensables à la réalisation de ce travail.

Je remercie également les membres du jury pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de ce mémoire. Leurs observations rigoureuses ont été essentielles à sa finalisation.

Enfin, je dédie ce mémoire à ma famille, dont l'amour inconditionnel, le soutien et les nombreux sacrifices m'ont permis d'atteindre mes objectifs académiques. Leur confiance et leurs encouragements constants ont été une source inépuisable de motivation tout au long de mon parcours.

## DÉDICACE

Je dédie ce travail à toutes les personnes qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de ce parcours académique et professionnel.

À **ma grand-mère**, dont les souvenirs et l'amour continuent de m'accompagner chaque jour.

À **mon oncle**, parti trop tôt, mais dont l'influence bienveillante reste gravée en moi.

À **mes parents**, pour leur amour inconditionnel et leur soutien indéfectible. Maman, ta patience et ta sagesse m'ont inspiré dans les moments de doute. Papa, ta confiance en moi et tes encouragements m'ont toujours poussé à viser l'excellence.

À **mes sœurs**, pour leur complicité et leur soutien constant qui m'ont donné de la force dans les moments difficiles.

Enfin, à toute **ma famille** et à **mes proches**, dont la présence m'a apporté la force et la motivation nécessaires pour mener à bien ce travail.

# Table de matières

REMERCIEMENTS.....	i
DÉDICACE .....	ii
Table de matières .....	iii
Liste des figures .....	vi
Liste des tableaux.....	x
Liste des abréviations et symboles.....	xi
Résumé.....	xiii
1 Introduction.....	1
1.1 Introduction générale.....	1
1.2 Contexte de la recherche .....	2
1.3 Problématique.....	3
1.4 Hypothèses de recherche .....	5
1.4.1 Hypothèses pour la matrice d'extrusion d'aluminium.....	5
1.4.2 Hypothèses pour les défaillances mécaniques de la grue portuaire .....	6
1.5 Objectifs .....	8
1.5.1 Objectifs spécifiques à l'étude de la matrice d'extrusion d'aluminium ...	8
1.5.2 Objectifs spécifiques à l'étude de la grue portuaire.....	9
2 Contexte de base et revue de littérature .....	10
2.1 Cas d'étude 1 : Identification et analyse des défaillances dans une matrice d'extrusion d'aluminium .....	10
2.1.1 Contexte de base .....	10
2.1.2 Revue de la littérature .....	12

2.2	Cas d'étude 2 : Étude des défaillances mécaniques dans une grue portuaire	18
2.2.1	Contexte de base	18
2.2.2	Revue de la littérature	21
3	Méthodologies et démarches suivies	26
3.1	Analyse préliminaire et identification de la problématique	26
3.1.1	Cas d'étude 1	26
3.1.2	Cas d'étude 2	29
3.2	Méthodologie appliquée sur l'étude	31
3.2.1	Cas d'étude 1	31
3.2.2	Cas d'étude 2	33
4	Analyses et résultats	35
4.1	Défaillances dans une matrice d'extrusion d'aluminium	35
4.1.1	Analyse statique	35
4.1.2	Modélisation des fissurations par la méthode XFEM	43
4.1.3	Modélisation des fissurations par la méthode J intégrale	52
4.1.4	Étude de la fissuration et de leur propagation dans la matrice	57
4.2	Défaillance mécanique dans les grues portuaires	69
4.2.1	Analyse statique	69
4.2.2	Analyse avec pondération et combinaison des charges	100
4.2.3	Étude de fatigue	110
5	Conclusion générale	123
6	Perspectives	124

7	Références.....	125
---	-----------------	-----

## Liste des figures

Figure 1 Disposition schématique de la presse d'extrusion et de l'outillage [7].....	10
Figure 2 Concept de transformation de la billette chauffée en profilé par la matrice [7] .....	11
Figure 3 Fissures au niveau des coins et des arrondis [9] .....	14
Figure 4 Pourcentage de types de défaillance des 616 matrices [10].....	15
Figure 5 Fractures au niveau de la matrice [2].....	17
Figure 6 Processus de chargement et de déchargement des conteneurs .....	18
Figure 7 Les principaux composants de la grue portuaire .....	19
Figure 8 Localisation de fissure au niveau de la grue [19] .....	24
Figure 9 Zone de corrosion au niveau d'une des connexions de caisson [19].....	25
Figure 10 Matrice de l'étude via le partenaire industriel [20] .....	26
Figure 11 Fissures sur la matrice de l'étude et leur propagation [20].....	27
Figure 12 a) Dessin de la grue en 2D, b) Vue réel de la grue [19] .....	29
Figure 13 Géométrie de la matrice – a) Avant modification, b) Après modifications.....	35
Figure 14 Cycle de pression appliqué au cours de la simulation .....	36
Figure 15 Modélisation de la matrice sous les différentes charges.....	37
Figure 16 Vue en perspective du maillage de la matrice d'étude .....	38
Figure 17 Vues du plan normal de la matrice sous maillage .....	38
Figure 18 Résultats des contraintes de von Mises .....	39
Figure 19 Zoom des résultats des contraintes de von Mises.....	40
Figure 20 Contraintes de von Mises selon le Path créé .....	41
Figure 21 Courbe de contrainte en fonction de la distance.....	42
Figure 22 Exemples numériques en élastostatique bidimensionnelle plaque trouée, a) EF, b) XFEM [32].....	47
Figure 23 La croissance des fissures dans une plaque avec deux inclusions interactives.....	48
Figure 24 a) Maillage avec fissure, b) Maillage sans fissure.....	50
Figure 25 Les trois modes de chargement. a) Mode I, b) Mode II, c) Mode II .....	52
Figure 26 Système de coordonnées tridimensionnel des contraintes près du front de la fissure .....	53
Figure 27 a) Une intégrale de contour en 2D et b) une intégrale de contour fermée en 2D ...	54



Figure 28 a) Système de coordonnées locales, b) Intégrale de contour pour un front de fissure tridimensionnel général.....	57
Figure 29 la symétrie de la matrice et la section d'intérêt .....	58
Figure 30 Visualisation des zones de concentration des contraintes de l'analyse statique – a) Perspective, b) Topologique, c) Filaire .....	60
Figure 31 a) Courbe de déplacement au nœud critique, b) Nœud critique .....	61
Figure 32 L'insertion de la plaque rectangulaire pour initier la fissure .....	62
Figure 33 L'apparition des fissures et leurs propagations .....	63
Figure 34 a) Vue en perspective, b) Vue en zoom - de l'emplacement de la fissure.....	64
Figure 35 La direction d'extension de la fissure .....	65
Figure 36 Réglages de singularité et de la direction du vecteur .....	66
Figure 37 Résultats des itérations de propagation de fissure – a) 1ère itération, b) 2ème itération, c) 3ème itération, d) 4ème itération.....	67
Figure 38 L'endommagement identifié dans la matrice .....	68
Figure 39 Dimensions de la section S1 .....	69
Figure 40 Étapes d'assemblage de chaque sous-ensemble de la grue.....	70
Figure 41 Représentation semi-filaire du modèle .....	70
Figure 42 Vue de perspective détaillée du modèle .....	71
Figure 43 Schéma d'une section de la grue avec les renforts internes .....	72
Figure 44 Configuration du maillage sous SolidWorks .....	73
Figure 45 Configuration du maillage sous Abaqus.....	74
Figure 46 Définition des interactions avec la discrétisation Surface-To-Surface .....	75
Figure 47 Charge de levage appliqué au niveau de la flèche .....	77
Figure 48 Résultat de l'analyse statique au niveau de la flèche sous Abaqus, zone supérieure de la grue.....	78
Figure 49 Résultat de l'analyse statique au niveau de la flèche sous Abaqus, zone inférieure de la grue.....	79
Figure 50 Résultat de l'analyse statique au niveau de la flèche sous SolidWorks, zone supérieure de la grue .....	80
Figure 51 Résultat de l'analyse statique au niveau de la flèche sous SolidWorks, zone inférieure de la grue.....	81

Figure 52 Charges des poulies et des équipements du chariot.....	82
Figure 53 Charge du système de dépoussiérage .....	83
Figure 54 Charges des systèmes hydrauliques et électriques.....	83
Figure 55 Charges du système de convoyeur.....	84
Figure 56 Contraintes von Mises au résultat du scénario 2 pour la partie supérieure de la grue – a) Abaqus, b) SolidWorks.....	85
Figure 57 Contraintes von Mises au résultat du scénario 2 pour la partie inférieure de la grue - a) Abaqus, b) SolidWorks.....	86
Figure 58 Charge de neige .....	87
Figure 59 Charge de vent sur la partie supérieure de la grue.....	88
Figure 60 Charge de vent sur les éléments du système de levage .....	88
Figure 61 Charge de vent sur le deuxième niveau de la grue .....	89
Figure 62 Charge de vent sur la base de la grue .....	89
Figure 63 Contraintes von Mises au résultat du scénario 3 pour la partie supérieure de la grue, Abaqus .....	90
Figure 64 Contraintes von Mises au résultat du scénario 3 pour la partie supérieure de la grue, SolidWorks .....	91
Figure 65 Visualisation des résultats en déplacement U – a) Zone 1, b) Zone 2.....	93
Figure 66 Traverse supérieure – a) avant modification, b) après modification .....	95
Figure 67 Connexions des poutres avant et après modification.....	95
Figure 68 Contreventement arrière – a) avant modification, b) après modification .....	96
Figure 69 Contraintes von Mises au résultat du scénario 3 pour la partie supérieure de la grue après modification, Abaqus.....	98
Figure 70 Contraintes von Mises au résultat du scénario 3 pour la partie supérieure de la grue, SolidWorks .....	99
Figure 71 Résultats de simulation de $1.2D+0.4W+1.4C$ de <b>S1V3</b> au niveau des connexions sous les haubans.....	105
Figure 72 Résultats de simulation de $1.2D+0.4W+1.4C$ de <b>S1V3</b> au niveau de la traverse supérieure.....	106
Figure 73 Résultats de simulation de $1.2D+0.4W+1.4C$ de <b>S2V3</b> au niveau des connexions sous les haubans.....	107

Figure 74 Résultats de simulation 1.2D+0.4W+1.4C de <b>S2V3</b> au niveau de la traverse supérieure.....	108
Figure 75 Résultats de simulation de 1.2D+0.4W+1.4C de <b>S3V3</b> au niveau de la traverse supérieure.....	109
Figure 76 Zone de concentration de contraintes au niveau de la traverse supérieure.....	109
Figure 77 Modèles de fatigue [43].....	114
Figure 78 Les différentes zones de fatigue selon la courbe de Wöhler [44].....	116
Figure 79 Types de chargement selon le rapport de fatigue [44].....	117
Figure 80 Les contraintes alternées en fonction du nombre de cycles.....	118
Figure 81 Résultat de fatigue sous FE-Safe.....	119
Figure 82 Résultat de fatigue au niveau de la grue sous Abaqus.....	120
Figure 83 Vue en perspective 1 de la zone susceptible à la fatigue.....	120
Figure 84 Vue en perspective 2 de la zone susceptible à la fatigue.....	121

## Liste des tableaux

Tableau 1 Propriétés mécaniques de l'Acier H13 [8].....	13
Tableau 2 Coefficient de dilatation thermique en fonction de la température [8] .....	13
Tableau 3 Conductivité thermique en fonction de la température [8].....	13
Tableau 4 Propriétés de matériau selon le grade [12].....	21
Tableau 5 Valeurs de KI normalisées .....	45
Tableau 6 Valeurs de KII normalisées .....	45
Tableau 7 Scénarios possibles .....	102
Tableau 8 Vitesses de vents possibles.....	102
Tableau 9 Combinaisons possibles .....	102
Tableau 10 Caractérisation des paramètres influant à la fatigue sur les éléments de la grue [42] .....	113
Tableau 11 Les valeurs spécifiques de la contrainte alternée $\sigma_a$ .....	117

## Liste des abréviations et symboles

Symbole	Unité	Définition
$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	Masse volumique
E	GPa	Module élastique
$\nu$	0,3	Coefficient de Poisson
$R_e$	MPa	Limite d'élasticité
$R_m$	MPa	Résistance à la traction
$\gamma$	W/m K	Conductivité thermique
XFEM	-	Méthode des éléments finis étendus
EF	-	Éléments finis
T	K - °C	Température
GFEM	-	Méthode des éléments finis généralisés
$u^h$	-	Approximation par éléments finis pour le maillage
$N_i$	-	Fonction de forme
$u_i$	-	Vecteur de déplacement
$H(x)$	-	Fonction de saut discontinue
$K_I, K_{II}$ et $K_{III}$	-	Facteurs d'intensité des contraintes
$r$	-	Distance de la pointe de la fissure
$\alpha$	-	Angle par rapport à la pointe de la fissure
$\Gamma$	-	Contour autour de la pointe de la fissure
$d$	-	Incrément d'arc
$n$	-	Normale extérieure du contour
$q$	-	Vecteur unitaire dans la direction d'extension virtuelle de la fissure
$W$	-	L'énergie de déformation élastique
$I$	-	Tenseur identité
$\sigma$	-	Tenseur des contraintes de Cauchy
$u$	-	Vecteur de déplacement
$C_+$ et $C_-$	-	Contours le long des faces de la fissure
$t$	-	Traction sur les surfaces de la fissure
A	-	Domaine de l'aire par un contour fermé
$dA$	-	Segment d'aire infinitésimale
$\epsilon^m$	-	Déformation mécanique
$f$	-	Force corporelle par unité de volume
$\bar{J}$	-	Segment fini du front de fissure
$U_{xfem}$	-	Vecteur d'approximation du déplacement
$I^{cut}$	-	Ensembles de nœuds élémentaires entourant la face de la fissure

$I^{tip}$	-	Ensembles de nœuds élémentaires entourant la pointe de la fissure
$u_i$	-	Degrés de liberté de déplacement nodaux conventionnels pour les nœuds non enrichis
$H(x)$	-	Fonction discontinue de Heaviside
$a_i$	-	Vecteur de degrés de liberté enrichis associé avec la fonction de Heaviside
$b_i^k$	-	Vecteur de degrés de liberté enrichis associé avec l'enrichissement de la pointe de la fissure
$S$	$mm^2$	La superficie de la surface concernée
$CH_p$	Pa	Charge de vent
$CH_N$	Pa	Charge de neige
$\alpha_D$	-	Coefficient de pondération pour la charge permanente
$\alpha_L$	-	Coefficient de pondération pour la surcharge d'utilisation
$\alpha_W$	-	Coefficient de pondération pour la charge de vent
$\alpha_T$	-	Coefficient de pondération pour la charge thermique
$v_r$	Km/h	Vitesse de référence
$v_m$	Km/h	Vitesse maximale
$f_{sr}$	MPa	Étendue de contrainte due aux charges appliquées
$F_{sr}$	MPa	Résistance à la fatigue exprimée en termes d'écart de contrainte
$F_{srt}$	MPa	Seuil de fatigue à amplitude constante
$\sigma_a$	MPa	Contrainte alternée
$\sigma_e$	MPa	Limite d'endurance
$\sigma_m$	MPa	Contrainte moyenne
$\sigma_u$	MPa	Contrainte ultime
$R$	-	Rapport de fatigue
$FS$	-	Facteur de sécurité

## Résumé

Cette recherche s'attache à l'analyse et à la prévention des défaillances mécaniques dans le but d'améliorer la durée de vie et l'efficacité des équipements industriels, qui sont aspects essentiels pour la sécurité et la compétitivité dans les environnements industriels.

Elle est structurée autour de deux études de cas principales. La première se concentre sur les matrices d'extrusion d'aluminium, où sont examinés les causes et les impacts des défaillances, notamment les fissures et l'usure. L'objectif est d'améliorer la durée de vie des matrices et d'augmenter leur performance grâce à un contrôle optimisé des conditions opérationnelles et à une conception plus fiable, afin de réduire les interruptions de production et d'augmenter la qualité des produits finis. La seconde étude porte sur les défaillances mécaniques des grues portuaires, avec un accent particulier sur les défis de maintenance posés par les charges dynamiques et les conditions environnementales extrêmes. Cette partie explore l'importance de la maintenance prédictive pour prévenir les risques liés à la sécurité et améliorer la durée de vie des équipements.

En conclusion, cette recherche vise à analyser des mécanismes de défaillance dans les systèmes industriels, tout en proposant des stratégies pratiques pour renforcer la maintenance et optimiser la conception des équipements. Ces contributions visent à accroître la sécurité, la fiabilité et l'efficacité des opérations industrielles.

### Mots clés :

Défaillances mécaniques; Équipements industriels; maintenance prédictive; durée de vie; fiabilité des équipements; efficacité des opérations

# **1 Introduction**

## **1.1 Introduction générale**

Dans le monde industriel moderne, chaque défaillance mécanique représente un enjeu. Un enjeu de contraintes extrêmes, de matériaux poussés à leurs limites et de systèmes complexes où chaque composant joue un rôle critique dans un ensemble de mécanismes parfaitement synchronisés. Lorsqu'une défaillance mécanique survient, les conséquences sont immédiates : baisse de productivité, risques accrus pour la sécurité, et augmentation des coûts d'exploitation. Mes recherches se sont donc inscrites dans ce contexte exigeant, en s'attachant à analyser les mécanismes et les sollicitations progressives qui, au fil du temps, dégradent les performances des systèmes industriels.

Mon travail se concentre sur deux systèmes industriels majeurs : les matrices d'extrusion d'aluminium, éléments clés dans la production de profilés métalliques, et les grues portuaires, structures critiques dans les chaînes logistiques mondiales. Bien que statiques en apparence, ces systèmes présentent des défis techniques considérables : améliorer la durée de vie des matrices soumises à des contraintes extrêmes tout en maintenant la qualité de l'extrusion et prévenir les défaillances structurelles des grues portuaires, soumises à des conditions environnementales sévères et à des charges dynamiques répétées, qui compromettent leur intégrité au fil du temps.

Mes recherches, basées sur des simulations numériques avancées et des analyses structurelles, visent à identifier et à comprendre les mécanismes de dégradation progressive. Au-delà de l'analyse descriptive, elles visent à proposer des solutions concrètes pour améliorer la résilience et la durée de vie de ces systèmes. En adoptant une approche préventive et prédictive, ces travaux contribuent à un futur où la fiabilité des équipements industriels devient la norme et qui garantit des opérations sûres et durables à long terme.



## 1.2 Contexte de la recherche

De nos jours, la robustesse des systèmes mécaniques n'est plus simplement un objectif souhaitable, mais une exigence fondamentale pour garantir des opérations continues et sécurisées. Pourtant, même les équipements les plus avancés sont soumis à des contraintes extrêmes qui finissent par les user. Qu'il s'agisse des contraintes thermomécaniques qui déforment les matrices d'extrusion d'aluminium ou des forces dynamiques et corrosives qui rongent les structures des grues portuaires, chaque système est constamment mis à l'épreuve. Dans ces conditions extrêmes, la capacité des équipements à maintenir des performances optimales sans défaillance devient un facteur déterminant pour la continuité des opérations. Une seule défaillance peut initier une chaîne de conséquences, allant de perturbations sévères des flux de production à des interventions de maintenance complexes, tout en exposant les opérateurs à des risques accrus.

Les matrices d'extrusion pour la production de profilés métalliques subissent des cycles thermomécaniques qui favorisent l'apparition de fissures et d'autres formes de dégradations. Ces défauts compromettent la qualité du produit et l'efficacité de tout le processus industriel. Simultanément, les grues portuaires, exposées à des conditions environnementales externes et à des charges variables, voient leur structure progressivement affaiblie par des phénomènes de fatigue et de corrosion. L'intégrité structurelle de ces grandes infrastructures métalliques est directement liée à la sécurité des opérations portuaires qui affectent l'efficacité et la continuité des chaînes logistiques mondiales.

Face à ces défis et grâce à l'utilisation d'outils de simulation numérique et d'analyses structurelles précises, mes recherches s'attaquent aux mécanismes complexes de dégradation en identifiant les points faibles avant qu'ils ne deviennent critiques. En élaborant des stratégies de maintenance prédictive et en optimisant les conceptions, ce projet a pour objectif de redéfinir les approches d'anticipation et de gestion des

défaillances, en favorisant un environnement industriel où la durée de vie des équipements doit être optimisée pour réduire la fréquence des arrêts imprévus.

### **1.3 Problématique**

Dans cette étude, nous présentons deux cas d'étude illustrant l'importance de la maintenance préventive et de l'optimisation des équipements industriels pour garantir leur efficacité et leur sécurité. Le premier cas se concentre sur les matrices d'extrusion d'aluminium, tandis que le second explore les défaillances mécaniques dans les grues portuaires.

Dans le premier cas, intitulé " Identification et analyse des défaillances dans une matrice d'extrusion d'aluminium", l'évolution des processus industriels et la recherche d'efficacité des outils dans le domaine de la conception et de la performance des matrices d'extrusion présentent un défi important. La matrice est l'élément essentiel du processus d'extrusion en raison de son coût élevé, de ses tolérances dimensionnelles strictes et de sa capacité à résister à des contraintes thermomécaniques récurrentes. La précision et la durée de vie des matrices sont essentielles pour garantir une qualité supérieure des profilés et minimiser les interruptions opérationnelles, ce qui fait de l'intégrité des matrices un facteur clé de l'efficacité du processus d'extrusion. Les problèmes liés aux matrices peuvent être atténués en contrôlant la qualité des billettes et les paramètres de ce processus. De nombreux problèmes courants des matrices sont réparables et sont résolus par diverses opérations de correction des matrices. Cependant, après une certaine période, les corrections deviennent impraticables et la matrice doit être remplacée. Les raisons courantes de défaillance des matrices incluent les fissures, l'usure, l'écaillage, la déformation, la fracture et l'érosion. X. Duan et al. [1] ont exploré l'utilisation de la méthode des éléments finis dans le contexte de l'extrusion à chaud des alliages d'aluminium, tandis que S. Akhtar and A. Arif [2] ont étudié les effets des paramètres du processus et des caractéristiques de conception sur la durée de vie des matrices. Ces études ont souligné la complexité de la performance des matrices, prenant en compte divers facteurs tels que les caractéristiques des

matériaux et les éléments de conception complexes. La réduction des défauts des matrices diminue significativement les taux de rejet, augmente la productivité et réduit les coûts globaux. Dans cette étude, la recherche de l'extension de la durée de vie des matrices d'extrusion devient un défi majeur. De nombreuses études ont fourni des informations substantielles sur la propagation et le comportement des fissures dans les matrices d'extrusion, offrant une voie vers une amélioration des méthodologies de conception et de fonctionnement. N. R. E. G. Lim et al. [3] ont mené une analyse par éléments finis pour étudier les divers facteurs impactant la propagation des fissures dans les matrices sous des conditions de charges thermomécaniques. Dans l'étude de K. Chantziara et al. [4], deux segments d'acier H13 de matrices ont été choisis, avec les principales sources de fatigue mécanique et thermique. Face à ces obstacles, la problématique centrale de notre étude se focalise sur l'amélioration du processus d'extrusion et réduire les défaillances des matrices afin de diminuer les rejets de métal.

Le second cas, intitulé " Étude des défaillances mécaniques dans une grue portuaire" aborde les enjeux liés à la maintenance des grues portuaires, qui sont composées de plusieurs processus logistiques interconnectés, depuis l'arrivée d'un navire porte-conteneur jusqu'à la livraison des conteneurs dans la zone de stockage, et vice versa. Sous l'effet de charges d'impact à long terme, les conditions mécaniques de la grue peuvent se détériorer, entraînant diverses défaillances. Des problèmes tels que des dysfonctionnements opérationnels du roulement de pivotement, des fissures et des déformations dans la structure métallique peuvent survenir, posant des risques de sécurité importants pour l'équipement et les opérateurs comme présenté dans les travaux de R. L. Neitzel et al. [5]. Les facteurs environnementaux et opérationnels, notamment les variations de température et les conditions de charge, influencent la réponse dynamique des structures et ne doivent pas être sous-estimés. Ces conditions variables peuvent parfois masquer des changements structurels plus subtils indiquant des dommages. De plus, avec les changements climatiques potentiels, il devient important de réviser les données sur les vitesses de vent extrêmes et les charges de

tempête sur les structures comme dans les travaux de H. Sohn et al. [6]. Le problème qui se pose est de savoir comment les grues portuaires peuvent maintenir leur intégrité structurelle et assurer la sécurité des opérations sous l'effet des charges dynamiques et des conditions environnementales variables, en tenant compte des incertitudes et des besoins en maintenance prédictive.

## **1.4 Hypothèses de recherche**

### **1.4.1 Hypothèses pour la matrice d'extrusion d'aluminium**

Dans le cadre de cette étude, nous examinons divers facteurs susceptibles d'influencer la durée de vie et l'efficacité des matrices d'extrusion d'aluminium. À travers une série d'hypothèses, nous cherchons à déterminer les relations causales entre la conception des matrices, les propriétés des matériaux utilisés, les paramètres du processus d'extrusion, et les stratégies de maintenance préventive. Ces hypothèses sont formulées sur la base des observations préliminaires et de la littérature existante, et elles guideront les simulations numériques et les analyses qui suivront. En validant ou en réfutant ces hypothèses, nous visons à apporter des améliorations à la compréhension des mécanismes de défaillance, tout en proposant des solutions pour augmenter la durée de vie des matrices et optimiser le processus d'extrusion. Les résultats escomptés devraient non seulement contribuer à la théorie et à la pratique dans le domaine de l'extrusion d'aluminium, mais aussi fournir des directives pratiques pour l'optimisation de la conception et pour la maintenance des matrices.

- **Hypothèse 1** : Influence des propriétés matérielles sur la résistance à la fatigue des matrices. Les matrices d'extrusion en acier H13, en raison de leurs propriétés supérieures de résistance à la chaleur et à la corrosion, présentent une meilleure résistance à la fatigue thermique et mécanique comparativement à d'autres alliages utilisés dans des conditions similaires.
- **Hypothèse 2** : Impact de la conception de la matrice sur la propagation des fissures : Les conceptions de matrice qui intègrent des transitions géométriques

optimisées réduisent significativement la concentration de contraintes et, par conséquent, la propagation des fissures par rapport à des conceptions conventionnelles.

- **Hypothèse 3 :** Efficacité de la maintenance préventive dans la réduction des défaillances : Un programme de maintenance préventive basé sur le suivi régulier des conditions thermomécaniques et des inspections détaillées des matrices peut réduire les taux de défaillance comparativement à des programmes standards.
- **Hypothèse 4 :** Influence des paramètres du processus d'extrusion sur la durée de vie des matrices : Les variations contrôlées de la température et de la vitesse d'extrusion contribuent à optimiser la durée de vie des matrices en minimisant les effets néfastes des cycles thermomécaniques répétitifs.
- **Hypothèse 5 :** Rôle de la qualité des billettes sur l'intégrité des matrices : L'utilisation de billettes de haute qualité avec une homogénéité améliorée et des impuretés réduites améliore la durée de vie des matrices en diminuant les contraintes internes lors de l'extrusion.
- **Hypothèse 6 :** Avantages de l'utilisation de la méthode des éléments finis étendus (XFEM) : L'application de la méthode des éléments finis étendus (XFEM) pour la modélisation des fissures dans les matrices d'extrusion sur Abaqus permet une prédiction plus précise des zones critiques de défaillance et afin d'optimiser la géométrie de la matrice.

#### **1.4.2 Hypothèses pour les défaillances mécaniques de la grue portuaire**

Pour explorer les mécanismes sous-jacents des défaillances mécaniques dans les grues portuaires, des hypothèses sont construites sur la base d'observations préliminaires, d'analyses de données historiques et de revues de la littérature existante. Elles visent à identifier les facteurs critiques qui influencent la durée de vie et la fiabilité des grues, y compris les impacts de la corrosion, de la fatigue, des conditions environnementales

et des stratégies de maintenance. Par l'examen de ces hypothèses à travers des simulations et des analyses empiriques, cette recherche aspire à fournir des recommandations concrètes pour améliorer soit la conception, les opérations et la maintenance des grues portuaires. En validant ces hypothèses, l'étude vise à contribuer à la littérature sur les infrastructures portuaires et à la pratique de l'ingénierie, en offrant des solutions pour protéger les systèmes de levage au sein des structures portuaires.

- **Hypothèse 1 : Impact de la corrosion et de la fatigue sur l'intégrité structurelle des grues portuaires :** La corrosion et la fatigue mécanique sont les principaux facteurs contribuant aux défaillances structurelles des grues portuaires, réduisant leur durée de vie opérationnelle par rapport aux prévisions initiales basées sur des conditions de service idéales.
- **Hypothèse 2 : Efficacité des stratégies de maintenance prédictive :** L'adoption de stratégies de maintenance prédictive, basées sur des analyses régulières des données de contrainte et des inspections visuelles, diminue la probabilité de défaillances imprévues et augmente la durée de vie des grues portuaires.
- **Hypothèse 3 : Influence des facteurs environnementaux sur la performance des grues :** Les variations climatiques, notamment les températures extrêmes et les charges de vent, influencent directement la réponse dynamique des grues portuaires, entraînant une augmentation des risques de défaillance sous des charges opérationnelles normales.
- **Hypothèse 4 : Comparaison des modèles de simulation dans la prévision des défaillances :** Les modèles de simulation numérique réalisés avec Abaqus et SolidWorks fournissent des prévisions plus précises des zones de haute contrainte et des risques de défaillance en raison de leur capacité supérieure à modéliser les interactions complexes entre les matériaux et les charges.

## **1.5 Objectifs**

Ce projet se concentre sur l'analyse des mécanismes de défaillance dans des contextes industriels critiques, à travers deux études distinctes, mais complémentaires. La première étude, intitulée "Identification et analyse des défaillances dans une matrice d'extrusion d'aluminium", vise à démêler les causes principales des fissures et leur propagation dans les matrices utilisées pour l'extrusion d'aluminium, en employant des simulations par éléments finis pour aligner les observations théoriques avec les résultats expérimentaux. La seconde étude, "Étude des défaillances mécaniques dans une grue portuaire", explore l'utilisation des technologies de simulation numérique pour renforcer la stabilité et la sécurité des grues portuaires, en développant un système de surveillance intelligent qui intègre la maintenance prédictive pour anticiper et prévenir les défaillances. Ces deux axes de recherche illustrent un engagement envers l'amélioration de la fiabilité et de l'efficacité des équipements industriels, avec des objectifs visant à renforcer la conception, la surveillance, et la maintenance à travers des innovations technologiques et analytiques.

### **1.5.1 Objectifs spécifiques à l'étude de la matrice d'extrusion d'aluminium**

- Comprendre les causes principales des fissures et leur propagation dans les matrices d'extrusion d'aluminium en utilisant la méthode des éléments finis.
- Comparer les résultats numériques des simulations des éléments finis avec les données expérimentales pour vérifier la corrélation entre les positions des fissures identifiées et les schémas de propagation observés.
- Développer une méthodologie d'analyse numérique pour optimiser la conception des matrices d'extrusion afin de réduire les défaillances et améliorer la durabilité et l'efficacité opérationnelle des matrices.

### **1.5.2 Objectifs spécifiques à l'étude de la grue portuaire**

- Analyser la stabilité structurelle des grues portuaires à l'aide de simulations numériques par éléments finis (FEA) dans des conditions météorologiques extrêmes et sous diverses charges opérationnelles.
- Proposer un schéma d'instrumentation basé sur les résultats des simulations FEA, incluant l'installation de capteurs pour mesurer en temps réel les contraintes, déformations, et déplacements.
- Développer et implémenter un système de surveillance intelligent pour les grues portuaires qui utilise des données en temps réel pour détecter les anomalies structurelles et prévenir les risques de défaillance.
- Exploiter la maintenance prédictive à travers le système de surveillance développé pour améliorer la surveillance de l'état des grues et optimiser les opérations de levage portuaire.



## 2 Contexte de base et revue de littérature

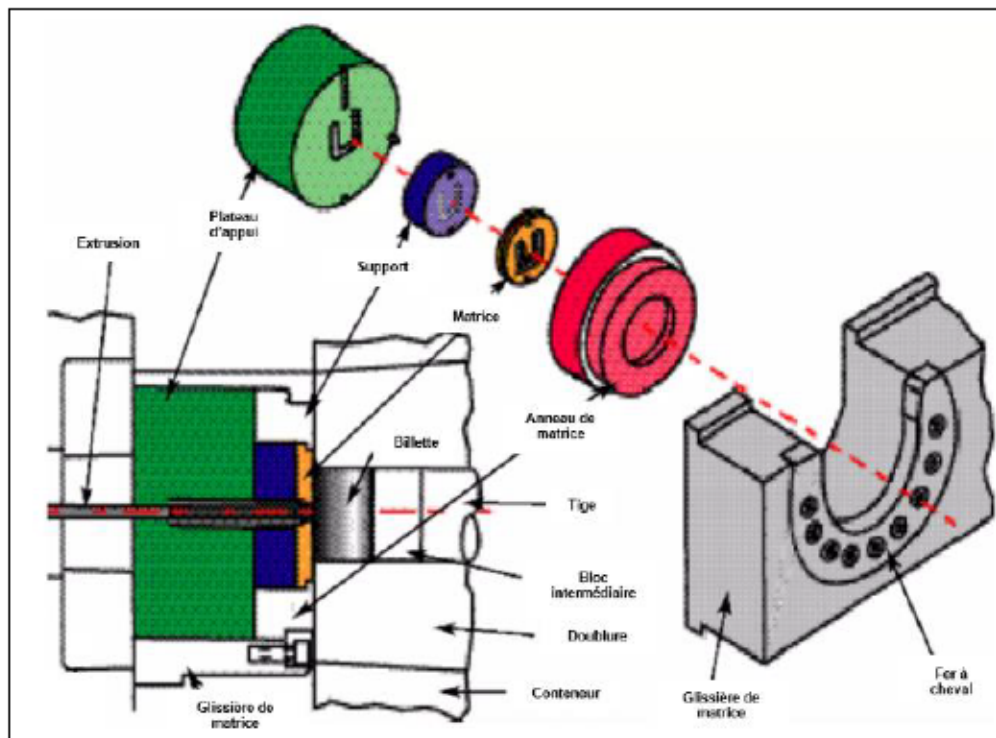
### 2.1 Cas d'étude 1 : Identification et analyse des défaillances dans une matrice d'extrusion d'aluminium

#### 2.1.1 Contexte de base

##### 2.1.1.1 Le procédé d'extrusion d'aluminium

L'extrusion est une méthode de fabrication couramment utilisée pour produire des pièces métalliques avec une section transversale constante et une longueur variable. Ce procédé consiste à chauffer des billettes de métal à une température bien déterminée, puis à le pousser à travers une matrice pour obtenir la forme souhaitée. La

Figure 1 décrit ce processus en identifiant les différents équipements de la presse

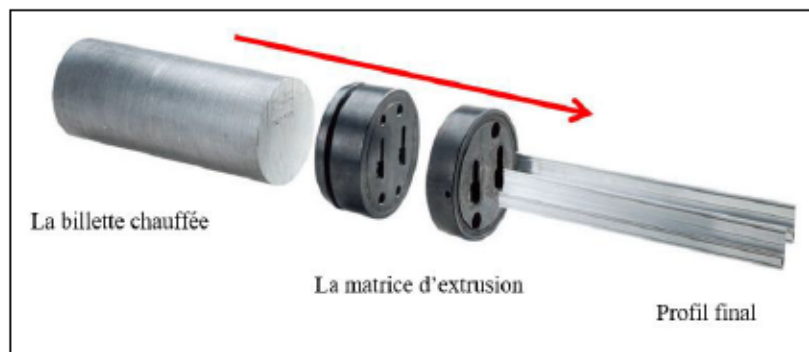


d'extrusion.

Figure 1 Disposition schématique de la presse d'extrusion et de l'outillage [7]

La billette, matériau de base, est placée dans le conteneur, maintenu par une doublure pour éviter l'usure. La tige applique une force sur le bloc obturateur, qui transmet cette pression à la billette sans contact direct. La billette est ensuite poussée à travers la matrice, qui donne sa forme finale au profilé extrudé. La matrice est stabilisée par un anneau de matrice, un support arrière et une butée, qui absorbent les charges élevées. Les glissières de matrice permettent d'installer ou de retirer la matrice facilement. Enfin, le fer à cheval stabilise la presse pendant l'extrusion ce qui un processus précis et efficace.

La matrice peut être conçue pour produire des profilés de différentes formes, telles que des barres, des tubes et des profilés en U, en L, etc. La Figure 2 présente implicitement le concept général d'obtention de profilé à partir d'une billette d'aluminium.



**Figure 2 Concept de transformation de la billette chauffée en profilé par la matrice [7]**

L'extrusion peut se faire à chaud ou à froid, selon les besoins et les caractéristiques du matériau et donc on trouve deux types d'extrusion, à chaud et à froid.

### **2.1.1.2 Les types d'extrusion d'aluminium**

Deux types d'extrusion sont mis en jeu, l'extrusion à froid est réalisée à température ambiante ou à des températures légèrement élevées, où le matériau est poussé à travers une filière pour obtenir la forme souhaitée sans nécessiter de chauffage préalable. Ce processus est principalement utilisé pour les métaux ferreux tels que l'acier et l'acier

inoxydable. En revanche, l'extrusion à chaud implique de chauffer le matériau à une température élevée pour le rendre suffisamment ductile et facile à travailler. La température de chauffe varie en fonction du type de métal utilisé et de la forme à obtenir. Une fois chauffé, le matériau est poussé à travers une filière pour obtenir la forme souhaitée. L'extrusion à chaud est généralement utilisée pour les métaux non ferreux tels que l'aluminium, le cuivre et le magnésium, permettant de travailler les métaux avec plus de facilité et de précision, car le matériau devient plus ductile à haute température. Elle permet également d'obtenir des formes plus complexes et de meilleurs états de surface. Cependant, ce procédé est plus coûteux en termes de consommation d'énergie et de temps de cycle de production par rapport à la méthode d'extrusion à froid.

## **2.1.2 Revue de la littérature**

### **2.1.2.1 Propriétés des matériaux**

Les alliages à base de nickel sont privilégiés pour les matrices nécessitant une grande résistance à la corrosion et capables de supporter des températures élevées. Tandis que, les alliages à base de cuivre, tel que le laiton et le bronze, sont souvent utilisés pour les matrices d'extrusion destinées aux matériaux ayant un bas point de fusion. D'autre part, les aciers à outils, comme les aciers H13, A2, D2 et M2, sont largement utilisés en raison de leur excellente résistance à la chaleur, leur dureté et leur grande résistance à l'usure et ces matériaux offrent des performances optimales pour diverses applications d'extrusion assurant l'efficacité du processus.

Le matériau de la matrice étudiée est l'acier H13. Le H13 est un acier allié à haute teneur en carbone et en chrome, reconnu pour ses propriétés exceptionnelles de résistance à la chaleur, à l'usure et à la corrosion. Il est couramment utilisé dans des applications nécessitant une grande résistance à la chaleur, telle que les moules pour l'industrie de la fonderie, les matrices pour l'extrusion d'aluminium et les outils pour la transformation des métaux à chaud. Connu également sous les désignations 1.2344 ou

SKD61 selon les normes internationales, le H13 offre des performances optimales dans des environnements exigeants. Les caractéristiques mécaniques et thermiques de l'acier H13 utilisées dans cette étude sont spécifiées dans les tableaux ci-dessous :

Propriété	Valeur
Masse volumique $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	7.8
Module élastique E (GPa)	210
Coefficient de Poisson $\nu$	0.3
Limite d'élasticité $R_e$ (MPa)	1230
Résistance à la traction $R_m$ (MPa)	1430

**Tableau 1 Propriétés mécaniques de l'Acier H13 [8]**

Température (°C)	Coefficient de dilatation (1/K x 10 <sup>-6</sup> )
294 – 366	10.4
294 – 477	11.3
294 – 589	12.4
294 – 700	13.1
294 – 811	13.5

**Tableau 2 Coefficient de dilatation thermique en fonction de la température [8]**

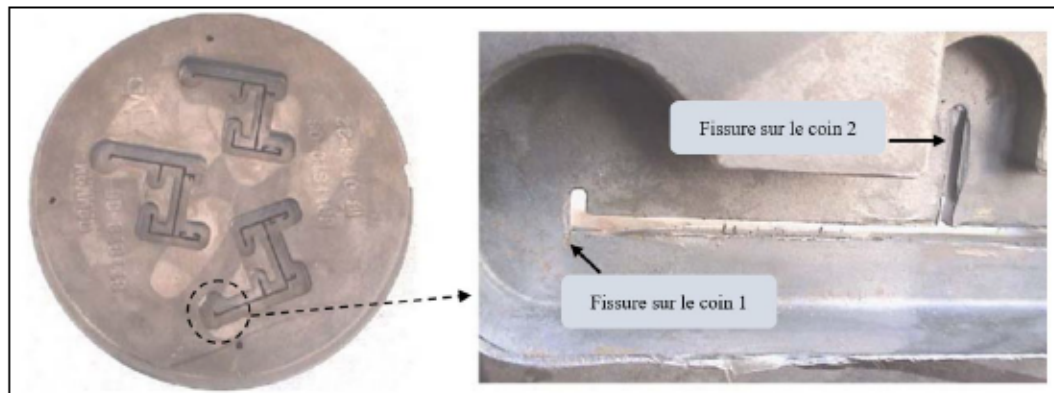
Conductivité thermique $\gamma$ (W/m K)	Température (K)
24.3	488.15
24.4	623.15
24.3	748.15
24.7	878.15

**Tableau 3 Conductivité thermique en fonction de la température [8]**

### 2.1.2.2 Types de défaillances dans les matrices d'extrusion

L'étude menée par B. Yilbas et al. [9] explique comment l'utilisation répétée de billettes recyclées, qui tendent à être plus résistantes à l'écoulement durant l'extrusion, peut induire des contraintes et déformations supplémentaires dans les matrices. À travers des analyses microstructurales et de simulations par éléments finis, ils démontrent que

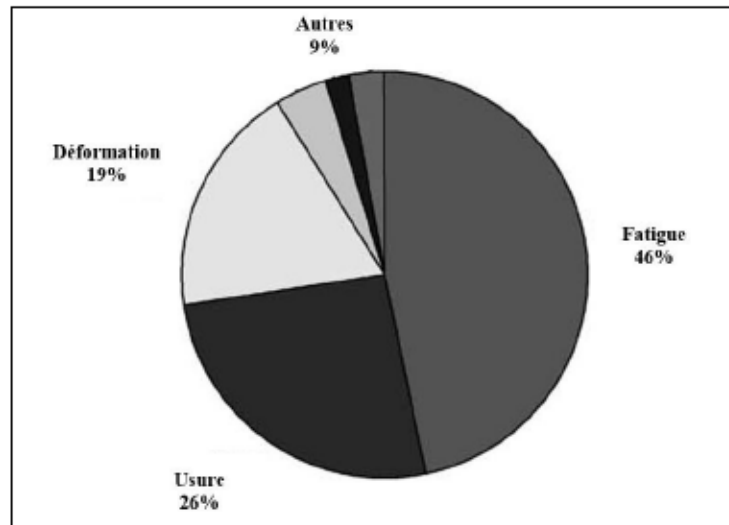
les billettes secondaires résistent davantage à l'écoulement durant le cycle d'extrusion, résultant en des contraintes et déformations accrues au niveau des zones critiques de la matrice, comme illustrée dans la Figure 3.



**Figure 3 Fissures au niveau des coins et des arrondis [9]**

Cette figure montre clairement une matrice d'extrusion échouée, avec des régions critiques de défaillance telles que des fissures au niveau des coins et des arrondis, soulignant les défis posés par l'utilisation de matériaux recyclés dans des processus d'extrusion. L'analyse des modes de défaillance par A. Arif et al. [10] révèle des découvertes clés concernant les modes de défaillance la plus courante, qui sont essentielles pour améliorer l'efficacité de ces processus d'extrusion à chaud. Leur étude repose sur l'analyse de 616 échecs de matrices utilisées pour extruder des profils structuraux en aluminium Al-6063 dans une configuration industrielle locale. Les auteurs découvrent que la fatigue, causée par les contraintes mécaniques et thermiques répétées, est le mode de défaillance le plus fréquent, représentant 46% des cas, suivi par l'usure (26%) et la déformation (19%). Cette distribution des modes de défaillance est illustrée dans la

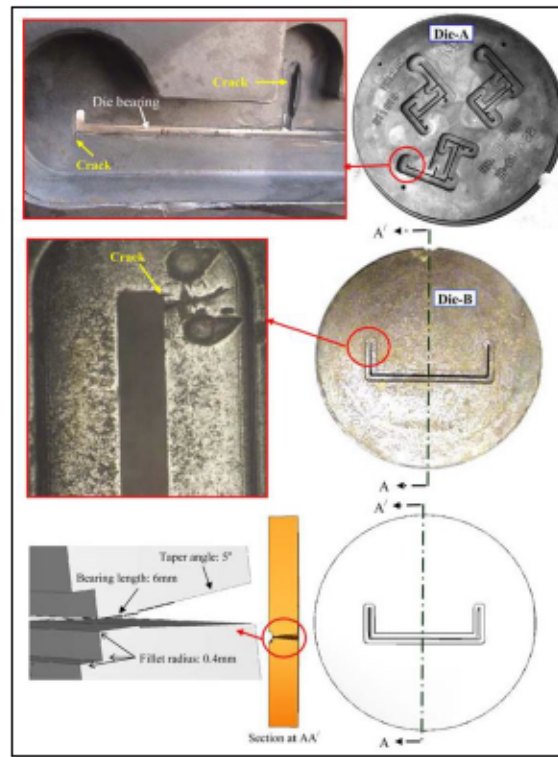
Figure 4, où chaque catégorie est clairement délimitée, permettant une visualisation instantanée des problématiques principales.



**Figure 4 Pourcentage de types de défaillance des 616 matrices [10]**

Cette étude met également en lumière comment la complexité de la forme des matrices influence directement leur tendance à échouer, avec des sections comportant des coins aigus et des formes complexes étant particulièrement susceptibles à la fatigue. Les résultats de cette recherche sont visuellement résumés dans des diagrammes sectoriels, où chaque graphique représente une ventilation des modes de défaillance pour différentes complexités et configurations des matrices. Ces visualisations facilitent la compréhension des interactions complexes entre la conception des matrices, le matériau utilisé et les conditions opérationnelles, soulignant ainsi l'importance d'une optimisation de forme et d'une maintenance pour augmenter la durée de vie des matrices et réduire les coûts de production. La recherche de S. Z. Qamar et al. [11] aborde la problématique du remplacement des matrices et outillages dans l'extrusion de métaux chauds. Ils soulignent que les aciers à outils de haute résistance et haute dureté, les méthodes de fabrication de précision comme l'érosion par étincelage, ainsi que les exigences spécifiques en matière de traitement thermique et de durcissement de surface, contribuent à ces coûts élevés. La recherche vise à augmenter la durée de vie des outils, bien que la défaillance des matrices de formage des métaux soit un problème

complexe et difficile à contrôler ou prévenir. Leur recherche propose une prédiction plus précise de la durée de vie des matrices, modélisant la matrice comme un cylindre pressurisé avec une fissure interne, ce qui constitue une approximation beaucoup plus réaliste pour l'extrusion utilisant une matrice tubulaire. Cette nouvelle stratégie comprend un modèle développé pour prévoir les défaillances par fracture des matrices d'extrusion. La nature stochastique de divers paramètres de fatigue et d'usure liés à la matrice est examinée, et une simulation de Monte-Carlo est utilisée pour prédire la durée de vie de la matrice sous un ensemble donné de conditions de fabrication et de propriétés mécaniques. Les valeurs de durée de vie simulée obtenues sont réalistes par rapport aux données de vie réelles issues de l'industrie. Cette approche offre également des perspectives pratiques pour améliorer la conception des matrices, augmenter la performance des installations, et élaborer une stratégie optimale de remplacement des matrices qui pourrait réduire considérablement les coûts associés au stockage et à la gestion des outils. L'analyse de la défaillance des matrices d'extrusion faite par S. Akhtar and A. Arif [2] est explorée comme un élément principal pour améliorer les processus de formage des métaux. Leur article met en œuvre que la fracture est le mode de défaillance le plus courant dans les matrices d'extrusion d'aluminium à chaud, principalement causée par la fatigue sous des charges cycliques sévères. En intégrant les modèles de dommage de fatigue de Morrow dans le code éléments finis ABAQUS, les auteurs étudient les paramètres critiques du processus et les caractéristiques de conception des matrices qui influencent leur durée de vie utile. Les simulations révèlent l'importance de la température et du taux de déformation, ainsi que du rayon de congé de la matrice sur la durée de vie des matrices. La Figure 5 illustre des matrices ayant échoué, capturant visuellement les fissures et les défauts mentionnés dans l'étude.



**Figure 5 Fractures au niveau de la matrice [2]**

Ces études, mentionnées ci-dessus, utilisent un mélange d'observations visuelles des défaillances et de données issues de simulations pour valider leurs théories. Les fissures au niveau des matrices et les autres défauts fournissent une preuve tangible zones critiques et des zones de défaillance potentielles, qui sont corroborées par des données simulées. Cela souligne l'importance de développer une méthode pour améliorer la conception des matrices et optimiser les processus de fabrication pour réduire les taux de défaillance.



## 2.2 Cas d'étude 2 : Étude des défaillances mécaniques dans une grue portuaire

### 2.2.1 Contexte de base

#### 2.2.1.1 Principe de fonctionnement des grues portuaires

Les grues portuaires de levage sont essentielles pour le transfert efficace de conteneurs chargés vers et depuis les navires, servant à des gains économiques pour de nombreuses nations. Positionnées sur des rails posés le long d'un quai, ces grues fonctionnent selon un mécanisme de transfert de base pour les opérations de manutention dans les ports. La structure de ces grues, constituée de plaques d'acier, supporte des charges importantes et fait face à divers stress opérationnels. L'efficacité opérationnelle de ces grues, avec un écartement de rail d'environ 10.97 mètres et une hauteur d'environ 43.66 mètres pour accueillir le chariot et la flèche, est essentielle pour desservir de grands navires capables de transporter des conteneurs sur le pont.

Les grues portuaires sont composées de plusieurs processus logistiques interconnectés, depuis l'arrivée d'un navire porte-conteneur jusqu'à la livraison des conteneurs dans la zone de stockage. Sous l'effet des charges d'impact à long terme, les conditions mécaniques de la grue porte-conteneurs peuvent se détériorer, entraînant diverses défaillances.

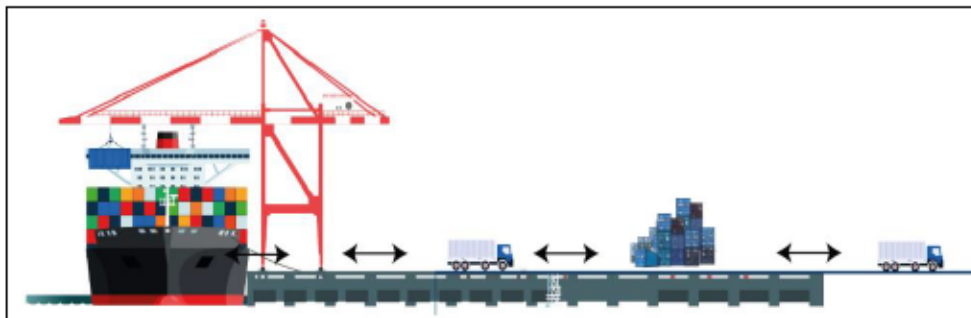
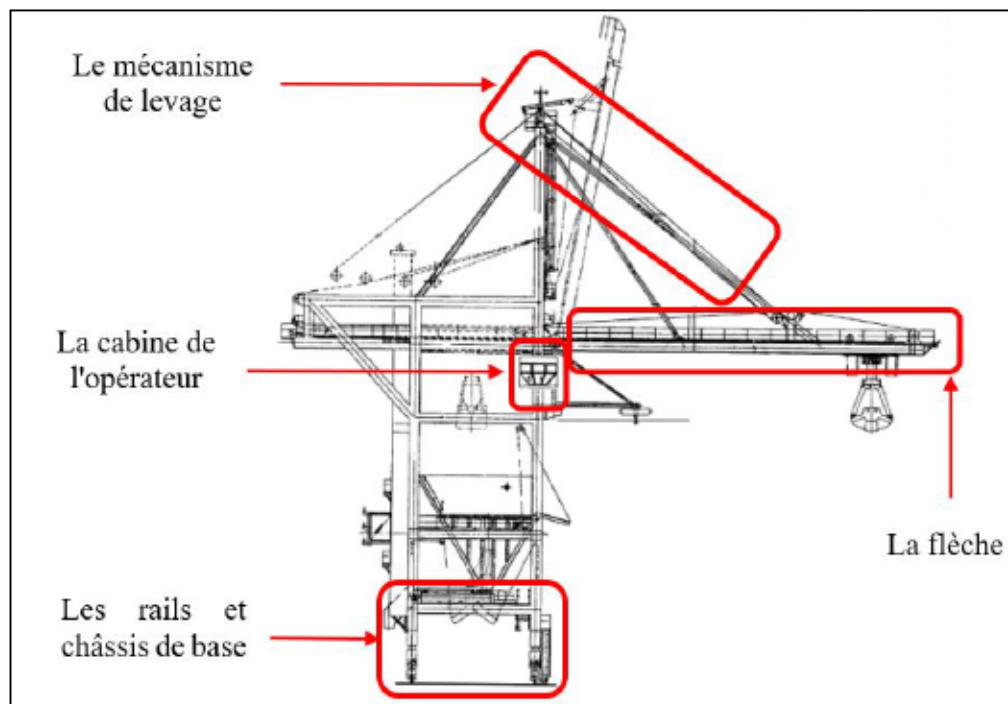


Figure 6 Processus de chargement et de déchargement des conteneurs

### 2.2.1.2 Description des équipements et du fonctionnement

La conception complexe de la grue intègre plusieurs composants clés, chacun contribue de manière différente à leur performance et leur fonctionnement. La Figure 7 présente les différents équipements clés, accompagnés d'une description détaillée des rôles respectifs de chaque équipement.



**Figure 7 Les principaux composants de la grue portuaire**

#### ▪ **Le portique**

Le portique, aussi appelé la structure porteuse, est la colonne vertébrale de la grue. Cette structure supporte non seulement le poids des conteneurs en mouvement, mais elle doit aussi résister à des conditions climatiques extrêmes, telles que des vents forts ou des changements rapides de température. Elle est conçue pour permettre une hauteur suffisante pour le chargement et le déchargement des plus grands navires porte-conteneurs.

- **La flèche**

La flèche est l'extension horizontale du portique qui traverse le quai. Sa longueur doit être suffisante pour atteindre les conteneurs les plus éloignés sur le navire et souvent s'étendre au-delà pour optimiser l'espace de manœuvre. C'est un élément clé qui influence directement la capacité de la grue à desservir différents types et tailles de navires.

- **Le mécanisme de levage**

Le mécanisme de levage est équipé de câbles, de poulies et de moteurs puissants pour soulever et abaisser les conteneurs. La précision et la fiabilité de ce système sont essentielles, car il manipule des charges lourdes. Ce système doit être régulièrement entretenu pour garantir une performance optimale et sécuritaire.

- **Le chariot**

Le mouvement du chariot doit être précis pour positionner les conteneurs exactement où ils sont nécessaires, que ce soit sur le navire, le quai, ou sur un véhicule de transport terrestre.

- **Les rails et châssis de base**

Les rails sur lesquels se déplace la grue assurent la mobilité longitudinale de l'équipement le long du quai. Ce système de rails doit être aligné et stable pour permettre un déplacement fluide et sécurisé de la grue, évitant ainsi les oscillations qui pourraient perturber les opérations ou endommager la cargaison.

- **La cabine de l'opérateur**

La cabine de l'opérateur est stratégiquement placée pour fournir une vue optimale sur l'ensemble des opérations. L'opérateur contrôle tous les aspects de la manutention des conteneurs à partir de cette cabine, utilisant des systèmes avancés de commande et de communication pour garantir un flux continu et sans incident.

- **Les systèmes d'automatisation**

Les systèmes d'automatisation intégrés dans les grues modernes incluent des dispositifs anti-balancement, qui stabilisent les conteneurs pendant leur déplacement, et des systèmes de positionnement automatique, qui calculent et ajustent la trajectoire du conteneur pour un placement précis.

## 2.2.2 Revue de la littérature

### 2.2.2.1 Propriétés des matériaux et classification de la structure

Le matériau de la structure utilisé durant cette étude est un acier de haute qualité spécifié selon la norme G40.8. Cet acier est classé sous les grades B et C, conçus pour offrir une résistance améliorée à la fracture fragile. Pour les éléments structurels d'une épaisseur allant jusqu'à 5/8 pouces, l'acier offre une limite d'élasticité de 40 ksi (275 MPa) et une résistance à la traction comprise entre 65 et 85 ksi (448 à 586 MPa). Ceci est présenté dans le Tableau 4 suivant.

Designation	Date Published	Yield Strength		Tensile Strength ( $F_u$ )	
		ksi	MPa	ksi	MPa
A16	1924	$\frac{1}{2} F_u$	$\frac{1}{2} F_u$	55 - 65	380 - 450
S39	1935	30	210	55 - 65	380 - 450
S40	1935	33	230	60 - 72	410 - 500
G40.4	1950	33	230	60 - 72	410 - 500
G40.5	1950	33	230	60 - 72	410 - 500
G40.6	1950	45 <sup>1</sup>	310	80 - 95	550 - 650
G40.8	1960	40 <sup>3</sup>	280	65 - 85	450 - 590
G40.12	1964 *	44 <sup>2</sup>	300	65	450
G40.21	1973 **	Replaced all previous Standards, see CISC Handbook			

**Tableau 4 Propriétés de matériau selon le grade [12]**

Pour mieux étudier la structure et la réponse des différentes poutres, une création d'un modèle CAD 3D de la grue permet une visualisation réaliste, une meilleure compréhension de la géométrie et de la structure de la grue, et facilite les études en statique, dynamique/vibratoire, fatigue et endommagement. Les simulations EF utilisant deux outils, SolidWorks et Abaqus, assurent une flexibilité pour gérer des cas

de chargement complexes. L'évaluation des résultats pour divers scénarios de chargement, avec variation des paramètres de charge et des conditions aux limites, permet de comprendre comment la grue réagirait dans des conditions variées.

#### **2.2.2.2 Travaux antérieurs**

Les grues portuaires sont des composants essentiels des infrastructures de transport maritime, mais elles sont vulnérables à diverses formes de défaillances mécaniques qui peuvent compromettre la sécurité et l'efficacité des opérations portuaires. Cette revue de littérature se concentre sur l'étude des défaillances structurelles, de la corrosion, des erreurs opérationnelles, et des limites sous charge maximale, en se basant sur plusieurs études récentes pour proposer une vision intégrée de la maintenance et de l'amélioration des performances de ces équipements critiques.

Pour une analyse des défaillances structurelles sous charge cyclique, J. S. et al. [14] explore la manière dont les charges répétitives affectent les équipements structuraux des grues portuaires. Leur recherche démontre que même de petites imperfections, lorsqu'elles sont soumises à des charges cycliques, peuvent initier des fissures qui se propagent avec le temps, menant potentiellement à des ruptures catastrophiques. Ils utilisent la modélisation par éléments finis pour simuler le comportement des matériaux sous stress répété, proposant des changements dans les alliages utilisés et dans les techniques de soudure pour améliorer la résilience des grues. Complémentaire à la fatigue structurelle, la corrosion est une autre menace à considérer, particulièrement dans les environnements marins agressifs. K. L. R. Johnson [15] étudie l'effet corrosif de l'air marin sur différents types de métaux utilisés dans la construction des grues. Ils montrent que sans protection adéquate, la corrosion peut réduire considérablement la durée de vie des structures métalliques. Leurs recommandations incluent l'application de revêtements anticorrosifs innovants et l'utilisation de matériaux composites plus résistants à la corrosion, qui pourraient être intégrées dès la phase de conception pour prolonger la durée de vie des grues. D'autre part, la contribution de F. D. et al. [16] se focalise sur les défaillances induites par des erreurs humaines. En analysant les données

opérationnelles de plusieurs ports, ils identifient des tendances spécifiques où les erreurs de manipulation induisent à des problèmes de fatigue et de corrosion. Leur travail suggère que des formations plus poussées et l'intégration de systèmes automatisés pourraient réduire ces erreurs, améliorant ainsi la sécurité globale. Ces formations pourraient être couplées à des technologies de monitoring en temps réel pour anticiper et corriger les erreurs avant qu'elles ne conduisent à des défaillances. Un autre volet analysé par C. M. D. Evans [17] se penche sur les systèmes de levage pour les opérations de la grue. Leur étude détaille comment une défaillance dans un seul équipement du système de levage peut entraîner des interruptions opérationnelles majeures. Ils proposent un modèle de maintenance prédictive qui utilise des capteurs pour surveiller l'état des équipements critiques et prédire les défaillances avant qu'elles ne surviennent. Cette approche, basée sur la fiabilité, est alignée sur les conclusions de F. D. et al. [16] en termes de réduction des arrêts non planifiés et d'amélioration de la sécurité.

Enfin M. T. L. Garcia [18] examine les réponses des grues portuaires lorsqu'elles opèrent à proximité de leurs limites de charge maximale. Par des tests dynamiques, ils montrent comment les charges lourdes influencent les tensions dans les structures et identifient des zones où les renforcements pourraient être nécessaires. Cette étude propose des modifications dans les procédures de chargement et dans la conception des grues pour éviter les surcharges et améliorer la durée de vie de l'équipement.

Ces études partagent plusieurs volets communs et essentiels dans la fiabilité des grues portuaires. Elles mettent toutes un accent prononcé sur la prévention des défaillances mécaniques, suggérant l'adoption de systèmes de maintenance prédictive. Plus précisément, l'utilisation de technologies avancées telles que la modélisation par éléments finis et les capteurs pour la surveillance en temps réel est un thème récurrent, aidant à mieux comprendre et optimiser les réponses aux conditions opérationnelles.

Lors des inspections réalisées les 27 et 28 mars 2023 sur le déchargeur UT-7, l'entreprise a identifié deux types d'anomalies nécessitant une attention particulière. La première anomalie concerne une fissure trouvée dans les plaques de caisson au niveau de la connexion, comme illustré dans la Figure 8.



**Figure 8 Localisation de fissure au niveau de la grue [19]**

Cette fissure, située à l'intérieur du déchargeur, est accessible via les passerelles internes. Malgré son ancienneté apparente, il est obligatoire de planifier les réparations dans un délai de six mois pour éviter une aggravation du problème qui pourrait compromettre la structure entière. La deuxième anomalie détectée est une corrosion au niveau d'une des connexions de caisson. Cette dégradation, également illustrée dans la Figure 9, nécessite des mesures d'épaisseurs de cette zone et des zones similaires exposées à des conditions d'accumulation de matière similaire.



**Figure 9 Zone de corrosion au niveau d'une des connexions de caisson [19]**

Il est recommandé que les résultats de ces relevés soient analysés par des ingénieurs en structure pour évaluer la nécessité d'interventions correctives. Ces deux découvertes mettent en œuvre l'importance de maintenir un programme d'inspection et de maintenance régulier, afin d'assurer la sécurité et la performance continue de l'équipement portuaire.

Ainsi que, les travaux antérieurs réalisés par l'entreprise visaient à évaluer la résistance à la fatigue de la grue dans différentes configurations de charge, pour mieux comprendre les contraintes subies par l'équipement et améliorer sa durabilité. Quatre scénarios spécifiques ont été étudiés : un godet plein à l'extrémité de la flèche, un godet plein ou vide positionné directement sous le deuxième hauban, et un godet vide en position de déchargement. Cette approche a permis d'identifier de manière précise les zones de contraintes élevées et les modes de défaillance potentiels. L'analyse a inclus une description de la masse de divers composants, tels que les sommiers avec moteurs, le système de convoyeur, la trémie, ainsi que d'autres parties structurelles et accessoires, fournissant ainsi une compréhension des forces en jeu. Grâce à cette étude, des données a été collectées, permettant d'exploiter les modèles de simulation utilisés.



### 3 Méthodologies et démarches suivies

#### 3.1 Analyse préliminaire et identification de la problématique

##### 3.1.1 Cas d'étude 1

La matrice d'extrusion illustrée à la Figure 10 est le sujet de cette étude.

Face en contact avec la  
billette d'aluminium à  
extruder



Vue latérale de la matrice



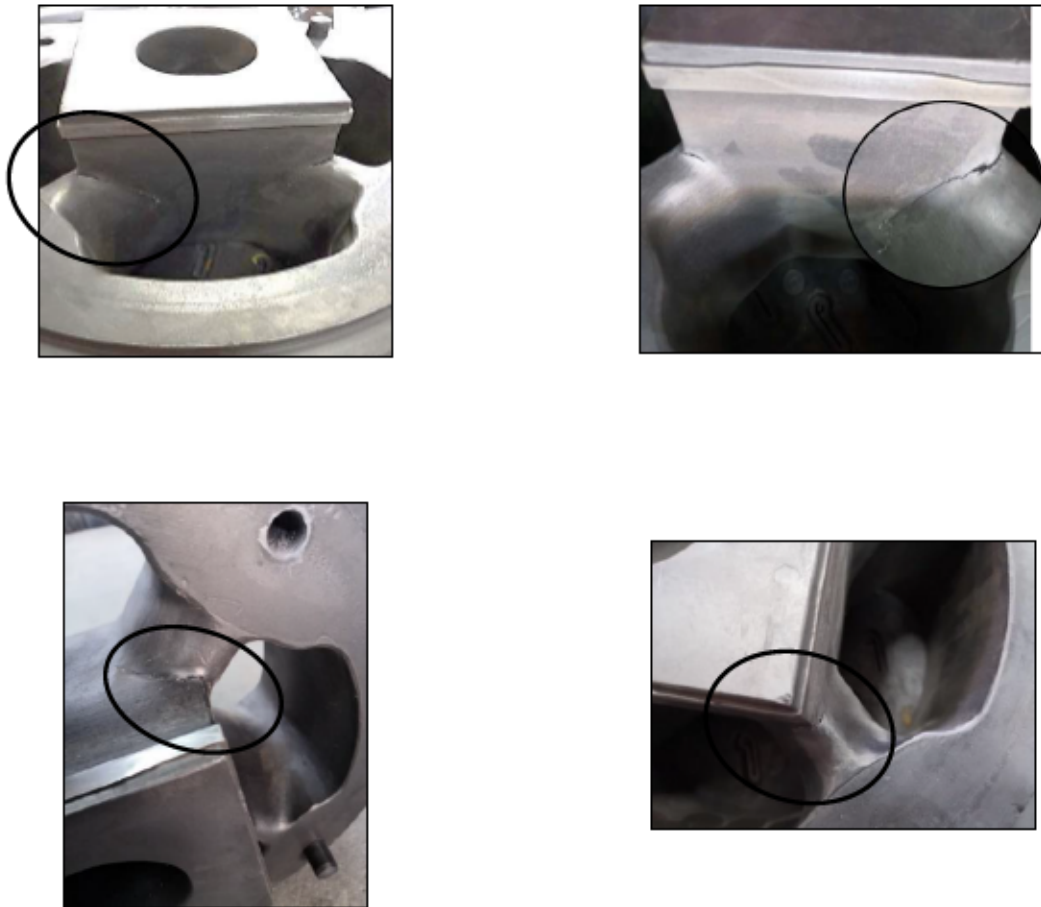
Face of intérêt



**Figure 10 Matrice de l'étude via le partenaire industriel [20]**

L'investigation a révélé que le premier segment de la matrice a subi une défaillance due à des contraintes mécaniques, avec une fissure prenant naissance dans la région de la broche d'éjection. G. Tang et al. [21] ont analysé la fatigue thermique des matrices en acier H13 dans le moulage sous pression, un processus critique affectant les performances des matrices. Leur étude sur les effets thermiques a souligné l'importance de la variabilité de la température pour optimiser la durée de vie. Cependant, ces matrices sont sujettes à diverses défaillances mécaniques, telles que des fissures et des déformations, qui nécessitent une investigation pour en identifier les causes et proposer des solutions. Ces problèmes peuvent compromettre la qualité du produit final et réduire l'efficacité du processus de production. Par conséquent, comprendre les mécanismes de ces défaillances et développer des solutions pour les prévenir est essentiel pour améliorer la durée de vie et la performance de ces matrices. Durant cette étude, l'objectif spécifique est de se concentrer sur l'apparition des fissures sur les

matrices et leur propagation. La Figure 11 suivante présente les observations de localisations de fissures survenues au niveau de la matrice adoptée pour la présente étude.



**Figure 11 Fissures sur la matrice de l'étude et leur propagation [20]**

La figure présentant les quatre observations montre des fissures à divers endroits critiques de la matrice de l'étude, indiquant des zones de défaillance potentielles. La première observation révèle une fissure sur la surface du mandrin, probablement due à des contraintes mécaniques élevées et à des cycles de chargement répétés. La seconde observation montre une fissure à l'interface de la matrice, suggérant une usure par

friction entre les surfaces en contact, potentiellement aggravée par des variations de température et des charges dynamiques. La troisième observation met en évidence une fissure à l'angle d'une section, résultant probablement de la concentration de stress et de la fatigue du matériau sous des charges cycliques. Enfin, la quatrième observation présente une petite fissure proche d'une zone d'assemblage, pouvant résulter de contraintes résiduelles introduites lors du processus de fonctionnement. Ces observations soulignent la nécessité d'une analyse des mécanismes de défaillance pour identifier les causes spécifiques et développer des solutions correctives. L'objectif est de renforcer ces zones critiques, améliorer la conception de la matrice et prévenir les défaillances futures. Une inspection régulière et un contrôle des conditions de fonctionnement sont essentiels pour gérer et prévenir l'extension de ces fissures.

Sur la base des investigations industrielles, l'accent est mis sur les défaillances des matrices induites par des fissures et nous avons proposé d'utiliser la méthode des éléments finis étendus (XFEM) pour la modélisation numérique du phénomène.

De cet effet, l'étude vise à développer une méthodologie d'analyse pour l'optimisation de la conception de cette matrice afin d'optimiser leur durée de vie.

### 3.1.2 Cas d'étude 2

La grue adoptée pour l'étude est une structure installée au port de Bagotville-Saguenay et présentée dans la Figure 12.

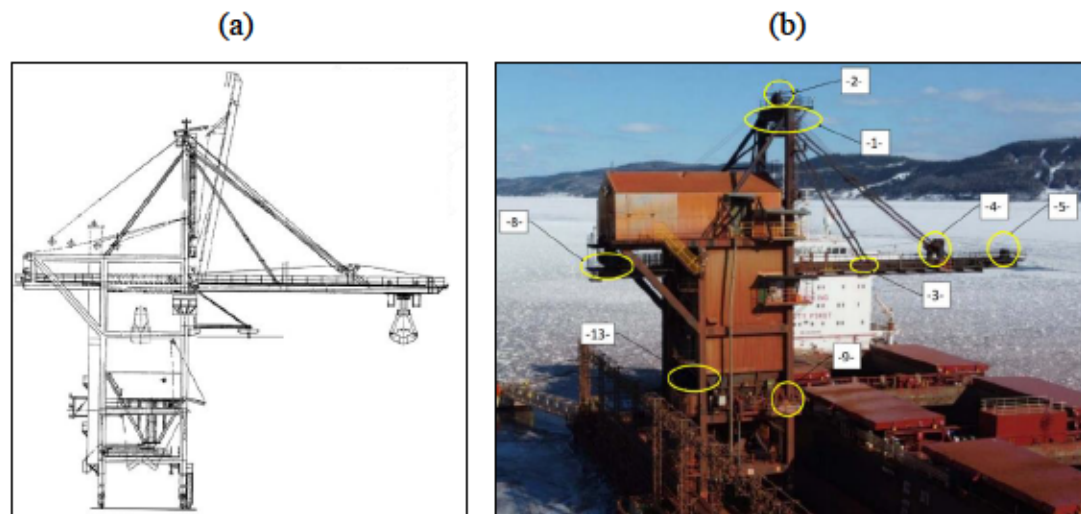


Figure 12 a) Dessin de la grue en 2D, b) Vue réel de la grue [19]

Les facteurs environnementaux et opérationnels, y compris les fluctuations de température, l'humidité et les conditions de charge, influencent considérablement la réponse dynamique des structures et ne doivent pas être sous-estimés. Ces conditions variables peuvent parfois masquer des changements structurels plus subtils qui indiquent des dommages. De plus, avec les changements climatiques potentiels, il devient important de réviser les données sur les vitesses de vent extrêmes et les charges de tempête sur les structures. Cette mise à jour est nécessaire pour évaluer toute modification des niveaux de sécurité de ces structures. G. Tang et al. [21] ont analysé comment les charges dynamiques affectent l'intégrité structurelle des grues de quai, en se concentrant sur les principaux composants tels que la flèche, la poutre et les pieds. Ils ont procédé à des simulations FEM pour modéliser le comportement de la grue sous diverses conditions de charge, en identifiant les points de stress et les modes de défaillance potentiels, et ont effectué des tests physiques sur les composants de la grue,

mesurant les réponses à des scénarios de charge contrôlés. X. Xu et al. [22] ont construit un modèle FEA d'une grue en utilisant le logiciel ANSYS, ce qui leur a permis d'analyser les sept premières fréquences modales et les formes modales correspondantes de la grue. Ils ont également effectué des tests modaux sur l'ensemble de la structure de la grue de quai sous des excitations environnementales. Cependant, l'étude était limitée par le nombre relativement faible de modes analysés et ne fournissait pas une analyse de stabilité suffisamment détaillée de la structure de la grue de quai. K. A. Porter et al., B. D. Kosbab, T. Lee [23-25] identifient les paramètres de conception critiques et leur sensibilité pour répondre aux exigences de performance globale tout en considérant les risques et les fiabilités similaires à d'autres structures. L'étude utilise des mouvements de sol en fonction du temps sur un modèle d'éléments finis tridimensionnel, en supposant des relations déterministes entre diverses variables d'entrée. Reconnaissant que l'élimination complète de l'incertitude soit impossible, l'accent est mis sur la gestion efficace des incertitudes pour développer des grues économiquement viables et résistantes aux dommages, capables de servir efficacement les communautés mondiales. Alternativement, ils suggèrent de réduire l'impact de l'incertitude là où cela est possible. Dans la littérature existante, il y a eu une absence notable d'une approche de test systématique appliquée aux grues sous charges dynamiques. Bien que certaines études, telles que l'analyse comparative des analyses statiques non linéaires et des analyses en fonction du temps des grues de conteneurs typiques coréennes Q. H. Tran et al. [26], aient été menées, elles se concentrent principalement sur des méthodologies analytiques plutôt que sur des tests empiriques. De plus, des livres publiés comme T. E. S. M. F. Spotts et al. [27] offrent des perspectives sur les propriétés des matériaux et les calculs structurels des composants de machines, mais n'abordent pas spécifiquement les tests dynamiques des grues. Par conséquent, cette lacune dans la recherche souligne la nécessité d'une approche de test systématique pour évaluer de manière exhaustive le comportement et les performances des grues sous diverses conditions de charge. Cette étude utilise une analyse statique sur un modèle d'éléments finis tridimensionnel (3D), en supposant que la sortie est

influencée de manière déterministe par diverses variables d'entrée. Le modèle FE étudié concerne une grue à conteneurs située à Bagotville-Saguenay. L'analyse utilise différents scénarios de charge pour explorer leur impact substantiel sur la réponse structurelle. Le reste de cet article est organisé pour discuter de la sensibilité des résultats, en particulier comment la qualité du maillage et les contacts entre les parties influencent l'analyse. De plus, il explore les sources d'incertitude, en se concentrant sur la manière dont elles affectent les réponses structurelles en termes de contraintes et de déplacements.

## **3.2 Méthodologie appliquée sur l'étude**

### **3.2.1 Cas d'étude 1**

La méthodologie de recherche pour l'étude des défaillances dans les matrices d'extrusion d'aluminium suit une série d'étapes structurées afin d'assurer une analyse précise et complète des origines potentielles de défaillance de la matrice. Voici les différentes étapes détaillées :

**Obtention et correction du modèle 3D :** Nous commençons par obtenir un modèle 3D de la matrice d'extrusion. Cette étape inclut également une analyse et un traitement spécifique pour corriger les détails de géométrie, notamment en éliminant les angles aigus et autres caractéristiques géométriques susceptibles de causer des problèmes lors des simulations. Ces corrections visent à minimiser les risques de concentrations, de contraintes excessives et à améliorer la précision des résultats de simulation.

- **Acquisition des données industrielles :** Nous collaborons étroitement avec notre partenaire industriel pour obtenir les données nécessaires, telles que les pressions appliquées au cours de chaque cycle d'extrusion, les contraintes subies par la matrice, ainsi que les conditions aux limites. Ces données sont indispensables pour reproduire fidèlement les conditions réelles de fonctionnement dans notre modèle numérique.

- **Modélisation numérique sur Abaqus** : En utilisant le logiciel de simulation Abaqus, nous procédons à la modélisation numérique du phénomène d'extrusion. Toutes les conditions réelles, incluant les données de pression, les contraintes et les limites collectées, sont intégrées dans le modèle pour garantir une simulation aussi précise que possible.
- **Application d'un maillage convergent** : Un maillage convergent est essentiel pour obtenir des résultats précis et fiables. Nous appliquons un maillage suffisamment fin et détaillé pour capturer les nuances des comportements mécaniques, tout en assurant que ce maillage permet d'obtenir des résultats convergents.
- **Assignment du matériau approprié** : La sélection et l'application du matériau adéquat à la pièce modélisée sont des étapes requises. Nous choisissons un matériau dont les propriétés mécaniques correspondent à celles utilisées dans les matrices d'extrusion réelles, ce qui permet d'assurer la validité des résultats de simulation.
- **Réalisation de simulations statiques** : Nous effectuons des simulations statiques pour identifier les contraintes critiques dans la matrice. Cette étape nous permet de localiser les zones à risque de défaillance en fonction des charges appliquées et des conditions aux limites.
- **Modélisation des fissures et de leur propagation** : Enfin, nous choisissons une méthode appropriée pour modéliser les fissures et leur propagation. Cette analyse se concentre particulièrement sur les zones où les concentrations de contraintes sont les plus élevées. En modélisant les fissures et leur comportement sous charge, nous pouvons prévoir les points de défaillance potentiels et proposer des améliorations de conception pour prévenir ces défaillances.

En adoptant cette méthodologie, ça va nous permettre de comprendre les origines de défaillance dans les matrices d'extrusion d'aluminium et de proposer des solutions efficaces pour améliorer leur durée de vie et leur performance.

### 3.2.2 Cas d'étude 2

Tandis que pour l'étude des défaillances mécaniques dans les grues portuaires, la méthodologie de travail est également bien structurée et comprend plusieurs étapes clés :

- **Création d'un modèle CAD 3D de la grue** : Nous commençons par la création d'un modèle 3D de la grue à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAD). Ce modèle offre une visualisation réaliste de la grue, permettant de mieux comprendre sa géométrie et sa structure. Cette étape est essentielle, car elle facilite les études statiques, dynamiques/vibratoires, ainsi que les analyses de fatigue et d'endommagement.
- **Simulations aux éléments finis (EF) utilisant SolidWorks et Abaqus** : Nous utilisons deux outils de simulation, SolidWorks et Abaqus, pour mener des simulations aux éléments finis. Cette approche assure une flexibilité accrue pour gérer des cas de chargement complexes. SolidWorks est souvent utilisé pour les phases initiales de modélisation et de vérification, tandis qu'Abaqus permet une analyse plus détaillée et sophistiquée des contraintes et des déformations.
- **Évaluation des résultats pour divers scénarios de chargement** : Nous évaluons les résultats des simulations sous divers scénarios de chargement. Cela inclut la variation des paramètres de charge et des conditions aux limites pour comprendre comment la grue réagirait dans différentes situations. Cette étape permet d'identifier les points faibles potentiels et les comportements sous des charges variables.
- **Étude de fatigue** : Enfin, nous réalisons une étude de fatigue pour déterminer la durée de vie de la grue sous des charges répétitives. Cette analyse permet de prédire la durée de vie de la grue en fonction des cycles de charge et d'identifier les zones susceptibles de subir des défaillances à long terme.

Cette méthodologie nous permet de comprendre les mécanismes de défaillance potentiels dans les grues portuaires et de proposer des solutions pour améliorer leur



fiabilité et leur performance. En combinant les outils de modélisation 3D et les simulations aux éléments finis, nous pouvons offrir une analyse fiable et des recommandations pour prévenir les défaillances mécaniques.

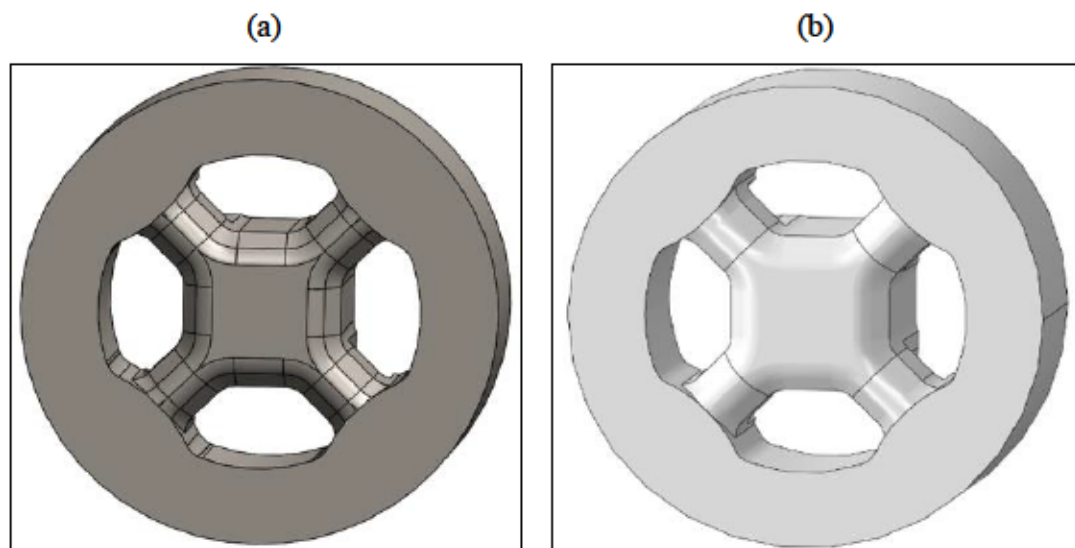
## 4 Analyses et résultats

### 4.1 Défaillances dans une matrice d'extrusion d'aluminium

#### 4.1.1 Analyse statique

##### 4.1.1.1 Obtention et correction du modèle 3D

L'obtention et la correction du modèle 3D de la matrice d'extrusion commencent par la création initiale d'un modèle 3D modifié à l'aide des logiciels tels que SolidWorks et Abaqus pour identifier et corriger les défauts de conception. L'objectif est de créer une représentation précise de la matrice qui peut être utilisée pour des analyses ultérieures. Nous avons procédé par éliminer les angles vifs, qui peuvent entraîner des concentrations de contraintes excessives. Ces concentrations de contraintes sont problématiques, car elles peuvent compromettre l'intégrité de la matrice lorsqu'elle est soumise à des pressions élevées. La Figure 13 représente la géométrie de la matrice, utilisée dans toute l'analyse de cette étude dont elle génère la forme de profilé d'aluminium carré, avant et après les modifications.



**Figure 13 Géométrie de la matrice – a) Avant modification, b) Après modifications**

En supprimant ces angles vifs et en adoucissant les transitions géométriques, nous pouvons réduire les risques de points de défaillance potentiels. Les corrections apportées au modèle 3D visent à minimiser les risques de divergence du modèle et compromettre une géométrie plus réaliste sous les logiciels de travail.

#### 4.1.1.2 Acquisition des données et modélisation numérique

Une des données obtenues est la courbe de pression appliquée par la billette sur la face normale de la matrice. La Figure 14 ci-dessous montre la configuration des paramètres de distribution de la pression dans notre modèle de simulation :

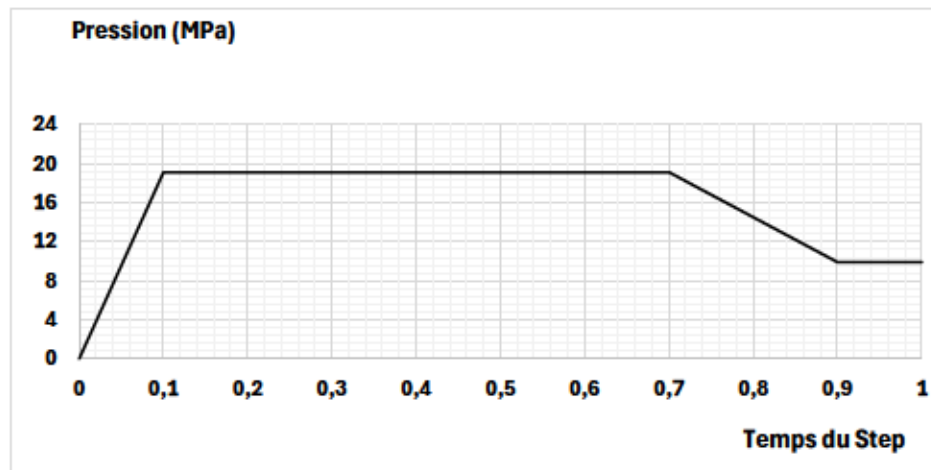


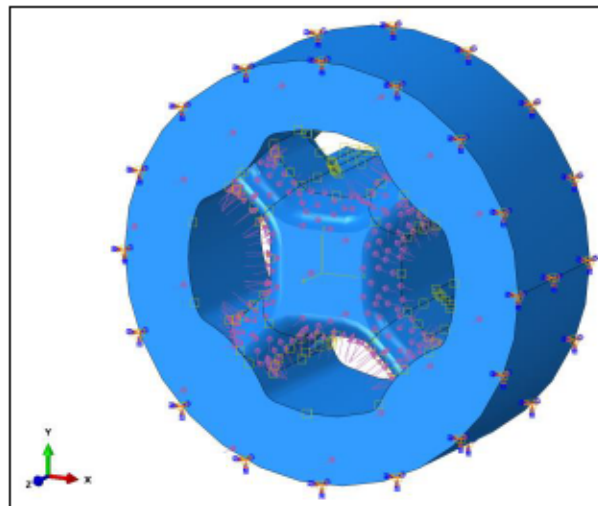
Figure 14 Cycle de pression appliqué au cours de la simulation

La pression est spécifiée directement avec une variation constante à travers la région concernée. La magnitude de cette pression est de 19.1 MPa. Pour les simulations, nous ajoutons une échelle de  $10^6$  pour convertir cette pression en Pascals.

D'autre part, la matrice est supposée être encastrée et fixée latéralement, ce qui signifie qu'elle ne peut pas se déplacer dans les directions latérales et est fixée en place. Cela reflète les conditions réelles de fonctionnement où la matrice est solidement maintenue pour résister aux forces appliquées par la billette. Un autre paramètre important est la température de préchauffage de la matrice, qui est fixée à 753.15 Kelvin. Cette

température est essentielle pour simuler les conditions thermiques auxquelles la matrice est soumise pendant le processus d'extrusion. Une température adéquate permet de réduire les contraintes thermiques et d'améliorer la qualité de l'extrusion.

La Figure 15 ci-dessous présente les différents paramètres appliqués dans notre modèle de simulation :



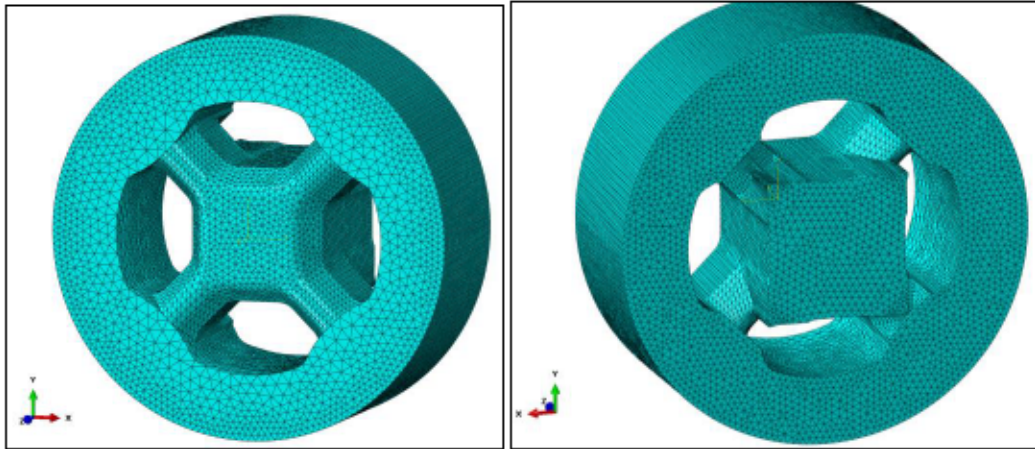
**Figure 15 Modélisation de la matrice sous les différentes charges**

Dans cette figure, les flèches indiquent les pressions appliquées sur la face normale de la matrice, et les symboles de fixation montrent les encastres latéraux.

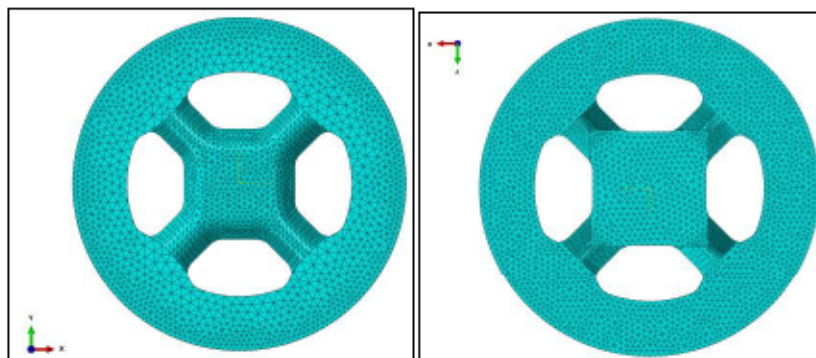
Dans Abaqus, nous avons introduit le matériau H13, qui est couramment utilisé pour les matrices d'extrusion en raison de ses excellentes propriétés mécaniques et thermiques et était présenté dans la section "Propriétés des matériaux". Le H13 est un acier à outils à haute résistance, connu pour sa dureté, sa résistance à l'usure et sa capacité à conserver ces propriétés à des températures élevées. Ces caractéristiques le rendent particulièrement adapté aux applications exigeantes telles que l'extrusion de l'aluminium.

Par rapport au maillage, nous avons suivi plusieurs itérations afin de sélectionner le maillage le plus convergent, en tenant compte des spécificités géométriques et des

conditions de charge de la matrice. Après diverses analyses, nous avons opté pour un maillage de type C3D10, un tétraèdre quadratique à 10 nœuds, qui a démontré une excellente capacité à capturer les comportements mécaniques complexes de la matrice. Ce type de maillage est particulièrement efficace pour les géométries complexes et les conditions de chargement non linéaires, ce qui est le cas pour notre étude des matrices d'extrusion d'aluminium. La Figure 16 suivante est une représentation en perspective des deux côtés de la matrice sous la configuration du maillage adopté ainsi que la Figure 17 représente la face en contact avec la billette d'aluminium extrudée et la face d'intérêt de l'étude.



**Figure 16** Vue en perspective du maillage de la matrice d'étude

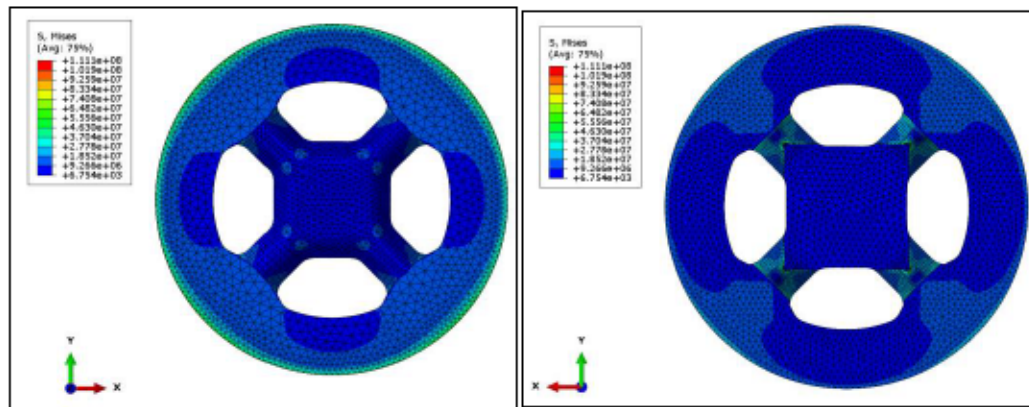


**Figure 17** Vues du plan normal de la matrice sous maillage

Pour parvenir à cette configuration, nous avons réalisé plusieurs itérations de maillage, en ajustant les tailles des éléments et en testant différents types d'éléments. Chaque itération a été évaluée sur la base de la convergence des résultats et de la précision des prédictions de contrainte et de déformation.

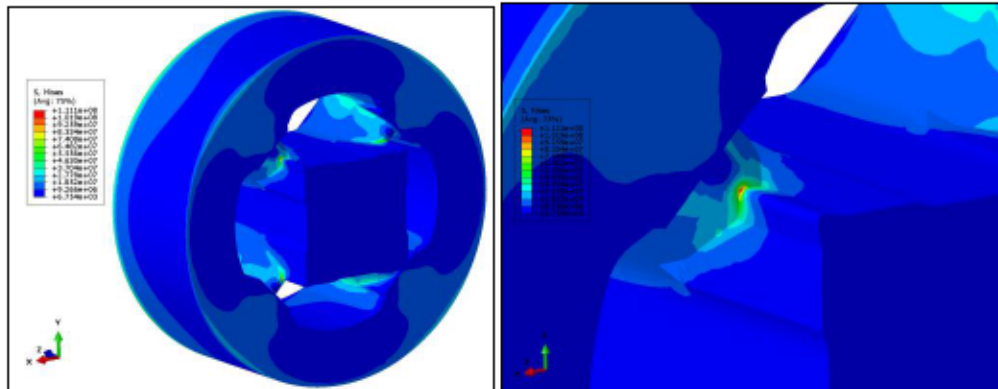
#### 4.1.1.3 Résultats et interprétations

Les résultats de la simulation des contraintes de von Mises tout au long de la matrice d'extrusion révèlent plusieurs zones de concentration de contraintes élevées. On observe dans la Figure 18 suivante que les contraintes sont réparties de manière inégale, avec des zones de concentration élevée situées principalement à l'intérieur de la matrice, où l'aluminium extrudé entre en contact avec les parois de la matrice. Afin de chercher les éventuelles sollicitations au sein de la matrice, nous avons effectué un zoom sur la zone dans laquelle l'aluminium est en contact avec les parois.



**Figure 18 Résultats des contraintes de von Mises**

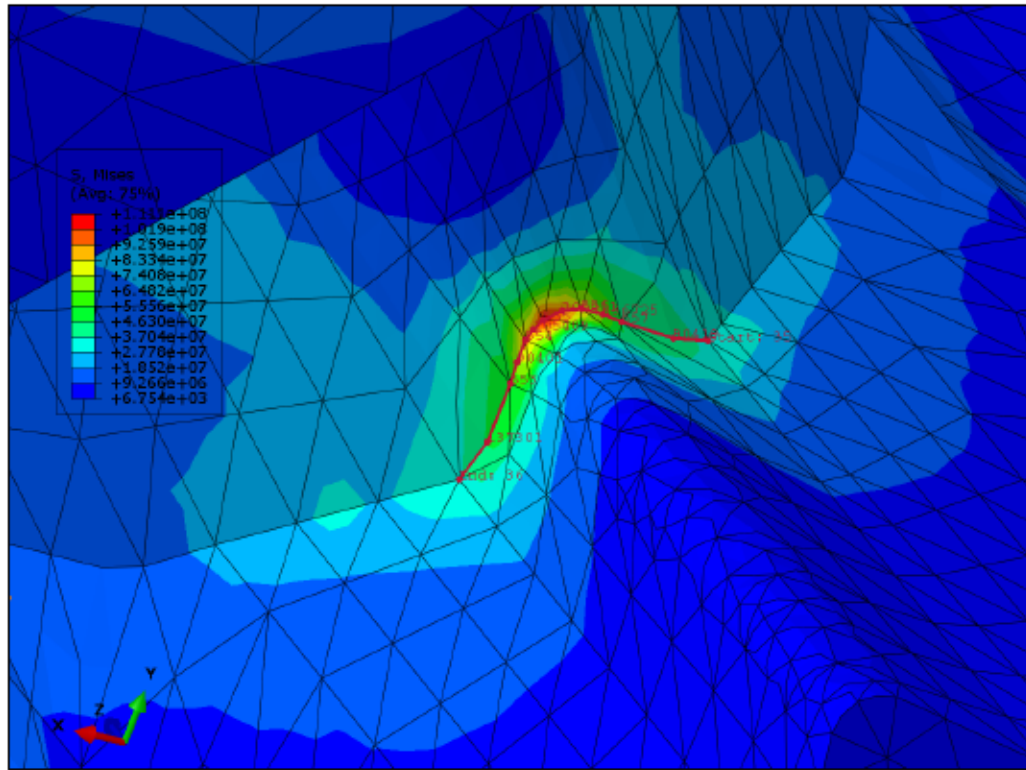
Cette zone, dans la Figure 19, montre des concentrations de contraintes particulièrement élevées, indiquant qu'elle est soumise à des sollicitations importantes. Cette concentration de contraintes est due à l'interaction intense entre la billette d'aluminium et la matrice, ainsi qu'aux transitions géométriques abruptes qui augmentent les contraintes locales.



**Figure 19 Zoom des résultats des contraintes de von Mises**

Pour mieux comprendre cette zone critique, nous avons effectué un zoom supplémentaire, comme illustré dans la Figure 20. Ce zoom met en évidence les points précis où les contraintes sont les plus élevées. Les résultats montrent que, bien qu'il y ait de nombreuses zones sollicitées dans la matrice, cette zone présente les niveaux de stress les plus élevés. Ces concentrations de contraintes peuvent être attribuées à des effets de bord, des singularités géométriques ou des variations dans les propriétés matérielles locales.

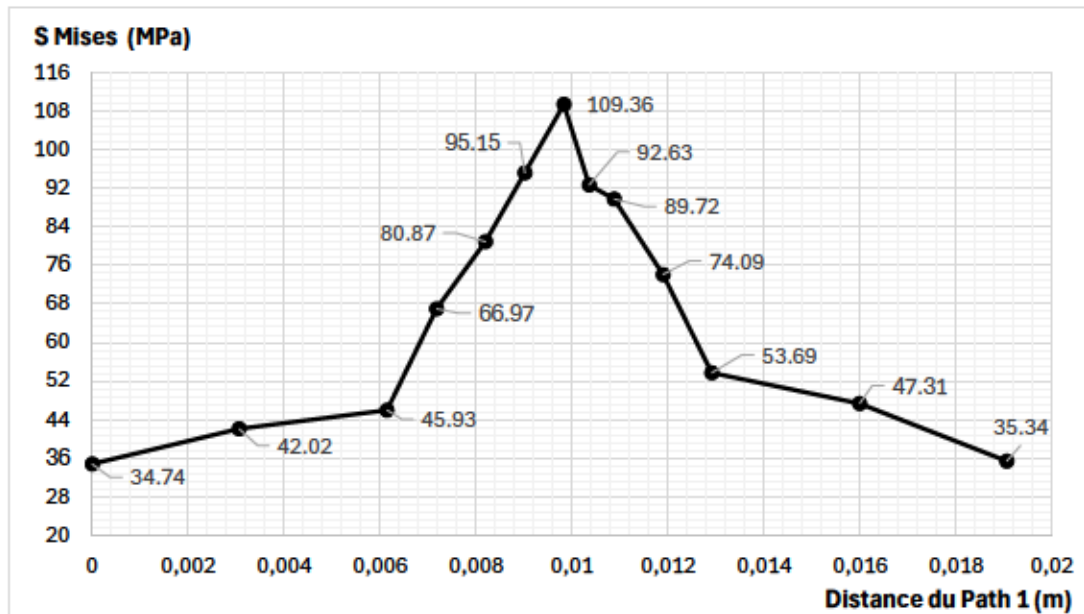
Pour investiguer l'analyse de cette zone critique, nous avons créé un chemin (Path) tout au long de la zone de sortie de l'aluminium extrudé. L'objectif était de mesurer les contraintes de von Mises le long de ce chemin et de tirer des conclusions sur la distribution des contraintes.



**Figure 20 Contraintes de von Mises selon le Path créé**

La courbe résultante, présentée dans la Figure 21, montre les valeurs des contraintes de von Mises en fonction de la distance le long du chemin. Cette courbe révèle un pic de contraintes atteignant 109.36 MPa, confirmant que c'est le point de défaillance potentiel le plus critique. La courbe montre également comment les contraintes diminuent progressivement à mesure que l'on s'éloigne de ce point.





**Figure 21 Courbe de contrainte en fonction de la distance**

Les résultats obtenus indiquent clairement que la zone de la sortie de l'aluminium extrudé est soumise à des contraintes particulièrement élevées. Cette observation est corroborée par les différentes analyses et zooms effectués, ainsi que par la courbe de Path Analysis. Les liaisons entre ces interprétations sont essentielles pour formuler des recommandations de conception. Par exemple :

- **Renforcement structurel** : La zone critique identifiée pourrait être renforcée pour mieux répartir les contraintes et réduire les concentrations de contraintes.
- **Optimisation géométrique** : Les transitions géométriques abruptes pourraient être adoucies pour minimiser les effets de bord et les singularités qui augmentent les contraintes locales.
- **Matériaux avancés** : L'utilisation de matériaux avec des propriétés mécaniques améliorées pourrait également être envisagée pour mieux résister aux contraintes élevées.

## **4.1.2 Modélisation des fissurations par la méthode XFEM**

### **4.1.2.1 Introduction**

La méthode des éléments finis étendus (XFEM) est une technique numérique avancée utilisée pour la modélisation des discontinuités, telles que les fissures, dans les matériaux. Elle est une extension de la méthode des éléments finis (EF) traditionnelle et offre des avantages pour certains types de problèmes tels que notre cas d'étude sur l'apparition des fissures au niveau de la matrice.

### **4.1.2.2 Principes de base de la XFEM**

La XFEM permet de modéliser des discontinuités sans nécessiter de raffinement du maillage autour de ces discontinuités. Elle le fait en enrichissant les fonctions de forme standard utilisées dans l'EF avec des fonctions supplémentaires qui représentent les discontinuités telles que :

- **Enrichissement des fonctions de forme** : Les fonctions de forme standards sont enrichies avec des fonctions supplémentaires pour capturer les effets des discontinuités. Par exemple, pour modéliser une fissure, des fonctions qui représentent l'ouverture de la fissure sont ajoutées.
- **Fonctions de heaviside** : Utilisées pour modéliser les discontinuités de champ, telles que les fissures. Elles permettent de représenter une discontinuité nette dans le champ de déplacement.
- **Fonctions asymptotiques** : Utilisées pour modéliser le comportement singulier au voisinage de la pointe de la fissure.
- **Indépendance du maillage** : Une des principales forces de la XFEM est qu'elle permet de modéliser des discontinuités indépendamment du maillage. Cela signifie qu'il n'est pas nécessaire de remailler autour des discontinuités, ce qui simplifie considérablement la modélisation.

### **4.1.2.3 Domaines d'applications de la XFEM**

La méthode XFEM trouve des applications dans divers domaines :

- **La mécanique de la rupture** : utilisée pour modéliser la propagation des fissures dans les matériaux solides, permet d'analyser les comportements des matériaux avant et après la rupture.
- **Modélisation des fractures dans les formations géologiques**, notamment dans les réservoirs de pétrole et de gaz pour prédire la propagation des fractures et optimiser les techniques d'extraction.
- **Biomécanique** : Utilisée pour étudier des fissures et des défaillances dans les os et autres tissus biologiques et permet de comprendre les mécanismes de fracture dans les structures biologiques.

#### **4.1.2.4 Revue de la littérature sur la méthode XFEM et les fissures**

Les fissures au sein des matrices d'extrusion peuvent entraîner des défaillances importantes, des pertes de productivité, et des coûts élevés de maintenance et de remplacement. La méthode des éléments finis étendus (XFEM) a été adoptée par de nombreux chercheurs pour étudier et modéliser les fissures dans ces matrices.

Les études menées par T. Belytschko [28] ont été parmi les fondamentaux de la méthode XFEM, posant les bases théoriques de cette technique. Leur travail a démontré que la XFEM peut modéliser efficacement les fissures dans les matériaux sans nécessiter de remaillage autour des discontinuités. Cela a représenté un saut par rapport à la méthode des éléments finis traditionnelle, qui nécessite un maillage très fin pour capturer les détails autour des fissures. Leur technique repose sur l'utilisation de fonctions d'enrichissement pour représenter une fissure orientée arbitrairement au sein du maillage. Les facteurs d'intensité des contraintes pour la fissure étaient calculés avec une précision inférieure à 1%. La même gamme de fonctions développées par M. Fleming et al. [29] pour l'enrichissement de la méthode Galerkin sans éléments était utilisée. La méthode exploite la propriété de partition de l'unité des éléments finis, notés par J. M. Melenk and I. Babuška [30], et C. A. Duarte and J. Oden [31], selon laquelle la somme des fonctions de forme doit être égale à l'unité. Cette propriété était nécessaire pour la convergence, car elle permet aux fonctions de forme de reproduire

une constante. Les valeurs normalisées des facteurs d'intensité de contrainte  $KI$  et  $KII$  utilisant la méthode de kink mapping étaient comparées aux résultats obtenus sans cette méthode. Deux modèles de fissure étaient considérés : un modèle avec 10 segments de ligne droite et 11 sommets, et un modèle avec 20 segments de ligne droite et 21 sommets, comme illustré dans les Erreur ! Source du renvoi introuvable. et Erreur ! Source du renvoi introuvable. :

SIFs	dom1	dom2	dom3
Kink 11	1-0117	1-0107	1-0227
Kink 21	1-0119	1-0113	1-0227
No map	0-8240	0-8225	0-8356

**Tableau 5 Valeurs de KI normalisées**

SIFs	dom1	dom2	dom3
Kink 11	1-0056	1-0141	1-0567
Kink 21	1-0058	1-0148	1-0567
No map	0-8089	0-8101	0-8241

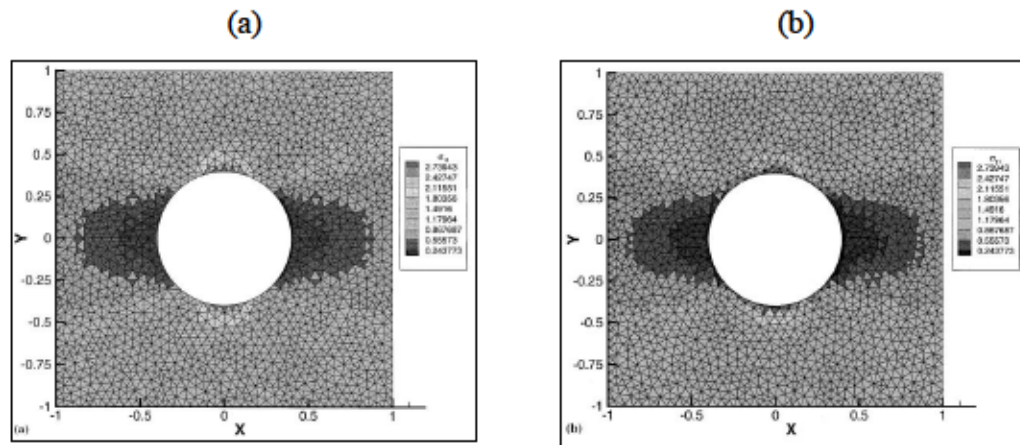
**Tableau 6 Valeurs de KII normalisées**

Leurs analyses démontrent bien que l'augmentation de la discrétisation de la fissure n'améliore presque pas les résultats et l'utilisation du kink mapping est nécessaire pour obtenir des valeurs précises des facteurs d'intensité de contrainte près de la fissure.

L'étude menée par N. Sukumar et al. [32] a exploré l'application de la méthode des éléments finis étendus (XFEM) pour modéliser les fissures et les inclusions dans divers matériaux. L'objectif principal de leur recherche était de développer une approche permettant de représenter les défauts internes tels que les pores, les fissures et les inclusions, qui affectent l'intégrité structurelle et la durée de vie des composants. Ils soulignent que, bien que la génération de maillages en deux dimensions soit bien établie, la gestion d'un nombre de défauts internes reste une tâche complexe qui rend nécessaire l'adoption de nouvelles techniques comme la XFEM.

Les auteurs avaient pour but de modéliser les défaillances internes qui influencent les propriétés mécaniques des matériaux. L'intégration de la méthode des ensembles de niveaux dans le cadre de la XFEM a permis de suivre les interfaces en mouvement et d'enrichir l'approximation des éléments finis avec des fonctions supplémentaires. Ces fonctions d'enrichissement facilitent la représentation des discontinuités internes, comme les fissures, sans nécessiter de remaillage, ce qui est souvent requis par les méthodes traditionnelles. La recherche a démontré comment ces enrichissements peuvent améliorer la précision des solutions numériques dans les domaines où les discontinuités jouent un rôle important. Ils ont enrichi l'approximation des éléments finis en utilisant la notion de partition de l'unité, une propriété qui assure que la somme des fonctions de forme est égale à l'unité. Cet enrichissement a permis de modéliser les fissures, les vides et les inhomogénéités au sein des matériaux. La méthode des ensembles de niveaux a été intégrée pour représenter les interfaces évolutives comme des ensembles de niveaux zéro d'une fonction dans une dimension supérieure. Cette intégration a permis de suivre les interfaces et de capturer les détails des discontinuités internes sans recourir à un maillage supplémentaire complexe. Cette flexibilité permet à la XFEM de résoudre une large gamme de problèmes, surpassant les capacités de la méthode des éléments finis généralisés (GFEM) et d'autres techniques similaires.

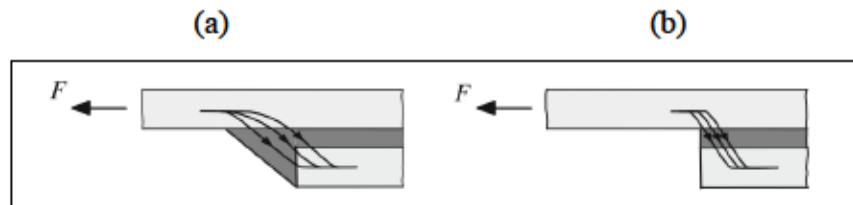
Pour démontrer l'efficacité de leur méthode, les auteurs ont présenté plusieurs exemples numériques en élastostatique bidimensionnelle telle que des plaques avec des trous et des problèmes impliquant des conditions aux limites de déplacement pur dans des matériaux bimatières présentées dans la Figure 22 Exemples numériques en élastostatique bidimensionnelle plaque trouée:



**Figure 22 Exemples numériques en élastostatique bidimensionnelle plaque trouée, a) EF, b) XFEM [32]**

Les résultats de ces études ont montré une convergence optimale des solutions en norme énergétique, concluant la capacité de la XFEM à fournir des résultats précis sans nécessiter de maillage interne détaillé.

D'autres études menées par N. Stein et al. [33] décrivent une mise en œuvre de la (XFEM) pour modéliser la déviation des fissures dans des joints multi matériaux. La méthode proposée permet de modéliser la croissance bidimensionnelle des fissures, y compris la déviation potentielle des fissures à des interfaces de matériaux multi matériaux plus résistants. Les auteurs utilisent un critère de déviation des fissures bien défini pour permettre la déviation des fissures parallèlement à l'interface, ainsi que la croissance des fissures s'écartant de l'interface. L'implémentation de la XFEM était illustrée par l'analyse de la croissance des fissures dans une plaque avec deux inclusions interactives, montrant un effet distinct de renforcement comme dans la Figure 23 La croissance des fissures dans une plaque avec deux inclusions interactives.



**Figure 23 La croissance des fissures dans une plaque avec deux inclusions interactives**

De plus, plusieurs études de conception de joints adhésifs différents étaient utilisées pour valider le modèle. Les résultats ont montré que cette mise en œuvre de la XFEM permet une prédiction précise de la résistance et du comportement des fissures dans les conceptions de joints complexes, comme les joints avec des goussets ou des coins adhérents arrondis. Le cadre proposé est général et peut également être appliqué à l'étude des processus de fracture, y compris la déviation des fissures dans des fractures micromécaniques. Ainsi, les études de joints adhésifs montrent que les analyses XFEM prédisent les fissures qui approchent les interfaces, mais ne peuvent pas prédire leur progression au-delà de ce point. Le cadre amélioré présenté utilise une sub-routine Abaqus pour modifier la prédiction de la croissance des fissures le long des interfaces afin que les fissures soient déviées aux interfaces, mais puissent également quitter l'interface à un stade ultérieur. L'approche donnée est restreinte aux configurations multi matériaux où il est connu que les fissures ne se produisent que dans certains matériaux. Ce cadre est applicable à divers processus de fracture dans les joints adhésifs et les composites polymères, permettant des études de paramètres pour l'amélioration des joints ou la conception. Les résultats montrent que la méthode offre une prédiction réaliste des chemins de fissuration et des charges de défaillance, validée par des comparaisons avec des résultats expérimentaux.

L'analyse menée par Y. Yan and S.-H. Park [34] explorent l'application de la (XFEM) pour la simulation de la propagation des fissures près des interfaces dans des structures stratifiées métal-céramique. Les auteurs expliquent que des preuves expérimentales indiquent qu'une fissure interfaciale dans une couche de céramique peut être attirée

vers ou déviée de la couche métallique en fonction des propriétés élastiques relatives des matériaux constitutifs. Pour modéliser cette fracture interfaciale, seules les fonctions de Heaviside ont été utilisées pour la XFEM, et la méthode des ensembles de niveaux vectoriels était employée pour évaluer les fonctions d'enrichissement. Les trajectoires de propagation des fissures prédites par les simulations XFEM étaient trouvées cohérentes avec les observations expérimentales, montrant une bonne correspondance entre la modélisation numérique et les résultats pratiques.

Ceci implique que la méthode XFEM a été appliquée avec succès à l'analyse des fractures interfaciales dans les structures stratifiées métal-céramique. Et a capturé avec précision les aspects importants du comportement de la fracture, montrant que la trajectoire de croissance des fissures peut être soit attirée vers l'interface métal-céramique, soit repoussée de celle-ci, en fonction des propriétés élastiques relatives des matériaux. Les trajectoires de fissuration observées dans les expériences étaient également reproduites de manière fiable par les simulations XFEM. Les auteurs notent que certaines divergences observées dans les trajectoires de fissuration peuvent être réduites en tenant compte du comportement inélastique de la structure et en utilisant des descriptions cinématiques de plus haut ordre dans les formulations XFEM. Ceci fournit le potentiel de la XFEM à résoudre des problèmes plus complexes dans la fracture interfaciale.

#### **4.1.2.5 Formulation mathématique**

Pour expliquer comment les fonctions discontinues sont ajoutées à l'approximation par éléments finis classique, on peut considérer le cas d'une fissure dans un maillage avec quatre éléments, où la fissure est placée sur la frontière de l'élément, comme le montre la Figure 24.



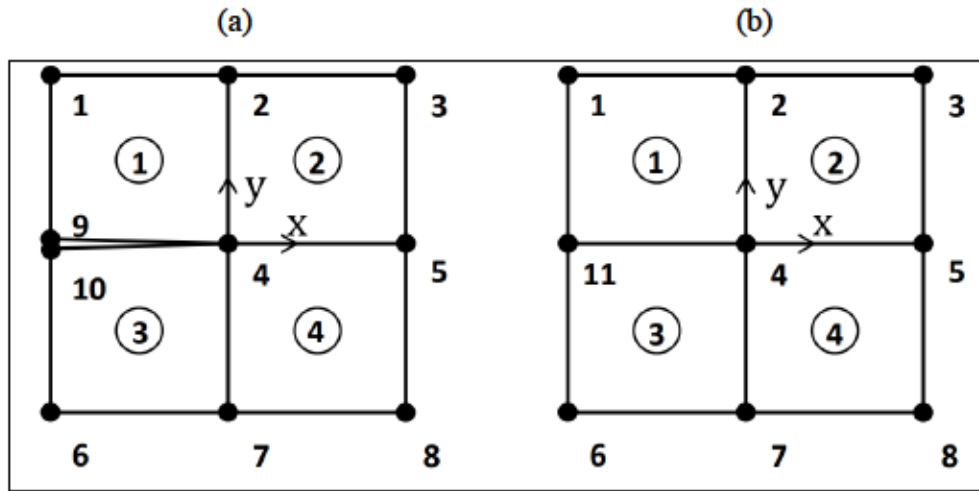


Figure 24 a) Maillage avec fissure, b) Maillage sans fissure

L'approximation par éléments finis pour le maillage est :

$$\mathbf{u}^h(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{10} N_i(\mathbf{x}) \mathbf{u}_i \quad 1$$

Où  $N_i$  est la fonction de forme pour le nœud  $i$ ,  $\mathbf{u}_i$  est le vecteur de déplacement au nœud  $i$  et  $\mathbf{x}$  est le vecteur de position.

Définissons  $k$  et  $l$  comme :

$$\mathbf{k} = \frac{\mathbf{u}_9 + \mathbf{u}_{10}}{2}, \quad \mathbf{l} = \frac{\mathbf{u}_9 - \mathbf{u}_{10}}{2} \quad 2$$

C'est-à-dire,  $k$  se trouve entre  $\mathbf{u}_9$  et  $\mathbf{u}_{10}$  et  $l$  est la moitié de la distance entre  $\mathbf{u}_9$  et  $\mathbf{u}_{10}$ .

Maintenant,  $\mathbf{u}_9$  et  $\mathbf{u}_{10}$  peuvent être exprimés en termes de  $k$  et  $l$  comme :

$$\mathbf{u}_9 = \mathbf{k} + \mathbf{l}, \quad \mathbf{u}_{10} = \mathbf{k} - \mathbf{l} \quad 3$$

En ajoutant ces expressions dans l'équation 4, on obtient :

$$\mathbf{u}^h = \sum_{i=1}^8 N_i \mathbf{u}_i + k(N_9 + N_{10}) + l(N_9 - N_{10})H(\mathbf{x}) \quad 4$$

Où la fonction de saut discontinue  $H(\mathbf{x})$  est introduite comme :

$$H(\mathbf{x}) = \mathbf{1}, \quad \text{si } y > \mathbf{1} \quad 5$$

$$H(\mathbf{x}) = -\mathbf{1}, \quad \text{si } y < \mathbf{1} \quad 6$$

Maintenant,  $N_9 + N_{10}$  peut être remplacé par  $N_{11}$  et  $k$  par  $\mathbf{u}_{11}$  et l'approximation par éléments finis peut s'exprimer comme :

$$\mathbf{u}^h = \sum_{i=1}^8 N_i \mathbf{u}_i + N_{11} \mathbf{u}_{11} + l N_{11} H(\mathbf{x}) \quad 7$$

Les deux premières parties sont l'approximation standard par éléments finis et la troisième partie est l'enrichissement discontinu supplémentaire. L'équation montre que l'approximation par éléments finis d'une fissure dans un maillage peut être interprétée comme un maillage sans fissure et un enrichissement discontinu supplémentaire. L'extension à une fissure qui n'est pas placée sur la frontière de l'élément peut être décrite de manière similaire.

Pour pouvoir capturer la singularité à la pointe de la fissure, des fonctions de pointe de fissure asymptotique discontinues peuvent être ajoutées aux nœuds qui entourent la pointe de la fissure. Si la pointe ne se termine pas à une frontière d'élément, les fonctions de pointe de fissure décrivent également la discontinuité sur les surfaces dans l'élément contenant la pointe de la fissure.

Ainsi, au total, il y a deux types d'enrichissements : les fonctions de pointe de fissure asymptotiques pour décrire la pointe de la fissure et la fonction de saut pour décrire le reste de la fissure. Les nœuds sont enrichis avec la fonction de saut lorsque leurs

supports sont entièrement intersectés par une fissure tandis que les nœuds d'élément entourant la pointe de la fissure sont enrichis avec les fonctions de pointe de fissure. Les nœuds entourés sont enrichis avec la fonction de saut et les nœuds carrés sont enrichis avec les fonctions de pointe de fissure.

### 4.1.3 Modélisation des fissurations par la méthode J intégrale

#### 4.1.3.1 Facteurs d'intensité des contraintes

Les facteurs d'intensité des contraintes sont utilisés pour exprimer le champ de contraintes à la pointe d'une fissure et servent de mesure de la gravité de la pointe de la fissure pour différentes configurations de fissures. Ils jouent un rôle très important dans l'évaluation des fissures, où ils peuvent être liés à des niveaux critiques de contraintes entraînant la croissance de la fissure et éventuellement la fracture.

Il existe trois modes de chargement indépendants utilisés en mécanique de la fracture : le Mode I, II et III. Ils sont représentés dans la Figure 25.

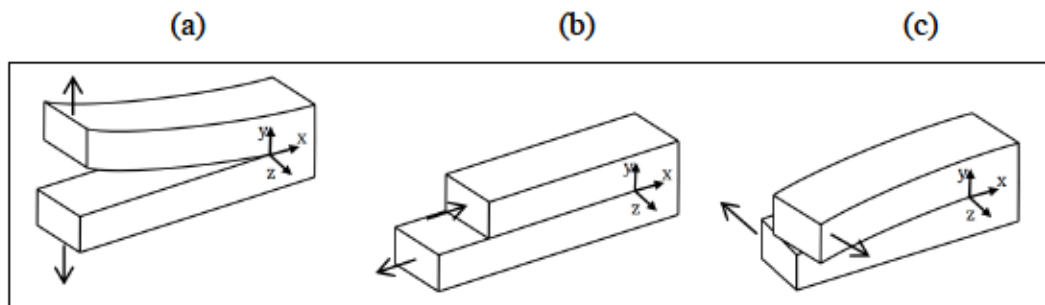


Figure 25 Les trois modes de chargement. a) Mode I, b) Mode II, c) Mode III

Le Mode I est le mode d'ouverture de la fissure où les surfaces de la fissure s'écartent et est le type de charge le plus courant. Le Mode II est un mode de cisaillement dans le plan où les surfaces de la fissure glissent perpendiculairement à la fissure. Le Mode III est un mode de cisaillement hors du plan où les surfaces de la fissure glissent de manière déchirante.

La solution du champ de contraintes élastiques près de la pointe de la fissure est définie comme suit :

$$\sigma = K_I f_I(r, \alpha) + K_{II} f_{II}(r, \alpha) + K_{III} f_{III}(r, \alpha) + \sigma_0 \quad 8$$

Où  $K_I$ ,  $K_{II}$  et  $K_{III}$  sont les facteurs d'intensité des contraintes pour le mode respectif,  $\sigma_0$  est une contrainte finie,  $r$  est la distance de la pointe de la fissure et  $\alpha$  est l'angle par rapport à la pointe de la fissure. Une définition schématique du champ de contraintes, de la distance radiale et de l'angle est représentée dans la Figure 26 :

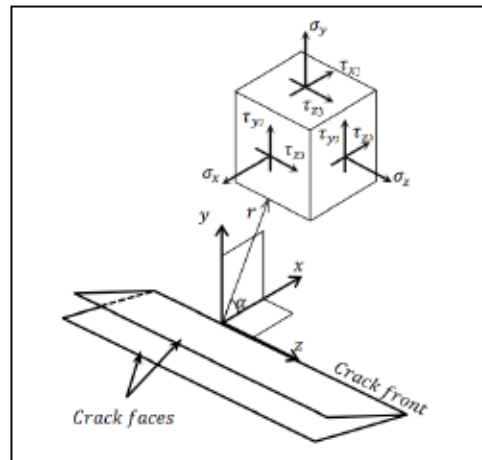


Figure 26 Système de coordonnées tridimensionnel des contraintes près du front de la fissure

$f_I$ ,  $f_{II}$  et  $f_{III}$  sont proportionnels à  $\frac{1}{\sqrt{r}}$  et l'exemple de  $f_I$  est comme suit :

$$(f_I)_{xx} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \left(1 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\left(\frac{3\alpha}{2}\right)\right) \quad 9$$

Ce qui rend le terme singulier lorsque  $r \rightarrow 0$ . Les autres termes ont une forme similaire.

Les facteurs d'intensité des contraintes pour les trois modes sont définis comme suit :

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}(r, 0) \quad 10$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yx}(r, 0) \quad 11$$

$$K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yz}(r, 0) \quad 12$$

Où  $\sigma_{ij}$  est la contrainte dans la direction particulière.

#### 4.1.3.2 Évaluation de l'intégrale de contour

Les facteurs d'intensité des contraintes peuvent être calculés à partir de l'intégrale J avec la méthode dite de l'intégrale d'interaction, comme mentionné dans les travaux de C. Shih et al. [35]. L'intégrale J est une méthode d'intégrale de contour pour calculer le taux de libération d'énergie de déformation, l'énergie dissipée lors de la fracture par unité de surface de fracture créée, précisé dans les travaux de J. R. Rice [36]. Cette mesure est également importante en mécanique de la fracture puisque l'énergie peut être liée à la croissance de la fissure. La méthode de l'intégrale d'interaction est une extension de l'intégrale J, où l'intégrale J est calculée pour des modes purs.

L'intégrale J est initialement définie pour une intégrale de contour en deux dimensions. Elle peut ensuite être étendue à trois dimensions, ce qui est utilisé dans la méthode de l'intégrale d'interaction pour extraire les facteurs d'intensité des contraintes.

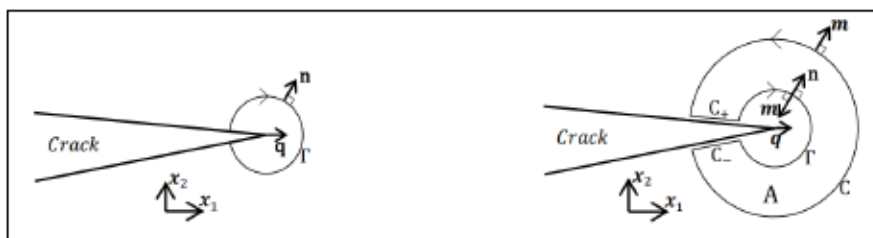


Figure 27 a) Une intégrale de contour en 2D et b) une intégrale de contour fermée en 2D

L'intégrale  $J$  bidimensionnelle, est définie pour une analyse quasi statique comme suit :

$$J = \lim_{\Gamma \rightarrow 0} \int_{\Gamma} \mathbf{bn} \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{q} \, d \quad 13$$

Où  $\Gamma$  est le contour autour de la pointe de la fissure,  $d$  est l'incrément d'arc sur  $\Gamma$ ,  $\mathbf{n}$  est la normale extérieure du contour,  $\mathbf{q}$  est le vecteur unitaire dans la direction d'extension virtuelle de la fissure.  $\mathbf{H}$  est défini selon :

$$\mathbf{H} = \mathbf{W}\mathbf{I} - \boldsymbol{\sigma} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} \quad 14$$

Où  $\mathbf{W}$  est l'énergie de déformation élastique,  $\mathbf{I}$  est le tenseur d'identité,  $\boldsymbol{\sigma}$  est le tenseur des contraintes de Cauchy et  $\mathbf{u}$  est le vecteur de déplacement. L'énergie de déformation peut être étendue pour inclure la réponse matérielle élastoplastique.

Le contour  $\Gamma$  est connecté aux deux faces de la fissure et englobe la pointe de la fissure. Le contour est réduit de sorte qu'il n'inclut que la pointe de la fissure ( $\Gamma \rightarrow \mathbf{0}$ ). La normale extérieure  $\mathbf{n}$  est située le long de tout le contour et le vecteur unitaire dans la direction d'extension virtuelle de la fissure  $\mathbf{q}$  est situé à la pointe de la fissure. Il convient de noter que l'intégrale  $J$  est indépendante du chemin pour un matériau élastique en l'absence de forces corporelles et de tractions sur les surfaces de fissure dans l'étude de C. Shih et al. [35]. Cela signifie que le contour n'a pas besoin d'être rétréci jusqu'à la pointe de la fissure, mais peut être spécifié n'importe où tant qu'il englobe la pointe de la fissure.

L'intégrale de contour 2D régulière peut être réécrite en une intégrale de contour fermée :

$$J = \oint_{C_+C_+C_+C_+} \mathbf{m} \cdot \mathbf{H} \cdot \bar{\mathbf{q}} \, d\Gamma - \oint_{C_+C_-} \mathbf{t} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} \cdot \bar{\mathbf{q}} \, d\Gamma \quad 15$$

Où les segments d'intégrale sont définis comme un contour fermé qui est étendu à partir de  $\Gamma$ . Le contour reste le même,  $C_+$  et  $C_-$  sont des contours le long des faces de la fissure respectivement et  $C$  englobe le contour de  $C_+$  et  $C_-$  sur la pointe de la fissure. La normale unitaire  $\mathbf{m}$  a été introduite ici au lieu de la normale extérieure en  $C$ , ce qui signifie que pour  $\Gamma$  la normale  $\mathbf{m} = -\mathbf{n}$ . Le vecteur de pondération  $\bar{\mathbf{q}}$  a été introduit comme le vecteur unitaire dans la direction d'extension virtuelle de la fissure,  $\bar{\mathbf{q}} = \mathbf{q}$ , sur  $\Gamma$  et nul sur  $C$ ,  $\bar{\mathbf{q}} = \mathbf{0}$ . Il est également nécessaire que  $C$  soit suffisamment lisse dans le domaine englobé par le contour. Dans l'équation,  $\mathbf{t}$  est la traction sur les surfaces de la fissure,  $\mathbf{t} = \mathbf{m} \cdot \boldsymbol{\sigma}$ . La traction sur les surfaces de la fissure est négligeable et par conséquent, le second terme dans l'intégrale  $J$  est ignoré.

L'intégrale  $J$  peut être transformée en une intégrale de domaine avec le théorème de la divergence [35] :

$$J = \int_A \left( \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \right) \cdot (\mathbf{H} \cdot \bar{\mathbf{q}}) dA \quad 16$$

Où  $A$  est le domaine de l'aire englobé par le contour fermé, et  $dA$  le segment d'aire infinitésimale.

En introduisant l'équation d'équilibre :

$$\left( \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \right) \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad 17$$

Et le gradient de l'énergie de déformation pour un matériau homogène avec des paramètres matériels constants :

$$\frac{\partial W(\boldsymbol{\epsilon}^m)}{\partial \mathbf{x}} = \frac{\partial W}{\partial \boldsymbol{\epsilon}^m} \cdot \frac{\partial \boldsymbol{\epsilon}^m}{\partial \mathbf{x}} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \frac{\partial \boldsymbol{\epsilon}}{\partial \mathbf{x}} \quad 18$$

Où  $\boldsymbol{\epsilon}^m$  est la déformation mécanique et  $\mathbf{f}$  est la force corporelle par unité de volume et l'influence thermique est négligée.

L'intégrale  $J$  2D peut être réécrite sous sa forme finale :

$$J = - \int_A \left[ H \cdot \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} + \left( f \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) \cdot \bar{q} \right] dV \quad 19$$

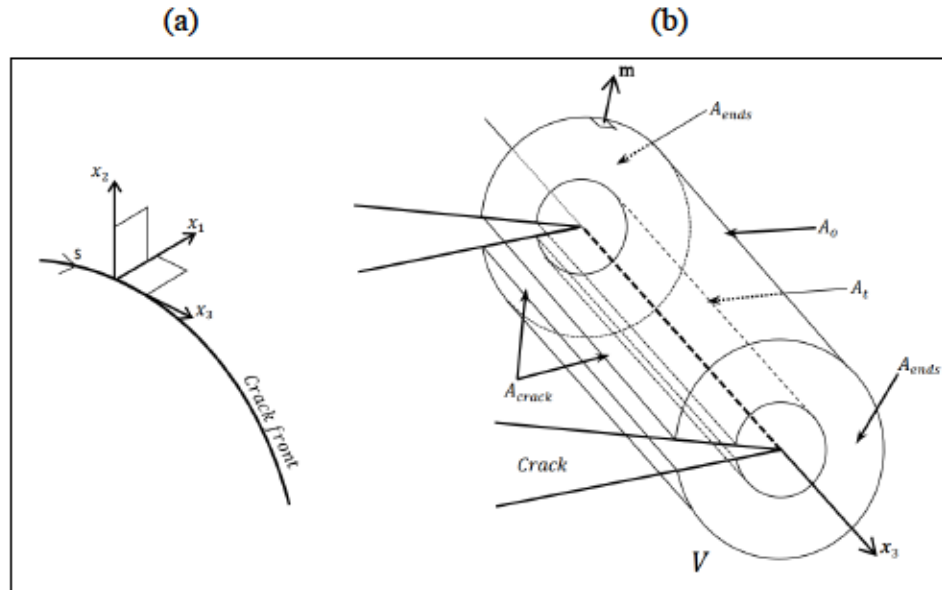


Figure 28 a) Système de coordonnées locales, b) Intégrale de contour pour un front de fissure tridimensionnel général

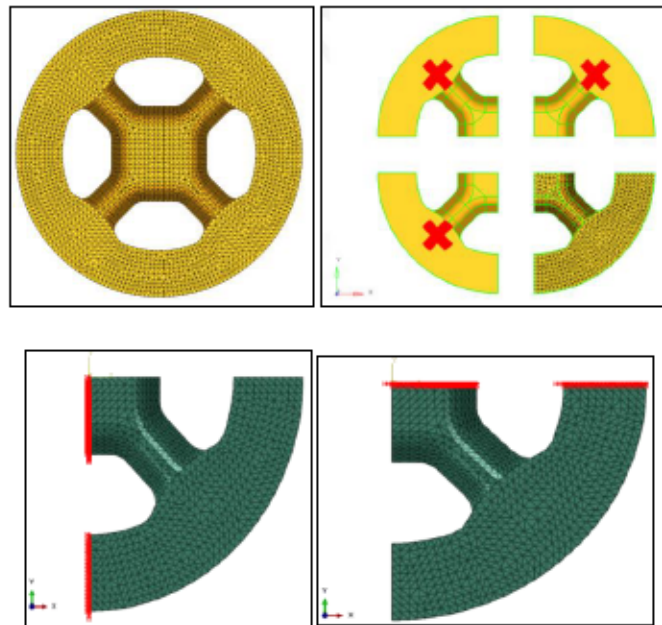
L'intégrale  $J$  bidimensionnelle peut être étendue à un front de fissure tridimensionnel où l'intégrale  $J$  est définie point par point par rapport à une variable paramétrique  $s$  le long du front de fissure,  $J(s)$ . Les calculs tridimensionnels sont effectués de manière similaire au cas bidimensionnel, mais le taux de libération d'énergie est initialement calculé par rapport à un segment fini du front de fissure, noté  $\bar{J}$ . Cela est ensuite utilisé pour obtenir le taux de libération d'énergie point par point  $J(s)$  pour chaque ensemble de nœuds le long de la pointe de la fissure.

#### 4.1.4 Étude de la fissuration et de leur propagation dans la matrice

Pour analyser les fissurations et leur propagation dans une matrice tridimensionnelle, une approche de modélisation utilisant la symétrie inhérente de la structure a été



adoptée. Comme illustré dans la Figure 29, la matrice complète a été divisée en quatre sections symétriques, et l'étude s'est concentrée sur un seul de ces morceaux. Cette méthode repose sur l'hypothèse que la symétrie géométrique et les conditions de chargement permettent de simplifier l'analyse sans perdre de précision ni de représentativité des résultats.



**Figure 29 la symétrie de la matrice et la section d'intérêt**

La division de la matrice en quatre parties égales est principalement due par deux raisons clés :

- **Utilisation de la symétrie** : La structure de la matrice présente une symétrie évidente, ce qui permet de réduire le domaine de calcul tout en maintenant l'intégrité de l'analyse. En travaillant sur un seul quart de la matrice, on peut appliquer des conditions aux limites appropriées qui reproduisent les effets de la structure complète.
- **Réduction du temps de calcul** : Les simulations numériques, en particulier celles impliquant des analyses de fissuration et de propagation, sont souvent très

coûteuses en ressources informatiques. En limitant l'étude à une portion symétrique de la matrice, nous réduisons considérablement le nombre d'éléments finis à analyser, ce qui diminue le temps de calcul nécessaire pour obtenir des résultats.

#### 4.1.4.1 Mise en œuvre de la méthode

La Figure 29 présente deux vues de la matrice : l'une avec la matrice entière et l'autre montrant une seule section symétrique utilisée pour l'analyse. Les zones marquées indiquent les endroits où les conditions de symétrie ont été appliquées. En traitant uniquement cette portion, nous avons pu focaliser les ressources de calcul sur les détails fins de la fissuration et de la propagation.

Dans le but de simuler la propagation des fissures, la méthode des éléments finis étendus (XFEM) est adoptée dans cette étude. Dans cette méthode, les champs asymptotiques proches de la pointe de la fissure et les champs discontinus ont été ajoutés à l'approximation classique basée sur le déplacement près d'une fissure en utilisant l'approche de la partition. Par conséquent, l'approximation du déplacement est fournie dans l'équation suivante des études de M. Karimi and J. Rouzegar [37] :

$$U_{xfem} = \sum_{i \in I} N_i(x)(u_i) + \sum_{i \in I^{cut}} N_i(x)H(x)(a_i) + \sum_{i \in I^{tip}} N_i(x) \sum_{k=1}^4 G_k(x)(b_i^k) \quad 20$$

Où  $U_{xfem}$  est le vecteur d'approximation du déplacement,  $I^{cut}$  et  $I^{tip}$  sont respectivement les ensembles de nœuds élémentaires entourant la face de la fissure et la pointe de la fissure.  $u_i$  sont les degrés de liberté de déplacement nodal conventionnel pour les nœuds non enrichis.  $H(x)$  représente la fonction discontinue de Heaviside, qui est égale à +1 lorsque la distance du point de mesure  $x$  aux côtés de la fissure est positive et égale à -1 lorsque la distance du point de mesure  $x$  aux côtés de la fissure est négative.  $a_i$  et  $b_i^k$  sont les vecteurs de degrés de liberté enrichis associés respectivement avec la fonction de Heaviside et avec l'enrichissement de la pointe de

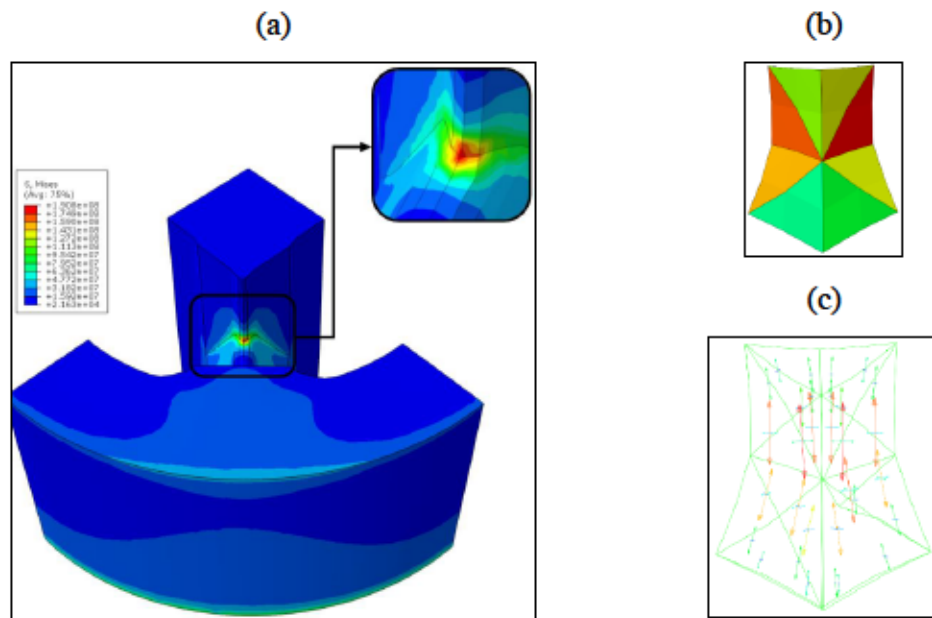
la fissure. Quatre fonctions asymptotiques de pointe de fissure sont nécessaires pour les nœuds enrichis de pointe pour établir la solution pour les matériaux isotropes élastiques linéaires cités dans les travaux de Z. Chen et al. [38] :

$$[G_k(r, \varphi), k = 1 \sim 4] = \left[ \sqrt{r} \sin \frac{\varphi}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\varphi}{2}, \sqrt{r} \sin \frac{\varphi}{2} \sin \varphi, \sqrt{r} \cos \frac{\varphi}{2} \sin \varphi \right] \quad 21$$

Où les coordonnées polaires locales spécifiées en amont de la fissure sont désignées par  $r$  et  $\varphi$ .

#### 4.1.4.2 Résultats de l'analyse statique

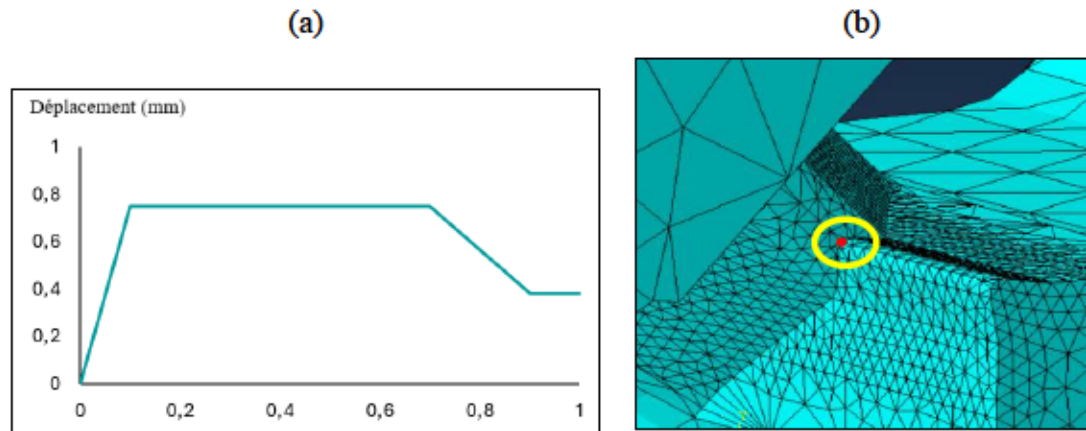
Une analyse statique initiale sur le quart de la matrice se concentrant sur sa réponse sous des conditions opérationnelles est réalisée.



**Figure 30 Visualisation des zones de concentration des contraintes de l'analyse statique – a) Perspective, b) Topologique, c) Filaire**

La Figure 30 montre les zones de concentration des contraintes, qui représentent l'intérêt de cette analyse. Ces zones de contraintes accrues sont clairement définies

dans la Figure 19, montrant l'existence d'une corrélation avec les points critiques dans la géométrie de la matrice. Une concordance est révélée lorsque les données de simulation sont comparées aux inspections physiques réelles de la matrice après l'opération.



**Figure 31 a) Courbe de déplacement au nœud critique, b) Nœud critique**

La Figure 31 illustre le graphe de déplacement au nœud critique. Dès le début du processus, le déplacement augmente avec le temps. Cela indique que, pendant la première étape de l'extrusion, les contraintes appliquées et l'expansion thermique dans la matrice provoquent une distorsion du nœud. Ensuite, les niveaux de déplacement se stabilisent, suggérant que la matrice a atteint un état d'équilibre en réponse à une charge soutenue ou à des conditions thermiques constantes. Dans la dernière étape, le déplacement revient à un niveau inférieur. Cela signifie que le système a atteint un nouvel état d'équilibre sous les conditions modifiées. L'accent est actuellement mis sur l'analyse de cette région pour étudier la croissance des fissures, dans le but de simuler le chemin de propagation des fissures.

#### 4.1.4.3 Modélisation de la fissure dans la zone des concentrations des contraintes

- **Modélisation XFEM**

Pour modéliser la fissure au niveau de la zone de concentration des contraintes dans la matrice d'extrusion, la méthode XFEM a été utilisée en raison de sa capacité à simuler la croissance des fissures sans nécessiter de remailler le modèle à chaque étape de la propagation. Cette méthode permet de capturer les effets de la fissuration de manière plus précise et efficace, surtout dans des géométries complexes comme celles rencontrées dans la matrice d'extrusion de l'étude.

La démarche a commencé par l'insertion de la fissure dans le module d'interaction d'Abaqus, en sélectionnant l'option (interaction > special > crack initiation) pour initier la fissure. Une plaque rectangulaire, représentée en rouge dans la Figure 32, a été introduite pour indiquer l'emplacement initial de la fissure. Cette plaque agit comme un déclencheur pour la fissuration dans la zone où les contraintes sont concentrées, ce qui est évident pour comprendre comment et où la fissure pourrait se propager sous les pressions appliquées.

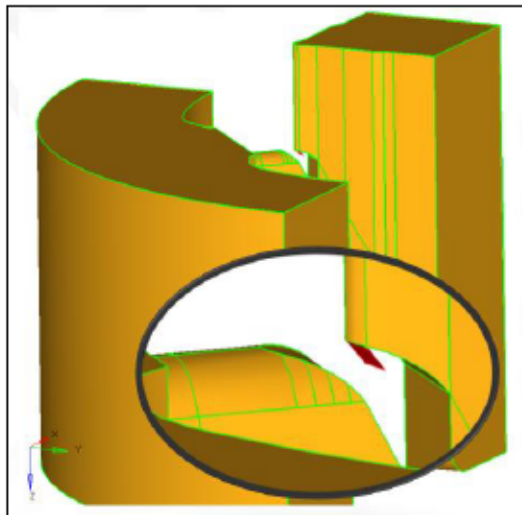
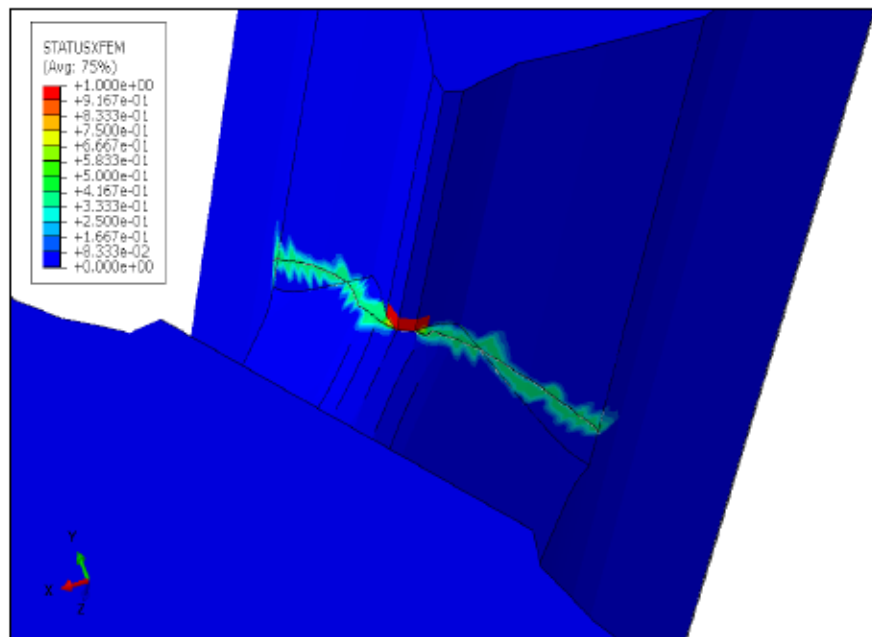


Figure 32 L'insertion de la plaque rectangulaire pour initier la fissure

En focalisant sur cette zone, l'analyse statique effectuée vise à évaluer le comportement de la fissure sous les conditions de chargement précédentes.

Le résultat de la simulation, comme le montre la Figure 33, met en évidence la propagation de la fissure sous l'effet des contraintes mécaniques. Les zones colorées indiquent l'intensité des contraintes autour de la fissure. Le contour en rouge représente les zones où la fissure est la plus susceptible de se propager, marquant les chemins critiques de la matrice qui pourraient conduire à une défaillance si les contraintes continuent à s'accumuler.



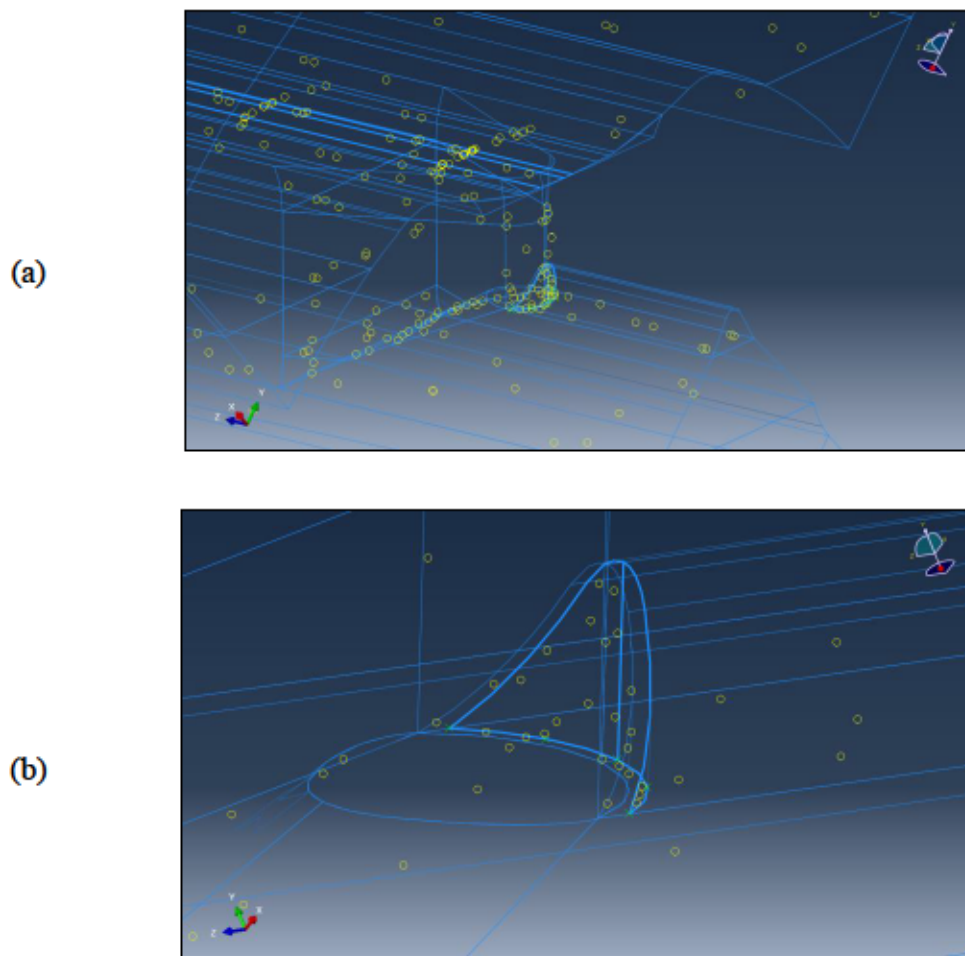
**Figure 33 L'apparition des fissures et leurs propagations**

Cette simulation démontre clairement que la zone où la fissure a été initiée est soumise à des contraintes extrêmes qui favorisent la propagation de la fissure. Les résultats obtenus permettent non seulement de valider l'emplacement initial de la fissure, mais aussi de mieux comprendre comment cette fissure peut évoluer sous les conditions appliquées. Pour prévenir la défaillance, il est donc à renforcer cette zone ou d'optimiser la conception de la matrice pour mieux distribuer les contraintes. Ainsi, il

faut proposer des solutions d'ingénierie qui visent à améliorer la durée de vie de la matrice et à éviter les interruptions de production dues à ces fissures.

- **Modélisation J-Contour**

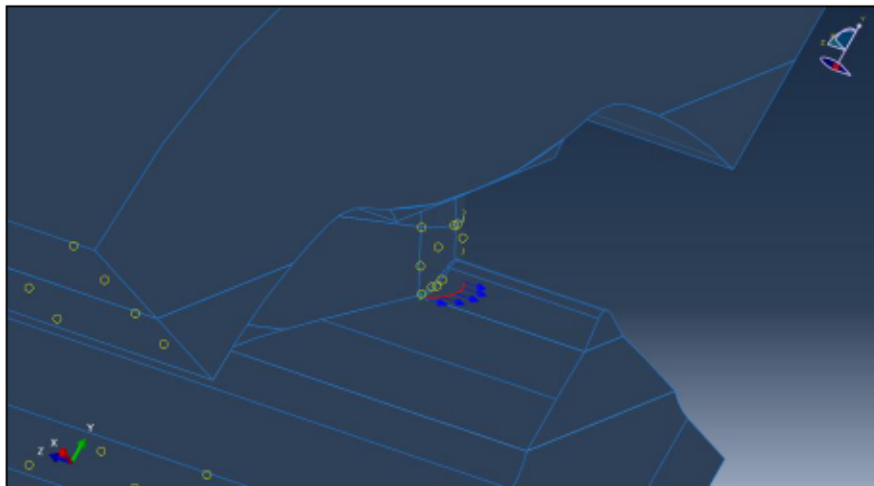
Pour la modélisation de la fissure dans la matrice d'extrusion en utilisant la méthode du contour  $J$ , une approche méthodique a été suivie pour analyser les zones de concentration des contraintes. La fissure a été insérée précisément dans les zones critiques identifiées, comme illustrée dans la Figure 34. Ces figures montrent les contours de la fissure et la répartition des éléments entourant cette zone critique.



**Figure 34 a) Vue en perspective, b) Vue en zoom - de l'emplacement de la fissure**

La méthode du contour  $J$  permet de calculer le facteur d'intensité de contrainte autour de la fissure, pour suivre comment la fissure peut se propager sous des charges appliquées. L'insertion de la fissure a été réalisée en utilisant le module de modélisation d'Abaqus, où des spécifications précises ont été définies pour s'assurer que la fissure suit le front de la contrainte dans la direction du flux de matière.

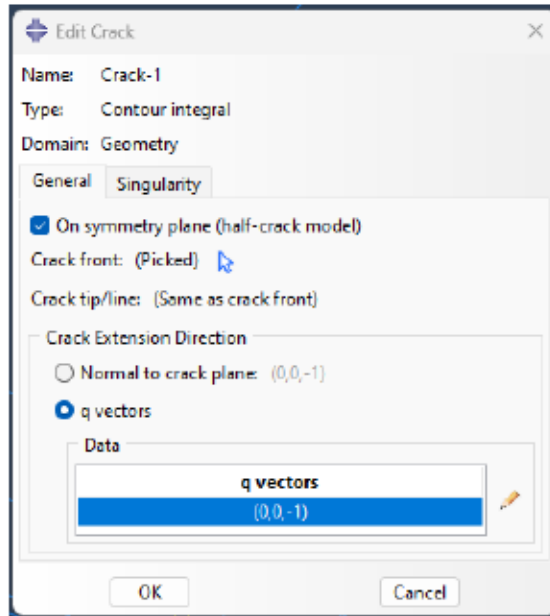
La Figure 35 présente une étape clé dans la modélisation Contour  $J$  avec Abaqus, où la direction d'extension de la fissure a été définie via des vecteurs  $q$ . En fixant correctement les vecteurs  $q$  suivant le modèle et le type de chargement, la simulation reflète plus fidèlement les conditions réelles de fonctionnement, ce qui rend les résultats fiables.



**Figure 35 La direction d'extension de la fissure**

Par la suite, la reformulation du contour a été paramétrée dans la Figure 36, où les différents réglages ont été introduits en éliminant les singularités.



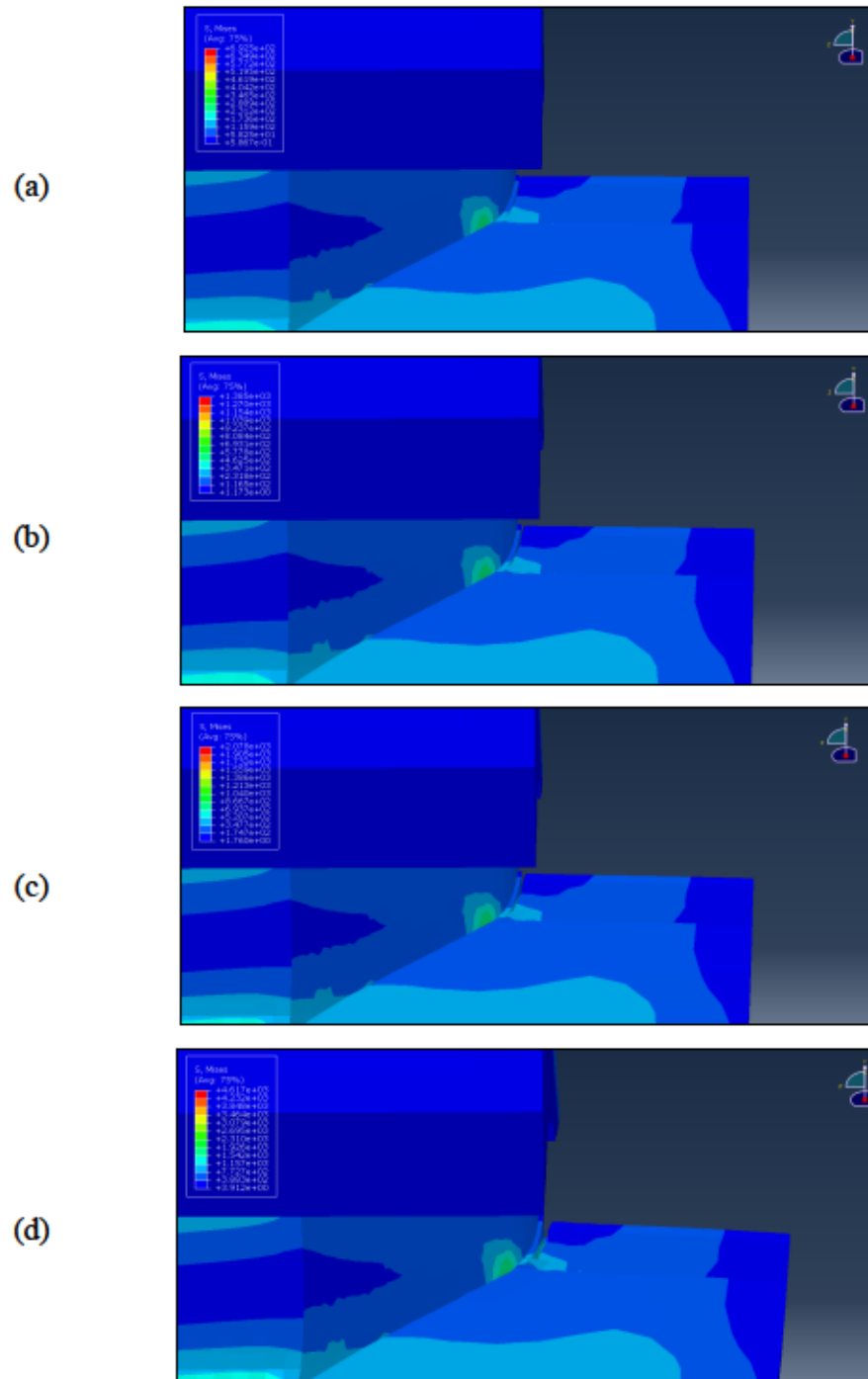


**Figure 36 Réglages de singularité et de la direction du vecteur**

- **Résultats de propagation de la fissure dans la matrice :**

La simulation a été réalisée sur un quart de la matrice d'extrusion afin de minimiser le temps de calcul tout en conservant une représentation précise du problème. Les résultats sont présentés sous forme de séquences successives, montrant l'évolution de la fissure.

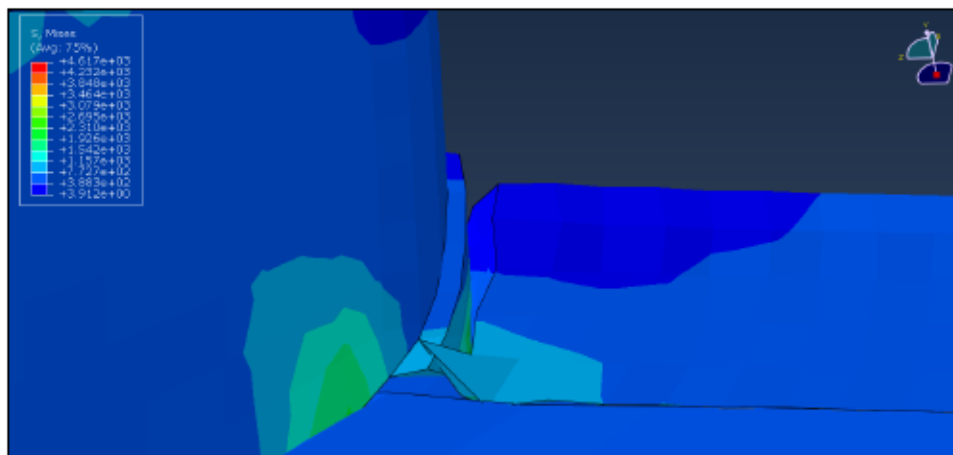
Au fur et à mesure que la fissure progresse, les contours de la simulation montrent une extension de la zone affectée par des contraintes élevées. On constate une migration de ces contraintes le long du chemin de propagation prévu pour la fissure, ce qui est en accord avec les hypothèses théoriques. L'effet de bord libre est visible dans la Figure 37, avec une légère dispersion des contraintes tout au long que la fissure se propage.



**Figure 37 Résultats des itérations de propagation de fissure – a) 1ère itération, b) 2ème itération, c) 3ème itération, d) 4ème itération**

Au fur et à mesure que la fissure continue de se propager, comme illustrée dans les différents sous-figures de la Figure 37, elle pénètre plus profondément dans la structure. Les niveaux de contrainte augmentent autour de la fissure, ce qui indique un risque accru de rupture.

Le résultat final de la propagation de fissure suivant un Contour  $J$  fait en sorte qu'il y a un endommagement important au niveau de la zone identifiée dans la matrice. Cette distorsion fait en sorte que cette zone doit impérativement être renforcée ou bien optimisée afin de minimiser cette défaillance et du coup, augmenter la durée de vie avant qu'une fissure apparait.



**Figure 38 L'endommagement identifié dans la matrice**

Ces résultats montrent la contribution de la méthode contour  $J$  pour prédire le comportement de la fissure et pour mettre en évidence la nécessité d'agir en utilisant des méthodes spécifiques à ce type de problème tel que l'optimisation de la géométrie pour éviter des défaillances imprévues comme le cas des fissurations.

Toutefois, il est à noter que ce projet est encore en cours. Une optimisation de la forme de la matrice, visant à réduire les concentrations de contraintes, est actuellement en phase d'analyse. Les résultats de cette optimisation feront l'objet d'une publication dans un article de journal scientifique à venir.

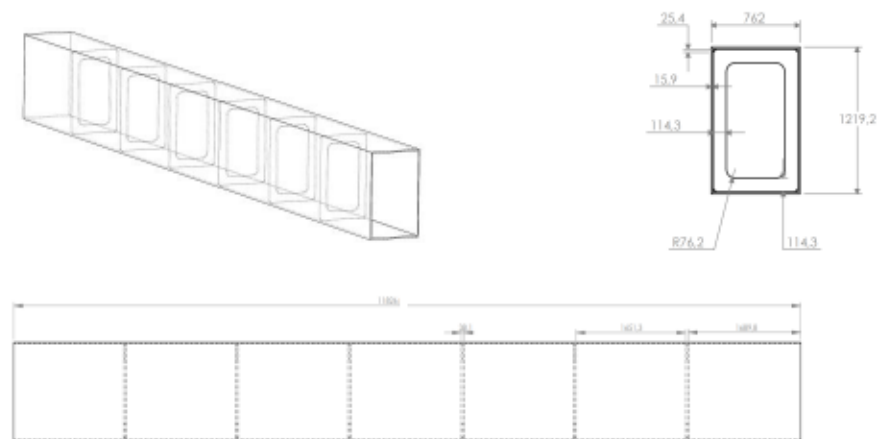
## 4.2 Défaillance mécanique dans les grues portuaires

### 4.2.1 Analyse statique

#### 4.2.1.1 Création d'un modèle CAD 3D de la grue

La conception de la grue portuaire en 3D est un processus complexe qui implique plusieurs étapes détaillées pour s'assurer que chaque composant est conçu avec précision et que l'assemblage final est structurellement solide et fonctionnel. Voici les principales étapes suivies pour réaliser cette modélisation à l'aide de SolidWorks :

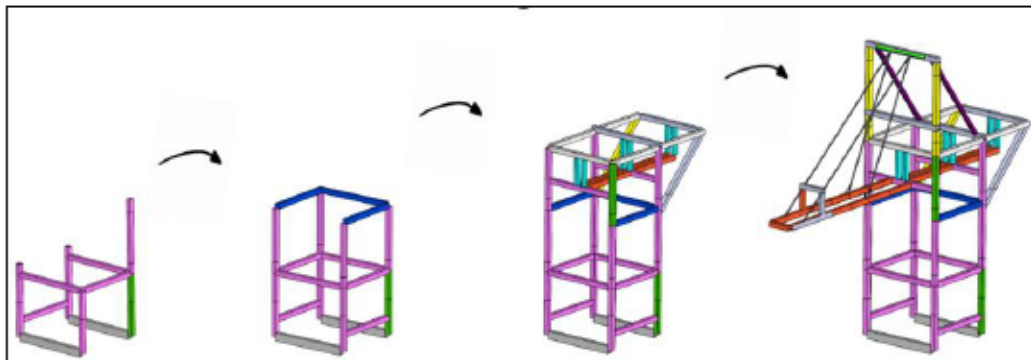
La première étape de la conception consiste à dessiner toutes les poutres nécessaires pour la structure de la grue. Chaque poutre est modélisée individuellement, en respectant les dimensions spécifiques et les tolérances requises dans les documentations fournies. Le dessin inclut des détails tels que les sections transversales et les renforts internes. L'une des sections typiques, présentées dans la Figure 39, la section S1, est détaillée avec des dimensions précises pour garantir la compatibilité et l'intégrité structurelle. Les dimensions et les détails des renforts internes sont spécifiés pour chaque poutre.



**Figure 39 Dimensions de la section S1**

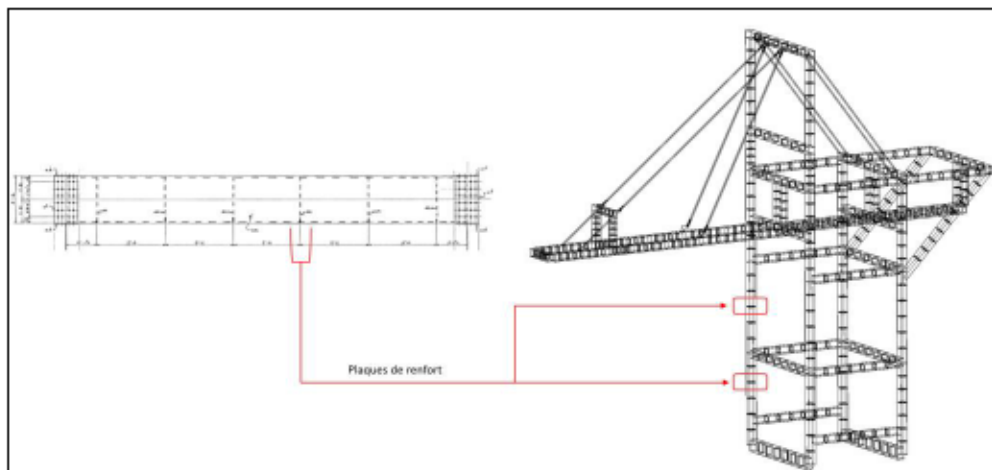
Une fois que toutes les poutres individuelles sont dessinées, l'étape suivante consiste à les assembler pour former la structure de la grue. Cette phase d'assemblage est pour

assurer que toutes les pièces s'adaptent parfaitement et que la structure est stable. Le processus d'assemblage se déroule en plusieurs étapes, chaque sous-assemblage étant ajouté progressivement pour former la structure complète. Les sous-assemblages comprennent la base de la grue, les colonnes verticales, les poutres horizontales, et finalement les composants du bras de levage. Chaque étape est soigneusement vérifiée pour garantir la précision de l'assemblage qui est représenté dans la Figure 40.



**Figure 40** Étapes d'assemblage de chaque sous-ensemble de la grue

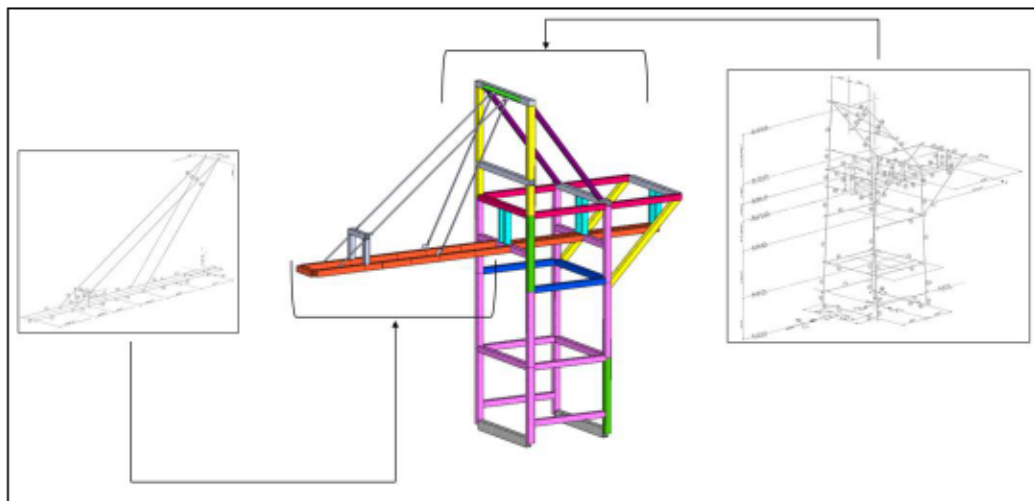
Après l'assemblage des poutres, une représentation semi-filaire du modèle est créée. Cette représentation montre la structure complète de la grue avec tous les composants principaux et les renforts.



**Figure 41** Représentation semi-filaire du modèle

Ces plaques de renfort sont ajoutées à des points critiques de la structure pour augmenter la résistance et prévenir les défaillances structurelles. Ces plaques sont placées stratégiquement en fonction des analyses de charge et des simulations de contraintes effectuées.

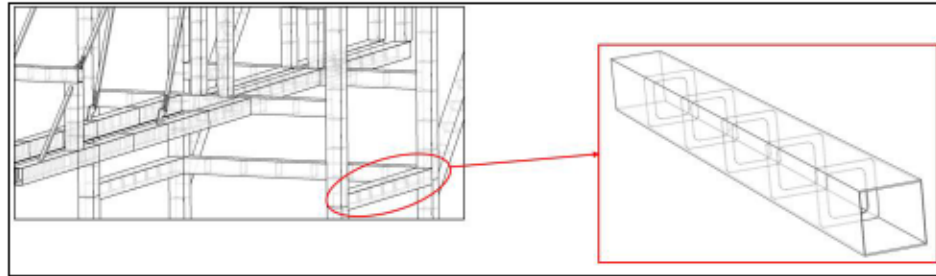
Enfin, la Figure 42 représente une vue de perspective détaillée du modèle pour vérifier que tous les composants sont correctement assemblés et pour différencier les deux parties de structure étant, la base de la grue et la flèche.



**Figure 42** Vue de perspective détaillée du modèle

#### **4.2.1.2 Spécificité du matériau**

Pour la modélisation de la grue portuaire, nous avons choisi d'utiliser l'acier structural G40.8 selon la spécification de 1960. Cet acier est reconnu pour sa résistance améliorée aux fractures, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications structurales critiques telles que les grues portuaires. La Figure 43 représente un schéma d'une section de la grue, incluant une poutre spécifique avec les renforts internes.



**Figure 43 Schéma d'une section de la grue avec les renforts internes**

#### **4.2.1.3 Modélisation en éléments finis utilisant SolidWorks et**

##### **Abaqus**

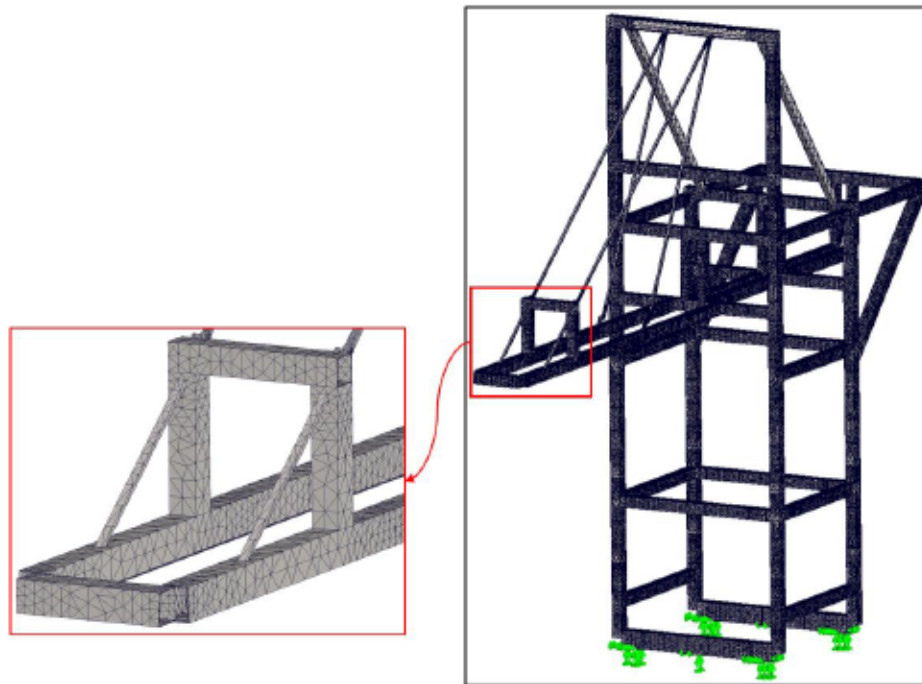
Pour étudier les performances structurelles de la grue portuaire, des simulations aux éléments finis (EF) ont été réalisées en utilisant deux logiciels de pointe : SolidWorks et Abaqus. Chaque logiciel a permis d'explorer différents aspects de la modélisation et de l'analyse structurelle, fournissant des perspectives complémentaires sur le comportement de la grue sous diverses conditions de charge.

- **Modélisation sur SolidWorks**

La modélisation effectuée sur SolidWorks a été réalisée en utilisant un maillage tétraédrique de haute qualité. Ce choix a permis de capturer avec précision les détails géométriques complexes de la grue et de s'assurer que les résultats de la simulation sont fiables et précis. Les éléments tétraédriques paraboliques volumiques ont été employés pour mieux représenter les courbures et les changements géométriques, augmentant ainsi la précision des résultats. Bien qu'il soit vrai que les éléments coque soient généralement plus adaptés pour des structures à faible épaisseur, la complexité de la géométrie, ainsi que d'autres paramètres spécifiques du modèle, combinés à la facilité d'obtention des résultats, ont conduit à privilégier l'utilisation des éléments tétraédriques dans cette étude. Un maillage adaptatif basé sur la courbure a été utilisé, intégrant un nombre accru d'éléments dans les zones à haute courbure, garantissant ainsi une meilleure résolution là où les contraintes sont les plus critiques. De plus, la

méthode adaptative a été mise en œuvre pour augmenter l'ordre polynomial des éléments en cas d'erreurs élevées, ce qui améliore encore la précision des calculs.

Le processus de maillage a impliqué plusieurs itérations pour optimiser la taille des éléments et le nombre de nœuds afin d'obtenir un équilibre entre la précision des résultats et les ressources informatiques disponibles. La configuration finale du maillage, représentée dans la Figure 44, comprend des éléments de taille variant entre 115.3 mm et 576.5 mm, totalisant 547 860 éléments et 938 231 nœuds.



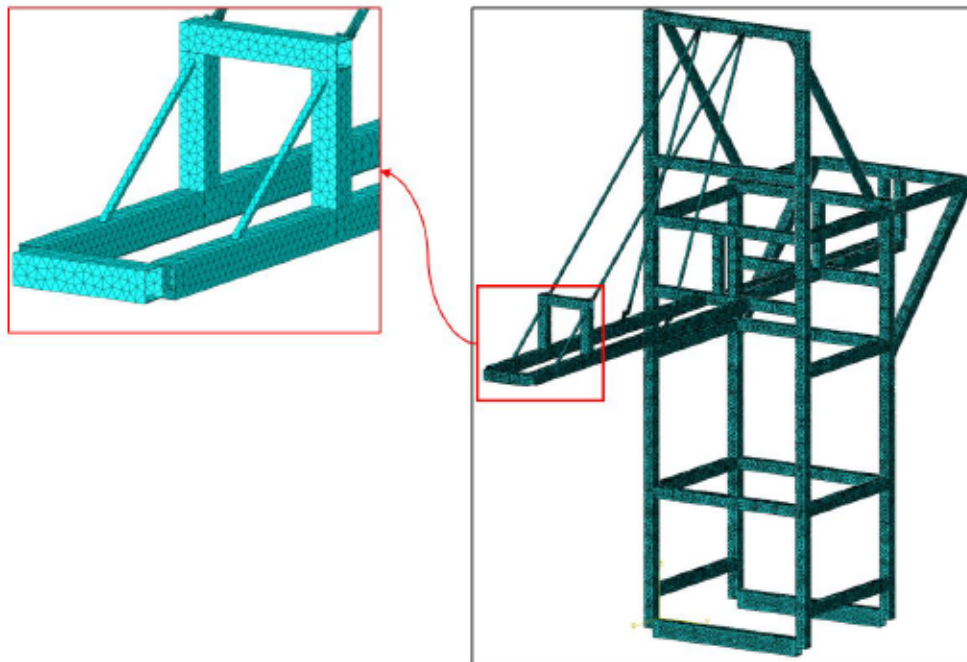
**Figure 44 Configuration du maillage sous SolidWorks**

- **Modélisation sur Abaqus**

Par la suite, le passage à Abaqus s'est avéré nécessaire pour exploiter ses capacités supérieures en matière de maillage et d'analyse de contraintes complexes. Comme illustré dans la Figure 45, la simulation sous Abaqus a impliqué l'utilisation de maillages tétraédriques quadratiques C3D10, avec un contrôle rigoureux de la taille des éléments, variant de 1.5 mm à 15 mm, et un facteur de déviation maximale de 0.1,



permettant ainsi une précision accrue dans la modélisation des comportements sous charges dynamiques et statiques. Le modèle final a intégré un total de 556 327 nœuds et 271 833 éléments tétraédriques.



**Figure 45 Configuration du maillage sous Abaqus**

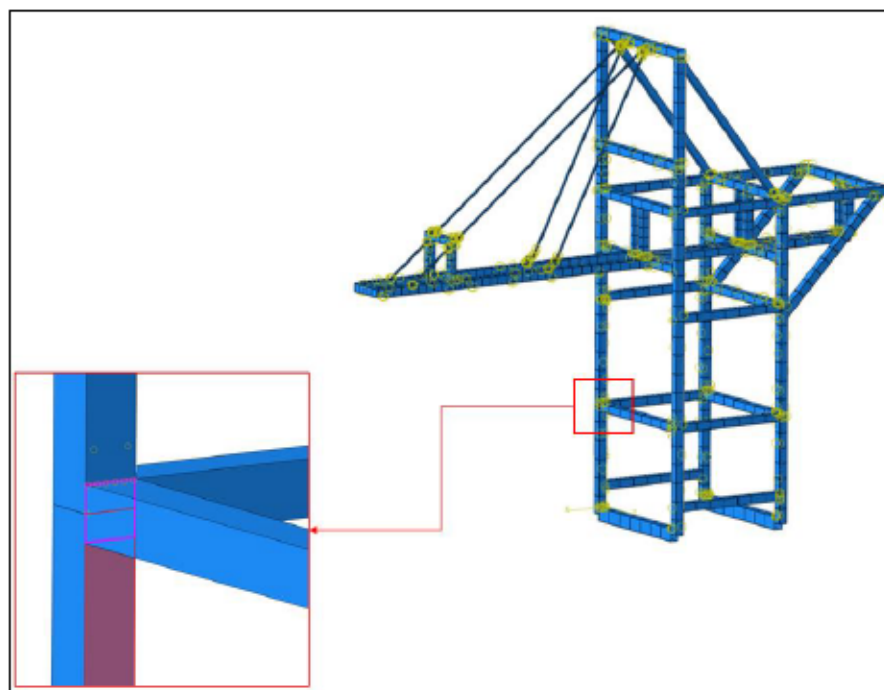
Cette approche biomimétique a facilité une analyse comparative et une validation des résultats obtenus, permettant ainsi une évaluation complète de la viabilité structurelle de la grue étudiée. Les simulations ont révélé des insights critiques sur le comportement dynamique et statique de la structure sous charges opérationnelles et extrêmes, fournissant une base solide pour des recommandations de conception et des stratégies d'amélioration de maillage visant à augmenter l'efficacité opérationnelle de la grue portuaire.

#### **4.2.1.4 Définition des interactions**

Avant la phase de simulation aux éléments finis de la structure, une attention particulière a été accordée aux interactions entre les poutres pour la fidélité des

résultats. Pour modéliser les connexions, nous avons opté pour des surfaces traitées comme soudées, employant une méthode de discrétisation Surface-To-Surface standard générée automatiquement par le logiciel. Cette approche est préférée pour sa capacité à simuler les contacts et les transferts de charge entre éléments interfacés, ce qui est essentiel pour évaluer l'intégrité structurelle des assemblages sous charges diverses.

Chaque interaction a été définie individuellement sur 155 surfaces différentes pour assurer que chaque poutre contribue correctement à la stabilité globale de la structure comme présentée dans la Figure 46.



**Figure 46 Définition des interactions avec la discrétisation Surface-To-Surface**

Cette modélisation complexe permet de capturer précisément les effets de la soudure, y compris la rigidité locale et la redistribution des contraintes, qui sont des facteurs critiques dans la sécurité des structures. La simulation intégrant ces interactions détaillées fournit une vue complète sur le comportement dynamique et statique de la

structure, permettant ainsi d'identifier les zones susceptibles de défaillance et de recommander des renforcements structuraux appropriés.

Dans le cadre de notre étude sur la performance de la grue portuaire, divers scénarios de charge ont été simulés pour représenter fidèlement les conditions opérationnelles auxquelles la grue est soumise. Ces scénarios incluent une variété de charges qui reflètent les contraintes et les forces que la structure de la grue doit supporter en situation réelle.

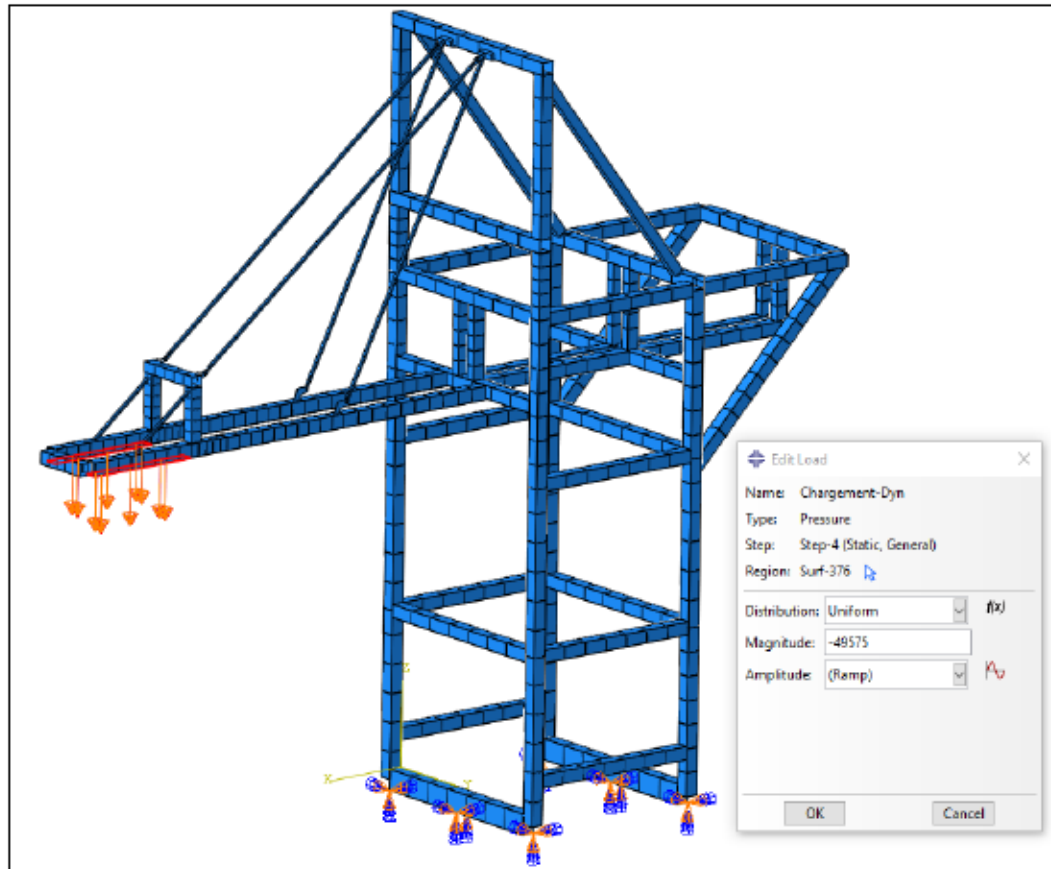
#### **4.2.1.5 Applications des charges des différents scénarios et leurs résultats**

##### **4.2.1.5.1 Scénario 1 : Charge sur l'extrémité de la flèche**

Dans le premier scénario, une charge concentrée sur l'extrémité de la flèche de la grue a été appliquée. Ce scénario est conçu pour évaluer la capacité de la flèche à résister aux forces maximales lors de l'opération de levage, où la charge est principalement supportée à son extrémité. Ce type de charge est typique lorsque la grue soulève des objets lourds et étendus. L'analyse vise à vérifier la déformation et les contraintes générées dans la flèche, pour garantir que les contraintes restent dans des limites acceptables. Afin de modéliser ce scénario, une tenue de compte de la limitation d'Abaqus pour appliquer une force sur une surface a été considérée. Du fait, une transformation de la force en pression a été nécessaire.

Pour ce scénario, la force appliquée était de 448 158 N, et la surface mesurée où cette force a été appliquée est de  $9.044101 \text{ m}^2$ . En substituant ces valeurs, nous obtenons une pression de 49 575 Pa. Cette transformation permet de modéliser les effets de la force comme une pression uniforme agissant sur l'extrémité de la flèche.

La Figure 47 présente cette pression définie avec une distribution uniforme sur la région spécifique de la flèche et le type de charge est configuré comme "Static, General" pour simuler les conditions statiques de levage de charge.



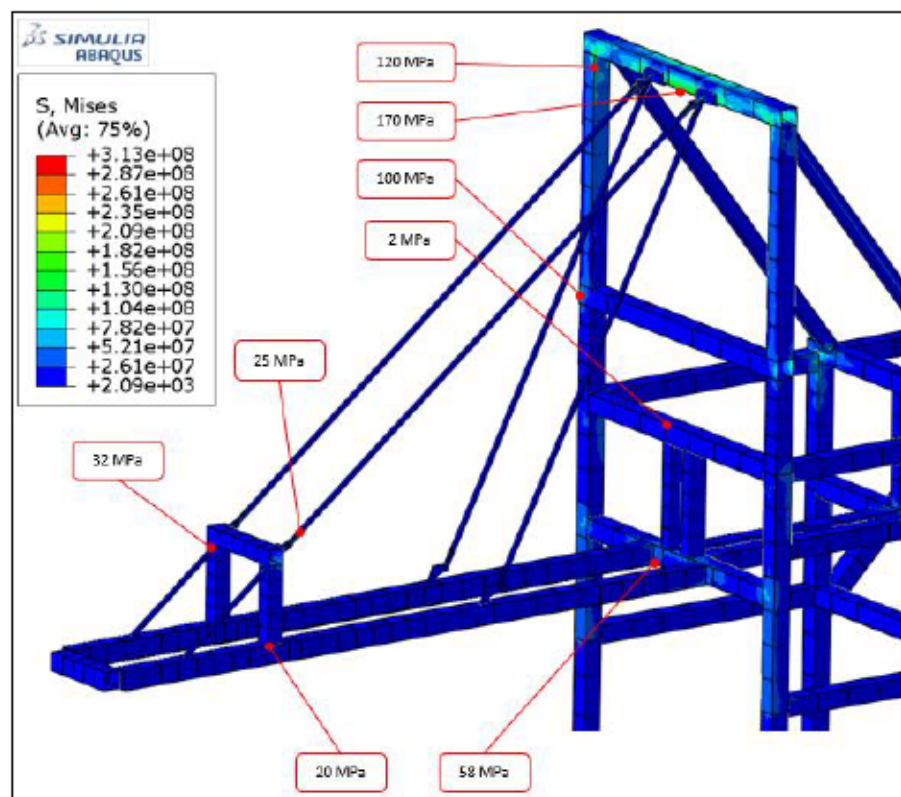
**Figure 47 Charge de levage appliqué au niveau de la flèche**

▪ **Résultats :**

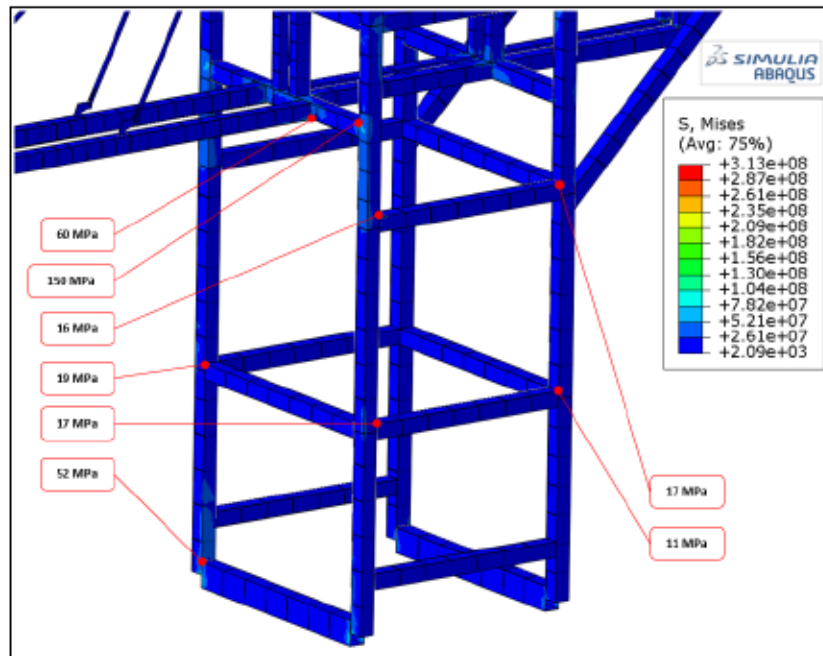
Dans les résultats de simulation Abaqus, plusieurs zones de contraintes élevées ont été identifiées. La contrainte von Mises maximale de 170 MPa se situe à une jonction critique de la partie supérieure de la structure, ce qui indique une concentration importante de contrainte par rapport à la limite élastique de 280 MPa. Cette zone critique, comme montre la Figure 48 et la Figure 49, est souvent soumise à des forces de traction importantes, ce qui explique ces niveaux de contraintes. D'autres zones dans la partie supérieure affichent des contraintes de 120 MPa et 100 MPa, notamment aux

câbles de support qui sont généralement soumis à de fortes tensions en raison de leur fonction de stabiliser la grue lors de transfert de charges.

Dans la partie inférieure de la grue, la contrainte maximale est de 150 MPa à une jonction critique, similaire aux observations faites pour la partie supérieure. Des zones avec des contraintes de 60 MPa et 52 MPa sont également présentes aux jonctions et aux points de support. Ces valeurs élevées dans les deux sections de la grue montrent que les éléments de ces zones jouent un rôle important dans le transfert de charge à travers la structure.



**Figure 48** Résultat de l'analyse statique au niveau de la flèche sous Abaqus, zone supérieure de la grue

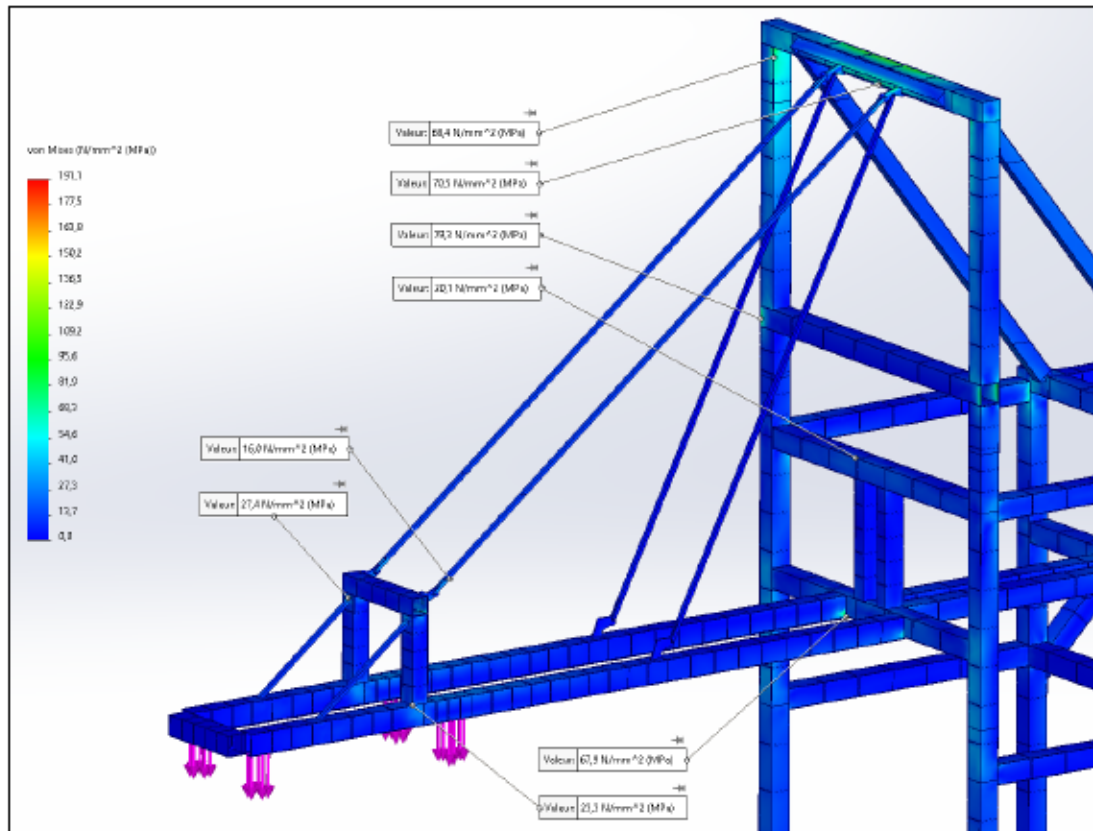


**Figure 49** Résultat de l'analyse statique au niveau de la flèche sous Abaqus, zone inférieure de la grue

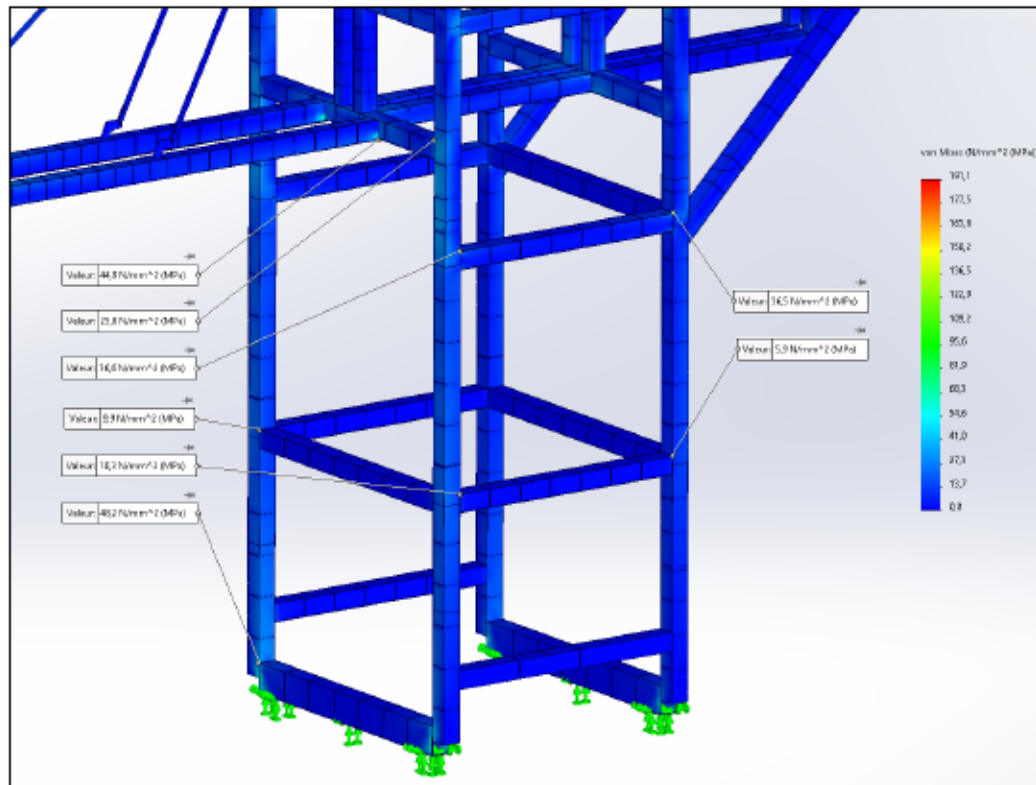
En plus des zones de contraintes élevées, l'analyse a révélé des zones de contraintes modérées et faibles dans les deux parties de la structure. Pour la partie supérieure, des contraintes de 32 MPa et 25 MPa se trouvent dans les poutres horizontales, ce qui montre une distribution plus uniforme des forces. Ces éléments participent à la distribution des charges sans subir de charges maximales, assurant ainsi la stabilité globale. Dans la partie inférieure, les contraintes modérées de 17 MPa, 19 MPa, et 16 MPa indiquent également une répartition uniforme des forces. La plus faible contrainte, 11 MPa, se trouve dans des zones qui subissent moins de stress, probablement en raison de leur distance par rapport aux points d'application de charge.

En comparaison avec les résultats de SolidWorks, les zones de contraintes élevées atteignent jusqu'à 79.3 MPa et 70.5 MPa dans la partie supérieure, et 48.2 MPa et 44.9 MPa dans la partie inférieure, ce qui ne dépasse pas la limite d'élasticité. Ces zones se situent principalement aux mêmes jonctions identifiées précédemment, où les charges

sont transférées entre les éléments. Les Figure 50 et Figure 51 présentent les différentes valeurs de contraintes distribuées au niveau des différentes poutres.



**Figure 50** Résultat de l'analyse statique au niveau de la flèche sous SolidWorks, zone supérieure de la grue



**Figure 51 Résultat de l'analyse statique au niveau de la flèche sous SolidWorks, zone inférieure de la grue**

Les valeurs de contraintes modérées dans SolidWorks, telles que 36.6 MPa et 36.5 MPa, se trouvent dans des éléments qui participent activement à la distribution des charges. Cela indique une répartition uniforme des forces et montre que la conception intègre ces éléments pour supporter les charges. Les zones de faibles contraintes, avec des valeurs de 10.3 MPa et 9.9 MPa, se trouvent dans des parties de la structure qui ne sont pas directement sollicitées par les charges appliquées et présentent une bonne marge de sécurité.

En termes de comparaison, la simulation Abaqus montre des concentrations de contraintes plus élevées, avec des maximas de 170 MPa et 150 MPa, indiquant une plus grande concentration de stress aux jonctions critiques. En revanche, les résultats de SolidWorks montrent des contraintes maximales inférieures, confirmant que ces zones



supportent une part importante des charges sans risque de déformation plastique. Cette comparaison souligne l'importance d'évaluer les résultats sous autres scénarios pour obtenir une compréhension complète du comportement structurel.

#### 4.2.1.5.2 Scénario 2 : Charge combinée avec les équipements du chariot

Le deuxième scénario inclut l'analyse du scénario 1 en ajoutant les charges provenant des engins du chariot et du tablier, y compris le système de support, les équipements hydrauliques et électriques. De plus, cette configuration inclut les charges des poulies, du système de convoyeur et du dépoussiéreur. Ce scénario simule une opération où plusieurs systèmes de la grue sont actifs simultanément, ce qui augmente les charges statiques sur la structure. L'objectif est d'évaluer la distribution des charges et les interactions entre les différents composants, en veillant à ce que chaque élément contribue à la stabilité générale de la grue.

En plus de la charge sur la flèche, les poulies et les équipements du chariot sont représentés par une pression de 2458 Pa. Ces charges reflètent les forces dynamiques générées par les poulies et les mécanismes de levage.

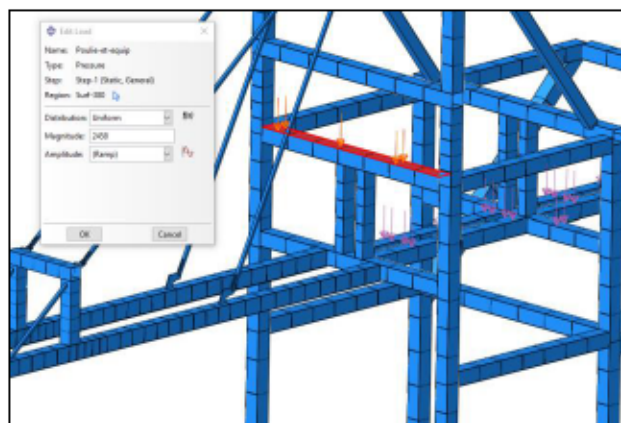
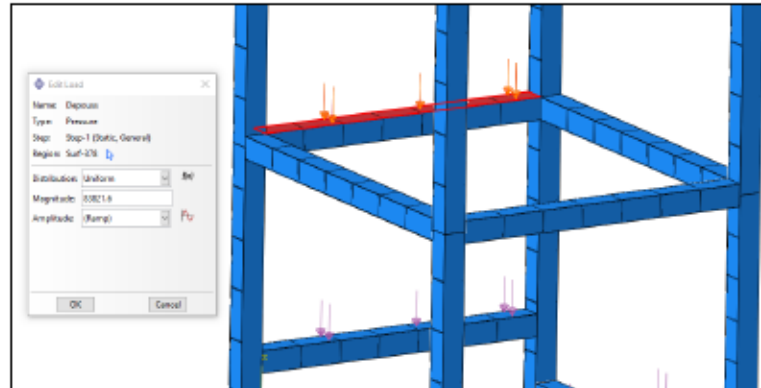


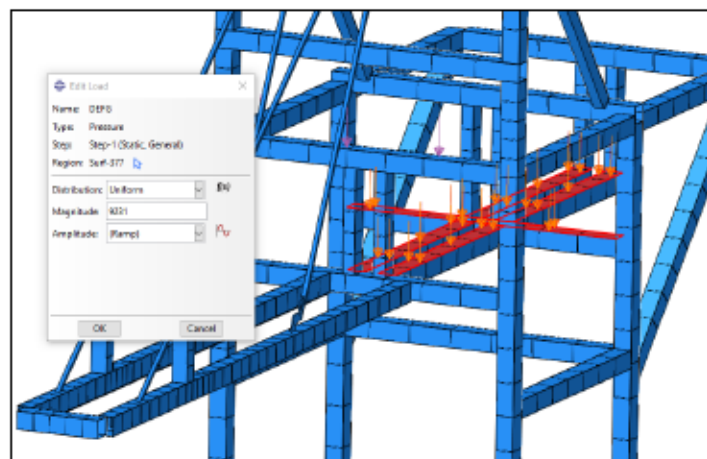
Figure 52 Charges des poulies et des équipements du chariot

Le système de dépoussiérage est modélisé à une pression de 83 821.6 Pa. Cette charge représente le poids supplémentaire et les forces dynamiques créées par l'équipement de dépoussiéreur lorsqu'il est en fonctionnement. Ces contraintes doivent être prises en compte pour se rapprocher d'une modélisation plus réaliste de la grue.



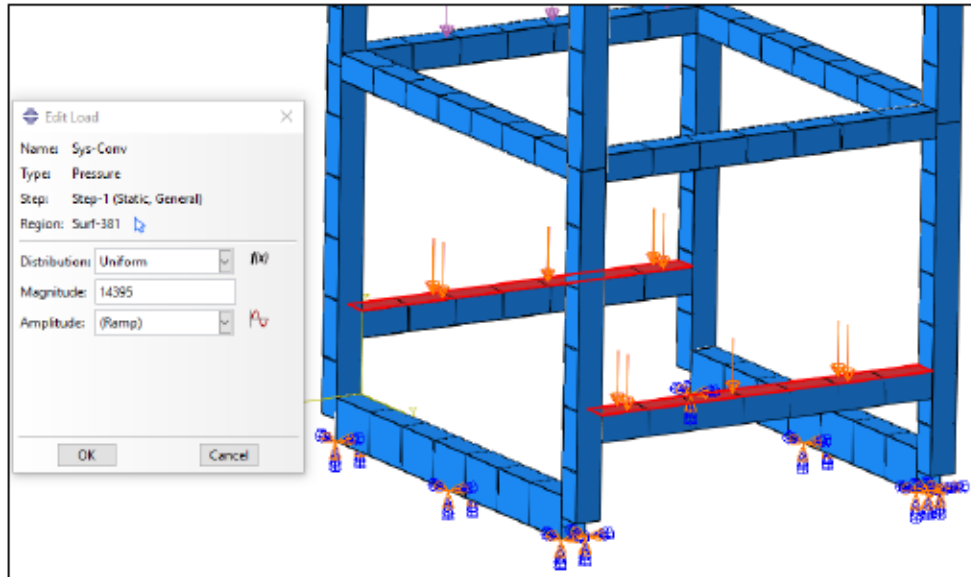
**Figure 53 Charge du système de dépoussiérage**

Ainsi, les équipements de support, comprenant les systèmes hydrauliques et électriques, exercent une pression de 9231 Pa sur les surfaces associées. Cette charge simule les contraintes additionnelles dues au fonctionnement de ces systèmes qui manipulent le contrôle des opérations.



**Figure 54 Charges des systèmes hydrauliques et électriques**

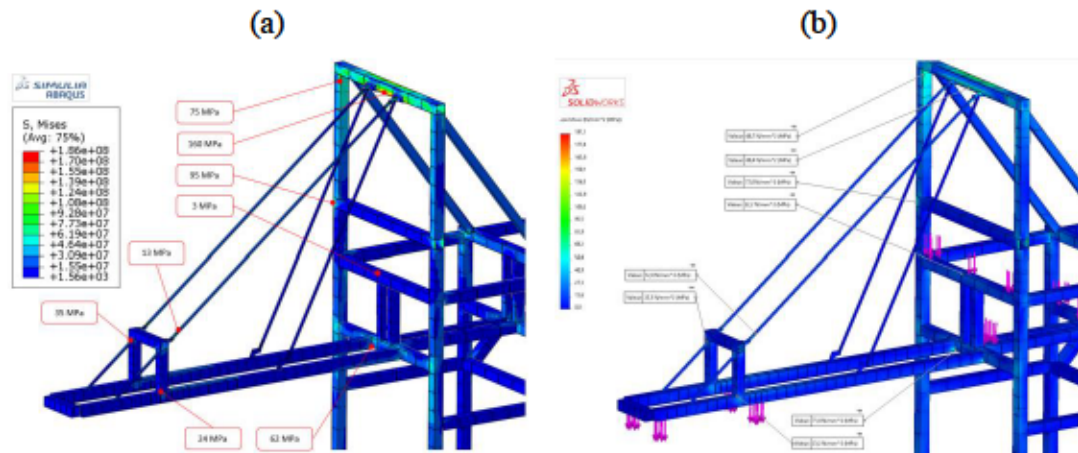
Enfin, le système de convoyeur qui exerce une pression de 14 395 Pa. Cette charge représente les forces et le poids associés au transport de charges le long de la grue.



**Figure 55 Charges du système de convoyeur**

▪ **Résultats :**

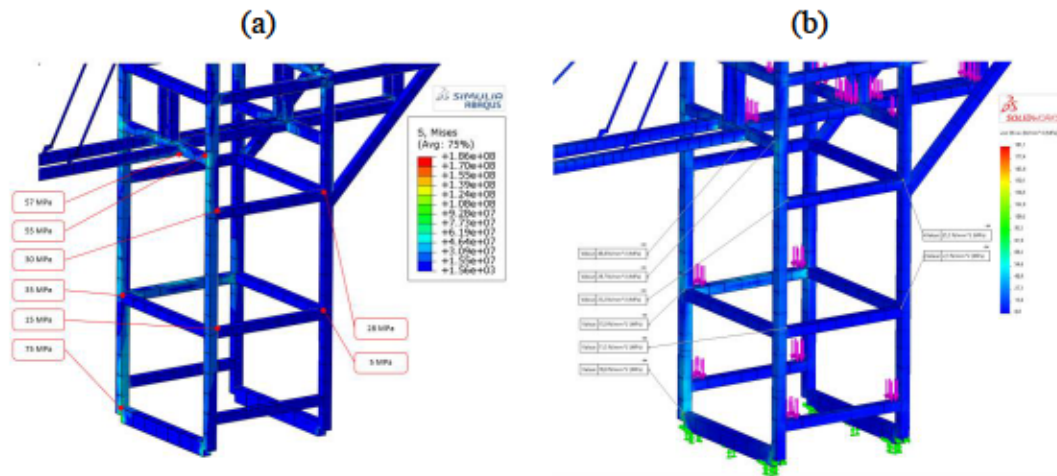
Dans la partie supérieure de la grue, l'analyse effectuée à l'aide d'Abaqus et de SolidWorks montre des concentrations de contraintes dans divers zones et composants porteurs. Les résultats d'Abaqus révèlent des valeurs de contrainte atteignant jusqu'à 160 MPa dans des zones critiques, telles que les connexions entre les poutres de support principales, la traverse et les systèmes de poulies comme présentés dans la Figure 56.



**Figure 56 Contraintes von Mises au résultat du scénario 2 pour la partie supérieure de la grue – a) Abaqus, b) SolidWorks**

Ces régions à haute contrainte indiquent des points potentiels de défaillance sous des conditions de charge maximale, ce qui déclenche la nécessité de renforcer ces zones ou d'ajuster la conception initiale. La distribution des contraintes est cohérente avec les attentes, où les points d'application de charge montrent des concentrations de contraintes plus élevées en raison des forces induites exercées par l'équipement et les systèmes de manutention des charges.

Pour la partie inférieure de la grue, les simulations illustrent des distributions de contraintes plus uniformes comparées à la structure supérieure. Les simulations Abaqus montrent des valeurs de contrainte maximales autour de 75 MPa, particulièrement dans les poutres de support verticales, comme montre la Figure 57, qui supportent le poids principal de la grue et les forces provenant des mécanismes supérieurs. La présence de valeurs de contrainte plus faibles dans la base indique que ces zones sont structurellement solides, avec des dispositions de conception adéquates pour gérer les charges prévues.



**Figure 57 Contraintes von Mises au résultat du scénario 2 pour la partie inférieure de la grue - a) Abaqus, b) SolidWorks**

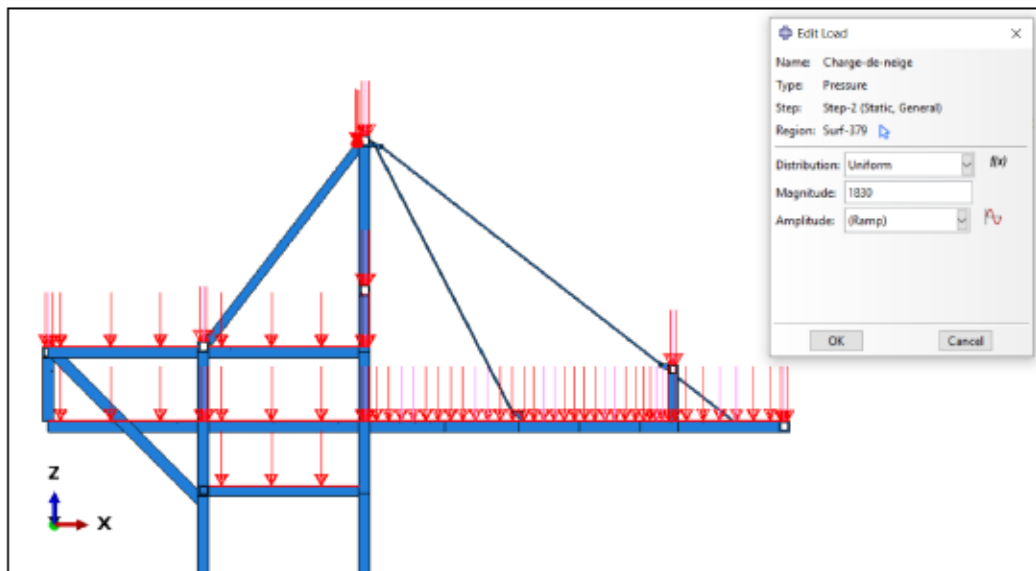
En comparant les résultats d'Abaqus et de SolidWorks, les deux simulations présentent des schémas de distribution de contraintes similaires à travers la structure de la grue, mais avec des différences notables en termes de magnitude. Abaqus a tendance à rapporter des valeurs de contrainte plus élevées, en particulier dans les zones soumises à des charges, telles que les poutres de support et la traverse. Cette différence peut être attribuée à un maillage plus raffiné ou à la discrétisation pour définir les contacts et les interactions de chacun des deux logiciels. SolidWorks, bien qu'offrant une estimation des contraintes plus conservatrice, fournit une vue d'ensemble cohérente de la performance structurelle, ce qui explique que les marges de sécurité tout au long de la grue sont adéquatement maintenues. Les divergences obtenues à ces niveaux mènent à concentrer l'analyse sur des zones spécifiques et critiques tout au long du projet.

#### **4.2.1.5.3 Scénario 3 : Charge combinée avec charges de vent et de neige**

Le troisième scénario inclut toutes les charges du deuxième scénario, en y ajoutant les charges environnementales, notamment les charges de vent ( $CH_v$ ) et de neige ( $CH_N$ ). Ce scénario est essentiel pour tester la résilience de la grue dans des conditions

météorologiques extrêmes. Les charges de vent simulent l'effet des rafales qui exercent des forces latérales sur la structure, tandis que les charges de neige ajoutent un poids supplémentaire et augmentent les charges verticales sur la grue. L'analyse de ce scénario a permis de vérifier la stabilité et la sécurité de la grue face aux facteurs externes imprévisibles des conditions climatiques défavorables.

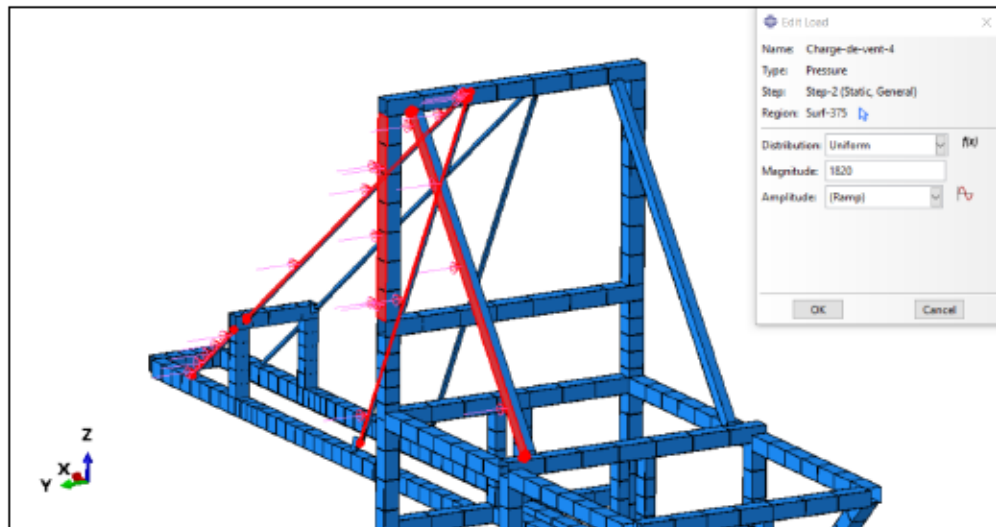
L'application de la charge de neige uniforme, présentée dans la Figure 58, est modélisée par une pression de 1830 Pa sur les surfaces supérieures de la grue.



**Figure 58 Charge de neige**

Cette charge simule le poids supplémentaire que la neige accumulée peut exercer sur la structure. En appliquant les charges verticales, la simulation aide à évaluer comment la grue gère le poids additionnel et la manière de laquelle se comporte en termes de stabilité.

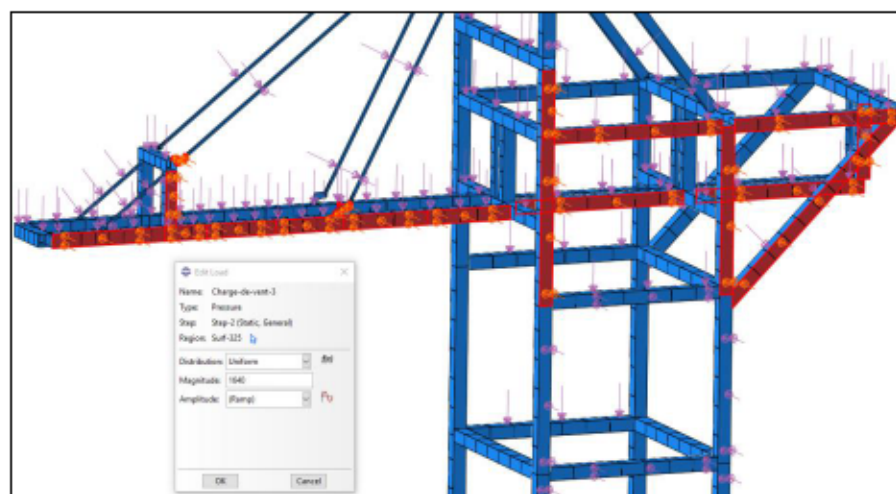
Ensuite, une pression de 1820 Pa est appliquée sur les surfaces latérales supérieures présentées dans la Figure 59.



**Figure 59 Charge de vent sur la partie supérieure de la grue**

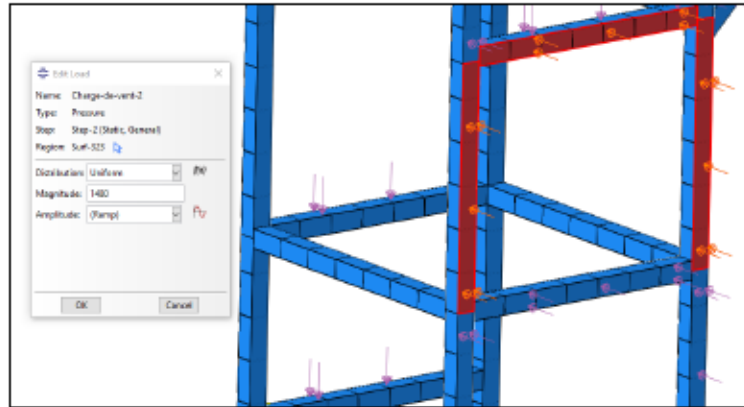
Cette charge simule le vent qui exerce des forces latérales sur la partie supérieure de la grue. L'objectif est d'évaluer la capacité de la structure à résister à ces forces et comment agir lorsqu'il y a des déformations.

Avec une pression de 1640 Pa, cette charge est appliquée sur des éléments spécifiques du système de levage montré dans la Figure 60. En testant cette section, on évalue le maintien du système de levage face aux rafales.



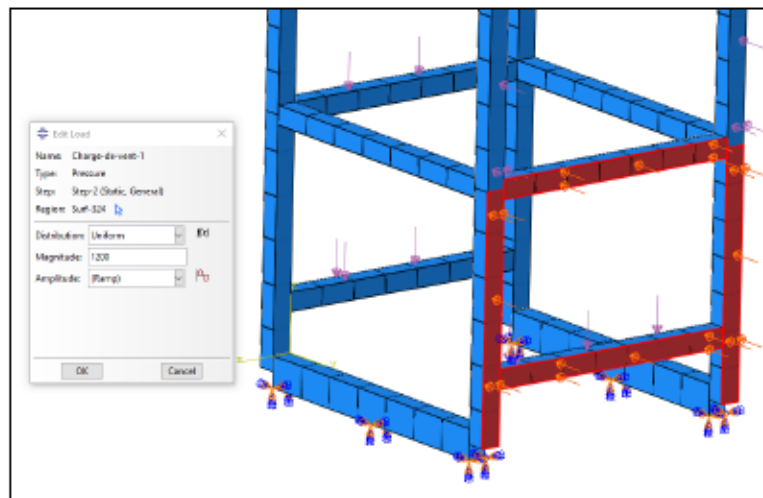
**Figure 60 Charge de vent sur les éléments du système de levage**

Par la suite, une pression de 1480 Pa est appliquée sur une autre section de la structure, comme représentée dans Figure 61, ciblant les surfaces verticales. Cette application permet d'analyser comment les vents latéraux affectent la stabilité de la grue même dans leur partie inférieure en agissant sur ses sections verticales.



**Figure 61 Charge de vent sur le deuxième niveau de la grue**

Finalement, une pression de 1200 Pa est exercée sur les éléments inférieurs de la structure, illustrée dans Figure 62, simulant les effets du vent au niveau de la base. Cette charge s'appuie à comprendre comment les forces latérales du vent affectent les fondations de base de la grue et d'évaluer si elle reste stable avec ces conditions de vent.



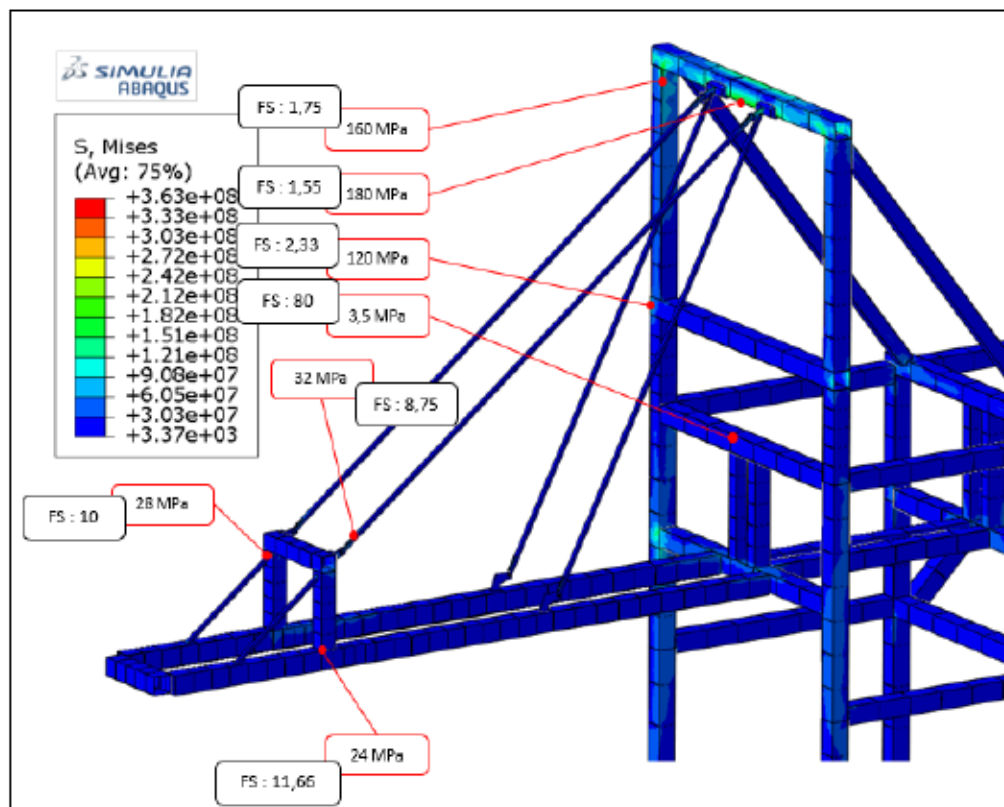
**Figure 62 Charge de vent sur la base de la grue**



En combinant ces charges environnementales avec celles du scénario précédent, une analyse statique est faite pour évaluer les contraintes von Mises aux différents niveaux de la structure.

- **Résultats :**

Dans l'analyse réalisée avec Abaqus, les contraintes maximales atteignent 180 MPa au niveau des jonctions des câbles supérieurs, notamment au niveau de la traverse supérieure ce qui est mis en œuvre dans la Figure 63.

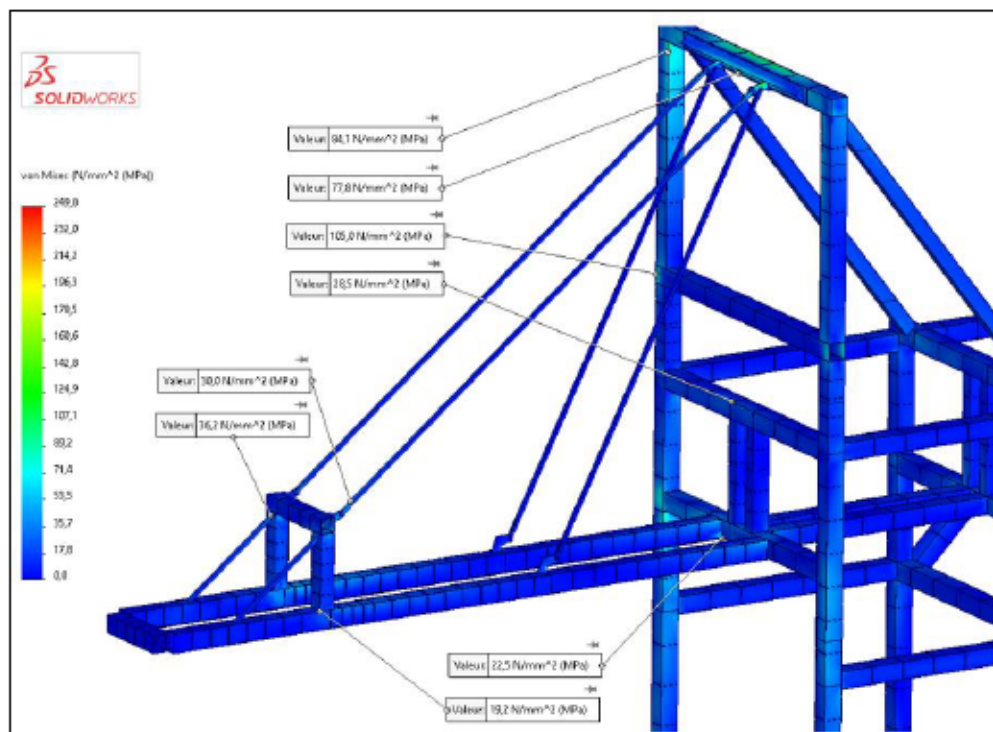


**Figure 63 Contraintes von Mises au résultat du scénario 3 pour la partie supérieure de la grue, Abaqus**

La présence de contraintes élevées dans ces zones indique une accumulation de stress, ce qui ramène aux propriétés de la résistance des matériaux utilisés pour s'assurer qu'ils ne dépassent pas la limite d'élasticité de 280 MPa. Ce qui est le cas et affirme qu'il n'y

a pas de déformation plastique. D'autres zones présentent des contraintes de 160 MPa et 120 MPa, également sur les câbles et les jonctions des poutres. Toutes ces contraintes sont proches de la limite élastique, ce qui implique la nécessité d'investiguer la résistance de ces poutres face aux charges appliquées.

À partir de Figure 64, les résultats de SolidWorks montrent des contraintes maximales de 105 MPa, ce qui est inférieur à celles observées dans Abaqus.



**Figure 64 Contraintes von Mises au résultat du scénario 3 pour la partie supérieure de la grue, SolidWorks**

Ces valeurs inférieures peuvent être dues à des différences dans les paramètres de simulation, tels que la modélisation des interactions et le raffinement du maillage. D'autres zones ayant des contraintes allant de 84.1 MPa à 77.8 MPa indiquent que les éléments structuraux sont efficacement conçus pour supporter les charges sans approcher des limites de déformation plastique. Les zones avec les contraintes les plus faibles, telles que 16.2 MPa, démontrent une capacité à absorber les forces avec une

marge de sécurité acceptable. Cela assure que les éléments secondaires de la structure ne sont pas surchargés et offrent une distribution efficace des charges.

D'autre part, le facteur de sécurité, calculé en divisant la limite élastique du matériau par la contrainte maximale observée, indique la marge de sécurité dont dispose une structure avant d'atteindre sa capacité maximale. Un FS élevé suggère une structure bien dans les limites de sécurité, tandis qu'un FS proche de 1 indique que la structure est à la limite de sa capacité.

Les résultats présentés dans les Figure 63 et Figure 64 montrent que certaines zones de la structure, notamment celles avec un FS de 1.75 à 180 MPa et de 1.55 à 160 MPa, ont une marge de sécurité limitée. Cela indique que ces parties de la structure opèrent près de leurs limites de résistance, ce qui pourrait représenter un risque de défaillance en cas de surcharge ou de conditions météorologiques extrêmes. Ces zones nécessitent une surveillance et éventuellement un renforcement pour éviter toute défaillance potentielle. En revanche, les zones avec un FS plus élevé, comme 2.33 à 120 MPa, montrent une meilleure marge de sécurité, ce qui offre une protection supplémentaire contre les variations inattendues des charges et démontrant une conception plus robuste. Les zones avec des facteurs de sécurité très élevés, comme 8.75 à 32 MPa, 10 à 28 MPa, et 11.66 à 24 MPa, indiquent une capacité à absorber des charges bien au-delà des niveaux opérationnels typiques. Cela signifie que ces parties de la structure sont bien conçues pour gérer efficacement les charges sans approcher des limites de défaillance.

#### **4.2.1.6 Consistance des résultats**

L'analyse de la structure de la grue portuaire à l'aide de deux logiciels différents révèle une cohérence remarquable dans l'identification des zones les plus sollicitées. Les simulations montrent que les points d'appui et les zones de chargement concentré présentent des écarts de contraintes plus élevés et présentent comment la structure réagit aux charges appliquées et où les renforts ou améliorations pourraient être

nécessaires pour garantir leur stabilité et leur sécurité. Les résultats convergent pour indiquer que les zones entourant les points de jonction et les supports primaires sont particulièrement vulnérables aux contraintes maximales. Les zones les plus sollicitées sont présentées dans Figure 65.

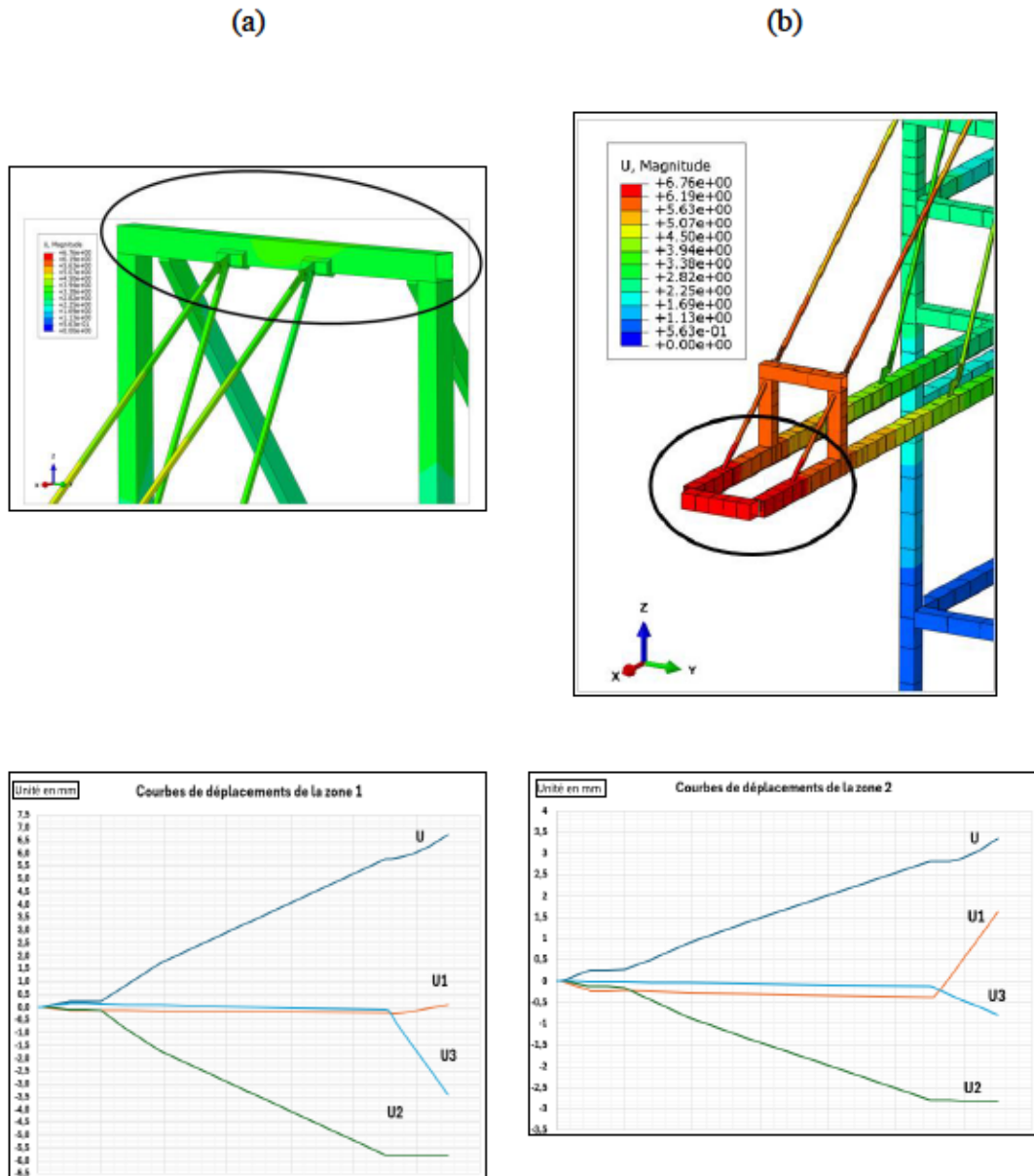


Figure 65 Visualisation des résultats en déplacement U – a) Zone 1, b) Zone 2

Ainsi, pour les deux zones les plus sollicitées, les graphiques présentent les courbes de déplacement le long de leurs différentes poutres.

Dans la zone 1, les déplacements atteignent jusqu'à 6.76 mm, principalement concentrés autour de la traverse supérieure. Ce déplacement est excessif et pourrait indiquer des risques de défaillance ou de fatigue structurelle. Les déplacements observés dans la zone 2 sont légèrement inférieurs, avec un maximum de 4 mm. Cette zone pourrait être mieux stabilisée avec un renfort spécifique. Ces résultats indiquent que des améliorations de la rigidité sont nécessaires pour minimiser les déplacements excessifs pour ne pas limiter la durée de vie de la structure.

#### **4.2.1.7 Recommandations et modifications proposées**

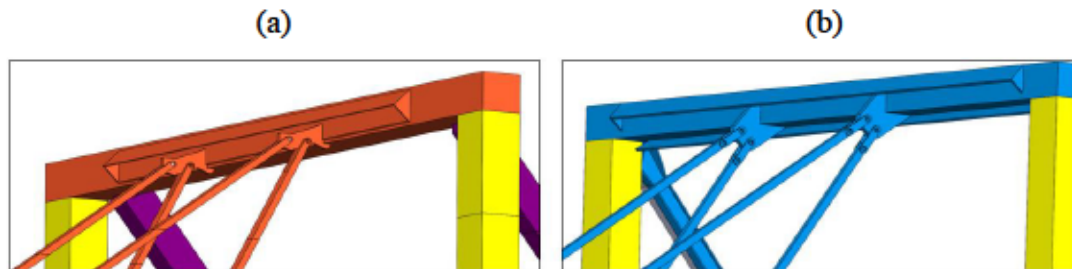
##### **4.2.1.7.1 Optimisation de la conception de la grue portuaire**

À la suite de l'analyse des résultats de simulation et aux recommandations du partenaire industriel, plusieurs modifications ont été proposées pour améliorer la conception de la grue portuaire afin d'obtenir des résultats plus proches de la réalité. Ces ajustements visent à aligner davantage les performances de la grue avec les conditions opérationnelles réelles, en améliorant la résistance structurelle et en minimisant les risques identifiés dans l'analyse.

###### **– Traverse supérieure**

L'une des modifications majeures concerne la traverse supérieure de la grue. Les simulations initiales ont révélé des concentrations de contraintes élevées aux jonctions des câbles de support avec la traverse, ce qui pourrait conduire à une défaillance sous charge maximale. Pour résoudre ce problème, la traverse a été redessinée avec des renforcements supplémentaires et une géométrie optimisée pour mieux répartir les charges. L'ajout de nervures internes améliore la capacité de la traverse à supporter les charges sans déformation excessive. Cette modification était nécessaire pour garantir

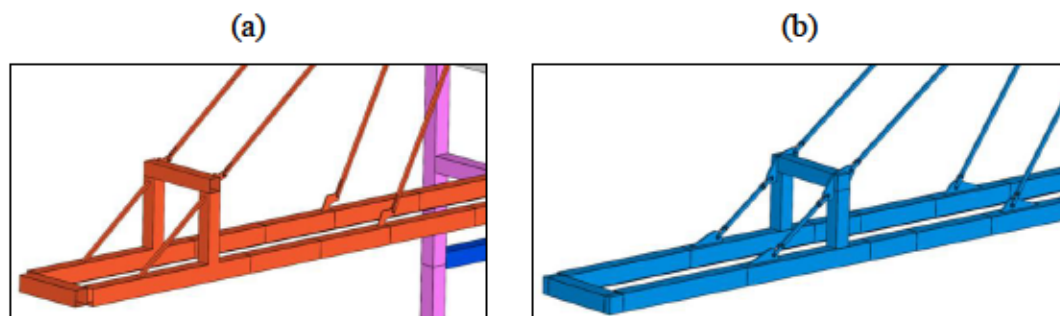
le fonctionnement de la grue dans des conditions de vent fort et de charges répétitives. La Figure 66 représente la partie de la traverse supérieure avant et après modification.



**Figure 66** Traverse supérieure – a) avant modification, b) après modification

– **Connexions des poutres**

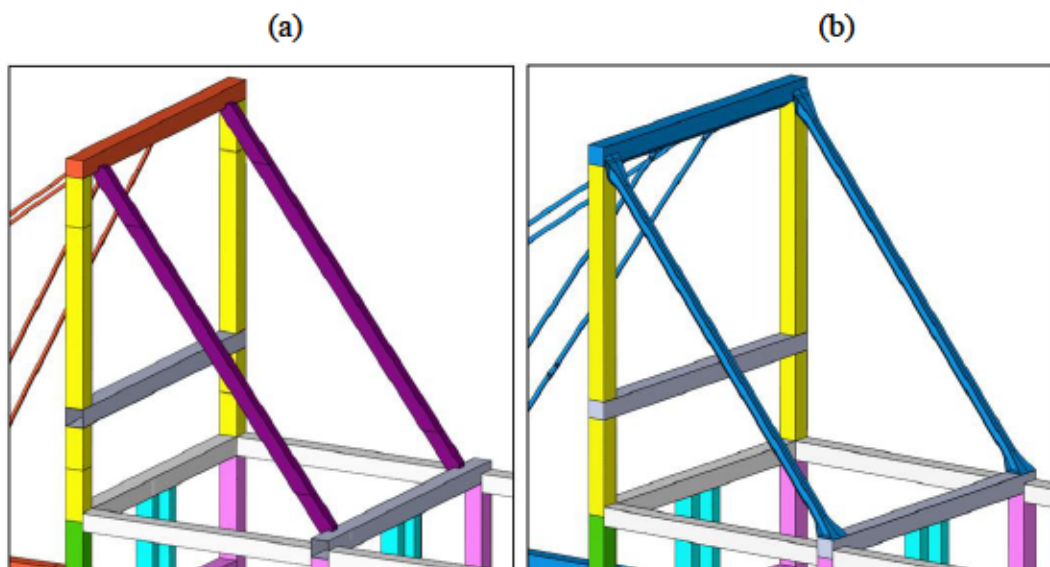
Les connexions des poutres représentent également des zones critiques qui peuvent avoir une défaillance excessive s'ils ne sont pas bien conçus. Les simulations ont montré que ces zones subissaient des contraintes importantes, particulièrement lors des mouvements de levage. En réponse, le partenaire industriel a recommandé à modifier la conception par l'utilisation de plaques d'acier qui intègrent l'assemblage des boulons. De plus, l'ajout de soudures continues sur les zones de jonction renforce la stabilité de la structure, minimisant ainsi les déplacements et les vibrations inattendues lors des opérations.



**Figure 67** Connexions des poutres avant et après modification

### – Contreventement arrière

Le contreventement arrière a été modifié pour améliorer la stabilité globale de la grue. Les analyses ont indiqué que les forces latérales, notamment celles induites par le vent, exerçaient des pressions élevées sur cette section. La modification révisée inclut des contreventements croisés supplémentaires et une augmentation de la section des poutres existantes, permettant une meilleure résistance aux torsions et aux flexions latérales. Ces modifications augmentent la rigidité du cadre et réduisent les risques de déformation sous l'effet de charges latérales. Cette modification a été illustrée dans la Figure 68.



**Figure 68 Contreventement arrière – a) avant modification, b) après modification**

Ces modifications proposées par le partenaire industriel étaient indispensables pour se rapprocher des conditions réelles d'exploitation de la grue. En modifiant les zones identifiées dans les simulations, la structure est mieux préparée à résister aux contraintes extrêmes avec une efficacité opérationnelle élevée. Ces améliorations peuvent offrir des résultats de simulations plus concrètes et réalistes. Afin de valider la

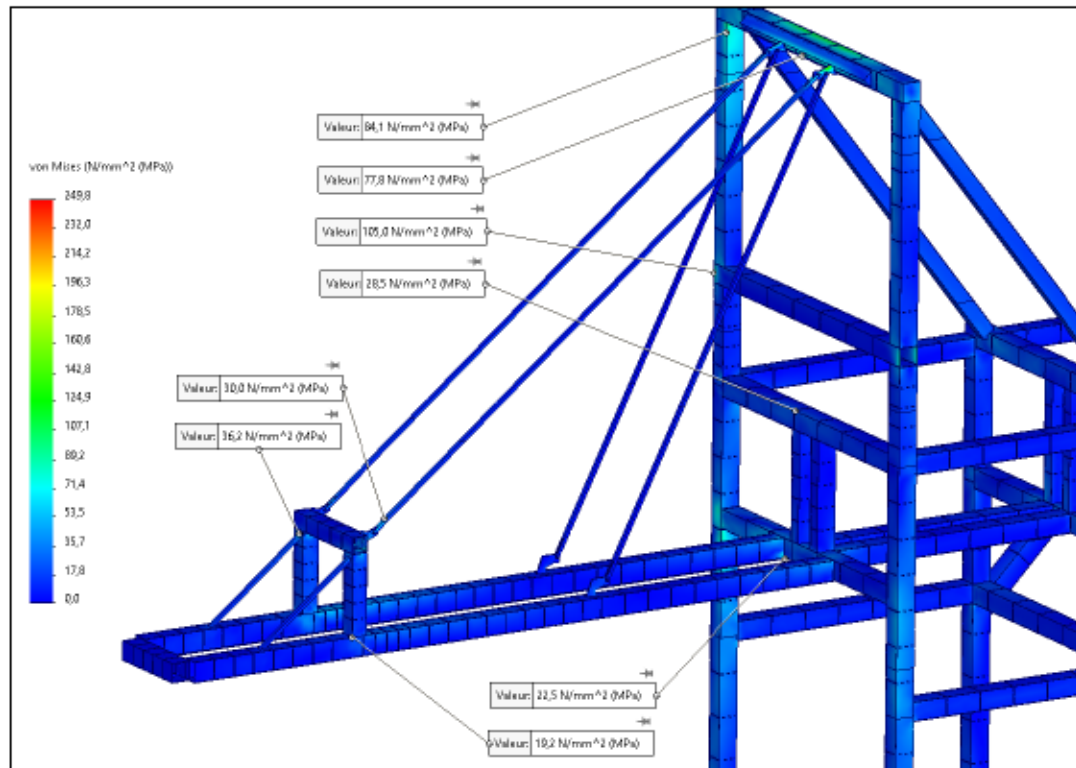
pertinence des modifications apportées, une analyse FEM a été faite pour reproduire le scénario 3 ayant les sollicitations extrêmes.

#### **4.2.1.7.2 Simulation du scénario 3 après modifications**

Dans le cadre du troisième scénario de simulation, la structure de la grue portuaire a été soumise à des charges combinées incluant à la fois les charges opérationnelles et les charges environnementales telles que le vent et la neige. Afin de mieux préparer la grue à ces conditions extrêmes et d'optimiser sa performance, des modifications géométriques ont été intégrées dans la conception. Ces modifications visent à renforcer les zones identifiées comme critiques lors des analyses précédentes, en augmentant la résistance aux contraintes concentrées et en améliorant la distribution des charges à travers la structure. Les ajustements incluent le renforcement de la traverse supérieure, l'amélioration des connexions des poutres, et le réaménagement du contreventement arrière pour offrir une meilleure rigidité structurelle et une capacité accrue à absorber les forces latérales et verticales. Ces changements sont conçus pour garantir que la grue peut fonctionner de manière sûre et efficace.

Dans la simulation initiale, les contraintes de von Mises montrent des valeurs relativement faibles par rapport à la limite d'élasticité du matériau (262 MPa), comme présenté dans la Figure 69.

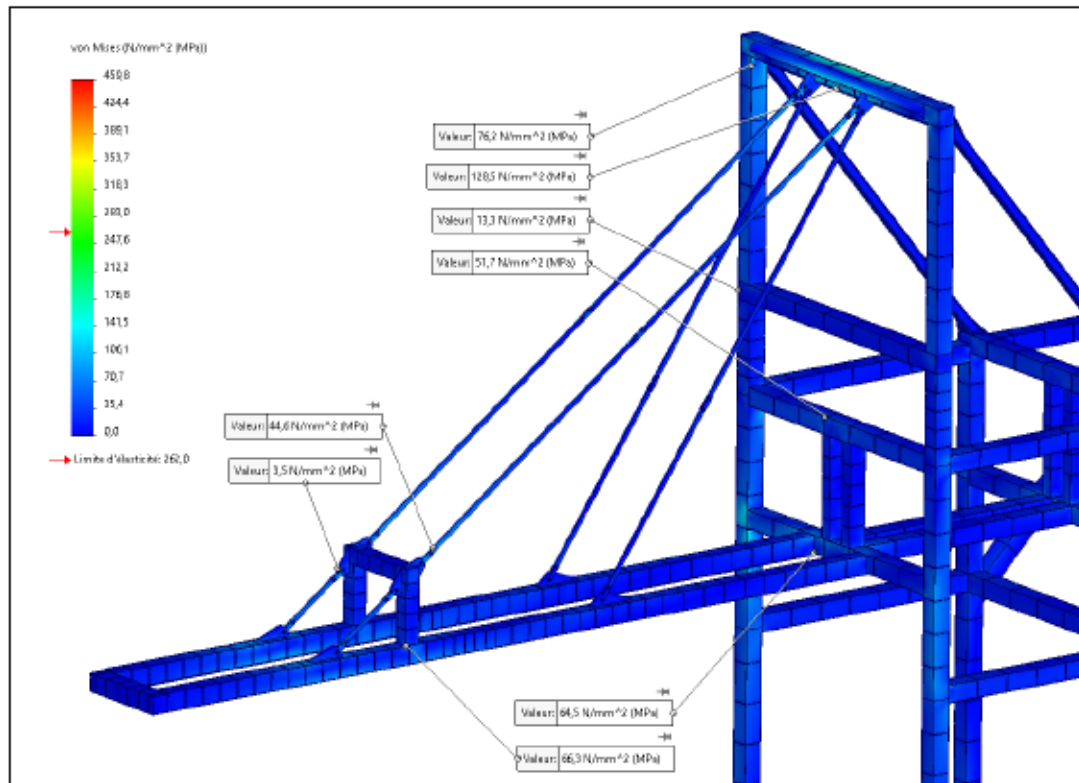




**Figure 69 Contraintes von Mises au résultat du scénario 3 pour la partie supérieure de la grue après modification, Abaqus**

Les contraintes maximales atteignent 105 MPa, et les zones critiques autour de la traverse supérieure enregistrent des valeurs atteignant 84.1 MPa. Cette distribution indique que, bien que la structure puisse gérer les charges appliquées, elle ne comprend pas une distribution logique des charges et cette distribution des contraintes pourrait être améliorée.

Les résultats de simulation, après modification qui est présentée dans la Figure 70, montrent une augmentation des contraintes maximales, atteignant jusqu'à 128.5 MPa.



**Figure 70 Contraintes von Mises au résultat du scénario 3 pour la partie supérieure de la grue, SolidWorks**

Cette augmentation indique que, bien que la structure ait été renforcée pour mieux résister aux charges, certaines zones voient une concentration accrue de contraintes. Cela peut résulter d'une redistribution des charges en raison des modifications géométriques. De ce fait, il faut assurer que les conceptions de renforcement peuvent supporter ces contraintes supplémentaires sans risque de défaillance.

L'augmentation des contraintes après la modification apporte non seulement le renforcement des zones critiques, mais aussi une distribution homogène des charges pour éviter les concentrations de contraintes. Bien qu'ils restent inférieurs à la limite d'élasticité, une analyse avec des pondérations de charges doit être nécessaire pour vérifier que la structure optimisée est capable de résister aux charges prévues sans compromettre la sécurité.

## 4.2.2 Analyse avec pondération et combinaison des charges

### 4.2.2.1 Introduction

La conception des structures métalliques, telles que les grues portuaires, nécessite une analyse particulière à la distribution des charges pour garantir la sécurité et la résistance face aux conditions de charge variées. Les récents ajustements géométriques apportés à la grue portuaire ont conduit à une redistribution des contraintes, mettant en œuvre l'application d'une approche pour évaluer la capacité de la structure à résister aux charges prévues. Les analyses des zones critiques ont été faites en appliquant une méthode de pondération des charges proposée par le Code national du bâtiment du Canada [39]. Cette approche permet de prendre en compte les différents facteurs de risque et de simultanéité des charges pour garantir une évaluation précise et complète de la structure.

L'évaluation des sollicitations dues aux charges pondérées, exprimées par l'équation  $S_F$ , intègre divers coefficients pour modéliser les réalités opérationnelles et environnementales. Les coefficients de pondération ( $\alpha$ ), de risque ( $\gamma$ ), et de simultanéité ( $\psi$ ) sont utilisés pour moduler les contributions des différentes charges, telles que les charges permanentes ( $D$ ), les surcharges ( $L$ ), et les charges environnementales comme le vent ( $W$ ) et la neige ( $S$ ) qui sont validés par R. Tremblay et al. [40]

Les sollicitations dues aux charges pondérées  $S_F$  sont représentées par l'équation suivante :

$$S_F = \alpha_D \cdot D + \gamma \cdot \psi \cdot (\alpha_L \cdot L + \alpha_W \cdot W + \alpha_T \cdot T) \quad 22$$

Où les coefficients de pondération sont :

- $\alpha_D$  : Coefficient de pondération pour la charge permanente ( $D$ )
- $\alpha_L$  : Coefficient de pondération pour la surcharge d'utilisation ( $L$ )
- $\alpha_W$  : Coefficient de pondération pour la charge de vent ( $W$ )
- $\alpha_T$  : Coefficient de pondération pour la charge thermique ( $T$ )

La combinaison des charges est également déterminée par les conditions suivantes, où chaque condition représente une combinaison spécifique de charges principales et de charges concomitantes extraites à partir du Rapport d'étude de faisabilité [41]:

<b>1.4 D</b>	23
<b>(1.25 D ou 0.9 D) + 1.5 L</b>	24
<b>(1.25 D ou 0.9 D) + 1.5 S</b>	25
<b>(1.25 D ou 0.9 D) + 1.4 W</b>	26
<b>1.0 D + 1.0 E</b>	27

Ainsi, que chaque combinaison permet de simuler différents scénarios de charge pour évaluer la résistance de la structure sous diverses conditions de chargement.

#### **4.2.2.2 Scénarios et combinaisons possibles dans le cas d'étude**

Dans l'étude de la grue portuaire, plusieurs scénarios de charge ont été définis pour évaluer la performance et la résistance de la structure sous différentes vitesses de vent et des situations de charge, permettant d'identifier les comportements potentiels de la grue dans des situations réalistes.

Les différents scénarios, les vitesses de vent et les combinaisons possibles sont présentés dans les tableaux suivants :

Scénarios	S1	S2	S3
	Transbordement - 17 T - scénario client	Transbordement – 17 T - bout de la flèche	Déchargement – 24,5 T

**Tableau 7 Scénarios possibles**

Vitesses de vent	V1	V2	V3
	$V_m = \frac{115 \text{ Km}}{h}$ $(V_r = \frac{93 \text{ Km}}{h})$	$V_m = \frac{99 \text{ Km}}{h}$ $(V_r = \frac{80 \text{ Km}}{h})$	$V_m = \frac{75 \text{ Km}}{h}$ $(V_r = \frac{60 \text{ Km}}{h})$

**Tableau 8 Vitesses de vents possibles**

				Pondérations
Combinaisons	S1 - V1	S2 - V1	S3 - V1	1.2D+1.3W+1.0 C
	S1 - V2	S2 - V2	S3 - V2	
	S1 - V3	S2 - V3	S3 - V3	1.2D+0.4W+1.4C

**Tableau 9 Combinaisons possibles**

L'analyse des sollicitations structurelles a été considérée sous trois combinaisons de scénarios de charge et de vitesses de vent. En appliquant la méthode de pondération des charges, deux équations de pondération ont été identifiées pour décrire les sollicitations critiques :

$$1.2 D + 1.3 W + 1.0 C \quad 28$$

$$1.2 D + 0.4 W + 1.4 C \quad 29$$

#### 4.2.2.2.1 Scénarios de charge

Trois scénarios de charge ont été définis pour cette étude :

- **S1 - Transbordement de 17 Tonnes - Scénario client** : Ce scénario représente une opération typique de transbordement selon les spécifications du client, impliquant le déplacement de 17 tonnes.
- **S2 - Transbordement de 17 Tonnes - Bout de la flèche** : Ce scénario est similaire au premier, mais place la charge de 17 tonnes au bout de la flèche pour augmenter les sollicitations structurelles.
- **S3 - Déchargement de 24.5 Tonnes** : Ce scénario simule le déchargement de 24.5 tonnes qui teste la capacité de la grue à gérer des opérations de déchargement sous des charges importantes.

#### 4.2.2.2.2 Vitesses de vent

Trois vitesses de vent ont été considérées pour chaque scénario pour représenter les conditions environnementales variées :

- V1 :  $V_m = 115 \frac{km}{h}$  (vitesse maximale) et  $V_r = 93 \frac{km}{h}$  (vitesse de référence).
- V2 :  $V_m = 99 \frac{km}{h}$  et  $V_r = 80 \frac{km}{h}$ .
- V3 :  $V_m = 75 \frac{km}{h}$  et  $V_r = 60 \frac{km}{h}$ .

#### 4.2.2.2.3 Combinaisons de charges

Les combinaisons de scénarios de charge et de vitesses de vent produisent neuf combinaisons possibles (3 x 3 = 9) :

$$C_i = S_i V_i \quad 30$$

Chaque combinaison a été analysée en appliquant les équations de pondération des charges pour déterminer les sollicitations maximales :

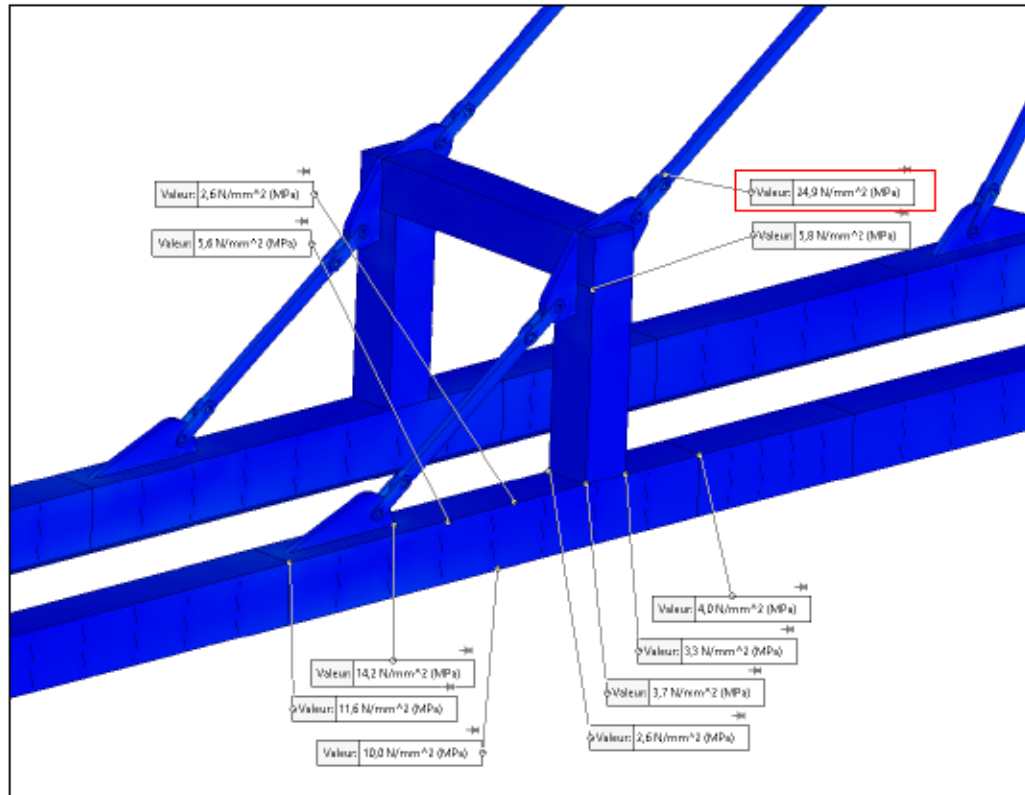
- $1.2 D + 1.3 W + 1.0 C$  : Cette pondération est appliquée pour les vitesses de vent de  $80 - 93 \frac{km}{h}$ . Elle intègre une charge permanente ( $D$ ) augmentée de 20%, une charge de vent ( $W$ ) augmentée de 30%, et une charge complémentaire ( $C$ ) sans modification.
- $1.2 D + 0.4 W + 1.4 C$  : Cette pondération est appliquée pour les vitesses de vent de  $60 \frac{km}{h}$ . Elle inclut une charge permanente ( $D$ ) augmentée de 20%, une charge de vent ( $W$ ) réduite à 40%, et une charge complémentaire ( $C$ ) augmentée de 40%.

Ces combinaisons illustrent comment la structure de la grue réagit sous diverses conditions de charge et de vent. Les pondérations appliquées permettent d'identifier les scénarios les plus critiques, où les contraintes maximales peuvent approcher les limites de sécurité. Cette analyse facilite la prévision des zones de la structure nécessitant des renforcements pour assurer sa stabilité. À la suite des recommandations du partenaire industriel, l'accent a été mis sur les combinaisons correspondant à une vitesse de rafale de vent  $V_r$  de  $60 \frac{km}{h}$ . En conséquence, les simulations ultérieures se sont concentrées sur les combinaisons critiques suivantes :  $S1V3$ ,  $S2V3$ , et  $S3V3$ . Ces scénarios spécifiques permettent une évaluation ciblée de la réponse de la grue sous des conditions de vent modéré.

#### 4.2.2.3 Simulation $S_1V_3$ sous la combinaison $1.2D + 0.4W + 1.4C$

Les résultats de cette simulation montrent des valeurs de contraintes de von Mises variées sur différentes parties de la structure. Les concentrations de contraintes étaient réparties dans deux différentes zones, les connexions sous les haubans et la traverse supérieure.

Par rapport à la zone 2, la valeur maximale est observée est de 24.9 MPa comme indiqués dans la Figure 71.

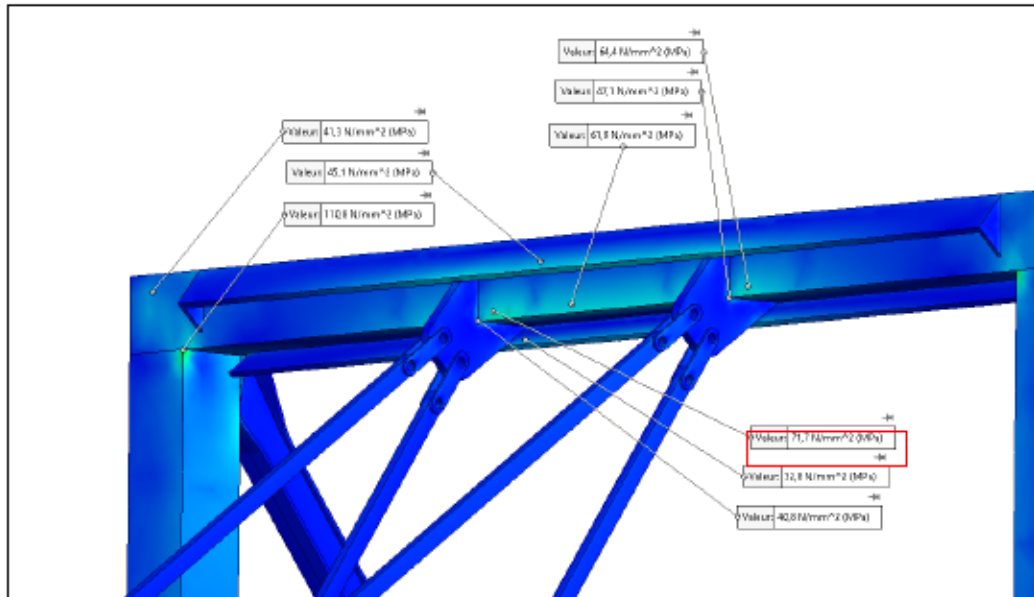


**Figure 71 Résultats de simulation de 1.2D+0.4W+1.4C de  $S_1V_3$  au niveau des connexions sous les haubans**

Ainsi que l'on constate que les valeurs au niveau de cette section sont autour de 14.2 MPa et 11.6 MPa ce qui affirme qu'on est en dessous de la limite élastique sans risque de déformation plastique ou de rupture.

D'autre part, les résultats au niveau de la traverse supérieure montrent une variation des contraintes de von Mises entre 32.8 MPa et 110.8 MPa sur différentes parties de cette zone. La Figure 72 présente les valeurs de contraintes prises au niveau des différentes parties de cette zone.



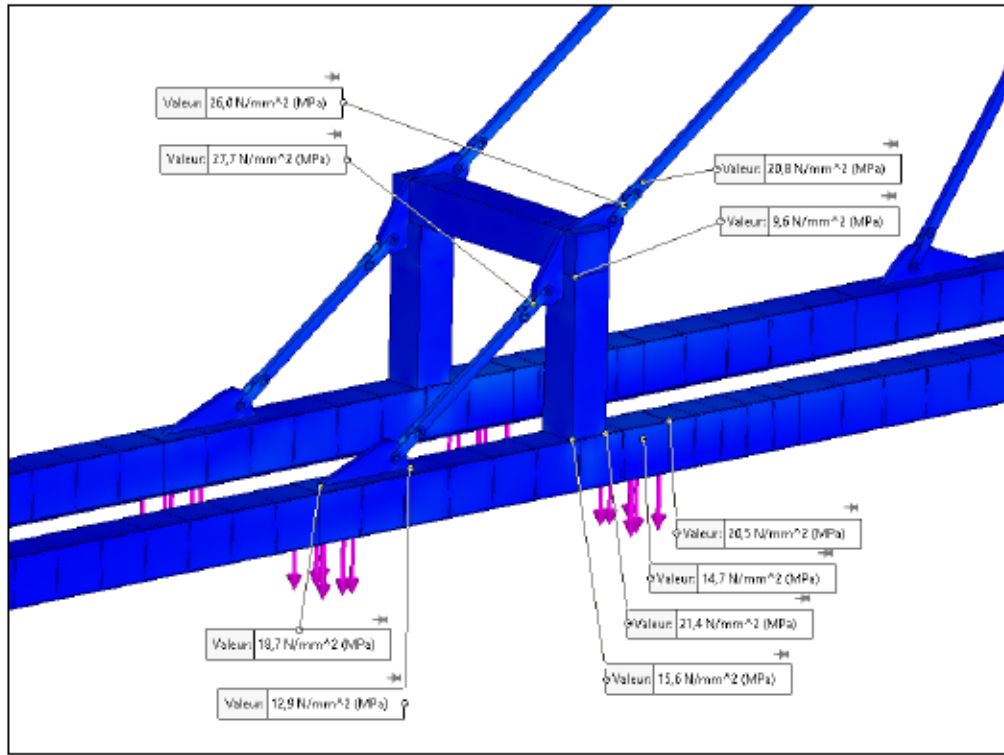


**Figure 72 Résultats de simulation de 1.2D+0.4W+1.4C de  $S_1V_3$  au niveau de la traverse supérieure**

La valeur maximale de 110.8 MPa a été observée dans une zone critique où les éléments diagonaux se connectent à la traverse. Cette contrainte élevée indique une forte concentration de contraintes, qui est le résultat de la combinaison des charges verticales et des charges de vent.

#### **4.2.2.4 Simulation $S_2V_3$ sous la combinaison 1.2D + 0.4W + 1.4C**

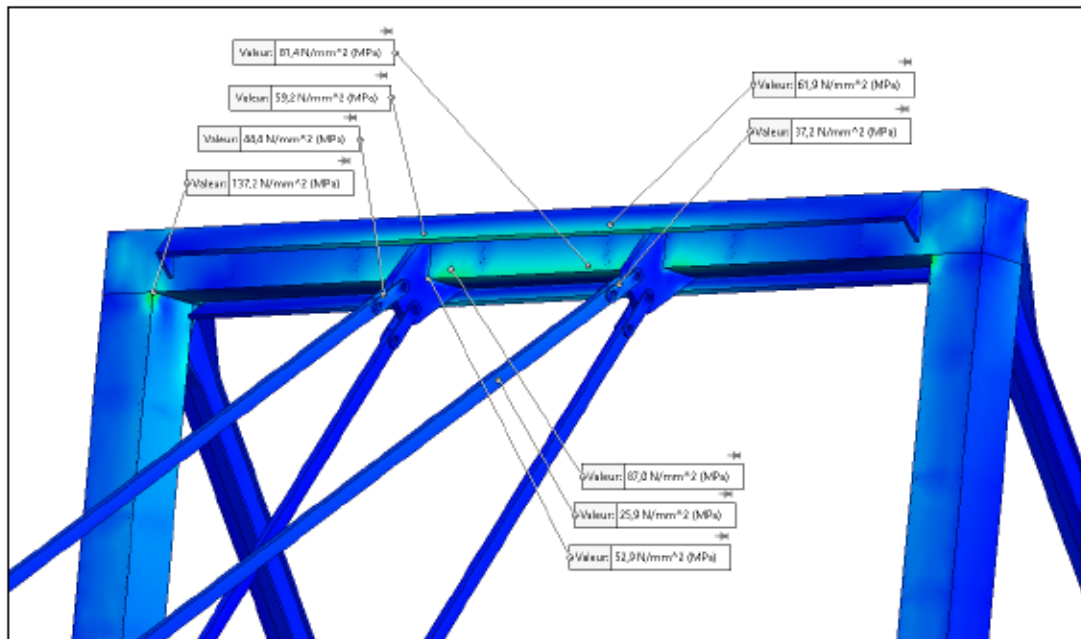
Les valeurs des contraintes de von Mises au bout de la flèche varient entre 9.6 MPa et 27.7 MPa, comme illustré dans la Figure 73.



**Figure 73 Résultats de simulation de 1.2D+0.4W+1.4C de  $S_2V_3$  au niveau des connexions sous les haubans**

On constate que les valeurs de S mises reflètent une distribution équilibrée cependant, elle présente une valeur maximale de 27.7 MPa qui est bien logique que ce soit au-dessus de la valeur maximale de la simulation précédente.

Par rapport au niveau de la traverse, les contraintes varient entre 25.9 MPa et 137.2 MPa. Ces zones de concentrations critiques, présentées dans la Figure 74, pourraient potentiellement poser des risques de défaillance. Ainsi, qu'elles doivent être renforcées et régulièrement inspectées pour prévenir tout signe de fatigue.

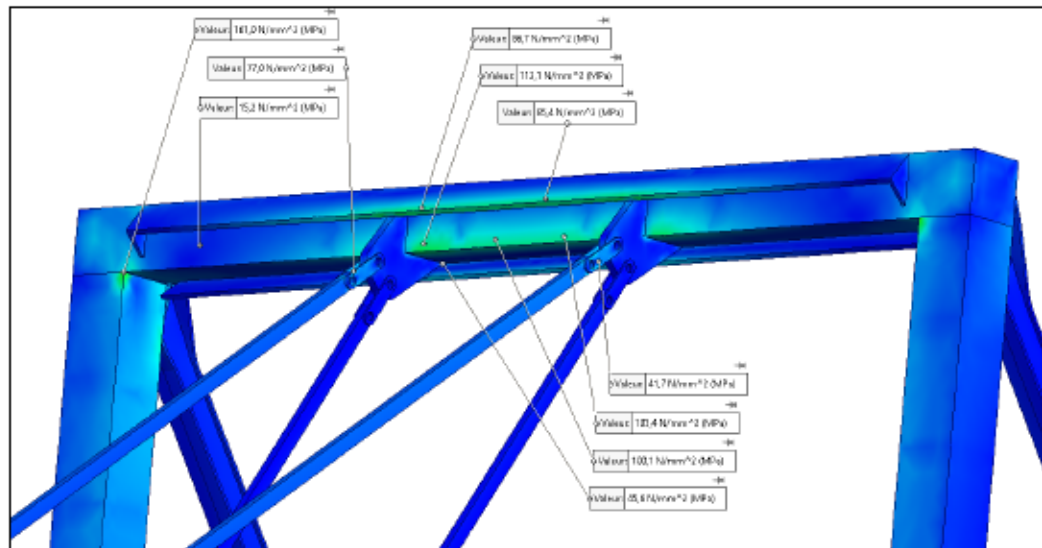


**Figure 74 Résultats de simulation 1.2D+0.4W+1.4C de  $S_2V_3$  au niveau de la traverse supérieure**

Les résultats de la simulation  $S_2V_3$  sous cette combinaison de charges révèlent des zones de concentrations de contraintes qui, bien qu'actuellement en dessous de la limite d'élasticité, pourraient poser des risques à la suite des charges répétées ou des conditions extrêmes.

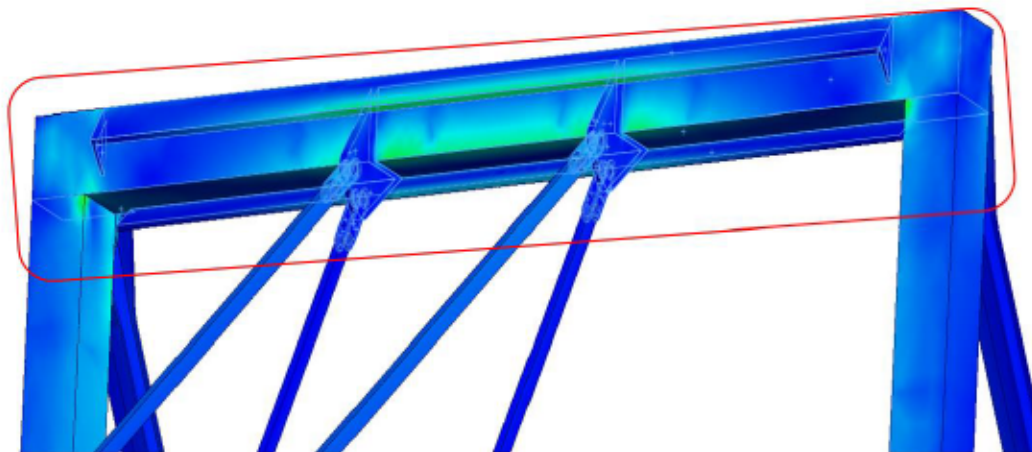
#### **4.2.2.5 Simulation $S_3V_3$ sous la combinaison 1.2D + 0.4W + 1.4C**

Dans cette simulation, les contraintes de von Mises ont été analysées pour évaluer les zones susceptibles de subir des défaillances sous les charges combinées spécifiées comme spécifiées dans la Figure 75. Dans la traverse supérieure, les valeurs de contraintes sont plus préoccupantes, avec des pics atteignant 161 MPa. Les zones colorées en vert et bleu indiquent des concentrations de contraintes importantes, ce qui pourrait conduire à des défaillances localisées si ces zones sont soumises à des charges cycliques répétées.



**Figure 75 Résultats de simulation de 1.2D+0.4W+1.4C de  $S_3V_3$  au niveau de la traverse supérieure**

Les résultats de cette simulation montrent clairement que la traverse supérieure est la zone la plus critique, avec des contraintes atteignant des niveaux qui pourraient compromettre l'intégrité structurelle sous des charges répétées. C'est bien identifié dans la Figure 76.



**Figure 76 Zone de concentration de contraintes au niveau de la traverse supérieure**

Par conséquent, il est recommandé de procéder à une analyse de fatigue de cette zone pour investiguer la durée de vie de la grue dans des conditions opérationnelles réelles.

### 4.2.3 Étude de fatigue

#### 4.2.3.1 Classe de la grue

Les bâtiments en hauteur, qui sont exposés à des charges cycliques causées par le vent et les chargements ne subissent pas un nombre suffisant de cycles au cours de leur durée de vie. C'est pour ça que la fatigue devienne une préoccupation majeure. Les exigences relatives à la fatigue pour les structures, comme celle d'une grue, en fonction de sa classe de service sont présentés dans le 10.

Structural Class of Service	Recommended <sup>a</sup> Number of Thousands of Full Load Cycles (N)
SA	20
SB	40
SC	100
SD	400
SE	1000
SF	Greater than 2000 <sup>b</sup>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• a : Utilisé comme une calibration de la structure de soutien (Classe Structurale de Service). La structure de soutien supportera de nombreux autres cycles avec des charges de différentes amplitudes.</li> <li>• b : En raison de la durée de vie illimitée en fatigue de la grue, un cycle de service et une analyse sont nécessaires pour définir les critères de conception en fatigue.</li> </ul>	

**Tableau 10 Classe de la structure selon la norme canadienne [13]**

En raison de la durée de vie illimitée en fatigue de la grue, un cycle de service et une analyse sont nécessaires pour définir les critères de conception en fatigue.

La grue de l'étude est classée sous la catégorie structurelle SF selon la norme canadienne, ce qui signifie sa capacité à gérer plus de 2 000 cycles de charge complète,

en prenant compte de sa fiabilité exceptionnelle pour des opérations continues de service intensif.

L'analyse du nombre de cycles de la structure de la déchargeuse fourni par le partenaire industriel selon les critères de la CMAA (Crane Manufacturers Association of America) montre que la grue a été en service depuis 1972, avec une durée de vie estimée à 77 ans, couvrant la période de 1972 à 2047. Le nombre de cycles annuels a été estimé à 180 000 cycles entre 1972 et 2001, augmentant à 200 000 cycles annuels entre 2001 et 2047, en raison de l'augmentation de la capacité de chargement (de 20 tonnes à 25 tonnes). Au total, la structure est prévue pour supporter environ 14 800 000 cycles sur sa durée de vie à partir du Rapport d'étude de faisabilité [41].

En ajoutant le poids du chariot (9.2 tonnes) au poids de la benne vide (10.3 tonnes), le calcul tient compte de la charge totale supportée par la structure lors de chaque cycle. Le résultat final classe la structure dans la catégorie SF (Service Factor), indiquant qu'elle est conçue pour un nombre de cycles supérieurs à 2 000 000, ce qui est en ligne avec une utilisation intense et une longue durée de vie.

#### 4.2.3.2 Critères de fatigue

Le critère de calcul pour évaluer la fatigue des structures métalliques se base sur la comparaison entre l'étendue de contrainte due aux charges appliquées  $f_{sr}$  et la résistance à la fatigue exprimée en termes d'écart de contrainte  $F_{sr}$ . La condition pour qu'une structure soit sécurisée face à la fatigue est que la résistance à la fatigue doit être supérieure ou égale à l'étendue de contrainte :

$$F_{sr} \geq f_{sr}$$

31

Les éléments à prendre en compte dans ce calcul sont :

- $\gamma$  : la constante de fatigue.
- $N$  : le nombre de passages de la charge.
- $n$  : le nombre de cycles par passage de la charge.
- $F_{srt}$  : le seuil de fatigue à amplitude constante, qui est la valeur de l'écart de contrainte sous lequel il n'y a pas d'effet de fatigue.

Le calcul est alors vérifié avec l'inégalité :

$$\left(\frac{\gamma}{nN}\right)^{\frac{1}{3}} \geq F_{srt} \quad 32$$

Cette relation permet de déterminer si la structure est capable de supporter les charges cycliques sans avoir de fatigue.

Dans le cas spécifique de l'étude de la grue, l'analyse de fatigue s'est concentrée sur trois éléments principaux : le caisson, le tirant W460x89, et le tirant avant PL1¼x10. Ces éléments ont été identifiés dans les résultats de simulations précédents comme critiques en raison de leur rôle structurel et des charges importantes auxquelles ils sont soumis.

Les valeurs de seuil de contrainte pour chaque élément, classées dans les catégories A et B, ont été comparées aux résultats de simulation pour évaluer leur résistance à la fatigue. Cette comparaison permet de déterminer si les éléments critiques de la grue respectent les critères de sécurité et d'endurance sur la durée de vie prévue de la structure.

Élément	Catégorie de raidisseur	$F_{srt}$ (MPa)	$\gamma$ (MPa)	$\gamma'$ (MPa)	$F_{sr} > F_{srt}$	$F_{sr}$ (MPa)
Caisson	B	110	3.93E+12	4.76E+16	$F_{sr} < F_{srt}$	$F_{sr} = (\gamma'/nN)^{1/5}$ 97.5
Tirant W460x89	A	165	8.19E+12	2.23E+17	$F_{sr} < F_{srt}$	$F_{sr} = (\gamma'/nN)^{1/5}$ 132.8
Tirant avant PL1½x10	A	165	8.19E+12	2.23E+17	$F_{sr} < F_{srt}$	$F_{sr} = (\gamma'/nN)^{1/5}$ 132.8

**Tableau 10 Caractérisation des paramètres influant à la fatigue sur les éléments de la grue [42]**

L'étude montre que le caisson, classé dans la catégorie B, présente une contrainte seuil de 110 MPa, tandis que les tirants, classés dans la catégorie A, ont une contrainte seuil de 165 MPa. Les résultats de simulation indiquent que pour le caisson, la contrainte maximale simulée 97.5 MPa est inférieure à la contrainte seuil, ce qui suggère une marge de sécurité. Cependant, la proximité des valeurs nécessite une investigation pour éviter tout risque de défaillance en service.

Pour les tirants, les contraintes maximales simulées sont bien en dessous du seuil de 165 MPa, ce qui confirme leur capacité à supporter les charges cycliques sans risque immédiat de fatigue. Toutefois, compte tenu de l'importance de ces éléments pour la stabilité globale de la grue, il est recommandé de procéder à une analyse de fatigue plus détaillée, en tenant compte des conditions réelles d'exploitation et des cycles de charge spécifiques à la grue.

#### 4.2.3.3 Modèles de fatigue

Les différents modèles de fatigue jouent un rôle important dans l'analyse de la durée de vie des matériaux soumis à des charges répétées. Pour ce projet, le choix du modèle de fatigue doit être fait en tenant compte de la nature des contraintes appliquées et des caractéristiques du matériau.



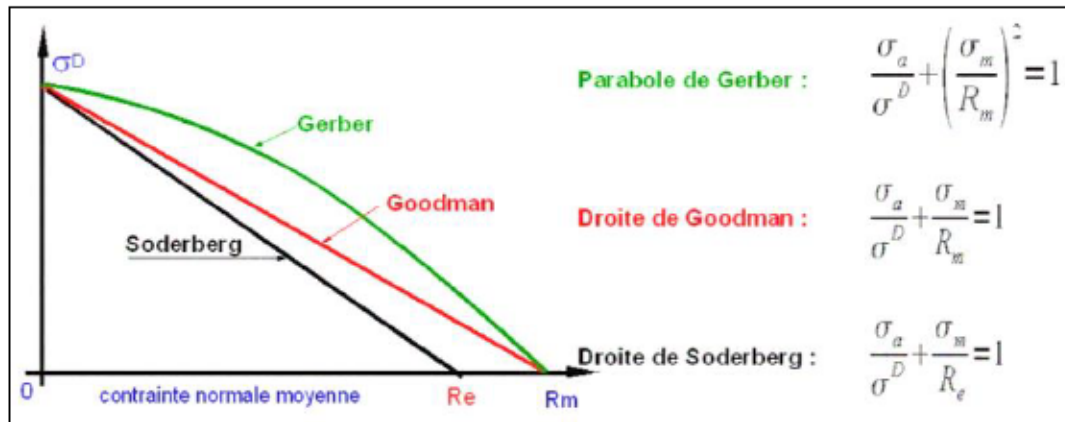


Figure 77 Modèles de fatigue [43]

- **Modèle de Goodman:** Il s'agit d'une méthode qui relie la contrainte alternée à la contrainte moyenne, ce qui permet de déterminer la durée de vie en fatigue tout en tenant compte des effets combinés de ces deux types de contraintes.
- **Modèle de Gerber:** Ce modèle est plus spécifique pour les matériaux ductiles, car il considère une courbe parabolique entre la contrainte alternée et la contrainte moyenne.
- **Modèle de Soderberg:** ce modèle prend en compte une contrainte limite plus faible, ce qui réduit le risque de défaillance, mais peut sous-estimer la capacité réelle du matériau.

#### 4.2.3.4 Avantages du modèle de Goodman

Dans notre étude de la grue, après avoir examiné plusieurs modèles de fatigue, il a été déterminé que le modèle de Goodman est le plus adapté. Ce choix repose sur le fait que le modèle de Goodman prend en compte à la fois la contrainte moyenne et la contrainte alternée, offrant ainsi une prédiction plus précise de la durée de vie en fatigue des structures soumises à des charges cycliques variées. En particulier pour les éléments critiques de la grue, où les charges fluctuent régulièrement, la considération des contraintes réelles, telles que celles observées dans les simulations, rend le modèle de

Goodman particulièrement pertinent pour garantir la fiabilité de la structure, à partir de l'approche de P. Duysinx [42].

$$\sigma_a = \sigma_e \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right) \quad 33$$

Où :

- $\sigma_a$  : Contrainte alternée
- $\sigma_e$  : Limite d'endurance
- $\sigma_m$  : Contrainte moyenne
- $\sigma_u$  : Contrainte ultime

#### 4.2.3.5 Courbe de Wöhler (diagramme S-N)

##### 4.2.3.5.1 Domaines de fatigue possibles

Dans les analyses de fatigue, il existe trois domaines bien définis pour classer l'endurance d'un matériau. La Figure 78 présente ces différents domaines tels que l'oligocyclique, l'endurance limitée et illimitée.

- **Fatigue oligocyclique (low cycle fatigue)** : Corresponds aux contraintes les plus grandes ( $>R_e$ ) où le nombre de cycles à la rupture inférieurs à  $10^4$ .
- **Fatigue d'endurance limitée** : Domaine où la rupture est atteinte après un nombre limité de cycles compris approximativement entre  $10^4$  à  $10^7$ .
- **Fatigue d'endurance illimitée** : Dite également zone de sécurité. La courbe de Wöhler présente généralement une limite asymptotique parallèle à l'axe des  $N_R$ .

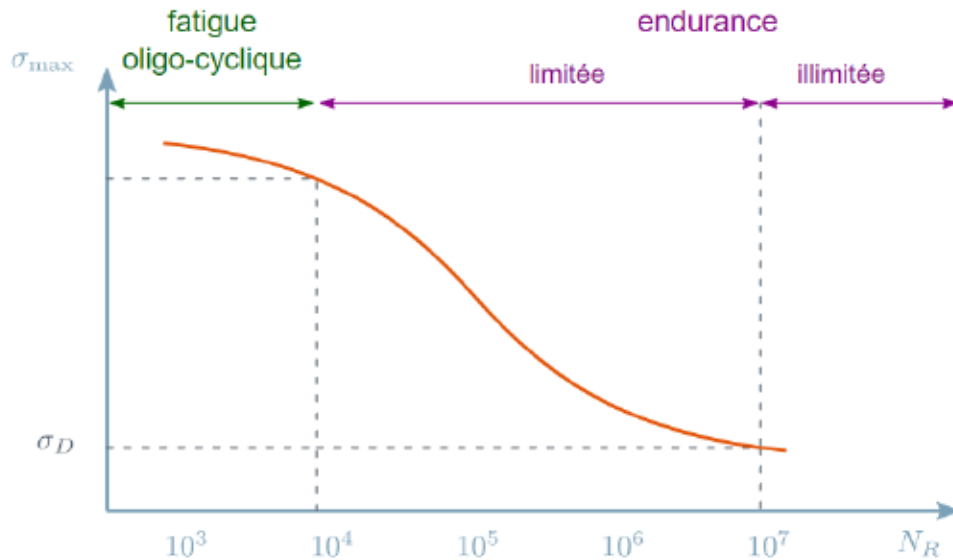


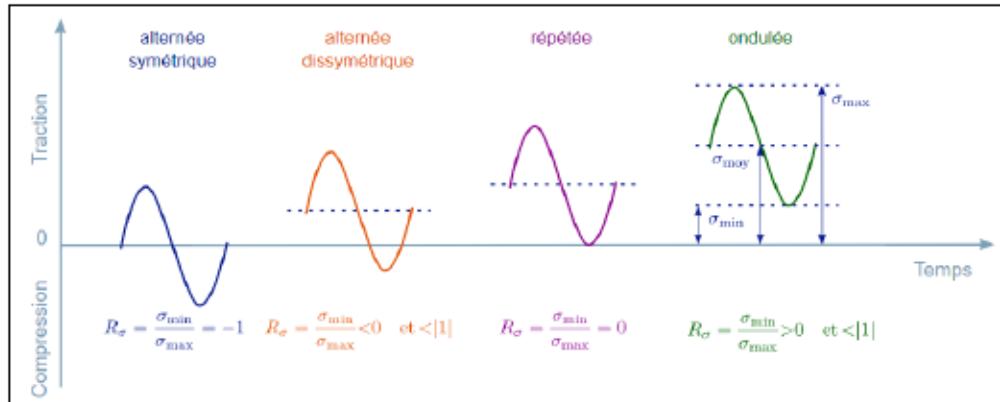
Figure 78 Les différentes zones de fatigue selon la courbe de Wöhler

#### 4.2.3.5.2 Rapport de fatigue et courbe S-N

Le rapport de fatigue  $R$  ou rapport de charge, appelé aussi  $R_\sigma$ , est défini comme le rapport entre la contrainte minimale  $\sigma_{min}$  et la contrainte maximale  $\sigma_{max}$  au cours d'un cycle de chargement. Ce rapport est une mesure de l'amplitude de la contrainte et donne une indication sur la sévérité du cycle de contrainte auquel un matériau est soumis. Formellement, il est exprimé par l'équation :

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad 34$$

Un rapport  $R$  proche de 1 indique un chargement presque constant, tandis qu'un rapport  $R$  proche de -1 indique un chargement alterné symétrique, ce qui est généralement plus critique pour la fatigue. Ainsi, il existe quatre types de charges différents représentés dans la Figure 79.



**Figure 79 Types de chargement selon le rapport de fatigue**

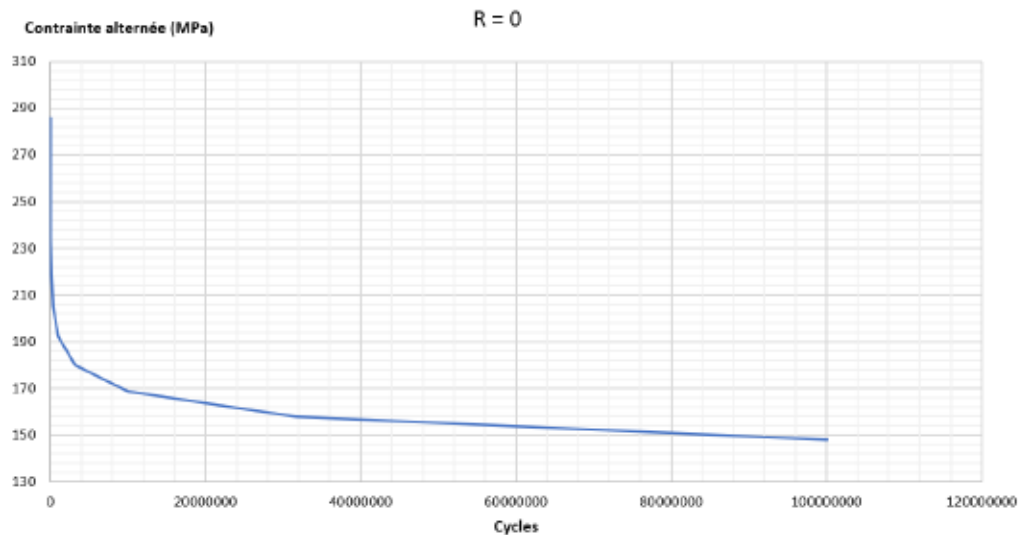
Dans le cas de la grue, le type de contrainte répétée a été adopté pour l'analyse de la fatigue, représentée par la courbe de Wöhler. Ce type de contrainte est caractérisé par un rapport de contraintes  $R_{\sigma} = 0$ , ce qui signifie que la contrainte minimale est nulle et que seule la contrainte maximale est prise en compte dans le cycle de chargement. Ce type de sollicitation est spécifique dans les structures soumises à des charges cycliques qui varient de zéro à une valeur maximale positive, comme c'est souvent le cas dans les grues ou les structures soumises à des charges variables.

La courbe de Wöhler, ou courbe S-N, représente la relation entre la contrainte alternée  $\sigma_a$  et le nombre de cycles  $N$  jusqu'à la rupture. Cette courbe montre que plus la contrainte alternée est élevée, plus le nombre de cycles nécessaires pour provoquer la rupture est faible. Inversement, une contrainte alternée plus faible permet à la structure de résister à un plus grand nombre de cycles avant d'atteindre la fatigue.

Dans le Tableau 11, récapitule les valeurs spécifiques de la contrainte alternée  $\sigma_a$  en fonction du nombre de cycles  $N$ .

Cycles	1000	3162	10000	31620	1 E5	3.16 E5	1 E6	3.16 E6	1 E7	3.16 E7	1 E8
$\sigma_a$ (MPa)	285.6	266.9	249.7	233.8	219	205.1	192.2	180	168.7	158	148

**Tableau 11 Les valeurs spécifiques de la contrainte alternée  $\sigma_a$**

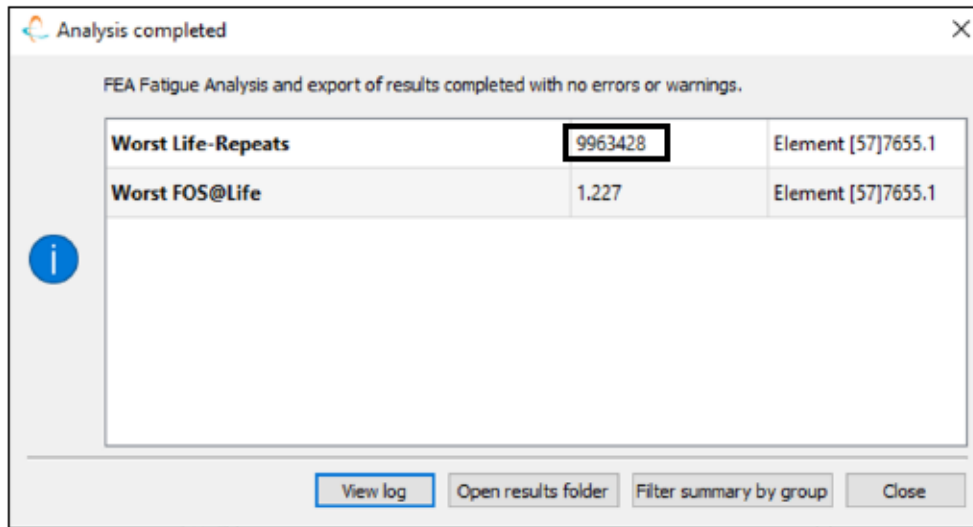


**Figure 80 Les contraintes alternées en fonction du nombre de cycles**

#### **4.2.3.6 Résultat de simulation de fatigue**

L'analyse réalisée à l'aide du logiciel FE-Safe pour la prédiction de la durée de vie en fatigue de la grue a fourni des résultats qui récapitulent la fiabilité et la sécurité de la structure de l'étude.

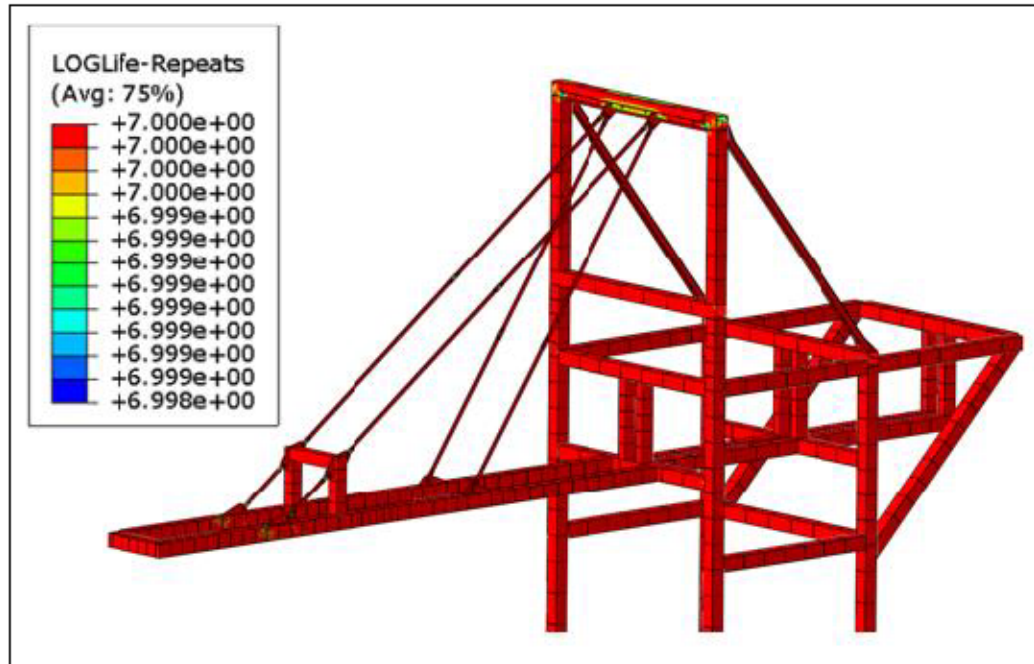
En utilisant le modèle de Goodman, qui est particulièrement bien adapté pour ce type d'évaluation, les effets combinés des contraintes alternées et moyennes ont été considérés sous les conditions cycliques précédentes. Le résultat de nombre de cycles maximal est présenté dans la Figure 81.



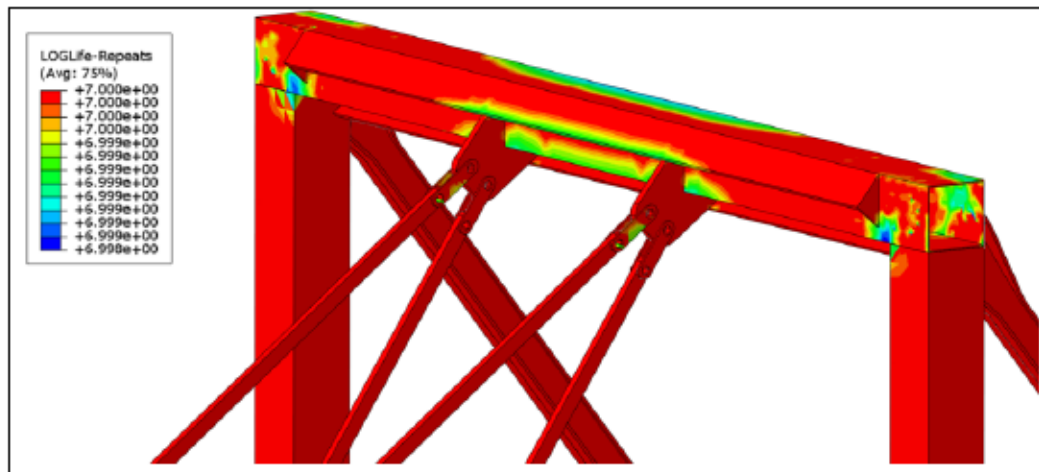
**Figure 81 Résultat de fatigue sous FE-Safe**

La simulation indique une durée de vie de 9 963 428 cycles pour les éléments les plus sollicités de la grue. Ce chiffre ne garantit pas l'absence de problèmes de fatigue à long terme. Même si les contraintes sont relativement faibles, peuvent entraîner une défaillance par fatigue si elles sont répétées de manière soutenue. Ainsi que, le facteur de sécurité minimum à la fatigue FS calculé est de 1.227. Cela signifie que les éléments critiques de la structure sont juste au-dessus de la limite de sécurité, mais restent dans une zone où l'inspection est requise.

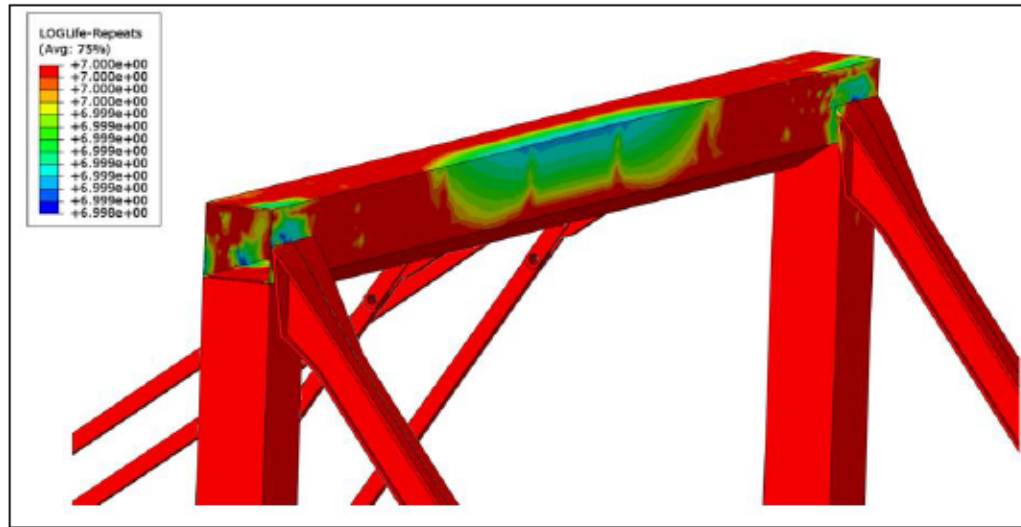
Les résultats visuels obtenus, dans les Figure 82, Figure 83 et Figure 84, montrent des zones spécifiques telles que la traverse supérieure où les indices de fatigue sont particulièrement élevés. Ces zones, identifiées par des concentrations de contraintes plus importantes, sont susceptibles de subir des défaillances avant les autres parties de la grue.



**Figure 82** Résultat de fatigue au niveau de la grue sous Abaqus



**Figure 83** Vue en perspective 1 de la zone susceptible à la fatigue



**Figure 84** Vue en perspective 2 de la zone susceptible à la fatigue

Il est important de noter que la couleur rouge dominante dans les simulations indique des régions où la durée de vie en fatigue pourrait être illimitée. Cependant, pour les autres zones, ils devront faire l'objet d'une surveillance régulière, car une fissuration ou une autre forme de dégradation par fatigue pourrait se développer avec le temps, surtout si les charges sont plus élevées ou plus fréquentes que prévu.

Les résultats de l'analyse de fatigue de la grue montrent une différence entre les cycles de vie prévus analytiquement et ceux obtenus par simulation numérique. Analytique, le nombre total de cycles a été estimé à environ 14 800 000, tandis que le modèle numérique a prédit un nombre de cycles plus bas, soit environ 9 963 428 cycles. Cette divergence met en évidence l'importance des simulations numériques qui prennent en compte les conditions réelles de fonctionnement de la grue, y compris les effets dynamiques et les variations de charge, qui peuvent ne pas être complètement capturés dans une analyse analytique simplifiée.



#### **4.2.3.7 Recommandations**

Pour améliorer la durée de vie de la traverse supérieure, il est recommandé de renforcer cette zone en ajoutant des renforts ou des structures supplémentaires qui augmentent la résistance à la fatigue. Par exemple, l'ajout de plaques de renforcement ou l'utilisation de matériaux à haute résistance dans les zones critiques pourrait réduire les contraintes localisées. De plus, il serait judicieux d'implémenter un plan d'instrumentation avec des capteurs de contrainte et de déplacement pour surveiller en temps réel l'état de la structure. Ces capteurs permettraient de détecter rapidement les signes de fatigue ou de défaillance.

Le choix des capteurs doit être basé sur leur capacité à résister aux conditions environnementales extrêmes et sur leur précision dans la mesure des contraintes et des vibrations.

En conclusion, la combinaison de renforts structuraux et de technologies d'instrumentation avancées constitue une approche efficace pour maximiser la durée de vie de la grue et assurer une surveillance continue de son intégrité structurelle.

## 5 Conclusion générale

Les recherches effectuées dans le cadre de ce travail ont permis de mieux comprendre les mécanismes de défaillance des matrices d'extrusion d'aluminium et des grues portuaires. Les résultats, obtenus à l'aide des simulations numériques, ont permis d'identifier les zones soumises à des contraintes critiques dans ces systèmes, ainsi que les facteurs déterminants pour leur dégradation.

Concernant les matrices d'extrusion d'aluminium, les analyses ont révélé que les défaillances observées, principalement sous forme de fissures, sont largement influencées par des contraintes thermomécaniques récurrentes. L'optimisation des paramètres géométriques et la sélection de matériaux plus résistants à ces contraintes permettent d'améliorer la durée de vie des matrices tout en assurant la qualité du processus d'extrusion.

Quant aux grues portuaires, les simulations ont montré que les charges dynamiques répétées et les conditions environnementales contribuent à l'usure et à la dégradation des structures. Des recommandations pour la mise en place de stratégies de maintenance prédictive ont été formulées, afin de limiter les risques de défaillances et d'assurer la continuité des opérations.

Ces travaux démontrent l'intérêt de l'utilisation d'outils numériques avancés pour l'analyse prédictive des défaillances mécaniques dans les systèmes industriels et visent à développer de solutions de conception optimisée et de maintenance préventive, basée sur l'amélioration continue des modèles de simulation et l'usage de matériaux plus performants.

## 6 Perspectives

Les résultats de cette recherche ouvrent plusieurs voies pour des travaux futurs. Premièrement, l'amélioration des modèles de simulation pourrait se concentrer sur la prise en compte de nouveaux paramètres, tels que les effets de vieillissement des matériaux et l'influence de facteurs environnementaux encore peu explorés, comme l'humidité et les variations de température à long terme. Des modèles plus complexes, intégrant ces paramètres, permettraient d'affiner les prédictions de défaillance et d'améliorer la précision des stratégies de maintenance prédictive.

Deuxièmement, l'intégration de matériaux composites et d'alliages avancés pourrait être étudiée dans les deux cas d'application. Ces matériaux offrent une résistance accrue à la fatigue et à la corrosion, et leur utilisation pourrait améliorer la durée de vie des matrices d'extrusion ainsi que des structures portuaires. Des études expérimentales couplées à des simulations numériques seraient nécessaires pour évaluer leur performance dans des conditions industrielles réelles.

Enfin, l'utilisation de capteurs intelligents pour la surveillance en temps réel des équipements constitue une piste importante. Le développement de systèmes de monitoring permettant de collecter des données continues sur l'état des systèmes mécaniques ce qui pourrait transformer les approches actuelles de maintenance en introduisant des techniques d'analyse de données et d'apprentissage automatique. Cela permettrait de détecter les signes précoces de défaillance, afin d'optimiser la planification des interventions et réduire les temps d'arrêt imprévus.

Ces axes de recherche visent à renforcer la fiabilité des équipements industriels et contribuent à l'optimisation des coûts liés à leurs défaillances.

## 7 Références

- [1] X. Duan, X. Velay, and T. Sheppard, "Application of finite element method in the hot extrusion of aluminium alloys," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 369, no. 1-2, pp. 66-75, 2004.
- [2] S. Akhtar and A. Arif, "Fatigue failure of extrusion dies: effect of process parameters and design features on die life," *J. Failure Anal. Prev.*, vol. 10, pp. 38-49, 2010.
- [3] N. R. E. G. Lim, A. T. Ubando, J. A. Gonzaga, and R. R. N. Dimagiba, "Finite element analysis on the factors affecting die crack propagation in BGA under thermo-mechanical loading," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 116, p. 104717, 2020.
- [4] K. Chantziara, F. J. Kalahroudi, J. Bergström, M. Grehk, and P. Ulfberg, "A case study of mechanical and thermal fatigue of press hardening dies," in *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1238, no. 1, p. 012025, 2022.
- [5] R. L. Neitzel, N. S. Seixas, and K. K. Ren, "A review of crane safety in the construction industry," *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 16, no. 12, pp. 1106-1117, 2001.
- [6] H. Sohn et al., "A review of structural health monitoring literature: 1996–2001," *Los Alamos National Laboratory, USA*, vol. 1, p. 16, 2003.
- [7] MMG Extrusions, "MMG Extrusions official website," Accessed: 2024. [Online]. Available: <https://mmgextrusions.com/>
- [8] The World Material, "H13 tool steel (AISI H13, X40CrMoV5-1, 1.2344, SKD61) properties, composition, and equivalent." Accessed: 2024. [Online]. Available: <https://www.theworldmaterial.com/h13-tool-steel/>
- [9] B. Yilbas, A. Arif, and S. Akhtar, "Finite element simulation of the effect of Al-6063 billet quality on the extrusion die performance," *Ind. Lubr. Tribol.*, vol. 65, no. 2, pp. 78-90, 2013.
- [10] A. Arif, A. Sheikh, and S. Qamar, "A study of die failure mechanisms in aluminum extrusion," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 134, no. 3, pp. 318-328, 2003.
- [11] S. Z. Qamar, T. Pervez, and A. D. Al-Moharbi, "Fracture prediction of extrusion die modeled as pressurized cylinder with internal crack," in *Proc. 15th Int. Res./Expert Conf. Trends Dev. Mach. Assoc. Technol. (TMT 2011)*, Prague, Czech Republic, 2011, pp. 12-18.
- [12] *Obsolete Canadian Structural Steel Grades, 1935–1971.*

- [13] Handbook of Steel Construction, 8th ed., CISC, 2004.
- [14] J. S. et al., "Impact of cyclic loads on the structural components of port cranes," *J. Struct. Eng.*, vol. 146, no. 5, pp. 102-118, 2020.
- [15] K. L. R. Johnson, "Corrosive effects of marine air on metals used in crane construction," *Mater. Corros.*, vol. 72, no. 6, pp. 874-888, 2021.
- [16] F. D. et al., "Operational errors and their impact on crane fatigue and corrosion," *Safety Sci.*, vol. 139, p. 105122, 2022.
- [17] C. M. D. Evans, "Reliability of lifting systems in port cranes," *Int. J. Predict. Maint.*, vol. 1, no. 1, pp. 45-59, 2023.
- [18] M. T. L. Garcia, "Dynamics of port cranes under maximum load conditions," *Struct. Dyn.*, vol. 3, no. 2, pp. 200-214, 2024.
- [19] NordaStelo Documentation, 2024.
- [20] CANEX Documentation, 2024.
- [21] G. Tang, C. Shi, Y. Wang, and X. Hu, "Strength analysis of the main structural component in ship-to-shore cranes under dynamic load," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 23959-23966, 2019.
- [22] X. Xu, X. Zhang, W. Zhu, and X. Gu, "Modal parameter identification of a quayside container crane based on data-driven stochastic subspace identification," *J. Vib. Eng. Technol.*, vol. 9, pp. 919-938, 2021.
- [23] K. A. Porter, J. L. Beck, and R. V. Shaikhutdinov, "Sensitivity of building loss estimates to major uncertain variables," *Earthquake Spectra*, vol. 18, no. 4, pp. 719-743, 2002.
- [24] B. D. Kosbab, *Seismic Performance Evaluation of Port Container Cranes Allowed to Uplift*, Georgia Institute of Technology, 2010.
- [25] T. Lee, "Sensitivity of seismic demand of a reinforced concrete shear-wall building," in *Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP-9 Conf.)*, 2003.
- [26] Q. H. Tran, J. Huh, V. B. Nguyen, A. Haldar, C. Kang, and K. M. Hwang, "Comparative study of nonlinear static and time-history analyses of typical Korean STS container cranes," *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2018, no. 1, p. 2176894, 2018.
- [27] T. E. S. M. F. Spotts and L. E. Hornberger, *Design of Machine Elements*, 8th ed., USA: Prentice-Hall, 1978.

- [28] T. Belytschko, "Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing," *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, vol. 40, pp. 1483-1504, 1997.
- [29] M. Fleming, Y. Chu, B. Moran, and T. Belytschko, "Enriched element-free Galerkin methods for crack tip fields," *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, vol. 40, no. 8, pp. 1483-1504, 1997.
- [30] J. M. Melenk and I. Babuška, "The partition of unity finite element method: basic theory and applications," *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, vol. 139, no. 1-4, pp. 289-314, 1996.
- [31] C. A. Duarte and J. Oden, "A new meshless method to solve boundary-value problems," 1995.
- [32] N. Sukumar, D. L. Chopp, N. Moës, and T. Belytschko, "Modeling holes and inclusions by level sets in the extended finite-element method," *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, vol. 190, no. 46-47, pp. 6183-6200, 2001.
- [33] N. Stein, S. Dölling, K. Chalkiadaki, W. Becker, and P. Weißgraeber, "Enhanced XFEM for crack deflection in multi-material joints," *Int. J. Fract.*, vol. 207, pp. 193-210, 2017.
- [34] Y. Yan and S.-H. Park, "An extended finite element method for modeling near-interfacial crack propagation in a layered structure," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 45, no. 17, pp. 4756-4765, 2008.
- [35] C. Shih, B. Moran, and T. Nakamura, "Energy release rate along a three-dimensional crack front in a thermally stressed body," *Int. J. Fract.*, vol. 30, pp. 79-102, 1986.
- [36] J. R. Rice, "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks," 1968.
- [37] M. Karimi and J. Rouzegar, "A CA-XFEM for mixed-mode variable-amplitude fatigue crack growth," *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 114, p. 102979, 2021.
- [38] Z. Chen, H. Bao, Y. Dai, and Y. Liu, "Numerical prediction based on XFEM for mixed-mode crack growth path and fatigue life under cyclic overload," *Int. J. Fatigue*, vol. 162, p. 106943, 2022.
- [39] Canadian Institute of Steel Construction. *Handbook of steel construction*. Willowdale, Ont.: Canadian Institute of Steel Construction, 1992.
- [40] R. Tremblay, A. Picard, G. Grondin, and B. Massicotte, *Calcul des charpentes d'acier – Tome I, 2e éd., 2e tirage revu, ICCA, 2008*.
- [41] R. Tinto, "Rapport d'étude de faisabilité : Capacité du déchargeur UT7 - Installations portuaires," 2023.

- [42] P. Duysinx, "Conception à la fatigue," Univ. Liège, 2021.
- [43] B. Meddour, "Fatigue des matériaux & mécanique de rupture," Univ. A. L. Khenchela, 2017.