

Nocivité et propagation de défaut en fatigue dans une frette d'alternateur

Van-Xuan Tran (EDF/R&D/AMA)

Ludovic May (EDF/R&D/AMA)

Gilbert Fréville (EDF/R&D/MMC)

15 Mars 2012



Plan de présentation

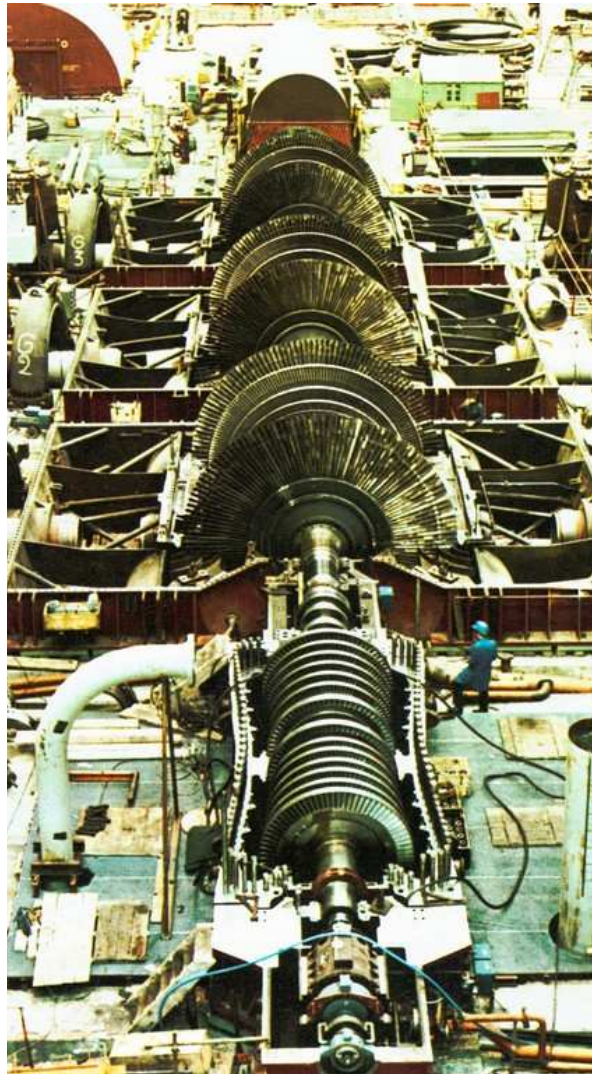
- ▶ Contexte industriel
- ▶ Rappels en mécanique de la rupture et fatigue
- ▶ CAO, maillage, chargements & Conditions aux limites
- ▶ Résultats de l'étude
 - Evaluation des risques d'amorçage et de propagation
 - Etude de nocivité de défaut
 - Etude de propagation de défaut
- ▶ Conclusions



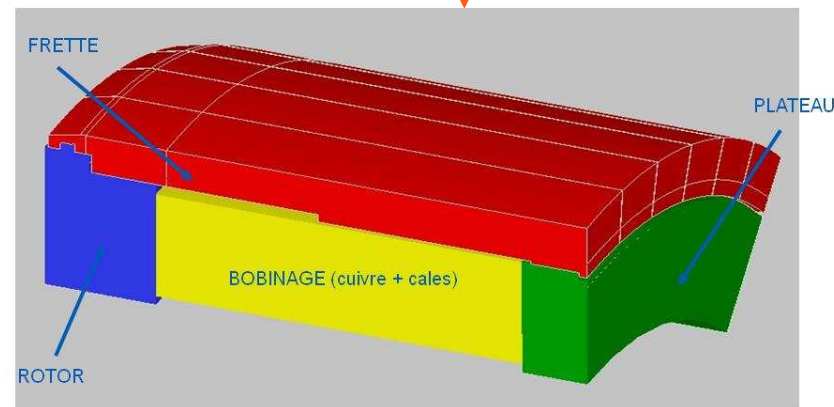
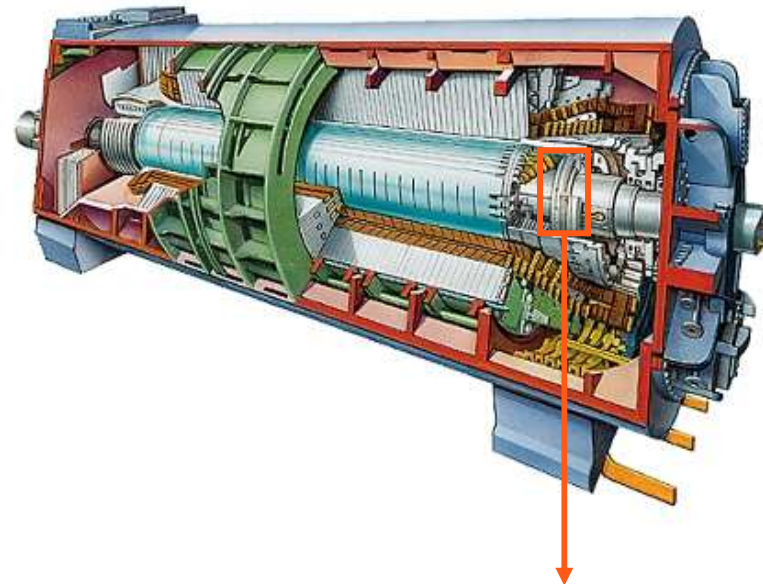
Contexte Industriel

Genèse et traitement de la problématique

Groupe turbo-alternateur dans une centrale nucléaire

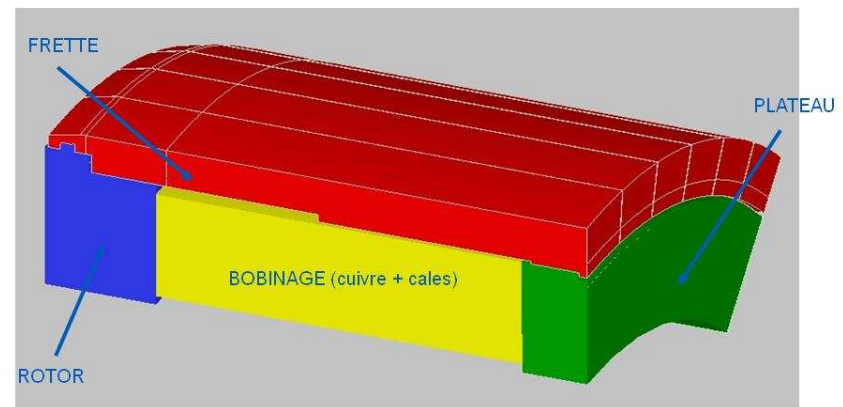


→ Alternateur



Genèse et traitement de la problématique

- ▶ Des zones fortement chargées ont été identifiées sur des parties de l'alternateur : les frettes
 - pièce de révolution en acier, montée aux deux extrémités du fût du rotor afin de maintenir les têtes de bobines de l'enroulement de l'inducteur
- ▶ Dans ces zones, des défauts sont susceptibles de s'initier
- ▶ Au titre de la maîtrise des risques et de la durée de fonctionnement des matériels, une étude de tenue des frettes à la fissuration est engagée
- ▶ Cette étude comprend 3 parties :
 - Nocivité des défauts
 - Essais matériaux
 - Étude numérique de propagation





Rappels de mécanique de la rupture et de fatigue

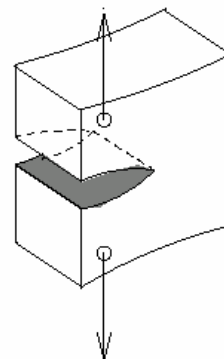
Comportement général et grandeurs physiques

- Modes de rupture et facteurs d'intensité de contraintes (FIC) dans le cadre de la mécanique linéaire de la rupture :

$$\sigma_{ij} \approx \frac{f_{ij}(\theta)}{\sqrt{2\pi r}}$$

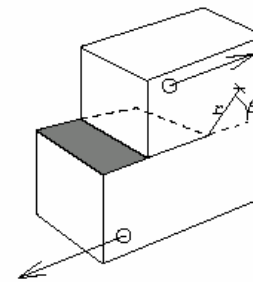
$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{yy}(r, 0) \sqrt{2\pi r}$$

Trois modes de rupture des structures fissurées



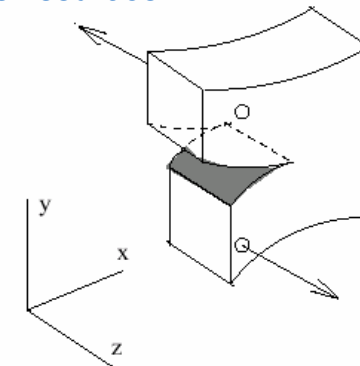
Mode I

Mode d'ouverture



Mode II

Mode de glissement droit
(ou de cisaillement plan)



Mode III

Mode de glissement vis
(ou de cisaillement antiplan)

- Taux de restitution d'énergie

$$G = \frac{1-\nu^2}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2$$

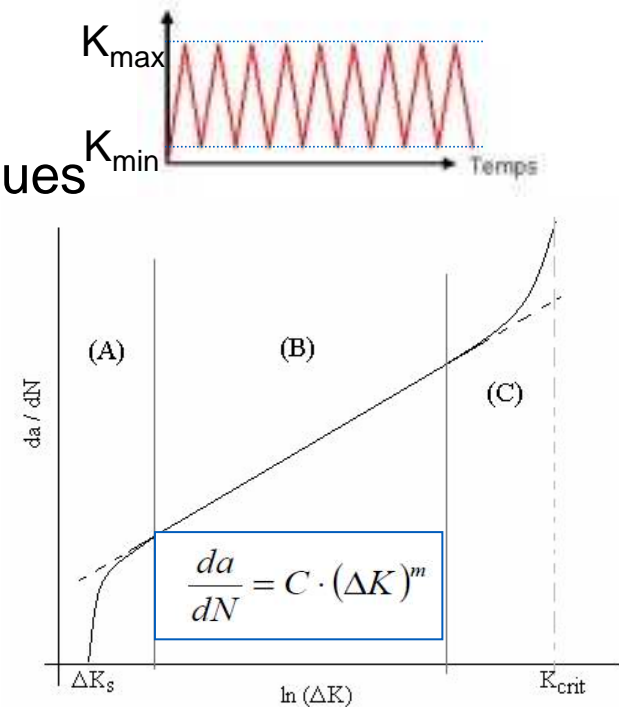
Nocivité et propagations des défauts

► Propagation d'une fissure sous chargement statique

- Critère d'Irwin : l'existence d'une valeur critique de K_I , appelée ténacité et notée K_{Ic} (donnée matériau) :
 - $K < K_{Ic}$: pas de propagation
 - $K > K_{Ic}$: propagation

► Propagation en fatigue sous chargements cycliques

- Propagation si $\Delta K > \Delta K_{seuil}$ (hors fissure courte)
- Cinétique déterminée à partir de la variation du facteur d'intensité de contrainte : $\Delta K = K_{max} - K_{min}$
- Cinétique qui peut être déterminée (zone B du graphique) par une loi de type Paris

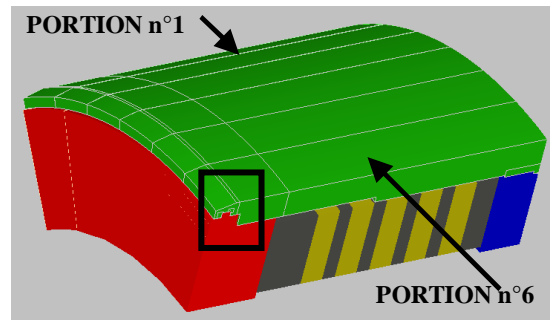




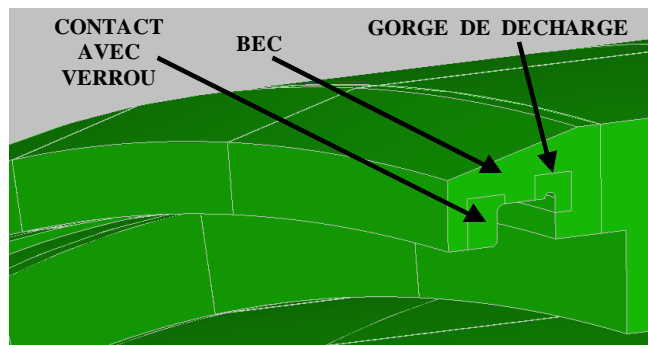
CAO, maillage, chargements & Conditions aux limites

Éléments du maillage

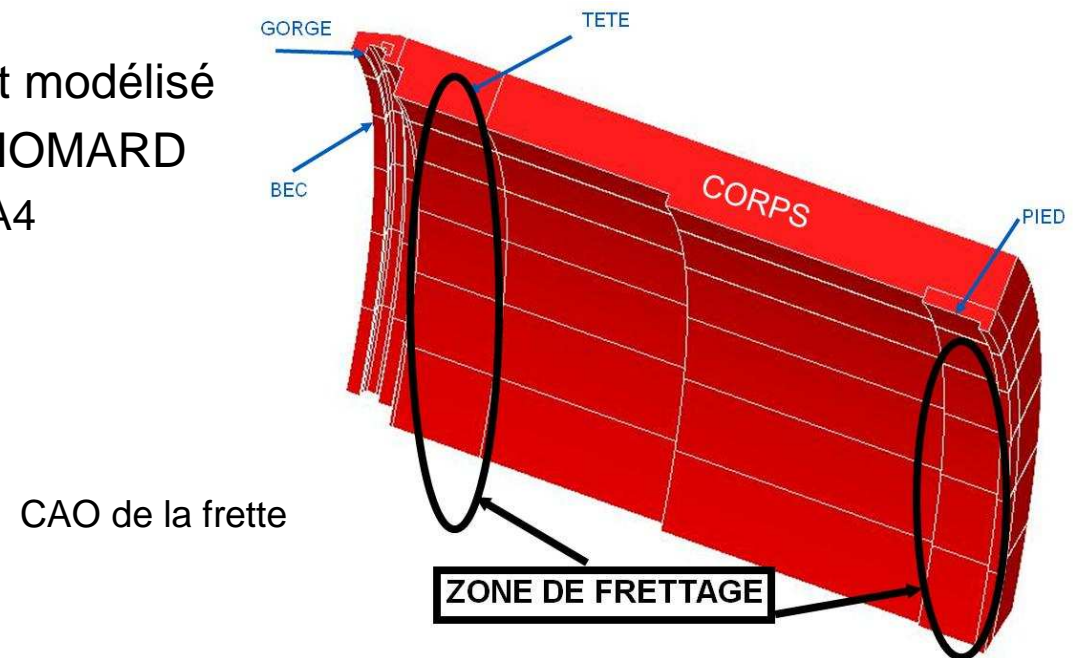
- Un huitième de la structure est modélisé
- Raffinement de maillage par HOMARD
 - 1 501 970 mailles TETRA4
 - 286 338 nœuds



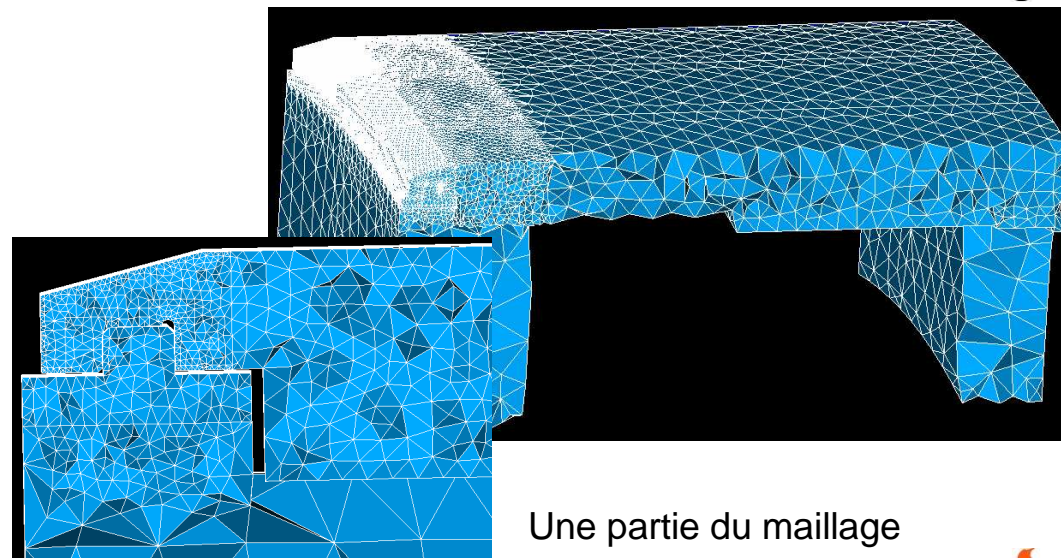
Modèle de la structure complète



Zoom de la Gorge



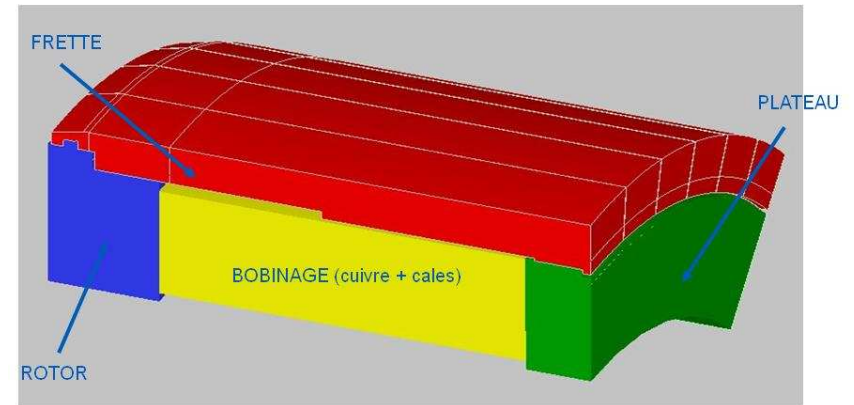
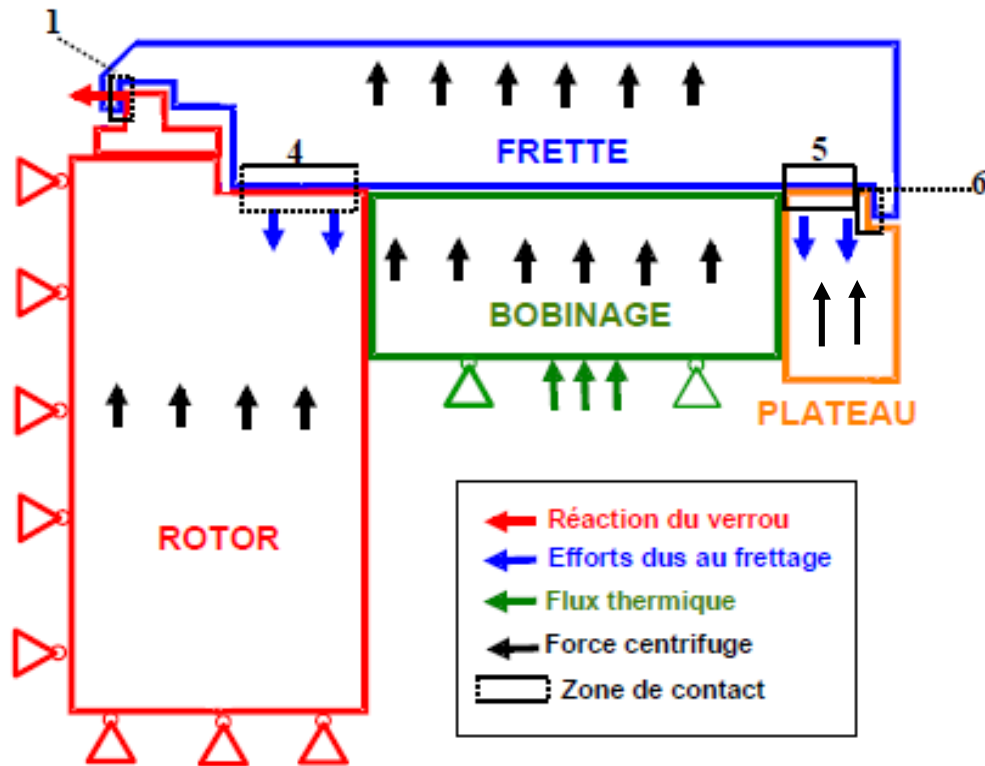
CAO de la frette



Une partie du maillage

Conditions aux limites et chargements

- Visualisation des chargements et conditions aux limites



► Modélisation

- Géométrie complexe
- Chargement thermo-mécanique compliqué
- Contact et frottement
- Structure fissurée

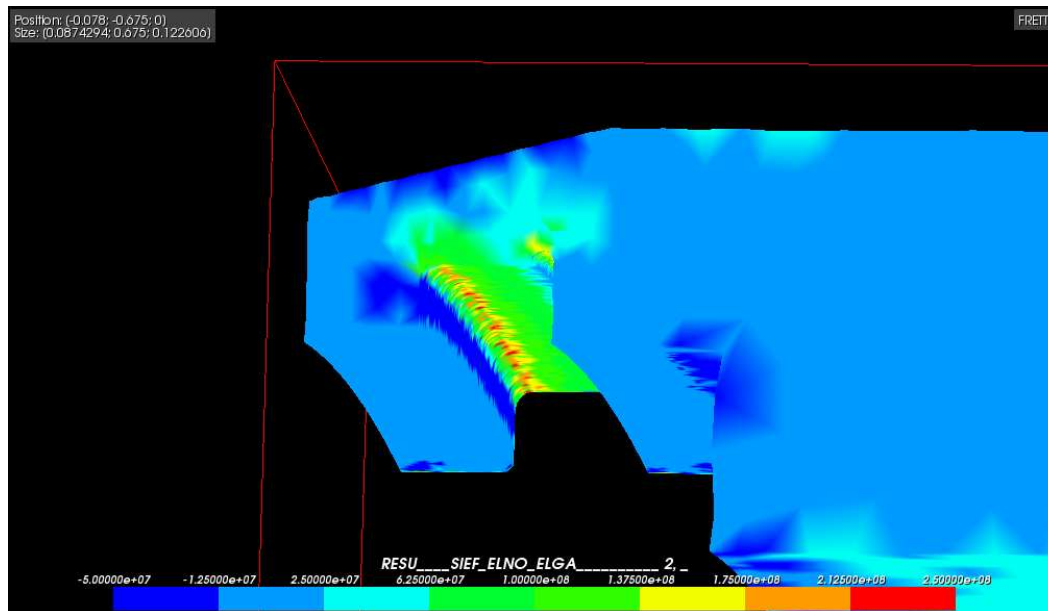


Résultats de l'étude

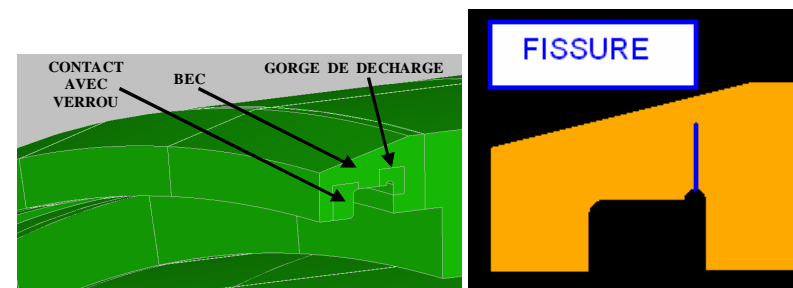
Evaluation des risques d'amorçage et de propagation

► Les effets des chargements ou la genèse d'une fissure

- La montée en vitesse de la ligne d'arbre lors des opérations d'arrêt/démarrage :
 - ✓ efforts centrifuges qui entraînent un gonflement de la frette et favorisent l'apparition ou le développement de fissures axiales
- La puissance réactive de l'alternateur et ses variations :
 - ✓ dilatation des bobinages qui étire la frette et favorise l'apparition ou le développement de fissures circonférentielles
- La fréquence de la variation de la puissance réactive est beaucoup plus importante que celle d'arrêt/démarrage → une seule fissure circonférentielle est étudiée. La fissure est principalement sous mode I (mode d'ouverture).



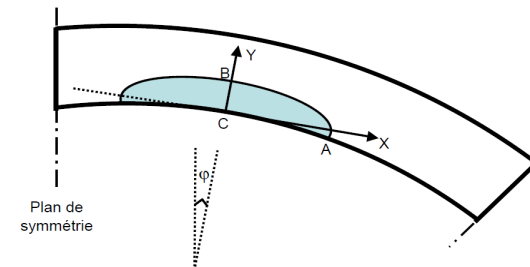
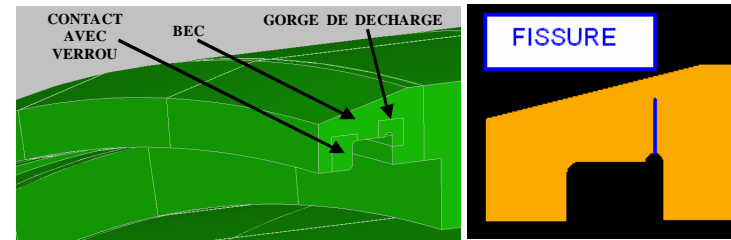
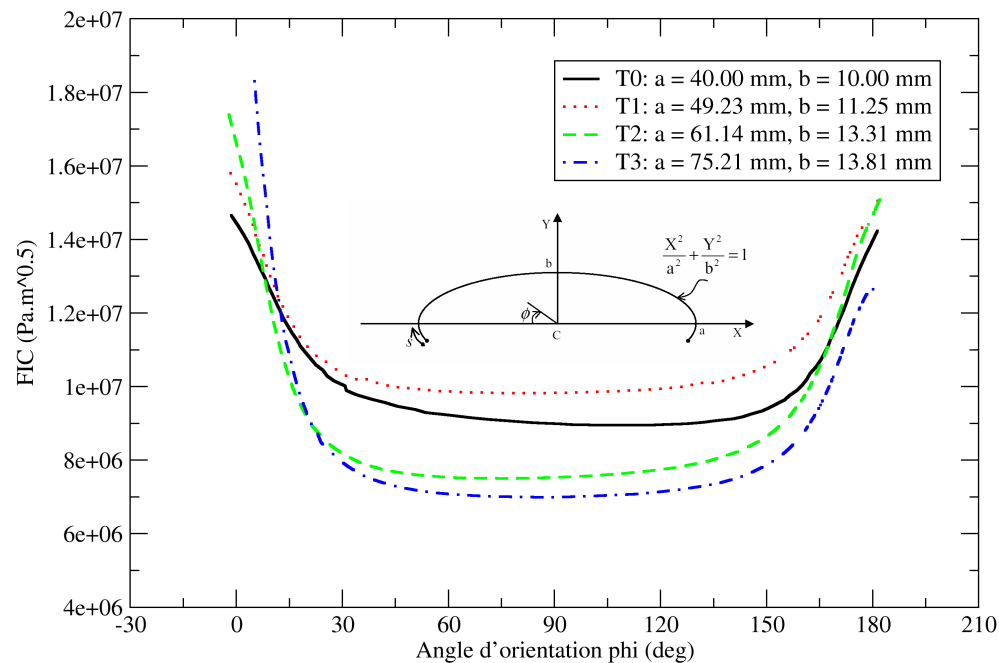
- Contraintes axiales pouvant générer l'apparition de défauts dans la gorge de décharge



Etude de nocivité de défaut

► Considérations

- Fissure elliptique représentée par éléments X-FEM (fissure non-maillée)
- Variation de la taille de la fissure
- Calcul des FIC au moyen de l'opérateur CALC_G



► Conclusion

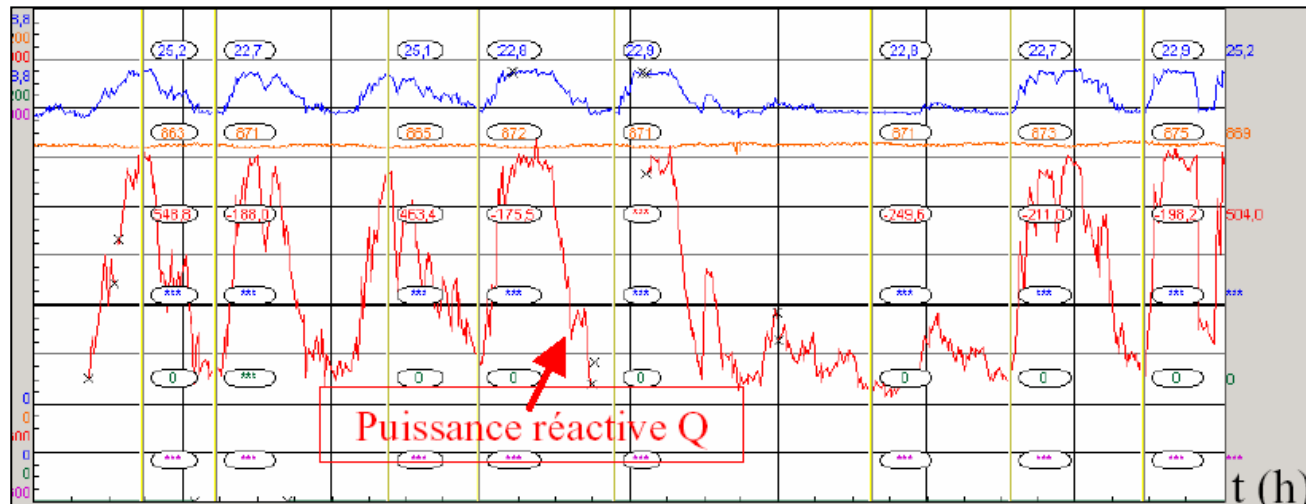
- Les FIC sont plus importants sur les points extrêmes proches du grand axe
- Le FIC maximal augmente lorsque la taille du défaut augmente
- En comparant avec la ténacité K_{IC} du matériau, il est possible de déterminer si la fissure est nocive ou pas sous le chargement statique

Etude de propagation de défaut (1/3)

► Méthodologie pour l'étude de propagation (1/2)

■ Chargement :

- ✓ Les chargements sont déduits de la puissance réactive mesurée lorsque la centrale fonctionne
- ✓ Pour chaque valeur de la puissance réactive Q, on cherche à obtenir le gradient du flux thermique (chargement)



- Calcul des FICs par X-FEM dans Code_Aster : $\Delta K_I = K_I^{\max} - K_I^{\min} = K_I(Q_{\max}) - K_I(Q_{\min})$

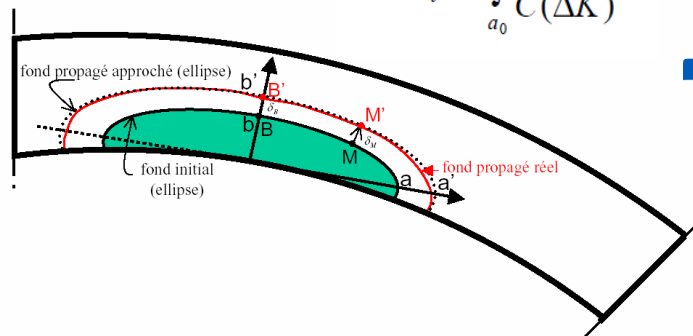
Etude de propagation de défaut (2/3)

◆ Méthodologie pour l'étude de propagation (2/2)

■ Propagation incrémentale d'un défaut :

- ✓ on considère un défaut initial $a = 40$ mm, $b = 10$ mm
- ✓ la loi de Paris (déterminée expérimentalement par EDF R&D / MMC) pour déterminer le fond propagé numériquement point à point à partir des FICs
- ✓ calculer la durée de vie associée à l'accroissement :

$$N_f = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K)^m}$$



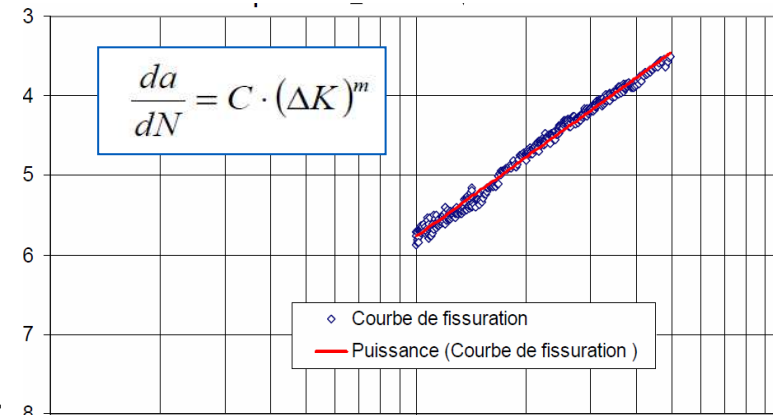
■ Nouvelle forme du défaut propagé

- ✓ fond propagé numériquement point par point est approché par la méthode de régression pour obtenir une nouvelle ellipse de taille plus grande
- ✓ nouvelle propagation incrémentale ou fin de propagation

■ Fin de propagation

- ✓ taille finale de la fissure est déterminée soit par le moment où le facteur d'intensité de contrainte maximal dépasse K_{Ic} , soit quand la fissure débouche sur les bords de la structure modélisée

- ✓ durée de vie totale de la structure fissurée :
$$N_f = \sum_i \int_{a_i}^{a_{i+1}} \frac{da}{C(\Delta K)^m} = \sum_i \frac{a_{i+1} - a_i}{C(\Delta K_i)^m} = \sum_i \frac{\delta_i}{C(\Delta K_i)^m} = \sum_i N_i$$

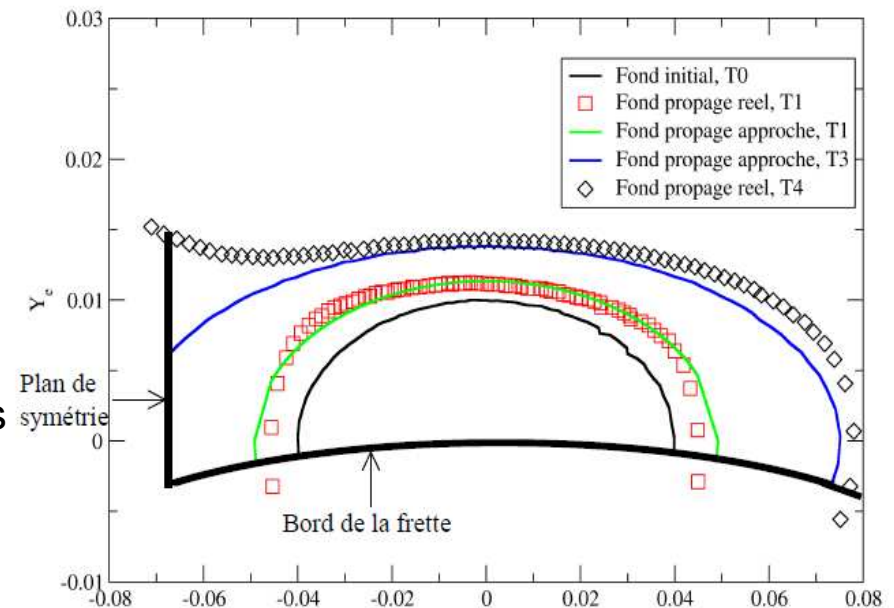


Etude de propagation de défaut (3/3)

► Evolution du défaut et durée de vie

- Le grand axe du fond approché est plus grand que celui du fond point à point déterminé numériquement → résultats conservatifs
- La propagation s'arrête lorsque la fissure débouche sur les bords de la frette
- Le rapport b'/a' de l'ellipse change au cours de la propagation

Pas d'avancement	Demi-petit et demi-grand axes obtenus à partir de la première méthode d'approximation		
	a' (mm)	b' (mm)	N_i (cycle)
T0	40,00	10,00	-
T1	49,23	11,35	995 751
T2	61,14	13,11	949 585
T3	75,21	13,81	918 561
T4	-	14,43	772 862
N_f (cycle)			3 636 762



► Conclusion

- En utilisant la fréquence de la puissance réactive mesurée, on peut déduire la durée de vie en fatigue de la frette fissurée sous le chargement cyclique



Conclusions

Conclusions

► Résultats des études

- Identification des coefficients d'une loi de Paris (EDF R&D / MMC)
- Mesures expérimentales des sollicitations via la mesure des flux thermiques et de la puissance réactive
- L'étude en statique permet d'identifier la zone d'apparition potentielle d'un défaut située dans la gorge de décharge au bec de la frette
- En comparant le FIC calculé par la méthode X-FEM avec la ténacité K_{Ic} du matériau, il est possible de déterminer si la fissure est nocive ou pas sous le chargement statique
- En utilisant la fréquence de la puissance réactive mesurée, on peut déduire la durée de vie en fatigue de la frette fissurée sous le chargement cyclique et adopter une politique de contrôle périodique optimale

► Les outils et méthodes utilisées dans l'étude

- Recalages des chargements sur des mesures expérimentales
- Utilisation de SaloméMéca pour le maillage et post-traitement
- Utilisation des fonctionnalités Aster : STAT_NON_LINE, DEFI_FISS_XFEM, CALC_G, MACR_ADAP_MAIL...
- Temps CPU pour un pas de propagation : 4 heures (version STA10, machine locale)

Merci de votre attention !