

CHAPITRE XXIV : RUPTURE D'UN PIPELINE (TD)

J. BESSON, S. CANTOURNET

On considère un pipeline réalisé avec un tube cylindrique de rayon R et d'épaisseur e (Figure 1). Ce tube contient une fissure de longueur a . On cherche à établir les conditions de ruine de ce pipeline.

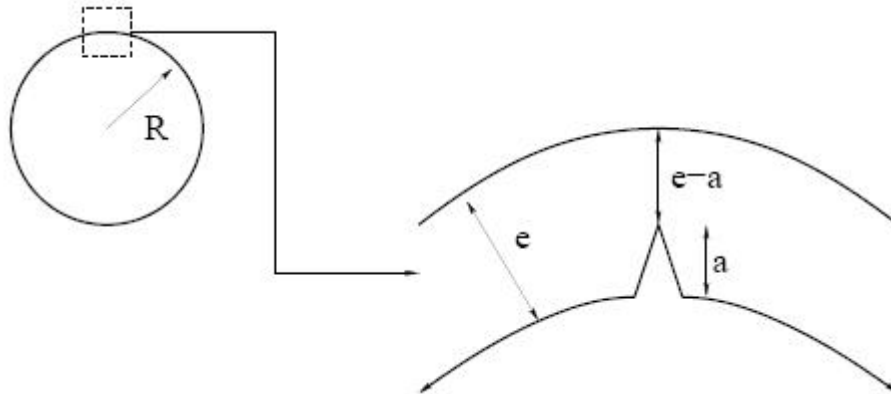


Figure 1 : Géométrie du tube considéré

1 CONTRAINTE DANS LA PAROI DU TUBE

Etablir que la contrainte orthoradiale dans le tube loin de la fissure est égale à :

$$\sigma_{\theta} = p \frac{R}{e} \quad [1]$$

L'exercice porte sur le dimensionnement du tube afin d'éviter l'éclatement tel qu'il peut se produire accidentellement ou en conditions d'essais (Figure 2).



Figure 2 : Eclatement d'un gazoduc lors d'un essai « à l'échelle 1 »

2 RUPTURE PAR CHARGEMENT LIMITE

On considère que le tube casse par ruine plastique (chargement limite). En écrivant l'équilibre du tube fissuré, considéré localement comme une tôle plate, et en négligeant l'effet de concentration des contraintes, calculer la pression limite p_L . On considère également que le tube est parfaitement plastique avec une limite d'écoulement notée σ_y .

En pratique, en tenant compte des concentrations de contraintes on trouve plutôt :

$$p_L = \sigma_y \frac{e}{R} \left(1 - \frac{a}{e}\right)^2 \quad [2]$$

3 RUPTURE PAR PROPAGATION BRUTALE DE LA FISSURE

Le facteur d'intensité des contraintes est donné par :

$$K_I = 0,6 \sqrt{\pi a} g\left(\frac{a}{e}\right) p \frac{R}{e} \quad [3]$$

avec

$$g\left(\frac{a}{e}\right) = \frac{1 + 2\frac{a}{e}}{\left(1 - \frac{a}{e}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad [4]$$

Soit K_{Ic} la ténacité du matériau. Calculer la pression d'éclatement pour une longueur de fissure donnée en supposant que la rupture se produit cette fois par propagation brutale d'une fissure et non par chargement limite.

4 COMPARAISON ENTRE LES DEUX MODES DE DEFAILLANCE

Le tube est progressivement mis en pression. Pour quelle longueur de fissure a_L se trouve-t-on à la limite entre un mode de rupture par chargement limite et un mode de rupture par propagation brutale de fissure (on posera simplement l'équation donnant a_L).

5 DIAGRAMMES D'ESTIMATION DE DEFAILLANCE (FAILURE ASSESSMENT DIAGRAM)

Dans le plan $(K/K_{Ic}) - (p/p_L)$, tracer la zone de non-rupture et indiquer le mode de rupture à la frontière de cette zone (on suppose a_L connue). On quantifie le degré de sûreté du tube par la distance séparant le point de fonctionnement et la frontière de rupture.

6 COMPORTEMENT EN PROPAGATION DE FISSURE PAR FATIGUE

On a réalisé des essais de fatigue sur l'acier ayant servi à fabriquer le pipeline. A partir du résultat de ces essais (Figure 3), déterminer les coefficients C et α de la loi de Paris du matériau :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^\alpha \quad [5]$$

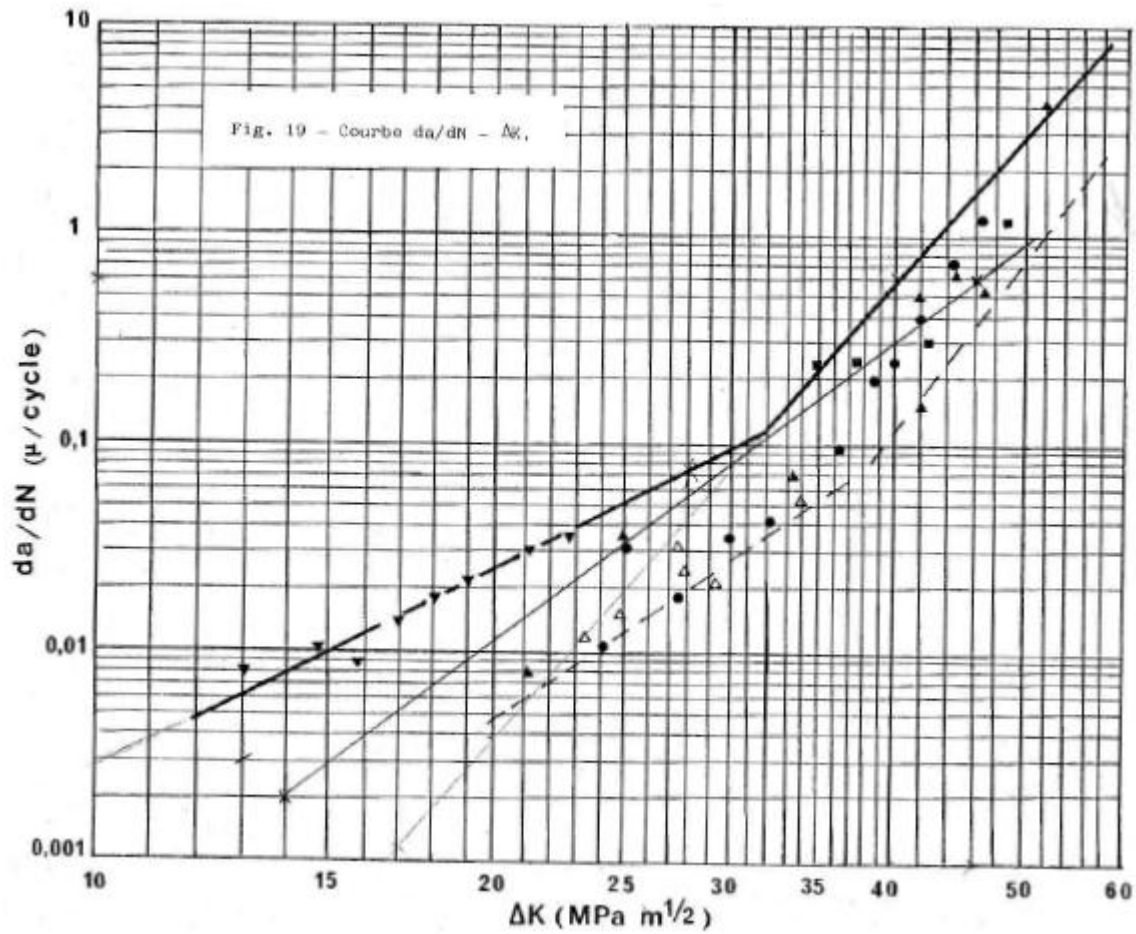


Figure 3 : Vitesse de propagation de fissure en fatigue, en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes

7 DIMENSIONNEMENT EN FATIGUE

Lors de son utilisation, le pipeline est soumis à des variations de pression entre 0 et p_{max} . On suppose un défaut de taille initiale a_0 telle que la structure du tube ne rompt initialement pas en fonctionnement. Intégrer la loi de Paris et poser l'équation donnant le nombre de cycles à rupture. On notera :

$$G = \int \frac{1}{\left(\sqrt{\pi a} g\left(\frac{a}{e}\right) \right)^\alpha} da \quad [6]$$

CHAPITRE XXIV : RUPTURE D'UN PIPELINE (CORRIGE)

J. BESSON, S. CANTOURNET

1 CONTRAINTE DANS LA PAROI DU TUBE

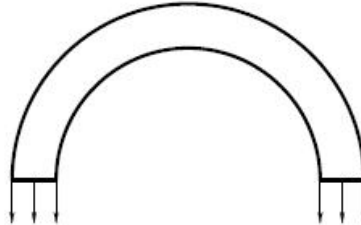


Figure 1 : Equilibre d'une demi-section de tube

On pourra écrire l'équilibre d'une demi-section de tube telle que celle représentée sur la Figure 1 ci-dessus.

$$\text{On trouve alors : } 2e\sigma_{\theta} = \int_0^{\pi} R \sin \theta p d\theta = 2Rp \quad [1]$$

$$\text{ce qui donne : } \sigma_{\theta} = p \frac{R}{e} \quad [2]$$

2 RUPTURE PAR CHARGEMENT LIMITE

L'hypothèse est forte ! Mais cela permet d'introduire le concept de rupture par chargement limite dans la zone fissurée. La Figure 2 représente les hypothèses du problème mécanique.

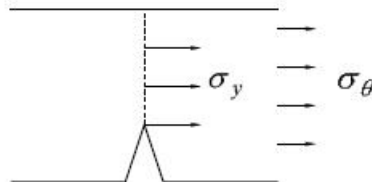


Figure 2 : Rupture par chargement limite

$$\text{On trouve alors : } (e-a)\sigma_y = e\sigma_{\theta} \quad [3]$$

$$\text{d'où } (e-a)\sigma_y = e \frac{R}{e} p_L \quad [4]$$

$$\text{d'où : } p_L = \left(1 - \frac{a}{e}\right) \frac{e}{R} \sigma_y \quad [5]$$

3 RUPTURE PAR PROPAGATION BRUTALE DE LA FISSURE

On a choisi de garder la forme complexe de K_I en fonction de a et de a/e pour souligner que tout n'est pas analytique ! On souligne aussi que

$$K_I = 0,6 \sqrt{\pi a} g\left(\frac{a}{e}\right) \sigma_{\theta} = Y \sqrt{\pi a} \sigma_{\theta} \quad [6]$$

qui est la forme classique mais avec Y exprimé comme une fonction du rapport a/e . La solution est évidente :

$$K_I = K_{Ic} = 0,6 \sqrt{\pi a} g\left(\frac{a}{e}\right) p \frac{R}{e} \quad [7]$$

$$\text{d'où } p_e = \frac{K_{Ic}}{0,6 \sqrt{\pi a} g\left(\frac{a}{e}\right)} \frac{e}{R} \quad [8]$$

4 COMPARAISON ENTRE LES DEUX MODES DE DEFAILLANCE

Dans cette question et dans la suivante, il s'agit d'introduire le diagramme FAD (Failure Assessment Diagram). Il faut que $p_L = p_e$, donc :

$$\frac{K_{Ic}}{0,6 \sqrt{\pi a} g\left(\frac{a}{e}\right)} = \left(1 - \frac{a}{e}\right)^2 \sigma_y \quad [9]$$

5 DIAGRAMMES D'ESTIMATION DE DEFAILLANCE (FAILURE ASSESSMENT DIAGRAM)

Le diagramme FAD est schématiquement représenté sur la Figure 3 ci-dessous.

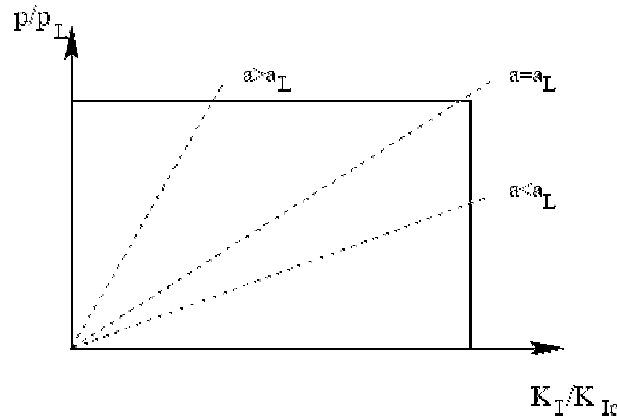


Figure 3 : Représentation schématique du FAD

6 COMPORTEMENT EN PROPAGATION DE FISSURE PAR FATIGUE

Avec la courbe épaisse indiquée sur le graphe, on trouve : $\alpha = 4,8$ et $C = 6,3 \cdot 10^{-9} \mu\text{m} \cdot \text{MPa}^{-\alpha} \cdot \text{m}^{-\alpha/2}$. Attention aux unités !

7 DIMENSIONNEMENT EN FATIGUE

$$\text{La loi de Paris donne : } \frac{da}{dN} = C (\Delta K)^\alpha = C \left(0,6 \sqrt{\pi a} g\left(\frac{a}{e}\right) p_{max} \frac{R}{e} \right)^\alpha \quad [10]$$

$$\text{soit : } \frac{da}{\left(0,6 p_{max} \frac{R}{e} \right)^\alpha \left(\sqrt{\pi a} g\left(\frac{a}{e}\right) \right)^\alpha} = dN \quad [11]$$

$$\text{donc } G(a_R) - G(a_0) = \left(0,6 p_{max} \frac{R}{e} \right)^\alpha N_R \quad [12]$$

avec a_R la longueur de fissure à rupture et N_R le nombre de cycles à rupture. Les valeurs de a_R peuvent être successivement calculées avec les deux hypothèses suivantes : (1) rupture par chargement limite et (2) rupture par fissuration brutale. Il faut bien sûr retenir la valeur la plus petite :

$$a_R = \min(a_R^L, a_R^e) \text{ avec } a_R^L \text{ solution de } p_{max} = p_L \text{ et } a_R^e \text{ solution de } p_{max} = p_e. \quad [13]$$