Opérateur de calcul de l'usure

Résumé :

Cette note présente trois lois d'usure qui permettent d'évaluer le volume usé à partir des quantités issues d'un calcul dynamique effectué avec l'opérateur DYNA_TRAN_MODAL [U4.54.03] et le mot-clé CHOC.

- La loi d'Archard,
- La loi KWU_EPRI,
- La loi EDF_MZ.

Les coefficients d'usure nécessaires pour ces calculs sont fournis par l'utilisateur ou bien spécifiés dans une base de données.

A partir du volume usé et de la géométrie du contact, il est possible de calculer la profondeur d'usure pour le mobile ou son obstacle.

Un découpage angulaire de la figure de jeu autorise l'opérateur à calculer les grandeurs relatives à l'usure par secteurs.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Table des matières

1 Introduction....3
2 Lois d'usure....3
2.1 Loi d'usure 'ARCHARD'....4
2.2 Loi d'usure 'KWU_EPRI'....4
2.3 Loi d'usure 'EDF_MZ'....6
3 Base de données....7
4 Relation entre le volume usé et la profondeur d'usure....11
4.1 Situation ‘GRAPPE - ALESAGE’....11
4.2 Situation ‘GRAPPE - ENCOCHE SIMPLE’....12
4.3 Situation ‘GRAPPE - ENCOCHE DOUBLE’....13
4.4 Situation ‘Tube de générateur de vapeur - Barre antivibratoire’....13
4.5 Situation ‘Tube de générateur de vapeur - Alésage’....16
4.6 Situation ‘Tube de générateur de vapeur - Trifolié’....17
4.7 Situation ‘Tube de générateur de vapeur - Quadrifolié’....20
4.8 Situation ‘Tube de générateur de vapeur - Tube de générateur de vapeur’....23
5 Découpage de la figure de jeu en secteurs....23
6 Actualisation de la table....24
7 Bibliographie....24
8 Description des versions du document....25

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Introduction

L'évaluation du dommage par usure nécessite une connaissance approfondie des corps en présence lors du contact, des chargements et de la cinématique. Les investigations menées au Département Mécanique et Technologie des Composants permettent de fournir des coefficients pour des lois d'usure relatives à des configurations d'usure affectant les composants des centrales nucléaires. Un calcul transitoire par recombinaison modale, à l'aide de l'opérateur DYNA_TRAN_MODAL [U4.54.03] permet de connaître la cinématique et la dynamique du contact pour des structures filaires telles que les grappes de commandes et les tubes de générateur de vapeur qui impactent et glissent contre leurs guidages.

Pour calculer la puissance d'usure, le module de post-traitement de l'usure de *Code_Aster*, (POST_USURE [U4.67.03]), utilise, en un nœud de choc, le résultat en coordonnées généralisées (tran_gene) issu de DYNA_TRAN_MODAL. Il combine les forces normales et les vitesses de glissement selon la méthode définie au paragraphe suivant. A partir de la connaissance de la puissance d'usure, il est possible de remonter aux volumes usés en utilisant une des lois d'usure proposées dans POST_USURE. Les coefficients à utiliser sont à définir par l'utilisateur ou à rechercher dans une base de données intégrée à l'opérateur.

Dans un deuxième temps, la connaissance de la géométrie des structures internes de centrales nucléaires permet de calculer les profondeurs d'usure à partir des volumes usés.

L'opérateur POST_USURE permet de découper la figure de jeu en secteurs afin d'affecter plusieurs coefficients d'usure à une même zone de chocs pour tenir compte de géométries complexes. Par exemple, le contact sur arête conduit à des pertes de matière plus importante que le contact conformel dans le cas des grappes de commande.

La table générée par POST_USURE donne la valeur des volumes usés pour plusieurs valeurs du temps.

2 Lois d'usure

Dans sa forme initiale, la loi d'Archard [bib1] exprime, pour une configuration d'usure adhésive, en glissement, une relation entre le volume usé et des quantités caractéristiques du contact :

$$V = \frac{k \,.\, \|F_n\| \,.\, L}{H}$$

où V : volume usé,
k : coefficient d'usure sans dimension,
$\|F_n\|$: module de la force normale de contact, supposée constante,
L : longueur glissée,
H : dureté.

Le coefficient k est différent pour chacun des corps en présence. Il dépend des conditions géométriques et thermodynamiques lors du contact.

Il a été montré que la loi d'Archard peut être étendue à d'autres mécanismes, en glissement dominant. Moyennant une redéfinition de certains paramètres, l'équation précédente peut s'écrire :

$$V = K \,.\, W$$

où K : est égal à $\frac{k}{H}$,
W : est égal à $\|F_n\| \,.\, L$.

W a la dimension d'un travail. Par convention, il est appelé "travail d'usure".

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Dans le cas où la force normale de contact varie au cours du temps (par exemple, dans une situation d'impacts-glissements, $\|F_n\|$ présente de très fortes variations de courte durée lors des chocs), la définition de W devient :

$$W=\int_{t_0}^{t_1} \|F_n\|\cdot\|V_t\|\cdot dt$$

où W : travail d'usure,
$\|F_n\|$: module de la force normale au cours du contact,
$\|V_t\|$: module de la vitesse de glissement au cours du contact,
t_0 : instant de début du calcul,
t_1 : instant de fin du calcul.

Dès lors, par analogie avec les lois usuelles de la mécanique, il est possible de définir une "puissance d'usure" en posant :

$$P=\|F_n\|\cdot\|V_t\|$$

où P : puissance d'usure.

Dans le cas où un régime stationnaire est atteint, la puissance d'usure est supposée constante au cours du temps. Afin de s'assurer de cette stationnarité, l'intervalle $[t_0, t_1]$ peut être découpé en plusieurs blocs dans l'opérateur POST_USURE [U4.67.03]. Pour chacun de ces blocs, il convient de vérifier que la puissance d'usure évolue peu (en toute rigueur, l'utilisation des lois d'usure ci-dessous suppose que la puissance d'usure est constante).

2.1 Loi d'usure 'ARCHARD'

La loi est de type linéaire [bib1] : $V=K\cdot P\cdot t$

où V : volume d'usure,
K : coefficient d'usure,
P : puissance d'usure,
t : intervalle de temps.

Le coefficient K est fourni par l'utilisateur ou est pris dans une base de données (voir [§3]). Il est différent pour les deux corps en présence et dépend des conditions géométriques et thermodynamiques dans le contact. L'intervalle de temps t utilisé pour le calcul de l'usure ne correspond pas au temps de simulation effectif mais à l'intervalle de temps sur lequel l'utilisateur désire évaluer l'usure.

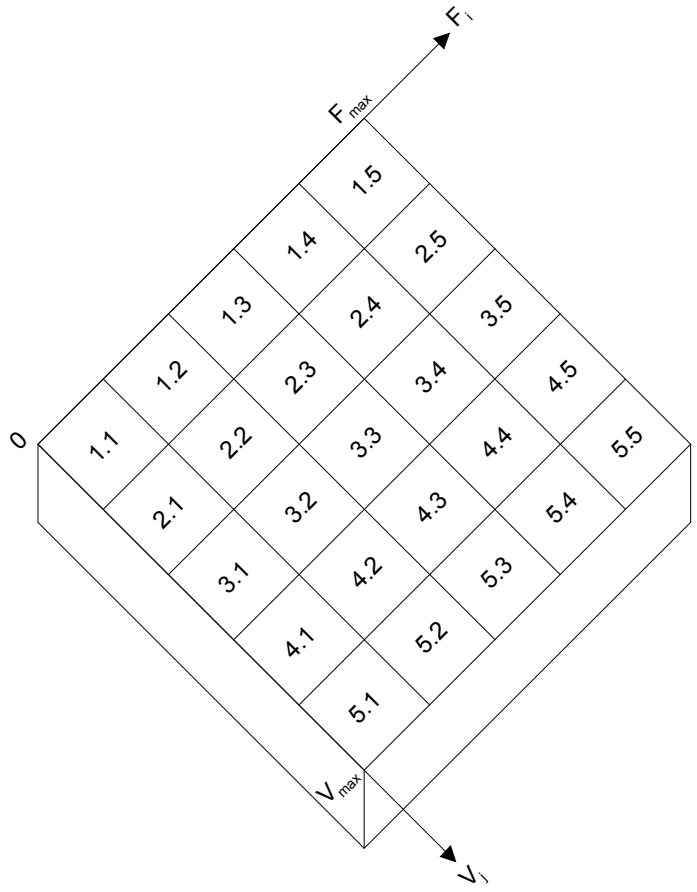
2.2 Loi d'usure 'KWU_EPRI'

La démarche du modèle consiste à déterminer un coefficient d'usure K, au sens de la loi d'Archard, en prenant en compte les conditions particulières du contact étudié [bib2].

Les forces normales $F_i(N)$ sont réparties en 5 classes, ainsi que les vitesses de glissement $V_j(m/s)$.

On obtient 25 classes dont le repérage est indiqué comme suit:

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)



Pour un calcul donné, on détermine les pourcentages obtenus pour chacune des 25 classes.

Le traitement se fait en appliquant des facteurs de pondération appropriés pour chaque classe, qui rendent compte de sa contribution particulière dans le processus d'usure global.

Dans le cas des impacts purs (classes 1.1 à 1.5), la contribution de ces classes est modélisée en faisant appel à un facteur de pondération $m_{h_{ij}}$ défini par :

$$m_{h_{ij}} = k_1 \cdot k \cdot \left(\frac{F_i}{c} \right)^3$$

où $m_{h_{ij}}$: facteur adimensionnel d'intensité d'impacts-écrouissage
k_1 : coefficient de correction dimensionnel
k : constante adimensionnelle expérimentale
c : constante adimensionnelle expérimentale
F_i : valeur moyenne de la force normale pour la classe ij

Dans le cas du glissement (classe 1.1 et classes 2.1 à 5.5), la contribution de ces classes est modélisée en faisant appel à un facteur de pondération $m_{w_{ij}}$ défini par :

$$m_{w_{ij}} = k_2 \cdot F_i \cdot \left(V_j \right)^2$$

où $m_{w_{ij}}$: facteur adimensionnel d'intensité d'usure par glissement

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

k_2 : coefficient de correction dimensionnel
F_i : valeur moyenne de la force normale pour la classe ij
V_j : valeur moyenne de la vitesse de glissement pour la classe ij

Il faut ensuite calculer les pourcentages pondérés pour chaque classe des deux catégories impacts-écrouissage et usure par glissement:

$$P_{h_{ij}} = m_{h_{ij}} \cdot p_{ij}$$
$$P_{w_{ij}} = m_{w_{ij}} \cdot p_{ij}$$

où p_{ij} est le pourcentage d'éléments de la classe ij .

Ce qui conduit à un facteur global d'intensité d'usure

$$w = \frac{\left(\sum P_{w_{ij}}\right)^2}{\sum P_{h_{ij}} + \sum P_{w_{ij}}}$$

Le facteur global d'intensité w est utilisé comme facteur de correction du coefficient d'usure au sens de la loi d'ARCHARD selon l'expression :

$$K_{KWU} = k_r \cdot w / w_r$$

$$V = K_{KWU} \cdot P \cdot t$$

où k_r : est le coefficient d'usure de référence obtenu expérimentalement pour des conditions d'essai conventionnelles en glissement oscillant,
et w_r est le facteur global d'intensité évalué pour ce même essai.

2.3 Loi d'usure 'EDF_MZ'

Elle est développée actuellement pour le seul cas des grappes de commande.

Le retour d'expérience montre que la cinétique d'usure ralentit avec le temps t ; une manière de tenir compte des observations est d'exprimer le volume usé sous la forme :

$$V = \left(\frac{S_0 - S}{n}\right) \cdot \left(1 - e^{-nt}\right) + S \cdot t$$

où S_0 est la vitesse initiale et S la vitesse d'usure asymptotique (voir ci-dessous),
n est un paramètre du modèle.

Les valeurs de n et de S sont déduites du retour d'expérience.

Des essais sur simulateurs, de courte durée par rapport à celle d'un cycle de fonctionnement d'un réacteur, montrent que la vitesse d'usure initiale S_0 suit une loi du type :

$$S_0 = A \cdot \left(P_0\right)^b$$

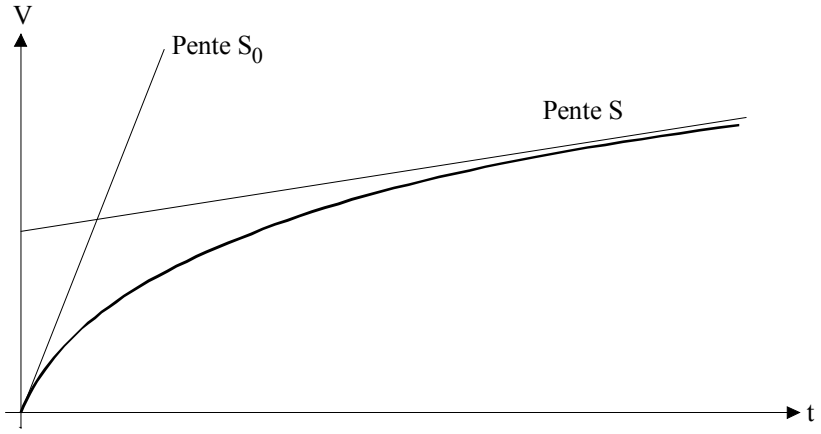
où P_0 est la puissance d'usure initiale

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

A et b sont des coefficients déterminés par des essais sur simulateurs [bib4]

Le retour d'expérience montre que la vitesse d'usure atteint une valeur asymptotique S. La relation précédente, observée sur simulateur est supposée valide pour tous les instants du phénomène d'usure. Cela suppose une puissance d'usure P qui permette d'atteindre $S = A \cdot (P)^b$, pour les valeurs élevées du temps t (typiquement, un ou plusieurs cycles de fonctionnement).

L'évolution correspondante du volume usé en fonction du temps est de la forme :



Le volume usé V calculé à l'aide l'opérateur POST_USURE s'écrit :

$$V = \left(\frac{A \cdot (P_0)^b - S}{n} \right) \cdot \left(1 - e^{nt} \right) + S \cdot t$$

où V : volume d'usure,
P_0 : puissance d'usure calculée par le *Code_Aster*®,
A, b, S, n : coefficients du modèle définis ci-dessus.

Ce modèle est décrit en détail par la référence [bib4].

3 Base de données

Les matériaux sont repérés par une lettre suivie de caractères alphanumériques. Les codes sont indiqués ci-dessous avec une appellation usuelle et entre parenthèses, la norme AFNOR.

A304L	:	Acier 304L (Z2 CN 18-9),
A304LNI	:	Acier 304L nitruré,
A304LCR	:	Acier 304L chromé,
A304LLC1C	:	Acier 304L recouvert de carbure de chrome,
A316L	:	Acier 316L (Z2 CND 17-12),
A347	:	Acier 347 (Z6 CNNb 18-11),
A405	:	Acier 405 (Z6 CA 13),
A42	:	Acier A42 (A 42),
Z10C13	:	Z10C13 (Z10 C13),
Z6C13	:	Z6C13 (Z6 C13),
I600	:	Inconel 600 (NC 15 Fe),
I600CR	:	Inconel 600 chromé,
I600TT	:	Inconel 600 traité thermiquement,
I690	:	Inconel 690 (NC 30 Fe),

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

I690TT : Inconel 690 traité thermiquement,
I800 : Incoloy 800 (Z5 NC 35-20),
I800CR : Incoloy 800 chromé,

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Les tableaux ci-dessous donnent les coefficients d'usure pour les mobiles et les obstacles pour plusieurs couples de matériaux (mat1 est le matériau de l'élément mobile et mat2 celui de l'obstacle). Les cases vides correspondent à des coefficients nuls. Un certain nombre de situations est actuellement prévu sans que tous les coefficients soient disponibles car cette base de données pourra être complétée avec les résultats des essais effectués au Département MTC.

Tableaux des coefficients pour les grappes de commande pour le modèle d'ARCHARD :

CONTACT : 'GRAPPE_ALESAGE' (cf [§4.1])

mat1	mat2	Coef_mobile	Coef_obst	Références
A304L	A304L	2.6E–15	3.7E–15	[bib5]
A316L	A304L	4.2E–15	4.1E–15	[bib5]
A304LNI	A304L	0.1E–15	4.1E–15	[bib5]
A304LCR	A304L	0.1E–15	5.5E–15	[bib5]
A304LLC1C	A304L	0.1E–15	5.5E–15	[bib5]

CONTACT : 'GRAPPE_1_ENCO' et 'GRAPPE_2_ENCO' (cf [§4.2] et [§4.3])

mat1	mat2	Coef_mobile	Coef_obst	Références
A304L	A304L	30.E–15	17.E–15	[bib5]
A316L	A304L	40.E–15	29.E–15	[bib5]
A304LNI	A304L	1.E–15	124.E–15	[bib5]
A304LCR	A304L	1.E–15	43.E–15	[bib5]
A304LLC1C	A304L	1.E–15	34.E–15	[bib5]

Tableaux des coefficients pour les grappes de commande pour le modèle EDF-MZ :

CONTACT : 'GRAPPE_ALESAGE' (cf [§4.1])

mat1	mat2	Coef_mobile	Coef_obst	Références
A304L	A304L	A = 2.6E–15 B = 1. N = 2.44E–8 S = 1.14E–16	A = 3.7E–15 B = 1. N = 2.44E–8 S = 1.14E–16	[bib5] [bib6]
A316L	A304L	A = 11.E–15 B = 1.61 N = 2.44E–8 S = 1.14E–16	A = 4.1E–15 B = 1. N = 2.44E–8 S = 1.14E–16	[bib5] [bib6]

CONTACT : 'GRAPPE_1_ENCO' et 'GRAPPE_2_ENCO' (cf [§4.2] et [§4.3])

mat1	mat2	Coef_mobile	Coef_obst	Références
A304L	A304L	A = 20.E–15 B = 1.05 N = 2.44E–8 S = 1.14E–16	A = 23.E–15 B = 1.19 N = 2.44E–8 S = 1.14E–16	[bib5] [bib6]
A316L	A304L	A = 500.E–15 B = 1.78 N = 2.44E–8 S = 1.14E–16	A = 490.E–15 B = 1.91 N = 2.44E–8 S = 1.14E–16	[bib5] [bib6]

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Tableaux des coefficients pour les générateurs de vapeur pour le modèle d'ARCHARD :

CONTACT : 'TUBE_BAV' (cf [§4.4])

mat1	mat2	Coef_mobile	Coef_obst	Références
I600	I600	1.2E–13		[bib6]
I600TT	I600	4.5E–14		[bib6]
I600TT	I600TT	1.4E–15		[bib6]
I600	I600CR	7.2E–14		[bib6]
I600TT	I600CR	9.1E–16		[bib6]
I690TT	I600CR	1.2E–15		[bib6]
I600	Z10C13	9.9E–14		[bib6]
I600	A405	6.2E–14		[bib6]
I690	A405	4.1E–16		[bib6]
I600TT	Z6C13	9.2E–15		[bib6]
I600	Z6C13	7.1E–15		[bib6]
I690TT	Z6C13	7.7E–15		[bib6]
I600	A347	1.0E–13		[bib6]

CONTACT : 'TUBE_ALESAGE' (cf [§4.5])

mat1	mat2	Coef_mobile	Coef_obst	Références
I690	Z10C13	6.0E–17		[bib6]
I600	I600	1.6E–13		[bib6]
I690	I600	5.2E–14		[bib6]
I600	I600CR	2.2E–15		[bib6]
I690	I600CR	4.4E–15		[bib6]
I600	A42	2.2E–15		[bib6]

CONTACT : 'TUBE_3_ENCO' (cf [§4.6])

mat1	mat2	Coef_mobile	Coef_obst	Références
I600	Z10C13	2.5E–16		[bib6]
I690	Z10C13	2.4E–16		[bib6]

CONTACT : 'TUBE_4_ENCO' (cf [§4.7])

mat1	mat2	Coef_mobile	Coef_obst	Références
I600	Z10C13	2.4E–16		[bib6]
I690	Z10C13	8.2E–17		[bib6]
I600	A405	6.5E–14		[bib6]
I600TT	A405	1.4E–15		[bib6]
I690	A405	7.8E–15		[bib6]
I600	I800	1.3E–15		[bib6]
I600TT	I800	3.6E–16		[bib6]
I690TT	Z10C13	1.2E–15		[bib6]
I600	I800CR	2.2E–15		[bib6]
I600	A347	2.6E–16		[bib6]

CONTACT : 'TUBE_TUBE' (cf [§4.8])

mat1	mat2	Coef_mobile	Coef_obst	Références
I600	I600	1.8E–13		[bib6]
I690	I690	1.0E–12		[bib6]

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Les valeurs indiquées ci-dessus correspondent à des moyennes des valeurs relevées dans les références pour des températures aussi voisines que possible des conditions REP. Il est à noter que la référence [bib6] ne donne pas de valeur de coefficient d'usure pour les antagonistes.

4 Relation entre le volume usé et la profondeur d'usure

A partir de la puissance d'usure, l'opérateur POST_USURE calcule les volumes usés puis les profondeurs d'usure. Les relations géométriques entre les volumes usés et les profondeurs usées dépendent du type de contact.

Soient : d_m : profondeur usée du tube mobile,
d_o : profondeur usée de l'obstacle,
R_m : rayon extérieur du tube mobile,
R_o : rayon intérieur de l'obstacle,
l : largeur de l'obstacle,
θ : angle mobile/obstacle,
V_m : volume usé du tube mobile,
V_o : volume usé de l'obstacle.

4.1 Situation 'GRAPPE - ALESAGE'

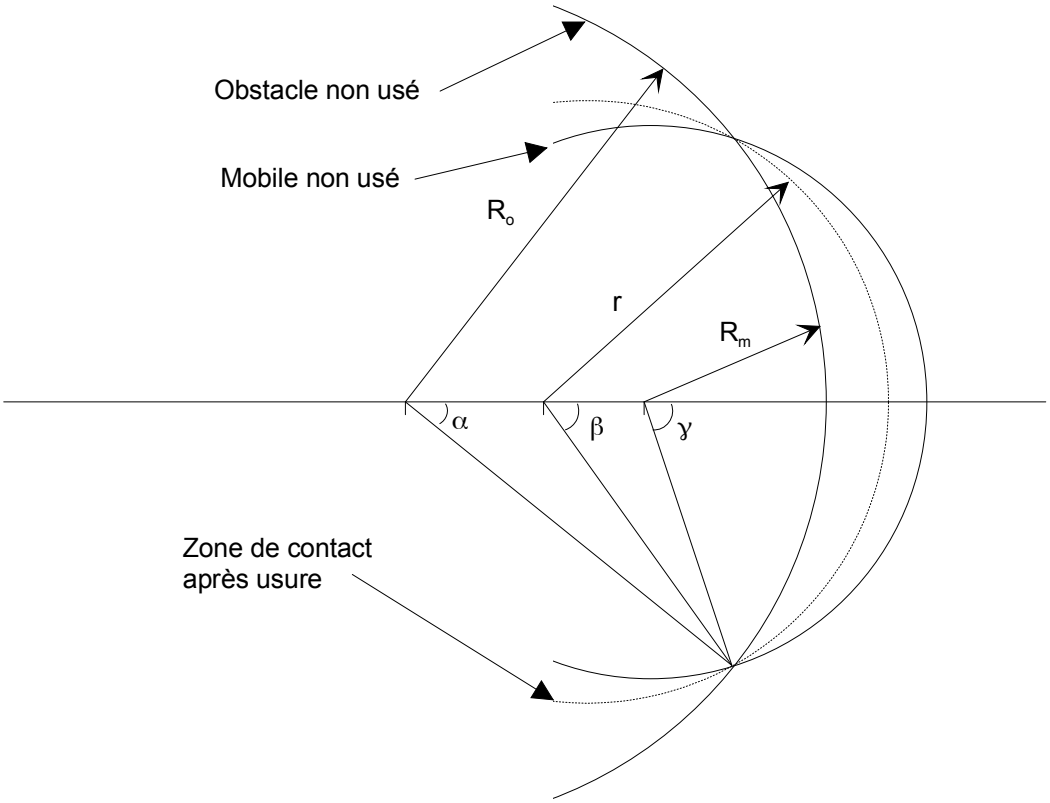
Le mot-clé utilisé est "GRAPPE_ALESAGE". La grappe est centrée dans un alésage. La trace d'usure a une section en forme de lunule [bib6]. Le volume usé est ramené à une aire usée dans une section, multipliée par la hauteur usée l

Les volumes usés s'écrivent [bib3]:

$$\frac{V_m}{l}=r^2\left(\beta-\sin\left(2\beta\right)\right)-R_m^2\left(\alpha-\sin\left(2\alpha\right)\right)$$
$$\frac{V_o}{l}=R_o^2\left(\gamma-\sin\left(2\gamma\right)\right)-r^2\left(\beta-\sin\left(2\beta\right)\right)$$
$$R_m\sin\left(\alpha\right)=r\sin\left(\alpha\right)$$
$$r\sin\left(\beta\right)=R_o\sin\left(\gamma\right)$$

Les variables r, α, β et γ sont des variables intermédiaires de calcul définies sur la figure ci-dessous :

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)



Un solveur numérique intégré au *Code_Aster*® permet de passer de résoudre ce système d'équations couplées à 4 inconnues, r, α, β, γ . Les profondeurs d'usure sont alors données par les relations suivantes :

$$d_o = r - R_t - \left(r\cos(\beta) - R_t\cos(\alpha) \right)$$
$$d_m = R_o - r - \left(R_o\cos(\gamma) - r\cos(\beta) \right)$$

4.2 Situation 'GRAPPE - ENCOCHE SIMPLE'

Le mot-clé utilisé est "GRAPPE_1_ENCO".
La carte de guidage comporte une seule encoche. Le volume usé est ramené à une aire usée dans une section, multipliée par la hauteur usée l .

Les volumes usés s'écrivent [bib7] : $\begin{cases} \frac{V_m}{l} = A_m d_m^3 + B_m d_m^2 + C_m d_m + D_m \\ V_o = 0{,}47 \cdot h \cdot R_o \cdot d_o \cdot \pi \end{cases}$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

avec [bib7] : $\begin{cases} A_m = -2,76 \\ B_m = 10,30 \\ C_m = 0,83 \\ D_m = 0 \end{cases}$

Ces coefficients sont fondés le retour d'expérience. Ils s'appliquent uniquement aux grappes de commande dont les caractéristiques sont :

- diamètre extérieur du crayon de grappe : 9,7 mm
- diamètre intérieur de la carte de guidage : 10,5 mm

Un solveur intégré à POST_USURE permet de déterminer d_m en fonction de V_m

4.3 Situation 'GRAPPE - ENCOCHE DOUBLE'

Le mot-clé utilisé est "GRAPPE_2_ENCO".
La carte de guidage est formée de 2 encoches diamétralement opposées. Le volume usé est ramené à une aire usée dans une section, multipliée par une hauteur usée l .

Les volumes usés s'écrivent [bib7] : $\begin{cases} \dfrac{V_m}{l} = A_m d_{m^3} + B_m d_{m^2} + C_m d_m + D_m \\ V_o = 0,94 \cdot h \cdot R_o \cdot d_o \cdot \pi \end{cases}$

avec [bib7] : $\begin{cases} A_m = -5,52 \\ B_m = 20,60 \\ C_m = 1,66 \\ D_m = 0 \end{cases}$

Ces coefficients sont fondés le retour d'expérience. Ils s'appliquent uniquement aux grappes de commande dont les caractéristiques sont :

- diamètre du crayon : 9,7 mm
- diamètre de la carte : 10,5 mm

Un solveur intégré à POST_USURE permet de déterminer d_m en fonction de V_m

4.4 Situation 'Tube de générateur de vapeur - Barre antivibratoire'

Le mot-clé utilisé est "TUBE_BAV".

Cas 1 :

Le tube se présente verticalement, la barre impacte perpendiculairement au tube, on suppose que la barre ne s'use pas.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Les profondeurs d'usure s'écrivent [bib3] : $\begin{cases} d_m = \left(\frac{1}{2R_m}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{3V_m}{41}\right)^{2/3} \\ d_o = 0 \end{cases}$

Cas 2 :

La barre se présente inclinée (angle θ) par rapport au tube, la barre impacte perpendiculairement au tube, on suppose que la barre ne s'use pas.

- si $d_m < l\,\theta$

  Les profondeurs d'usure s'écrivent [bib3] : $\begin{cases} d_m = \left(\frac{1}{2R_m}\right)^{1/5} \cdot \left(\frac{15 \cdot \theta \cdot V_m}{8}\right)^{2/5} \\ d_o = 0 \end{cases}$

- si $d_m \geqslant l\,\theta$

  Les relations entre volume usé et profondeurs d'usure s'écrivent [bib3] :
  $\begin{cases} V_m = \frac{8\sqrt{2R_m}}{15\theta} \cdot \left[d_m^{5/2} - \left(d_m - \theta l\right)^{5/2} \right] \\ d_o = 0 \end{cases}$

Un solveur intégré à POST_USURE permet de déterminer d_m en fonction de V_m

Cas 3 :

Le tube se présente verticalement, la barre impacte perpendiculairement au tube, on prend en compte l'usure de la barre. α est une inconnue à déterminer.

Les relations entre volume usé et profondeurs d'usure s'écrivent [bib3] :

$$\begin{cases} d_m = \left(\frac{V_m}{V_m + V_o}\right)\left(\frac{1}{2R_m}\right)^{1/3}\left(\frac{3 \cdot \left(V_m + V_o\right)}{4 \cdot l}\right)^{2/3} \\ \frac{V_m + V_o}{l} = \alpha \cdot R_m^2 - R_m^2 \sin(\alpha)\cos(\alpha) \\ d_o = R_t\left(1 - \cos(\alpha)\right) - d_m \end{cases}$$

Un solveur intégré à POST_USURE permet de déterminer α

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Cas 4 :

La barre se présente inclinée (angle θ) par rapport au tube, la barre impacte perpendiculairement au tube, on prend en compte l'usure de la barre. α est une inconnue à déterminer.

- si $\left(d_m+d_o\right)<l\,\theta$

  Les relations entre volume usé et profondeurs d'usure s'écrivent [bib3] :

$$\begin{cases} d_m=\left(\dfrac{V_m}{V_m+V_o}\right)\left(\dfrac{1}{2\,R_m}\right)^{1/5}\left(\dfrac{15\cdot\theta\cdot\left(V_m+V_o\right)}{8}\right)^{2/5} \\ \dfrac{V_m+V_o}{l}=\alpha\cdot R_m^2-R_m^2\sin\left(\alpha\right)\cos\left(\alpha\right) \\ d_o=R_m\left(1-\cos\left(\alpha\right)\right)-d_m+\dfrac{l}{2}\sin\left(\theta\right) \end{cases}$$

Un solveur intégré à POST_USURE permet de déterminer α

- si $\left(d_m+d_o\right)\geqslant l\,\theta$

  Les relations entre volume usé et profondeurs d'usure s'écrivent [bib3] :

$$\begin{cases} V_m=\dfrac{8\cdot\sqrt{2R_m}}{15\cdot\theta\cdot\left(1+k\right)}\cdot\left[\left(\left(d_m+d_o\right)\cdot\left(1+k\right)\right)^{5/2}-\left(\left(d_m+d_o\right)\cdot\left(1+k\right)-l\,\theta\right)^{5/2}\right] \\ \dfrac{V_m+V_o}{l}=\alpha\cdot R_m^2-R_m^2\sin\left(\alpha\right)\cos\left(\alpha\right) \\ d_o=R_m\cdot\left(1-\cos\left(\alpha\right)\right)-d_m+\dfrac{l}{2}\sin\left(\theta\right) \end{cases}$$

  où k est le rapport entre les volumes usés de la barre et du tube ($k=\dfrac{V_o}{V_m}$)

Un solveur intégré à POST_USURE permet de déterminer d_m en fonction de V_m . De même, un solveur permet de déterminer α .

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4.5 Situation 'Tube de générateur de vapeur - Alésage'

Le mot-clé utilisé est "TUBE_ALESAGE".

Cas 1 :

Le tube est parfaitement centré dans un alésage animé d'un mouvement orbital pur qui s'use de manière uniforme sur toute la périphérie en contact avec l'obstacle.

Les profondeurs usées s'écrivent [bib3] : $\begin{cases} d_m = \dfrac{V_m}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot R_m} \\ d_o = \dfrac{V_o}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot R_o} \end{cases}$

Cas 2 :

Le tube est centré dans un alésage animé d'un mouvement d'impacts-glissements de type elliptique qui conduit à la formation de traces d'usure de type cylindrique diamétralement opposées sur le tube et ayant une section en forme de lunule.

Les volumes usés s'écrivent [bib3] :

$$\frac{V_m}{l} = r^2\left(\beta - \sin(2\beta)\right) - R_m^2\left(\alpha - \sin(2\alpha)\right)$$
$$\frac{V_o}{l} = R_o^2\left(\gamma - \sin(2\gamma)\right) - r^2\left(\beta - \sin(2\beta)\right)$$
$$R_m \sin(\alpha) = r \sin(\beta)$$
$$r \sin(\beta) = R_o \sin(\gamma)$$

système d'équations couplées à quatre inconnues à déterminer : r, α, β, γ

$$d_o = r - R_m - \left(r\cos(\beta) - R_m\cos(\alpha)\right)$$
$$d_m = R_o - r - \left(R_o\cos(\gamma) - r\cos(\beta)\right)$$

Ces formules ont la même origine que celles du paragraphe [§4.1].

Cas 3 :

Le tube, animé d'un mouvement d'impacts-glissements, présente cette fois une inclinaison par rapport au support. On obtient deux traces d'usure symétriques sur le tube.

$$\frac{V_m}{l} = r^2\left(\beta - \sin(2\beta)\right) - R_m^2\left(\alpha - \sin(2\alpha)\right)$$
$$\frac{V_o}{l} = R_o^2\left(\gamma - \sin(2\gamma)\right) - r^2\left(\beta - \sin(2\beta)\right)$$
$$R_m \sin(\alpha) = r \sin(\beta)$$
$$r \sin(\beta) = R_o \sin(\gamma)$$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

système d'équations couplées à quatre inconnues à déterminer : r, α, β, γ

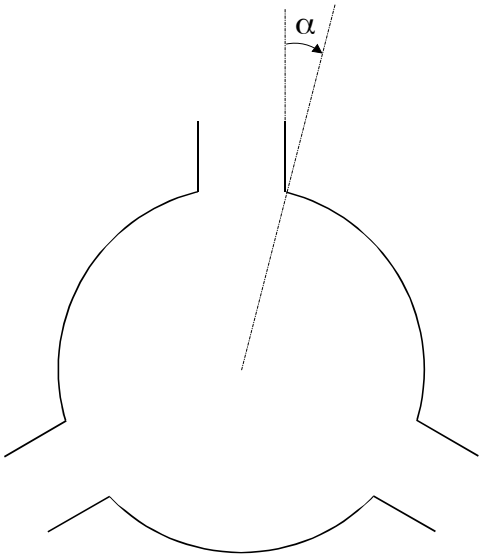
$$d_o = r - R_m - \left(r\cos(\beta) - R_m\cos(\alpha)\right) + \frac{l}{2}\sin(\theta)$$

$$d_m = R_o - r - \left(R_o\cos(\gamma) - r\cos(\beta)\right) + \frac{l}{2}\sin(\theta)$$

Ces formules ont la même origine que celles du paragraphe [§4.1].

4.6 Situation 'Tube de générateur de vapeur - Trifolié'

Le mot-clé utilisé est "TUBE_3_ENCO".
Soit un angle α caractéristique de l'isthme de l'alésage trifolié, défini par la figure ci-dessous :



Cas 1 :

Le contact initial s'effectue contre une arête d'un des isthmes de l'alésage trifolié. On suppose le tube parfaitement centré par rapport à son obstacle. La trace d'usure ne s'étend pas à l'isthme tout entier. On ne prend pas en compte l'usure de l'obstacle.

Les relations entre le volume usé et la profondeur d'usure s'écrivent [bib3] :

$$\begin{cases} V_m = \frac{l}{2}\left[R_m^2 \sin^{-1}\left(\frac{x}{R_m}\right) - R_o^2 \sin^{-1}\left(\frac{x}{R_o}\right) + x\left(R_o - R_m + d_m\right) + d_m^2 tg\,\alpha \right] \\ d_o = 0 \end{cases}$$

avec $x = \sqrt{R_m^2 - \frac{\left(R_o^2 - R_m^2 - \left(R_o - R_m + d_m\right)^2\right)^2}{4\left(R_o - R_m + d_m\right)^2}}$

Un solveur intégré à POST_USURE permet de déterminer d_m en fonction de V_m

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Cas 2 :

Mêmes hypothèses que pour le cas 1 excepté la position du tube par rapport à l'obstacle. On suppose cette fois que le tube présente un angle d'inclinaison θ .

- si $d_m < l\,\theta$

  Les relations entre le volume usé et la profondeur d'usure s'écrivent [bib3] :

$$\begin{cases} V_m = \dfrac{d_m}{6\,\theta}\left[R_m^2 \sin^{-1}\left(\dfrac{x}{R_m}\right) - R_o^2 \sin^{-1}\left(\dfrac{x}{R_o}\right) + x\left(R_o - R_m + d_m\right) + d_m^2 tg\,\alpha \right] \\ d_o = 0 \end{cases}$$

  avec $x = \sqrt{R_m^2 - \dfrac{\left(R_o^2 - R_m^2 - \left(R_o - R_m + d_m\right)^2\right)^2}{4\left(R_o - R_m + d_m\right)^2}}$

Un solveur intégré à POST_USURE permet de déterminer d_m en fonction de V_m

- si $d_m \geqslant l\,\theta$

  Les relations entre volumes usés et profondeurs d'usure s'écrivent [bib3] :

$$\begin{cases} V_m = \dfrac{l}{6}\left(V1 + \sqrt{V1 \cdot V2} + V2\right) \\ d_o = 0 \end{cases}$$

avec $x1 = \sqrt{R_m^2 - \dfrac{\left(R_o^2 - R_m^2 - \left(R_o - R_m + d_m\right)^2\right)^2}{4\left(R_o - R_m + d_m\right)^2}}$

$$V1 = R_m^2 \sin^{-1}\left(\frac{x1}{R_m}\right) - R_o^2 \sin^{-1}\left(\frac{x1}{R_o}\right) + x1\left(R_o - R_m + d_m\right) + d_m^2 tg\,\alpha$$

$$x2 = \sqrt{R_m^2 - \frac{\left(R_o^2 - R_m^2 - \left(R_o - R_m + d_m - l\cdot\theta\right)^2\right)^2}{4\left(R_o - R_m + d_m - l\cdot\theta\right)^2}}$$

$$V2 = R_m^2 \sin^{-1}\left(\frac{x2}{R_m}\right) - R_o^2 \sin^{-1}\left(\frac{x2}{R_o}\right) + x2\left(R_o - R_m + d_m - l\cdot\theta\right) + \left(d_m - l\cdot\theta\right)^2 \cdot \mathrm{tg}\,\alpha$$

Un solveur intégré à POST_USURE permet de déterminer d_m en fonction de V_m .

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Cas 3 :

Le contact s'effectue contre une arête d'un des isthmes de l'alésage trifolié. On suppose le tube parfaitement centré par rapport à son obstacle. On prend en considération l'usure de l'obstacle. α est un angle caractéristique de l'isthme de l'alésage trifolié.

Les volumes usés s'écrivent [bib3] :

$$\begin{cases} V_m+V_o=\dfrac{1}{2}\left[R_m^2\sin^{-1}\left(\dfrac{x}{R_m}\right)-R_o^2\sin^{-1}\left(\dfrac{x}{R_o}\right)+x\left(R_o-R_m+d_m+d_o\right)+\left(d_m+d_o\right)^2 tg\,\alpha\right] \\ V_o=1.41\cdot R_o\cdot d_o\cdot\pi \end{cases}$$

avec $x=\sqrt{R_m^2-\dfrac{\left(R_o^2-R_m^2-\left(R_o-R_m+d_m+d_o\right)^2\right)^2}{4\left(R_o-R_m+d_m+d_o\right)^2}}$

Cas 4 :

Le contact s'effectue contre une arête d'un des isthmes de l'alésage trifolié. On suppose cette fois que le tube présente un angle d'inclinaison θ par rapport à son obstacle. On prend en considération l'usure de l'obstacle. α est un angle caractéristique de l'isthme de l'alésage trifolié.

- si $\left(d_m+d_o\right)<l\theta$

  Les volumes usés s'écrivent [bib3] :

$$\begin{cases} V_m+V_o=\dfrac{d_m+d_o}{6\theta}\left[R_m^2\sin^{-1}\left(\dfrac{x}{R_m}\right)-R_o^2\sin^{-1}\left(\dfrac{x}{R_o}\right)+x\left(R_o-R_m+d_m+d_o\right)+\left(d_m+d_o\right)^2 tg\,\alpha\right] \\ V_o=1.41\cdot R_o\cdot d_o\cdot\pi \end{cases}$$

  avec $x=\sqrt{R_m^2-\dfrac{\left(R_o^2-R_m^2-\left(R_o-R_m+d_m+d_o\right)^2\right)^2}{4\left(R_o-R_m+d_m+d_o\right)^2}}$

Un solveur intégré à POST_USURE permet de déterminer d_m en fonction de V_m.

- si $\left(d_m+d_o\right)\geqslant l\theta$

  Le volume usé s'écrit [bib3] : $\begin{aligned} V_m&=\frac{l}{6}\left(V1+\sqrt{V1\cdot V2}+V2\right) \\ V_o&=1.41\cdot R_o\cdot d_o\cdot\pi \end{aligned}$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

avec $x1=\sqrt{R_m^2-\frac{\left(R_o^2-R_m^2-\left(R_o-R_m+d_m+d_o\right)^2\right)^2}{4\left(R_o-R_m+d_m+d_o\right)^2}}$

$$V1=R_m^2\sin^{-1}\left(\frac{x1}{R_m}\right)-R_o^2\sin^{-1}\left(\frac{x1}{R_o}\right)+x1\left(R_o-R_m+d_m+d_o\right)+\left(d_m+d_o\right)^2\operatorname{tg}\alpha$$

$$x2=\sqrt{R_m^2-\frac{\left(R_o^2-R_m^2-\left(R_o-R_m+d_m+d_o-l\cdot\theta\right)^2\right)^2}{4\left(R_o-R_m+d_m+d_o-l\cdot\theta\right)^2}}$$

$$V2=R_m^2\sin^{-1}\left(\frac{x2}{R_m}\right)-R_o^2\sin^{-1}\left(\frac{x2}{R_o}\right)+x2\left(R_o-R_m+d_m+d_o-l\cdot\theta\right)+\left(d_m+d_o-l\cdot\theta\right)^2\cdot\operatorname{tg}\alpha$$

Un solveur intégré à POST_USURE permet de déterminer d_m en fonction de V_m

4.7 Situation ‘Tube de générateur de vapeur - Quadrifolié’

Le mot-clé utilisé est "TUBE_4_ENCO".
Soit un angle α caractéristique de l'isthme de l'alésage quadrifolié, défini de la même manière qu'au paragraphe [§4.6] :

Cas 1 :

Le contact initial s'effectue contre une arête d'un des isthmes de l'alésage quadrifolié. On suppose le tube parfaitement centré par rapport à son obstacle. On ne prend pas en compte l'usure de l'obstacle.

Le volume usé s'écrit [bib3] :

$$V_m=\frac{l}{2}\left[R_m^2\sin^{-1}\left(\frac{x}{R_m}\right)-R_o^2\sin^{-1}\left(\frac{x}{R_o}\right)+x\left(R_o-R_m+d_m\right)+d_m^2\operatorname{tg}\alpha\right]$$

$$d_o=0$$

avec $x=\sqrt{R_m^2-\frac{\left(R_o^2-R_m^2-\left(R_o-R_m+d_m\right)^2\right)^2}{4\left(R_o-R_m+d_m\right)^2}}$

Un solveur intégré à POST_USURE permet de déterminer d_m en fonction de V_m

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Cas 2 :

Mêmes hypothèses que pour le cas 1 excepté la position du tube par rapport a l'obstacle. On suppose cette fois que le tube présente un angle d'inclinaison q.

- si $d_m < l\,\theta$

  Les relations entre volumes usés et profondeurs d'usure s'écrivent [bib3] :

$$\begin{cases} V_m = \dfrac{d}{6\cdot\theta}\left[R_m^2 \sin^{-1}\left(\dfrac{x}{R_m}\right) - R_o^2 \sin^{-1}\left(\dfrac{x}{R_o}\right) + x\left(R_o - R_m + d_m\right) + d_m^2 \operatorname{tg}\alpha \right] \\ d_o = 0 \end{cases}$$

avec $x = \sqrt{R_m^2 - \dfrac{\left(R_o^2 - R_m^2 - \left(R_o - R_m + d_m\right)^2\right)^2}{4\left(R_o - R_m + d_m\right)^2}}$

Un solveur intégré à POST_USURE permet de déterminer d_m en fonction de V_m

- si $d_m \geq l\,\theta$

  Les relations entre volumes usés et profondeurs d'usure s'écrivent [bib3] :

$$\begin{cases} V_m = \dfrac{l}{6}\left(V1 + \sqrt{V1\cdot V2} + V2\right) \\ d_o = 0 \end{cases}$$

avec $x1 = \sqrt{R_m^2 - \dfrac{\left(R_o^2 - R_m^2 - \left(R_o - R_m + d_m\right)^2\right)^2}{4\left(R_o - R_m + d_m\right)^2}}$

$$V1 = R_m^2 \sin^{-1}\left(\frac{x1}{R_m}\right) - R_o^2 \sin^{-1}\left(\frac{x1}{R_o}\right) + x1\left(R_o - R_m + d_m\right) + d_m^2 \operatorname{tg}\alpha$$

$$x2 = \sqrt{R_m^2 - \frac{\left(R_o^2 - R_m^2 - \left(R_o - R_m + d_m - l\cdot\theta\right)^2\right)^2}{4\left(R_o - R_t + d_m - l\cdot\theta\right)^2}}$$

$$V2 = R_m^2 \sin^{-1}\left(\frac{x2}{R_m}\right) - R_o^2 \sin^{-1}\left(\frac{x2}{R_o}\right) + x2\left(R_o - R_m + d_m - l\cdot\theta\right) + \left(d_m - l\cdot\theta\right)^2 \operatorname{tg}\alpha$$

Un solveur intégré à POST_USURE permet de déterminer d_m en fonction de V_m

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Cas 3 :

Le contact s'effectue contre une arête d'un des isthmes de l'alésage quadifolié. On suppose le tube parfaitement centré par rapport à son obstacle. On prend en considération l'usure de l'obstacle.

Les volumes usés s'écrivent [bib3] :

$$\begin{cases} V_m+V_o=\dfrac{1}{2}\left[R_m^2\sin^{-1}\left(\dfrac{x}{R_m}\right)-R_o^2\sin^{-1}\left(\dfrac{x}{R_o}\right)+x\left(R_o-R_m+d_m\right)+d_m^2\,\mathrm{tg}\,\alpha\right] \\ V_o=1.88\cdot R_o\cdot d_o\cdot\pi \end{cases}$$

avec $x=\sqrt{R_m^2-\dfrac{\left(R_o^2-R_m^2-\left(R_o-R_m+d_m+d_o\right)^2\right)^2}{4\left(R_o-R_m+d_m+d_o\right)^2}}$

Cas 4 :

Le contact s'effectue contre une arête d'un des isthmes de l'alésage quadrifolié. On suppose cette fois que le tube présente un angle d'inclinaison θ par rapport à son obstacle. On prend en considération l'usure de l'obstacle.

- si $\left(d_m+d_o\right)<l\,\theta$

  Les volumes usés s'écrivent [bib3] :

$$\begin{cases} V_m+V_o=\dfrac{d_m+d_o}{6\,\theta}\left[R_m^2\sin^{-1}\left(\dfrac{x}{R_m}\right)-R_o^2\sin^{-1}\left(\dfrac{x}{R_o}\right)+x\left(R_o-R_m+d_m+d_o\right)+\left(d_m+d_o\right)^2.\,\mathrm{tg}\,\alpha\right] \\ V_o=1.88\cdot R_o\cdot d_o\cdot\pi \end{cases}$$

  avec $x=\sqrt{R_m^2-\dfrac{\left(R_o^2-R_m^2-\left(R_o-R_m+d_m+d_o\right)^2\right)^2}{4\left(R_o-R_m+d_m+d_o\right)^2}}$

- si $\left(d_m+d_o\right)\geq l\,\theta$

  Les volumes usés s'écrivent [bib3] : $\begin{cases} V_m=\dfrac{l}{6}\left(V1+\sqrt{V1\cdot V2}+V2\right) \\ V_o=1.88\cdot R_o\cdot d_o\cdot\pi \end{cases}$

  avec $x1=\sqrt{R_m^2-\dfrac{\left(R_o^2-R_m^2-\left(R_o-R_m+d_m+d_o\right)^2\right)^2}{4\left(R_o-R_m+d_m+d_o\right)^2}}$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$$V1 = R_m^2 \sin^{-1}\left(\frac{x1}{R_m}\right) - R_o^2 \sin^{-1}\left(\frac{x1}{R_o}\right) + x1\left(R_o - R_m + d_m\right) + \left(d_m + d_o\right)^2 . \operatorname{tg}\alpha$$

$$x2 = \sqrt{R_m^2 - \frac{\left(R_o^2 - R_m^2 - \left(R_o - R_m + d_m + d_o - l\cdot\theta\right)^2\right)^2}{4\left(R_o - R_m + d_m + d_m - l\cdot\theta\right)^2}}$$

$$V2 = R_m^2 \sin^{-1}\left(\frac{x2}{R_m}\right) - R_o^2 \sin^{-1}\left(\frac{x2}{R_o}\right) + x2\left(R_o - R_m + d_m + d_o - l\cdot\theta\right) + \left(d_m + d_o - l\cdot\theta\right)^2 \cdot \operatorname{tg}\alpha$$

4.8 Situation ‘Tube de générateur de vapeur - Tube de générateur de vapeur’

Le mot-clé utilisé est "TUBE_TUBE". Suite à la rupture d’un tube bouché, il peut y avoir contact entre ce tube et l’un de ses voisins. L’usure des deux tubes par accommodation des surfaces conduit au contact à la création de deux surfaces planes. Cette affirmation est confirmée par des tests réalisés sur machine d’usure.

Les profondeurs usées s'écrivent [bib3] :

$$\begin{cases} d_t = \left(\frac{1}{2\cdot R_m}\right)^{1/5} \left(\frac{15\cdot\theta\cdot V_m}{8}\right)^{2/5} \\ d_o = \left(\frac{1}{2\cdot R_o}\right)^{1/5} \left(\frac{15\cdot\theta\cdot V_o}{8}\right)^{2/5} \end{cases}$$

5 Découpage de la figure de jeu en secteurs

L'utilisateur a la possibilité de définir un découpage de la figure de jeu en secteurs angulaires pour lesquels il donne un type de contact (GRAPPE_1_ENCO...), un coefficient d'usure et les angles de début et de fin du découpage (ces angles doivent être croissants entre -180° et +180°). La puissance d’usure pour chaque secteur est alors calculée comme la moyenne arithmétique sur les instants, préalablement découpés en blocs, du produit des normes de la force normale de choc et de la vitesse de glissement en ne tenant compte que des contacts qui ont lieu dans le secteur angulaire concerné. A partir de cette puissance, il est possible de définir un volume usé en multipliant la puissance d’usure du secteur par le coefficient d’usure du secteur et par un temps de fonctionnement donné par l’utilisateur. Il est également possible de calculer la profondeur d’usure pour ce secteur, en supposant que l'extension angulaire du défaut n'excède pas celle du secteur où il est détecté.

C'est le mot-clé SECTEUR qui permet de définir l'ensemble de ces modifications.

Il n'est pas prévu de vérifier la cohérence globale des calculs effectués. En particulier, une usure peut être répartie sur plusieurs secteurs et dans ce cas, le calcul de la profondeur d'usure n'a plus de sens. Il appartient à l'opérateur de s'assurer a posteriori de la validité de ses résultats. Un nouveau calcul avec un autre découpage doit éventuellement être mené pour obtenir la valeur de la profondeur d'usure. Ce choix n'est pas contraignant en raison de la rapidité du post-traitement considéré. L'intérêt d'effectuer ces calculs en POURSUITE est évident, compte-tenu de ce qui précède.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

6 Actualisation de la table

L'opérateur POST_USURE extrapole le volume usé obtenu en quelques secondes de simulation à des durées définies par l'utilisateur (typiquement quelques mois, voire quelques années).

Il restitue une table qui contient les volumes usés et les profondeurs d'usure pour tous les secteurs et tous les instants définis par l'utilisateur en les cumulant depuis l'instant initial de la simulation.

Il est possible de donner une table à réactualiser en utilisant le mot-clé ETAT_INIT. Cela permet de tenir de l'évolution des géométries liées à l'usure :

- A partir d'une figure de jeu, l'utilisateur mène un calcul dynamique.
- Il obtient des volumes et des profondeurs d'usure en sortie de POST_USURE.
- Il mène un nouveau calcul dynamique avec la figure de jeu modifiée.
- Il en déduit de nouvelles grandeurs liées à l'usure et les cumule dans la table résultat de POST_USURE.

En itérant le processus un certain nombre de fois [bib9], il est possible de prendre en compte l'évolution des géométries en fonction de l'usure et d'en déduire l'impact de ce phénomène sur la dynamique du système étudié.

7 Bibliographie

[1] ARCHARD J.F. : “Contact and Rubbing of flat surfaces”. Journal of Applied Physics, vol.24, p. 24, 1953

[2] P.J. HOFMANN, D.A. STEININGER, T. SCHETTLER : “PWR Steam Generator Tube Fretting and Fatigue Wear Phenomena and correlations”. HTD - Vol. 230/NE - vol. 9, Symposium on Flow-Induced Vibration and Noise, Vol 1, ASME, 1992

[3] F. GUEROUT : “Usure des tubes de Générateurs de Vapeur: relations géométriques entre volumes et profondeurs usés”. HT.22/93-21A. EDF-DER. Juillet 1993

[4] M. ZBINDEN, V. DURBEC : “A kinetic model for impacts/sliding wear of pressurized water reactor internal components : application to rod cluster control assemblies”. Communication présentée au Symposium on Flow Induced Vibration, Congrès ASME Pressurized Vessels and Piping, Montreal, 22 au 26 juillet 1996. HT.22/90-028A. EDF-DER.

[5] M. ZBINDEN, A. LINA, D. HERSANT : “Grappes de commande et guides de grappes : synthèse des essais d'usure effectués sur les simulateurs ERABLE1 et ERABLE2 de 1995 à 1997”. HT.22/97-21A. EDF-DER. Mars 1998

[6] F. GUEROUT, M. ZBINDEN : “Etude bibliographique des modèles d’usure. Revue des coefficients d’usure disponibles pour l’étude de l’endommagement des tubes de Générateurs de Vapeurs”. HT.22/93-56A. EDF-DER. Novembre 1993

[7] A. LINA, M. ZBINDEN : “Usure des gaines de crayons de grappes de commande : Relations entre volume usé et profondeur d'usure”. HT.22/95-06A. EDF-DER. Septembre 1995

[8] J.-D. GEORGES, D. HERSANT : “Amélioration de l'opérateur POST_USURE du *Code_Aster®* : calcul de l’usure par secteurs angulaires du contact mobile-antagoniste”. HT.22/97-010A. EDF-DER. Février 1997

[9] V. FAUCHER, D. HERSANT : “Grappes de commandes des réacteurs 1300MW. Calculs d'usure itératifs avec usure progressive des antagonistes sur le modèle à deux crayons. Méthode et calculs préliminaires”. HT.22/98-009A. EDF-DER. Mars 1998

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

8 Description des versions du document

Version Aster	Auteur(s) Organisme(s)	Description des modifications4
4	*D. HERSANT, L. VIVAN (EDF/RNE/MTC, CISI)*	Texte initial

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)