Nouvelle méthode d'analyse pour les nuages de défauts plans dans les gros composants métalliques sous pression

N. Greffet1

¹ EDF/DPN/UTO, France, nicolas.greffet@edf.fr

Résumé — Suite à de nouveaux examens de certaines zones des cuves du parc en exploitation, il a été nécessaire de développer une méthodologie spécifique d'analyse de nocivité mécanique pour les cas d'indications multiples. Cette nouvelle approche se doit d'être en cohérence avec les codes nucléaires reconnus (RSE-M, ASME). En effet, elle peut être utilisée dans le cadre de dossiers réglementaires qui sont validés par l'ASN.

Mots clefs — Indications multiples, rupture brutale, cuve, REP, défauts plans, interaction de défauts, RCC-M, RSE-M, ASME.

1 Introduction

Suite à une demande de l'ASN (Autorité de Sûreté Nucléaire) concernant la recherche de défauts dus à l'hydrogène (DDH), générés lors de la fabrication des gros composants forgés du parc nucléaire en exploitation, EDF a dû développer un nouveau procédé d'examen par ultrason.

Ce procédé a été mis en œuvre sur quelques cuves et a mis en évidence des indications. Par conservatisme, ces indications, de nature très probablement inclusionnelle de par leurs positions, sont considérées comme étant des défauts plans dans les calculs mécaniques. Il convient alors d'étudier la nocivité mécanique de ces défauts plans, pour pouvoir justifier le maintien en exploitation de la tranche.

Cette justification est un élément indispensable au dossier qui est présenté à l'ASN afin d'avoir l'autorisation de redémarrage.

2 Contexte EDF pour les analyses mécaniques de rupture brutale

Afin de pouvoir démontrer l'innocuité d'indications assimilées à des défauts plans, des analyses du risque de rupture brutale doivent être menées.

Les Dossiers de Référence Réglementaire (DRR) comportent donc ces analyses dédiées : les Dossiers de Rupture Brutale (DRB) qui sont mis à jours, *a minima*, lors de chaque visite décennale (VD). Chaque composant sensible dispose donc de ces documents (par exemple, pour le circuit primaire principal : la cuve, les générateurs de vapeur, le pressuriseur...)

Ces notes de calcul justifient la tenue mécanique en présence de défauts postulés. Elles se basent sur des approches codifiées (RCC-M [2] et RSE-M [3]) qui comportent des conservatismes connus, ce qui assure le maintien de marges.

En parallèle de ces analyses de conception, il faut aussi étudier la nocivité de défauts réels constatés sur le parc en exploitation. Si ces défauts ne sont pas couverts par les DRB, EDF/UTO doit alors mener une analyse mécanique spécifique, indispensable à la justification du maintien en exploitation du composant concerné.

Afin d'assurer l'acceptabilité de cette étude, nous privilégions, dans un premier temps, l'utilisation des méthodes des codes de références comme le RCC-M [2] et le RSE-M [3].

3 Résultats des examens

Parmi les zones examinées, on va présenter le cas des brides de corps de cuve, dites brides A (bride de fermeture avec le couvercle), pour les paliers 900 MWe et 1300 MWe. C'est une zone épaisse (plus de 370 mm) :



Figure 1 – Schéma bride A

On présente des exemples de répartition des indications observées sur deux cuves différentes:



Figure 2 – Répartition des indications (projetées dans un plan vertical à gauche et en vue de dessus à droite)

Le nombre d'indications peut atteindre quelques centaines.

4 Méthodologie d'analyse

4.1 Rappels sur l'approche RSE-M

La méthodologie d'analyse mécanique des défauts plans habituellement utilisée à EDF suit les règles des annexes 5.1 à 5.5 du RSE-M [3], en se basant sur les modèles et données des DRB. On doit ainsi pouvoir statuer sur la stabilité (en régime ductile et fragile) des défauts constatés, ainsi que leur propagation sur la durée de vie résiduelle prise en compte.

La tenue de la structure est donc ainsi analysée, en prenant en compte les coefficients de sécurité du RSE-M.

La première étape est de définir les défauts enveloppes (tenant compte des incertitudes liées au procédé d'examen) et les interactions entre défauts proches, suivant l'annexe 5.1 [3].

La méthode de recherche des interactions se base sur des critères géométriques simples. On construit des parallélépipèdes d'interaction et lorsqu'il y a une intersection entre deux, on définit le défaut regroupé enveloppe des deux défauts voisins :



Figure 3 – Recherche d'interaction (dans le plan), illustration RSE-M [3]

Le processus est itératif : on rajoute les défauts regroupés à la liste des défauts initiaux et on recommence la recherche d'interaction.

Dans les cas habituels, la recherche d'interaction se fait sur un nombre assez faible de défauts (de l'ordre de quelques dizaines au maximum) et la méthode converge rapidement.

Lorsque ce nombre de défauts devient très grand, donc avec une densité forte, la méthode n'est alors pas adaptée car elle conduit à des défauts regroupés de taille non physique (par exemple débouchant à la fois en paroi en dans les trous de goujons).

Cela vient du fait que la méthode d'interaction du RSE-M est conservative et implicitement adaptée au traitement des cas avec faible nombre de défauts.

Il est donc nécessaire de chercher une autre méthode adaptée aux nuages d'indications.

4.2 Bibliographie des méthodes d'interactions

Parmi les principaux travaux existants sur le sujet (cas d'indications dans des plans parallèles entre eux et perpendiculaires à la surface soumise à la pression), qui répondent aussi à l'exigence de validation sur des cas industriels comparables et aussi, autant que possible, une acceptation dans un code reconnu du domaine nucléaire, on peut citer :

	Remarques	Processus	Distance limite d'interaction		
Méthodes		itératif	Dans le plan (x,y)	Hors plan (z)	
RSE-M (annexe 5.1) [3]		Oui	0,5h ₁ +0,5h ₂		
ASME XI IWA-3300 [1]		Non	0,5.max(h ₁ ; h ₂)	13 mm (1/2 '')	
ASME CC N 848 [9] (Sites de Doel 3 et Tihange 2)	Défauts quasi-laminaires	Non	min(h ₁ ; l ₁ ; h ₂ ; l ₂)	0,425.min(h ₁ ; l ₁ ; h ₂ ; l ₂)	
ASME CC N 877 ([10])	Défauts radiaux non débouchants	Non	$\min(h_1^{eq}; h_2^{eq})$	$\min(\mathbf{h_1}^{eq};\mathbf{h_2}^{eq})$	
ASME CC N 877-1 ([7])	Défauts radiaux	Non	$\begin{split} Sx &= \min(l_1{}^{eq} \text{ ; } l_2{}^{eq}) \ (\text{// paroi})\\ Sy &= \min(h_1{}^{eq} \text{ ; } h_2{}^{eq}) \ (\text{\bot paroi}) \end{split}$	max(Sx, Sy)	
AREVA/FRAMATOME [5]	Sans singularité géométrique	Non	$0,6.min(h_1^{eq};h_2^{eq})$	$0,7.min(h_1^{eq};h_2^{eq})$	
AREVA/FRAMATOME [6]	Avec singularité géométrique	Non	$0,6.max(h_1^{eq}; h_2^{eq})$	$0,7.max(h_1^{eq};h_2^{eq})$	
Article [4]	Deux défauts identiques coplanaires	Non précisé	0,36.(h.l) ^{0,5}	Sans objet	
Article [8]	Défaut débouchant 1 et non débouchant 2 coplanaires	Non précisé	min(h ₁ ; 0,5h ₂)	Sans objet	

Table 1 - Synthèse des méthodes d'interaction analysées

La très grande majorité des méthodes récentes définissent une distance d'interaction pilotée par le plus petit des défauts voisins. La variante d'AREVA, qui fait apparaître une formule basée sur le plus gros défaut, correspond à un cas très spécifique de géométrie présentant une forte singularité comme les pénétrations de fond de cuve.

Les distances d'interaction pour la méthode du Code Case 877-1 [7] (S_y suivant la normale à la surface sous pression, S_x perpendiculaire à S_y et dans le plan de l'indication, H suivant la normale au plan de l'indication) s'écrivent ainsi :

$$\begin{cases} S_x \le \min(l_{1-eq}, l_{2-eq}) \\ S_y \le \min(h_{1-eq}, h_{2-eq}) \\ H \le \max\left(\min(l_{1-eq}, l_{2-eq}), \min(h_{1-eq}, h_{2-eq})\right) \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} l_{eq} = \frac{1,15l}{1+0,77\left(\frac{h}{2l}\right)^{-1,17}} \\ h_{eq} = \frac{1,8h}{1+6,67\left(\frac{h}{2l}\right)^{1,23}} \end{cases}$$

Ces formules restent valables si le rapport h/l (hauteur sur largeur du défaut) dépasse un.

On peut comparer les évolutions de ces longueurs équivalentes (adimensionnées en divisant par la hauteur) en fonction de la forme du défaut (au travers du coefficient de forme h/l):



Figure 4 – Comparaison des coefficients leq/h

L'anisotropie de la formulation du Code Case 877-1 apparaît clairement.

4.3 Comparaisons avec le critère RSE-M

On va comparer l'évaluation des interactions pour deux cas réels (une cuve du palier 900 et l'autre du palier 1300) avec le critère RSE-M et les nouveaux critères proposés (appelés FRA [6] et Code Cases 877 et 877-1 de l'ASME).

On donne le nombre d'interactions, le regroupement maximal (groupe avec le plus grand nombre de défauts en interaction dont on donne ce nombre), la taille maximale des défauts regroupés, pour une itération, pour trois ou cinq en cas de non-convergence :

Méthode	Itération	1300			900			
		Nombre	Regroupement maxi	Taille maxi	Nombre	Regroupement maxi	Taille maxi	
RSE-M	1	5	3	66x71	10	3	39x42	
	3	5	4	66x71	9	5	80x100	
	5	5	4	66x71	9	9	80x349	
FRA	1	1	2	17x12	2	2	26x28	
	3	1	3	18x23	2	2	26x28	
	5	1	3	18x23	2	2	26x28	
CC 877 ASME	1	1	3	18x27	2	2	33x46	
	3	1	3	18x27	2	2	33x46	
	5	1	3	18x27	2	2	33x46	
CC 877-1 ASME	1	2	3	18x27	2	2	33x46	
	3	2	3	18x27	2	2	33x46	
	5	2	3	18x27	2	2	33x46	

Table 2 - Comparaison des méthodes d'interaction sur deux cas réels

On constate que, pour le cas 900, la méthode RSE-M ne converge pas : le plus gros défaut regroupé grossit à chaque itération mais, surtout, il devient traversant entre la paroi et un trou de goujon (ligament minimale de matière de l'ordre de 80 mm). Sur le cas 1300 la méthode converge mais aboutit à un défaut regroupé maximal très important dont le réalisme physique est discutable.

4.4 Etude de stabilité et propagation des défauts plans

La méthode K_{cp} du RSE-M [3] (annexe 5.4) est utilisée pour calculer les dimensions des défauts critiques (défauts les plus grands admissible car restant stables) par zone, ainsi que pour évaluer la propagation des défauts considérés. Ces calculs ont été menés par FRAMATOME.

On étudie ainsi les zones suivantes (nommées D1 à D12, pour des défauts elliptiques non débouchant ou débouchant dans les différentes surfaces de la bride A, dont les trous de goujons) :



Figure 5 – Positionnement des défauts plans analysés

Afin d'affiner les calculs, des modèles EF 3D sont mis à contribution (un modèle global à gauche, permettant de prendre en compte les tubulures des branches chaudes et froides, un modèle médian de la fermeture avec le couvercle, au milieu et un modèle local du taraudage à droite), en particulier pour la zone pénalisante des trous de goujons :



Figure 6 – Modèles 3D à trois échelles pour la bride A

La méthode K_{cp} est une méthode où le défaut n'est pas maillé, mais pris en compte au travers de coefficients d'influence définis pour certaines configurations géométriques et pour les différents modes d'ouverture du défaut plan étudié. Le RSE-M ne donne pas ces coefficients pour une géométrie de type taraudage et il a donc été nécessaire de les calculer. Pour cela, des calculs sur modèle axisymétrique avec défaut maillé et utilisation de la méthode de calcul du taux de restitution de l'énergie G par la méthode θ ont été menés.

La propagation s'est avérée négligeable et, grâce aux modèles 3D réaliste, il a été possible d'obtenir des dimensions significatives de défauts critiques par zones, confirmant ainsi la robustesse à la rupture brutale des brides de cuve. Tous les cas de brides A examinés ont donc pu être analysés et il a été démontré que les critères du code RSE-M [3] (annexe 5.5) étaient respectés, y compris dans le cas des défauts regroupés.

4.5 Conclusion

Suite à une analyse bibliographique des méthodes d'évaluation de distance d'interaction, ce document propose de choisir un critère qui repose sur les analyses les plus généralistes (formes et position des défauts, ainsi que géométries des structures et chargements imposés), dont l'expression tient compte de la forme des défauts et, autant que possible, reconnu par les grands codes du domaine nucléaire. Parmi les documents analysés, deux méthodologies répondent à ces exigences : les approches FRAMATOME/AREVA ([5] et [6]) et les récents Code Cases 877 et 877-1 de l'ASME ([10] et [7]).Ces formulations sont proches et se basent sur des hauteurs équivalentes qui tiennent compte de la forme des défauts. On peut rappeler que les formulations sont équivalentes pour les géométries sans singularités ([5], [10] et [7]). Les différences de formulation entre les deux Code Cases ASME ont peu d'influence sur les résultats obtenus pour les cas testés. On va donc privilégier le Code Case 877-1 [7] qui est le plus général. Une proposition d'introduction de ce critère dans la prochaine édition du RSE-M est en instruction.

Références

Codes

- [1] ASME BPVC, édition 2019-2021.
- [2] RCC-M, édition 2020.
- [3] RSE-M, édition 2020.

Publications

- [4] K. Azuma, Y. Li, "Interaction factors for two elliptical embedded cracks with a wide range of aspect ratios", AIMS Materials Science, Vol. 4(2), 2017.
- [5] S. Chapuliot, A. Blouin, "Determination of an interaction rule for two defects submitted to a mode I fracture in an infinite media", proceedings SMiRT-22, 2013.
- [6] S. Chapuliot, A. Blouin, "Definition and validation of an interaction rule for two cracks submitted to a complex loading", Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 160, 2018.
- [7] P. Dulieu, V. Lacroix, K. Hasegawa, "Assessment of flaw interaction under combined tensile and bending stresses: suitability of ASME Code Case N-877-1", proceedings PVP2020.
- [8] C. Guozhong, Z. Kangda, "Interactions of coplanar surface semi-elliptical cracks and embedded elliptical cracks in finite thickness plates under uniform tension", Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 65, 1995.
- [9] V. Lacroix, P. Dulieu *et al.*, "Alternative characterization rules for quasi-laminar flaws", proceedings PVP2014.
- [10] V. Lacroix, P. Dulieu *et al.*, "Rules for flaw interaction for subsurface flaws in operating pressurized vessels: technical basis of Code Case N-877", proceedings PVP2018.