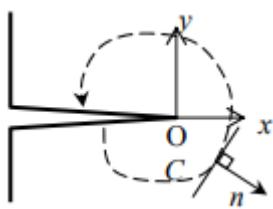


## Chapitre 5 : Mécanique de la Rupture Elastique Plastique

### 5.1 J-intégrale (J)

L'intégrale-J (intégrale curvilinear) représente un moyen de calculer le taux de relaxation de l'énergie de déformation ou de travail (énergie) par unité de surface de zone rompue au sein d'un matériau. Le concept théorique de l'integral-J a été développé, de façon indépendante, en 1967 par Cherepanov et en 1968 par Jim Rice. Ces travaux mettent en évidence que le contour délimitant la zone plastique aux abords du front de fissure (appelé J) est indépendant du profile (contour) de la fissure.



Contour d'intégration

Par la suite, des méthodes expérimentales ont été élaborées pour permettre la mesure des propriétés critiques de rupture à partir d'échantillons à l'échelle du laboratoire pour des matériaux dans lesquels la dimensions des prélèvements est insuffisante pour garantir la validité les hypothèses de la mécanique linéaire élastique de la rupture, et d'en déduire une valeur critique de l'énergie de rupture  $J_{1c}$ .

**La quantité  $J_{1c}$  définit le point à partir duquel se forme une zone plastique dans le matériau au moment de la propagation et pour un mode de chargement.**

L'intégrale-J est équivalente au taux de relaxation de l'énergie de déformation d'une fissure dans un solide soumis à une charge constante. Cela est vrai, dans des conditions quasi-statiques, tant pour les matériaux linéairement élastiques que pour les échantillons expérimentés à petite échelle en passe de céder en front de fissure.

### Critère d'énergie

Lorsque la variation d'énergie élastique est supérieure à la variation d'énergie superficielle il y a propagation de la fissure ce qui correspond à une diminution de l'énergie libre du système. **Dans une plaque de dimension infinie en matériau idéalement élastique contenant une fissure, celle-ci se propage lorsque :**

$$\sigma = \sigma_r = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}}$$

Avec

$E$  = Module de Young, et

$\sigma_r$  = contrainte de rupture.

$2E\gamma_s$  correspond à l'énergie nécessaire pour créer une surface unité de fissuration.

**Il s'agit en fait d'une énergie critique que l'on note:  $G_{1c}$  en  $J.m^{-2}$ .**

On peut donc réécrire (12) comme suit:

$$K_{1c} = \sqrt{\frac{EG_{1c}}{1 - \nu^2}}$$

Avec  $\nu$  = module de **Poisson**.

Pour un état de contraintes planes, cas des structures minces ;

$$K_{1c} = \sqrt{EG_{1c}}$$

### Intégrale-J et rupture ductile

Pour les matériaux isotropes présentant une transition ductile / fragile marquée, l'intégrale-J peut être directement liée au mode de rupture ductile.

Dans le cas d'une déformation plane dans les conditions de chargement correspondant au **mode I**, la relation est donnée par :

$$J_{Ic} = G_{Ic} = K_{Ic}^2 \left( \frac{1 - \nu^2}{E} \right)$$

Avec :

$G_{Ic}$  le facteur de relaxation de l'énergie de déformation critique,

$K_{Ic}$  le facteur d'intensité de contrainte en rupture ductile sous chargement en mode I,  
 $\nu$  le coefficient de Poisson, et  
 $E$  le module de Young du matériau.

Dans le cas d'un chargement en **mode II**, la relation entre l'intégrale-J et la rupture ductile en mode II, ( $K_{IIc}$ ) est donné par :

$$J_{IIc} = G_{IIc} = K_{IIc}^2 \left[ \frac{4(1-\nu^2)}{3E} \right]$$

Dans le cas d'un chargement en **mode III**, la relation est donnée par :

$$J_{IIIc} = G_{IIIc} = K_{IIIc}^2 \left( \frac{1+\nu}{E} \right)$$

---

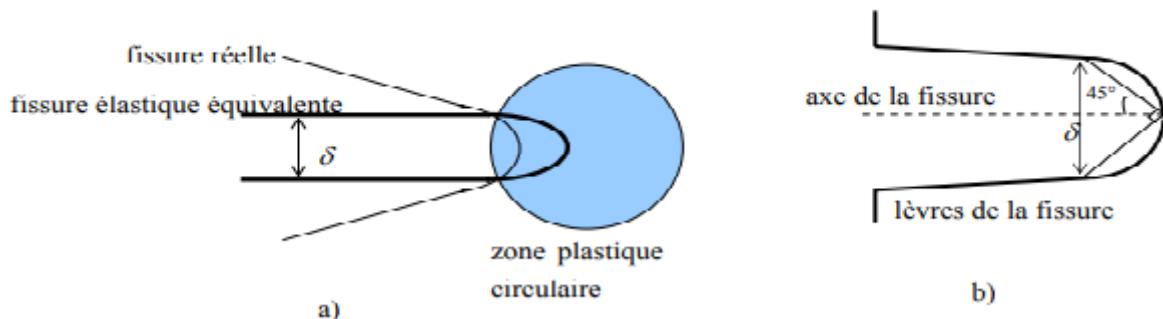
Rice a également démontré que la valeur de l'intégrale-J représente le taux de relaxation d'énergie pour la propagation des fissures planes.

L'intégrale-J a été développée pour résoudre des difficultés rencontrées dans le calcul des contraintes aux abords d'une fissure dans un matériau linéairement élastique. Rice a montré qu'en mode de chargement constant et sans atteindre l'adaptation plastique, l'intégrale-J peut aussi être utilisée pour calculer le taux de relaxation d'énergie dans un matériau plastique.

## 5.2 Déplacement d'ouverture du front de la fissure (CTOD)

(Crack Tip Opening Displacement)

En élastoplasticité, la pointe de la fissure s'émousse et certains auteurs [Wells 1963] ont proposé d'utiliser l'ouverture de fissure comme paramètre de mécanique de la rupture. Le CTOD, ou écartement de fissure  $\delta$ , a ainsi été défini à partir des déplacements de la pointe de fissure, mesurés à l'intersection de la frontière de la zone plastique avec les lèvres de la fissure (Figure). Il existe de nombreuses façons de calculer cet écartement  $\delta$  [Pluvinage 1989]. Par exemple, Tracey a proposé de définir cet écartement à l'intersection de deux droites passant à 45° de l'axe et des lèvres de la fissure



Ecartement de fissure  $\delta$  (CTOD)

Il est ensuite possible de relier le CTOD au taux de restitution d'énergie, ou encore à l'intégrale J en utilisant la solution asymptotique HRR [Shih 1981]

$$\delta = d_n(\sigma_0, n) \frac{J}{\sigma_0}$$

où  $d_n$  est un coefficient de proportionnalité sans dimension, et qui dépend fortement du coefficient d'écrouissage  $n$ , et peu de la limite d'élasticité  $\sigma_0$ .

L'essai COD (Crack Test opening Displacement) sert à mesurer l'aptitude d'une structure sous contrainte à propager ou non une fissure à partir d'un défaut existant.

Les nombreuses transformations métallurgiques qui se produisent lors du soudage sont à l'origine de microstructures complexes qui peuvent avoir des propriétés mécaniques significativement différentes. De plus, la valeur de la ténacité peut être fortement influencée par la position d'un défaut. Aussi, lorsqu'un défaut est détecté dans un assemblage soudé trois attitudes peuvent être envisagées :

- Le conserver en l'état en continuant à exploiter le matériel
- Le réparer, sachant qu'une réparation peut être à l'origine d'un autre défaut encore plus sévère, et
- Remplacer la partie défectueuse.

Tout l'avantage de l'essai COD réside dans la possibilité de déterminer la taille d'une indication maximum admissible n'entraînant pas le ruine de l'assemblage en service et ce, dans un contexte précis.

D'autre part, les essais COD peuvent contribuer à l'obtention de garantie de tenue en service sans nécessité d'effectuer un traitement thermique après soudage (TTAS) souvent imposé par les codes de construction à partir d'une certaine épaisseur soudée pour diminuer le niveau de contraintes induits dans l'ouvrage pendant sa construction. Par exemple, les essais COD pourraient

permettre de qualifier l'emploi d'acier thermo-mécanique dans la réalisation d'équipements sous pression brut de soudage quelle que soit l'épaisseur soudée (les aciers thermo-mécaniques voient leurs propriétés mécaniques dégradées après TTAS).

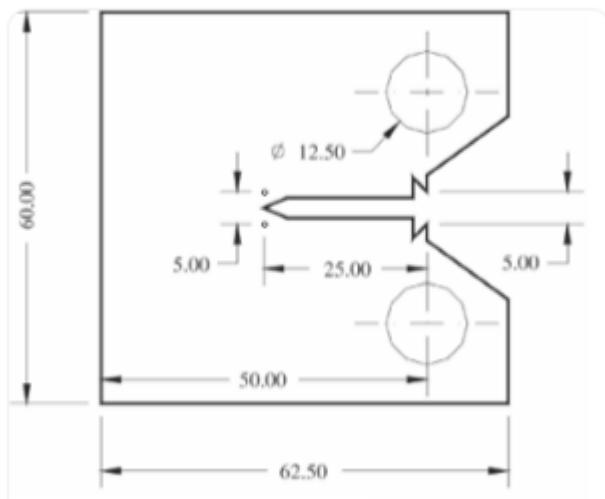
Il existe différentes méthodes d'analyse de nocivité, basées sur des méthodes développées pour des structures homogènes et adaptées au cours de ces dernières années aux assemblages soudés.

Parmi les plus connues on peut citer :

- la méthode R6 modifiée (méthode des deux critères),
- la méthode ETM-MM (Engineering Treatment Model for Mismatch Welds),
- la méthode EMM (Equivalent Material Method),
- la recommandation PD 6493 du British Standard, intitulée "Guidance on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures".

Une fois établie la taille maximum admissible de l'indication, celle-ci demeure une indication pouvant éventuellement faire l'objet d'un suivi et, d'autre part, toute indication de taille supérieure à cette limite sera cataloguée comme un défaut à corriger.

### L'éprouvette COD



### Le mismatching

Les différences de caractéristiques mécaniques entre le métal de base (MB), la zone fondue (ZF) et la zone affectée thermiquement (ZAT) peuvent invalider les résultats obtenus en COD. Ces différences peuvent être mises en évidence, en

première approximation, par des filiations de dureté dans les différentes zones voire complétées par des essais mécaniques.

Le « mismatching » s'exprime par le rapport entre la limite d'élasticité de la ZAT et celle du MB. Il se note «  $M$  ».

Quand  $M$  est supérieur à 1 on parle d'over-matching et dans le cas contraire d'under-matching.

La détermination de la ténacité de la zone fondue est influencée par l'effet de mismatching, la largeur de la ZF par rapport à celle de l'éprouvette, le mode de chargement (flexion ou traction), la position de la pointe de la fissure par rapport au cordon, l'évolution de la plasticité dans le ligament.

Par exemple, dans le cas de l'overmatching la plasticité se développer et rester confinée dans le métal le plus mou. Actuellement les codes ne tiennent pas compte de l'effet de mismatching. Ils considèrent le joint soudé comme un matériau homogène prenant en compte les caractéristiques les plus pénalisantes parmi celles constituant la soudure. Cela conduit en général à des résultats conservatifs.