

Prédiction des pressions limites selon une approche multicritère appliquée aux pipelines et aux pompes centrifuges

A. Sediri¹, H. Mrad^{1,2}, G. Dituba Ngoma¹, E. Elsharkawi³

¹École de génie, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda (QC), Canada.

alaeddine.sediri@uqat.ca / hatem.mrad@uqat.ca / Guyh.DitubaNgoma@uqat.ca / Ehab.Elsharkawi@smu.ca

²Département des sciences appliquées, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi (QC), Canada.

³ Faculty of Science, Saint Mary's University, Halifax, Nova Scotia, Canada.

Résumé — L'objectif principal de ce travail est de développer une approche de prédiction des pressions limites (pré-éclatement et éclatement) des équipements sous pression (ESP). L'approche développée est appliquée à une série de géométrie de tubes en acier AISI1020 et la section de décharge d'une pompe centrifuge de type MH40-65. Une étude numérique et expérimentale de pressurisation a été réalisée en vue de normaliser ces modèles de pompes. Un modèle générique de tube a été mis en place à l'aide du logiciel commercial Abaqus couplé avec un script Python.

Mots clefs — Pipeline ; Pompe centrifuge ; Pression ; Pré-éclatement ; Éclatement ; Plasticité.

1. Introduction

De nos jours, la demande en équipements sous pression a grandement augmenté dans le monde industriel. Les pipelines constituent un des ESP les plus sollicités mécaniquement et thermiquement donc mis à haut risque de défaillances et d'éclatement [1,2]. D'où, ils doivent, en permanence, répondre aux normes de conception et aux nouvelles exigences de l'industrie. Donc, une meilleure prédiction de comportement thermomécanique permet d'améliorer la fiabilité et par conséquent garantir une large économie énergétique et financière. Des études antérieures et des méthodes innovatrices portant sur la prédiction des états limites et le comportement des ESP ont été réalisées [3]. La fluctuation permanente des pressions et des températures internes/externes constitue un phénomène assez standard auquel font face ces ESP [4]. Ces fluctuations mènent inévitablement à l'endommagement progressif, voire instantané, des équipements par fatigue, fluage ou surpression. Law et Bowie [5] ont mis en place une étude portant sur la prédiction de la déformation et la pression d'éclatement des pipelines. Lasebikan et Akisanya [6] ont étudié l'effet des sollicitations combinées en tension axiale, pressions et températures élevées sur les éclatements.

Dans la majorité de ces études, le choix de critère de défaillance utilisé pour quantifier les niveaux des pressions limites de pré-éclatement et d'éclatement représente un défi majeur des chercheurs. D'autres chercheurs ont déployé des efforts afin d'amener des éléments de réponses au processus de prédiction des pressions limites à travers des essais expérimentaux, calculs empiriques et des simulations numériques. Aujourd'hui, plusieurs formulations du comportement thermomécanique et élastoplastique ont été implémentées dans des logiciels commerciaux utilisant la méthode des éléments finis. L'objectif à atteindre est un commun et consiste à réduire les risques de rupture et d'éclatement des ESP. Les données issues des essais d'éclatement en laboratoire permettent de comparer, vérifier et valider les résultats de simulation en mettant en évidence les critères d'admissibilité adéquats et l'analyse de l'état des contraintes dans les zones les plus critiques d'un prototype test. C'est dans ce contexte plus particulier que se place le présent projet. Un plan d'expérience d'essai-calcul est considéré dans lequel 10 rapports de diamètres extérieurs/intérieurs de tubes en acier dont on connaît respectivement leurs 10 pressions d'éclatement expérimentales. Ensuite, la partie de décharge d'une pompe de TECHNOJET multistage MH40-65 de la compagnie Technosub [7] a été étudiée.

2. Étude des pipelines sous pression

2.1. Modèle numérique générique

Le comportement mécanique des ESP dépend principalement de trois catégories de paramètres : (i) géométriques, (ii) conditions aux limites et (iii) propriétés physiques. Ces paramètres seront pris en considération pour mener des simulations numériques sur un modèle générique paramétré 3D de tube standard (figure 1). La prédiction des pressions de pré-éclatement et l'analyse des critères des états limites des tubes en acier AISI1020 ont été réalisées.

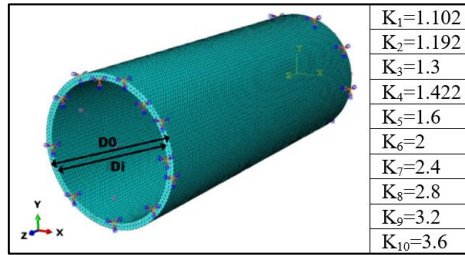


Figure 1 – Modèle générique de tube standard (Rapport de diamètre $K=D_0/D_i$)

L'organigramme de la simulation est représenté par la figure ci-dessous :

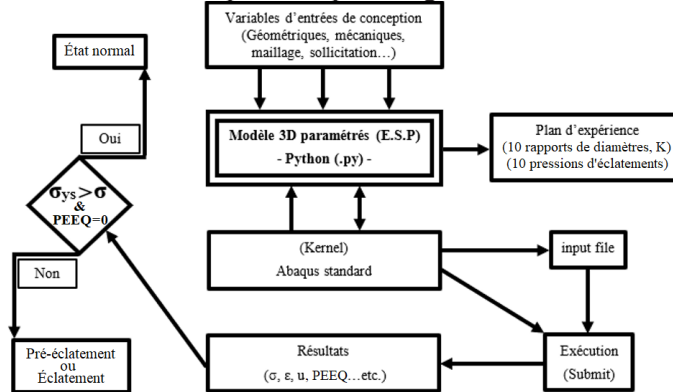


Figure 2 : Organigramme de modèle numérique de simulation (Couplage Abaqus-Python)

2.2. Critères limites multiaxiaux

Le critère principal de conception d'un tube est sa pression limite d'éclatement. La prédiction empirique de cet état limite a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche et quelques formules analytiques ont été proposées dans la littérature [5] pour des tubes sous pression interne. Sauf que les résultats expérimentaux ont montré que peu de formules donnent des prédictions fiables des pressions d'éclatement notamment pour les tubes en acier avec un ratio de résistance ultime à la traction sur limite d'élasticité assez élevé.

$$P_{burst} = \sigma_{ult} \cdot \left(\frac{K-1}{0.6k+0.4} \right) \quad (\text{ASME}) \quad (1)$$

$$P_{burst} = \frac{2\sigma_{ys}}{\sqrt{3}} \cdot \ln(K) \cdot \left(2 - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{ult}} \right) \quad (\text{Faupel}) \quad (2)$$

$$P_{burst} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_{ult} \cdot \ln(K) \quad (\text{Nadai}) \quad (3)$$

$$P_{burst} = \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_{ult} \cdot \left(\frac{K-1}{K+1} \right) \quad (\text{Soderberg}) \quad (4)$$

$$P_{burst} = \sigma_{ult} \cdot \ln(k) \quad (\text{Turner}) \quad (5)$$

Le pré-éclatement, tel que défini, est l'état où le tube se déforme plastiquement jusqu'à un niveau jugé extrême. Les valeurs de déformation équivalente plastique (PEEQ) donnent une information très précieuse pour faire une bonne prédiction de cet état de pré-éclatement. En effet, les équations 1 à 5, donnent une prédiction des états limites d'éclatement. Afin de déterminer l'état de pré-éclatement, il a été prouvé qu'il suffit de remplacer la contrainte ultime de traction (σ_{ult}) par celle à la limite élastique de traction (σ_{ys}) [8]. Donc les pressions de pré-éclatement peuvent être déduites à partir des formules précédentes.

2.3. Plan d'expérience

Le plan d'expérience retenu pour les simulations correspond à 10 tubes ayant 10 rapports K de diamètres différents (Tableau 1). La pression d'éclatement expérimentale étant connue pour chaque géométrie. Des résultats tels que les courbes d'évolution de la pression appliquée en fonction de la déformation équivalente de plasticité (PEEQ) seront les plus pertinentes à investiguer. Les critères de Tresca et von Mises permettent de confirmer les prédictions de pressions et de déformations limites. La comparaison des résultats obtenus permet de valider la pression de pré-éclatement de chaque rapport de diamètre considéré à partir du modèle générique développé.

3. Résultats et discussions

3.1. Choix du type d'élément

L'élément choisi lors de la simulation numérique sur Abaqus est le C3D10 (tétraédrique quadratique à 10 nœuds). Le choix a été basé principalement sur l'excellente concordance entre les résultats numériques et analytiques. Pour le rapport K_1 , les contraintes principales calculées analytiquement donnent $\sigma_1 = 467.81$ MPa et $\sigma_2 = -22.16$ MPa [9]. Ce qui donne la contrainte de von Mises suivante :

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = 479.27 \text{ MPa} \quad (6)$$

La contrainte de von Mises obtenue numériquement est de 483.2 MPa (Figure 3). Cette différence de 4 MPa est due à l'augmentation du diamètre intérieur après l'application de la pression.

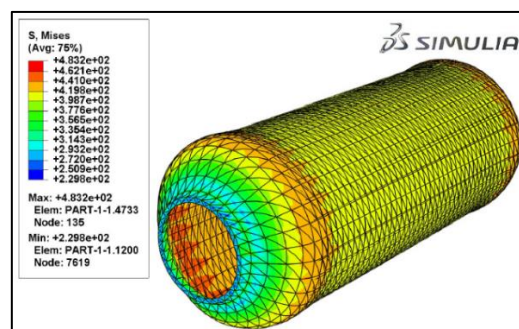


Figure 3 : Contrainte de von Mises pour le rapport K_1 (Simulation)

3.2. Analyse des pressions d'éclatement

La procédure proposée nous a permis de comparer les pressions d'éclatement expérimentales (P_{exp}) avec celles calculées par les modèles analytiques (équations 1-5). Il est possible alors de vérifier le modèle avec le minimum d'erreur, et ce, pour chaque rapport K. Le tableau 1 et la figure 4 détaillent cette analyse comparative. Les valeurs de pression d'éclatement analytiques sont calculées à partir des équations 1-5. On constate que ces pressions varient de 45.10 MPa (Faupel) pour K_1 à 715.88 MPa

(Nadai) pour K_{10} , et ce, respectivement pour des pressions d'éclatement expérimentales 47.8 à 574.69 MPa. D'où, pour une augmentation de 326 % de rapport des diamètres la pression d'éclatement expérimentale augmente de 1202 %.

Tableau 1 : Comparaison des pressions d'éclatement avec les modèles analytiques

K	P_{exp} (MPa) (10)	ASME		Faupel		Nadai		Soderberg		Turner	
		P (MPa)	Erreur (%)	P (MPa)	Erreur (%)	P (MPa)	Erreur (%)	P (MPa)	Erreur (%)	P (MPa)	Erreur (%)
1	47.8	46.52	2.67	45.10	5.64	54.28	-13.55	54.23	-13.45	47	1.67
2	76.03	83.32	-9.58	81.56	-7.27	98.15	-29.09	97.90	-28.76	85	-11.79
3	119.68	123.05	-2.81	121.84	-1.8	146.62	-22.51	145.79	-21.81	126.98	-6.09
4	167.26	162.98	2.55	163.49	2.25	196.75	-17.63	194.75	-16.43	170.39	-1.87
5	212.39	213.52	-0.53	218.26	-2.76	262.67	-23.67	257.94	-21.44	227.48	-7.1
6	311.85	302.5	2.99	321.89	-3.21	387.38	-24.21	372.58	-19.47	335.48	-7.57
7	381.48	368.26	3.46	406.56	-6.57	489.27	-28.25	460.25	-20.64	423.72	-11.07
8	456.90	418.84	8.33	478.15	-4.65	575.42	-25.94	529.46	-15.88	498.33	-9.06
9	526.62	458.96	12.84	540.16	-2.57	650	-23.42	585.48	-11.17	562.96	-6.9
10	574.69	491.56	14.46	594.86	-3.5	715.88	-24.56	631.77	-9.93	619.97	-7.87

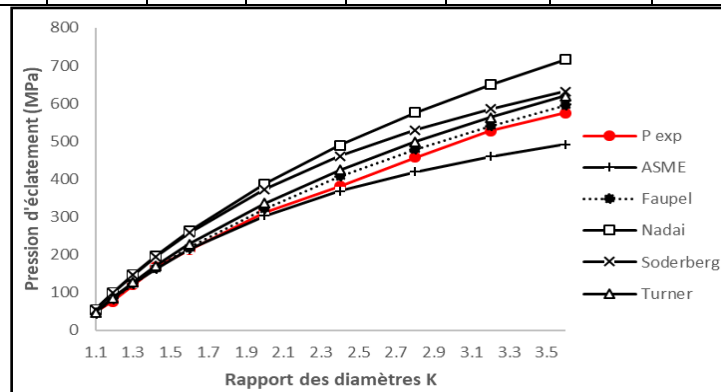


Figure 4 : Évolution de la pression d'éclatement analytique et expérimentale de K_1 à K_{10}

Les critères d'état limite de Nadai, ASME et Soderberg basés uniquement sur la résistance ultime à la traction n'ont pas réussi à approcher la valeur de pression obtenue expérimentalement pour le cas des épaisseurs de mur les plus élevées. Pour remédier à un tel écart Faupel a proposé une meilleure approche basée sur le ratio limite d'élasticité-résistance ultime à la traction. Par ailleurs, pour les faibles rapports de K, tous les modèles donnent des prédictions assez conformes.

3.3. Prédiction des pressions de pré-éclatement

Les courbes de la pression-PEEQ issues des simulations numériques pour chacune des 10 géométries étudiées sont données par la Figure 5. La pression de pré-éclatement pour chaque cas a été atteinte à des valeurs de déformation plastique équivalente sensiblement égales. Les valeurs de pression de pré-éclatement sont déterminées par projection à partir d'une valeur de PEEQ non nulle jugée excessive. Un critère global permet de fixer cette valeur à 5 %. Par exemple, pour le rapport K_3 la pression à $PEEQ=0.05$ est égale à 86.9 MPa ce qui concorde parfaitement avec la valeur prédite par le modèle Faupel 87 MPa. Le Tableau 2 donne les valeurs des pressions de pré-éclatement pour tous les rapports. Enfin, la Figure 6 montre la distribution des états limites correspondants aux prédictions selon les critères classiques de Tresca et von Mises.

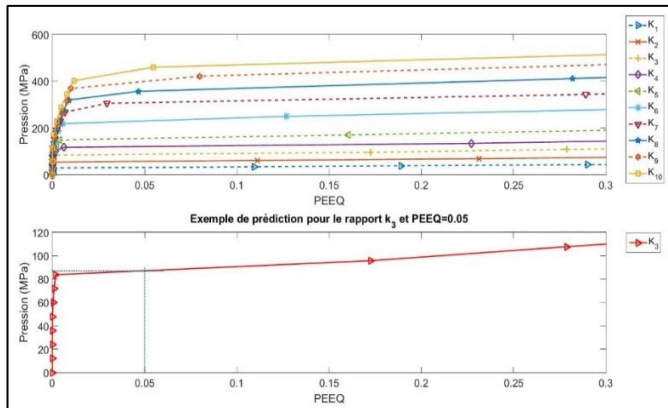


Figure 5 : Courbes de la Pression-PEEQ pour les 10 rapports de diamètres, prédiction pour le cas K_3

Tableau 2 : Prédiction des pressions de pré-éclatement pour K_1 à K_{10}

K	Pré-éclatement Simulation (MPa)	Pré-éclatement Faupel (MPa)
1	31.96	31
2	57.79	57
3	86.9	87
4	115.86	120
5	154.67	155
6	228.10	230
7	288.10	305
8	338.83	355
9	382.78	400
10	421.54	450

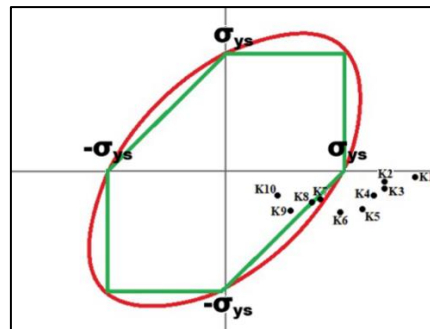


Figure 6 : Distribution des états limites adimensionnels selon les critères de Tresca et von Mises

4. Application industrielle : Pompe centrifuge multistage

Dans l'objectif de certifier des pompes centrifuges multistage, une étude préliminaire de comportement sous haute pression a été réalisée. Le modèle d'étude est celui de la section de décharge d'une pompe TECHNOJET multistage MH40-65 (Figure 7a) obtenu par moulage de fonte ductile. Des essais de pressurisation ont été menés afin de valider les simulations numériques. Le comportement élastoplastique a été étudié. Le mesure des données est assurée par un caméra haute définition, des capteurs de pression, jauges de déformations ainsi qu'un LVDT.

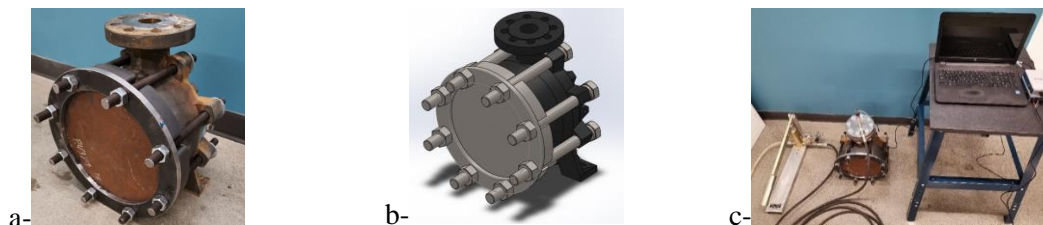


Figure 7 – Section décharge d'une pompe; a- MH Modèle réel; b- Dessin 3D; c- Dispositif d'essai

Le protocole des essais expérimentaux suit un cycle de pressurisation et de dépressurisations selon les normes : ANSI (American National Standards Institute) /API 610-1995, ASME B73.1-2001 et ASME B73.2-2003. Le mode opératoire commence par remplir la section de charge avec de l'eau sous pression à l'aide d'une pompe hydraulique manuelle (Figure 7c). La pression initiale ne doit pas en aucun cas être inférieure à 1 000 KPa, sachant que pendant le plan d'expérience il faut appliquer à chaque fois le double de la pression de travail maximale plus 10 %. Chaque pression appliquée doit être maintenue 1

minute au minimum. Un premier résultat de la simulation permet d'obtenir un état approximatif des concentrations des contraintes. Les capteurs ont été installés en conséquences dans ces endroits.

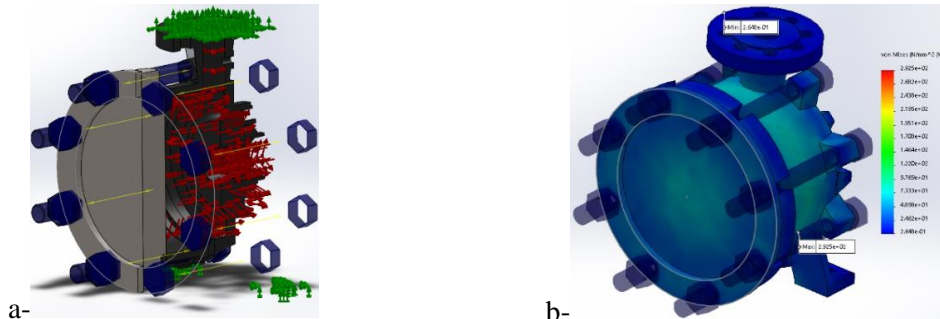


Figure 8 : Décharge d'une pompe MH : a- Conditions aux limites et pression appliquée (17.23 MPa), b- Contrainte de von Mises (MPa)

5. Conclusion et perspectives

Nous avons proposé dans cette étude un modèle de conception des tubes permettant la prédiction des pressions de pré-éclatement basé sur les critères classiques des états limites en plasticité. L'étude a montré qu'avec une augmentation de 326 % de rapport des diamètres, la pression d'éclatement expérimentale augmente de 1202 %. L'étude comparative des résultats a montré que le modèle analytique d'éclatement de Faupel a été celui qui concorde le mieux avec les tests expérimentaux. La pression de pré-éclatement pour 10 rapports de diamètres a été atteinte à des valeurs de déformation plastique équivalente sensiblement égales, et ce, selon la géométrie de tube.

Une étude préliminaire de comportement d'une pompe centrifuge sous haute pression a été réalisée pour déterminer les limites des pressions admissibles. La section décharge est considérée comme la partie de la pompe qui va subir les plus hautes sollicitations. Comme perspective, il est envisagé d'améliorer l'étude numérique pour l'obtention des courbes pression-PEEQ et valider le tout avec des essais de pressurisation expérimentaux.

Références

- ¹ A. T. Brabin et al. "Investigation on failure behavior of unflawed steel cylindrical pressure vessels using FEA." *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures* 5(1): 29-42, 2009.
- ² C.-j. Zhuang et al. "The Development and Its Future Research Direction of Grade X80 Pipeline Steel in China [J]." *Welded Pipe and Tube* 2: 002, 2005.
- ³ P. Rohart, S. Panier, S. Hariri, Y. Simonet et M. Afzali, "Contribution to pressure vessels design of innovative methods and comparative application with standardized rules on a realistic structure–Part I," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 134, pp. 25-32, 2015.
- ⁴ X.-K. Zhu and B. N. Leis, "Evaluation of burst pressure prediction models for line pipes," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 89, pp. 85-97, 2012.
- ⁵ M. Law and G. Bowie, "Prediction of failure strain and burst pressure in high yield-to-tensile strength ratio linepipe." *International journal of pressure vessels and piping* 84(8): 487-492, 2007.
- ⁶ B. Lasebikan, and A. Akisanya, "Burst pressure of super duplex stainless steel pipes subject to combined axial tension, internal pressure and elevated temperature." *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 119: 62-68, 2014.
- ⁷ Technosub. SERIE MH (TECHNOJET). Available: http://www.technosub.net/fr/produits/multistage/serie_mh
- ⁸ T. A. Brabin, T. Christopher, and B. N. Rao, "Bursting pressure of mild steel cylindrical vessels," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 88, no. 2-3, pp. 119-122, 2011.
- ⁹ A. Bazergui et al. "Résistance des matériaux, 3e édition." Presses internationales Polytechnique, 2002.
- ¹⁰ M. Kadam et al. "Finite Element Prediction of Static Burst Pressure in Closed Thick-walled Unflawed Cylinders of Different Diameter Ratios." *Procedia engineering* 173: 577-584, 2017.