

III. MECANIQUE LINEAIRE ELASTIQUE DE LA RUPTURE

La rupture est un problème auquel l'homme aura à faire face aussi longtemps qu'il construira des édifices ou fabriquera des structures. Ce problème est actuellement plus crucial avec le développement de structures complexes lié au progrès technologique. Les avancées dans la connaissance de la mécanique de la rupture permettent aujourd'hui et plus précisément de puis le milieu du 20^e siècle, de mieux prévenir le risque de rupture.

Cependant, beaucoup de mécanismes de rupture sont encore mal connus notamment lorsqu'on utilise de nouveaux matériaux ou de nouveaux procédés. Le coût des ruptures catastrophiques représente, d'après une étude économique de début des années 80, près de 4% du PNB dans les pays industriels développés. On pourrait réduire ce coût d'environ 30% si on appliquait correctement les concepts connus de la mécanique de la rupture et de 25% supplémentaires par le développement des recherches dans le domaine de la rupture. [10]

On distingue deux catégories de rupture des structures:

- soit une négligence dans la conception, dans la construction ou dans l'utilisation de la structure
- soit l'utilisation d'un nouveau matériau ou d'un nouveau procédé, qui peut provoquer une rupture inattendue.

Dans le premier cas, le risque de rupture peut être évité dès lors que la structure est bien dimensionnée avec un choix de matériaux adaptés et que les chargements sont correctement évalués.

Dans le deuxième cas, la prévention de la rupture est plus délicate. Lorsqu'on utilise un nouveau matériau ou un nouveau procédé, il y a souvent un certain nombre de facteurs que le concepteur ne maîtrise pas toujours car la mise en œuvre de nouvelles techniques, bien qu'elle procure des avantages, conduit inévitablement à des problèmes potentiels.

Un exemple bien connu du deuxième cas est la rupture de ce qu'on appelait les bateaux de la liberté pendant la deuxième guerre mondiale. Ces bateaux, dont la coque était assemblée par soudage et non par rivetage, coûtaient moins chers et étaient fabriqués plus rapidement. Ce changement de procédé de fabrication qui constituait un progrès indéniable, conduisait cependant à des ruptures catastrophiques qui se développaient dans les joints de soudure. [10]

Aujourd'hui, la plupart des bateaux sont assemblés par soudage mais le progrès des connaissances et l'utilisation des doubles coques en aciers plus adaptés permettent de mieux maîtriser ce risque de rupture.

III.1. DEFINITION :

Le mécanisme de rupture est un processus mécanique produisant au sein d'un matériau une discontinuité locale de matière appelée *fissure*. Il est usuel de parler d'initiation de la rupture et de propagation de la rupture. Par rapport au facteur temps.

On distingue deux types de rupture :

- rupture fragile : la rupture fragile est caractérisée par l'absence de déformation plastique macroscopique, et donc par la propagation très rapide possible des fissures (consommation d'énergie faible).

- rupture ductile : la rupture ductile semble liée essentiellement à la présence d'inclusion ou de précipités. Dans ce mode de rupture, la déformation plastique macroscopique est en général importante (consommation d'énergie grande).

III.2. MODE DE RUPTURE :

La propagation d'une fissure peut se faire suivant trois modes de déplacement des faces de la fissure dans un plan défini. Elle peut aussi se faire suivant des modes mixtes qui les combinent tous les trois. La figure (III.1) illustre les trois modes de rupture.

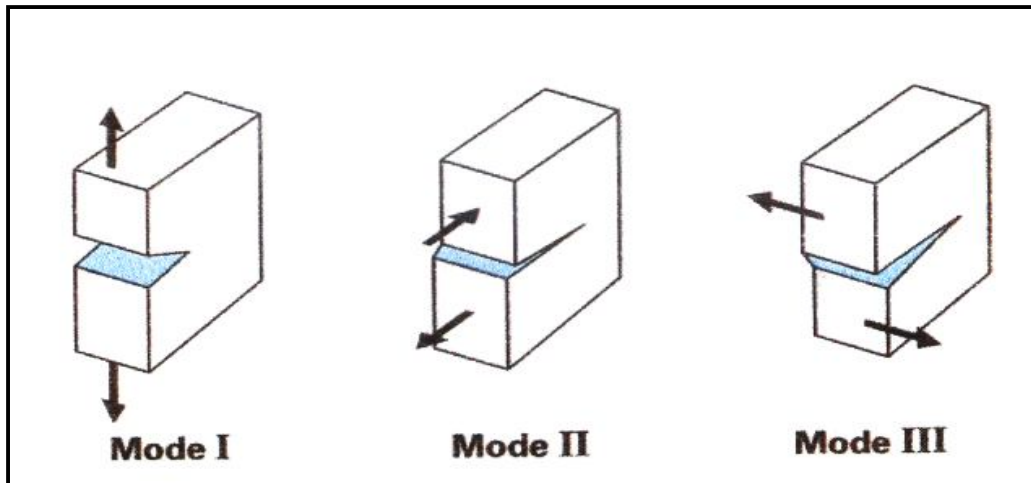


Fig. (III.1) : Schématisation des trois modes de rupture

- Mode I : les surfaces de la fissure se déplacent perpendiculairement l'une par rapport à l'autre, c'est le mode par ouverture.
- Mode II : les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan, et dans une direction perpendiculaire au front de fissure. Il est appelé aussi mode par glissement droit.
- Mode III : les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au front de fissure, c'est le mode de glissement vis.

Le mode I est considéré comme le plus dangereux en raison de l'ouverture par traction qui favorise l'initiation et la propagation des fissures. C'est le type le plus répandu dans le cas des matériaux fragiles. Par conséquent, il est le plus étudié.

III.3. MESURE DE LA TENACITE :

La mécanique de la rupture prend en considération la présence de défaut au sein du matériau, et propose d'étudier son influence sur le comportement mécanique durant le chargement, ainsi que son évolution au cours du chargement. Elle permet de quantifier le rupture et de décrire les phénomènes de rupture des matériaux.

Griffith (1920) posa les bases de cette théorie en se basant sur les ruptures soudaines dans le domaine élastique, le principe s'énonce en supposant que la rupture brutale provient d'une instabilité de la fissure qui se produit lorsque l'énergie potentielle mécanique libérée par l'extension d'une fissure dépasse l'énergie absorbée par cette extension. [8]

III.3.1. Facteur d'intensité des contraintes :

Lorsqu'un corps fissuré est sollicité par un champ de force il se produit au voisinage de la fissure une très grande concentration de contraintes, dans ces conditions qui représentent d'un point de vue pratique la réalité des pièces et structures. Les théories de l'élasticité permettent d'exprimer la contrainte proche du front de fissure par une série de Taylor en coordonnées polaires:

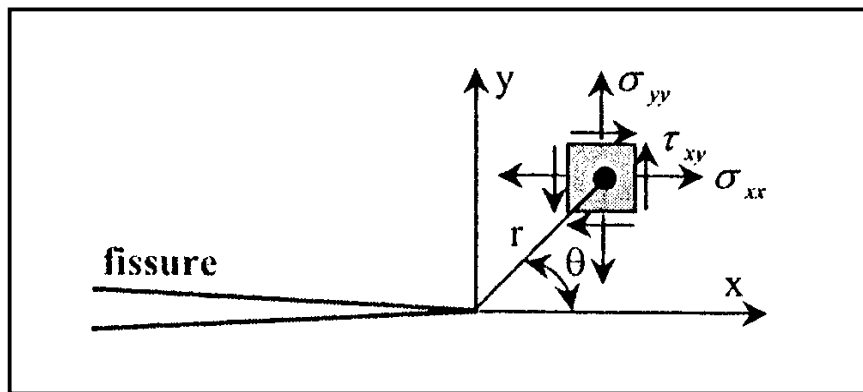


Fig. (III.2) : Détermination des axes (x, y) et des coordonnées (r, θ) au voisinage de l'extrémité d'une fissure

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \underbrace{\dots + \dots + \dots}_{\text{négligeable}} \quad \text{III.1}$$

K_I représente le facteur d'intensité de contraintes en mode I définis par IRWIN [5].

IRWIN a cherché une expression pouvant définir le champ de contraintes au voisinage de la fissure en tenant compte de la zone plastique par l'accroissement de la fissure. Il suggère que la fissure devient instable et se propage lorsque le facteur d'intensité de contraintes K_I atteint une valeur critique K_{IC} appelée ténacité qui caractérise quantitativement la résistance d'un matériau à la propagation brutale d'une fissure en mode I. Il énonça ainsi le critère de contrainte par la relation:

$$K_{IC} = \sigma_c \cdot Y \cdot \sqrt{a} \quad \text{III.2}$$

Y : Représente un coefficient de forme, c'est une fonction géométrique de l'éprouvette et de la longueur de fissure, il est donné pour les principales pièces par des tables. Dans le cas de la flexion trois points :

$$Y = 1.93 - 3.07\left(\frac{a}{W}\right) + 14.53\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 25.11\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 25.80\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad \text{III.3}$$

III.3.1.1. Détermination expérimentale de K_{IC} :

L'essai consiste à solliciter en traction ou en flexion des éprouvettes géométriquement identiques comprenant des fissures de longueurs différentes, les charges de rupture relevées serviront au calcul de K_{IC} . Dans la mesure ou l'on veut représenter graphiquement la courbe qui traduit l'évolution de K_{IC} et sera en fonction de a/w .

III.3.2. Taux de restitution d'énergie :

On se basant sur des considérations thermodynamiques GRIFFITH a mis en évidence le fait que la rupture est un phénomène consommateur d'énergie, car pour augmenter la surface d'une fissure dans un matériau il faut fournir un certain travail. Le bilan énergétique du système composé des forces extérieures et du corps fissuré s'écrit:

$$\frac{dW}{dA} = \frac{dU}{dA} + \frac{dT}{dA} \quad \text{III.4}$$

W : Travail des forces extérieures

U : l'énergie élastique stockée dans les matériaux

A : surface de la fissure

T : la somme de toutes les énergies dissipées de façon irréversible

L'énergie cinétique étant supposée nulle (situation quasi-statique). De cette relation découle l'énergie nécessaire à la création de surface (G) :

$$\frac{d}{dA}(W - U) = \frac{dT}{dA} = G \quad \text{III.5}$$

Elle est appelée taux de restitution d'énergie. L'amorçage de la fissure se caractérise par une valeur critique du taux de restitution d'énergie notée G_{IC} d'où le critère de rupture:

$$G \geq G_{IC} \quad \text{III.6}$$

III.3.2.1. Méthode des compliances pour la mesure de G_{IC} : [5]

Pour un corps fissuré, le taux du restitution d'énergie par unité de surface est donné par :

$$G = \frac{dU}{dA} \quad \text{III.7}$$

Sachons que :

U: énergie du système

A: surface de la fissure $A = B \cdot a$

B: largeur, a : longueur de fissure

Ce qui donne:

$$G = \frac{1}{B} \frac{dU}{da} \quad \text{III.8}$$

Sur une série d'éprouvettes identiques et fissurées avec différentes longueurs de fissures on mesure l'évolution de la charge en fonction du déplacement.

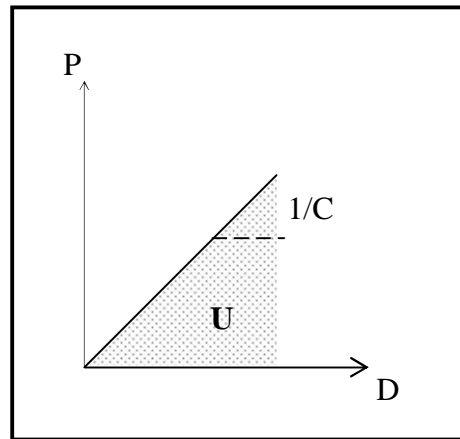


Fig. (III.3) : courbe typique charge déplacement

C: représente la compliance du système,

$$C = \frac{D}{P} \quad \text{III.9}$$

Ce qui nous donne une méthode expérimentale basée sur la forme :

$$G = \frac{1}{2} \cdot \frac{p^2}{B} \cdot \frac{dC}{da} \quad \text{III.10}$$

Une fois les compliances de chaque éprouvette calculé, on trace la variation de C en fonction de a, figure (III.4)

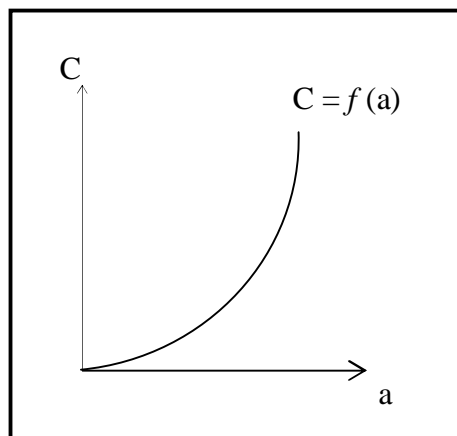


Fig. (III.4) : Evolution de la compliance en fonction de la longueur de fissure

On détermine par interpolation la relation $C = F(a)$, pour aboutir à relation de $\frac{dC}{da}$ ainsi nous obtenons différentes valeurs de G ce qui va permettre de tracer son évolution en fonction des différentes longueurs de fissures, figure (III.5).

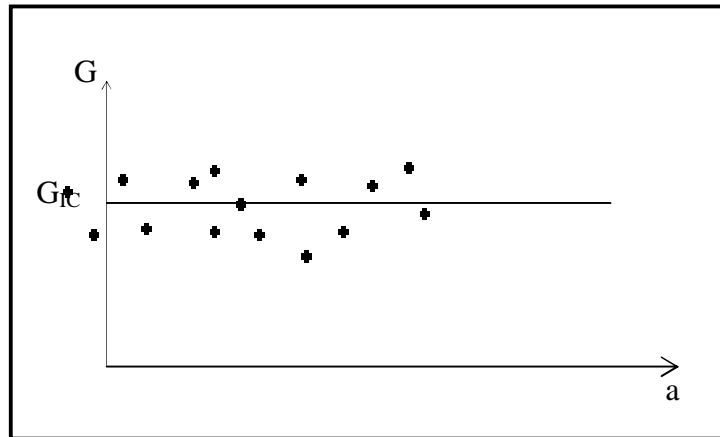


Fig. (III.5) : Evolution du taux de restitution d'énergie en fonction des longueur de fissure

III.3.2.2. Méthode WILLIAMS pour la mesure de G_{IC} : [27] [5]

Le paramètre intrinsèque G_{IC} mesuré en choc des matériaux à été estimé par la méthode de C. E. TURNER et J. G. WILLIAMS en utilisant les technique de la mécanique linéaire élastique de la rupture. En cassant en choc des éprouvettes de différentes longueurs d'entailles, on peut tracer la droite $U = f(B, W, Y)$:

$$U = G_{IC} \times B \times W \times Y \quad \text{III.11}$$

Dont la pente G_{IC} représente le taux de restitution d'énergie critique du matériau.

U est l'énergie perdue par le marteau et Y un facteur de calibration qui a été tabulé par les même auteurs. Il dépend de la profondeur d'entaille, des dimensions de l'éprouvette et de la distance entre appuis. Figure (III.6) :

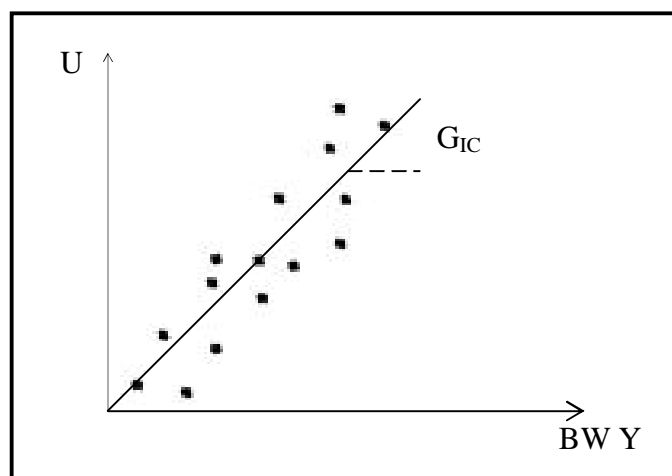


Fig. (III.6) : Représentation graphique de l'énergie en fonction de la géométrie

III.4. LIMITES DE VALIDITES :

Quand un corps fissuré est soumis à un chargement, la concentration de contraintes en fond de fissure crée une plastification localisée, l'applicabilité des méthodes de M. L. E. R dépend en premier lieu de la taille de cette zone plastique et exige que celle-ci reste petite par rapport à la longueur de fissure et aux dimensions du corps ce qui assurera la non perturbation de la distribution élastique des contraintes [5].

IRWIN et ORWAN [8] mettent l'hypothèse de la formation de la zone plastique, Figure (III.7), et propose les corrections suivantes :

$$- rp = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2 \text{ cas des contraintes planes}$$

$$- rp = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2 \text{ cas des déformations planes}$$

rp : correction plastique

σ_e : contrainte élastique

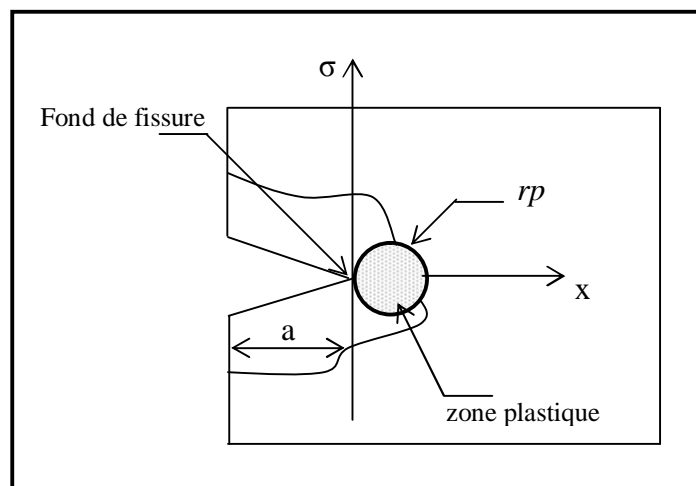


Fig. (III.7) : Zone plastique en fond de fissure représentation d'IRWIN

Ceci qui impose aux pièces des dimensions de taille très importante par rapport aux dimensions de la zone plastique. La norme ASTM donne les dimensions de l'entaille de la largeur et de l'épaisseur de l'éprouvette :

$$a, B \geq 2,5 \left[\frac{K_{IC}}{\sigma_e} \right]^2 \quad \text{et} \quad W \geq 5 \left[\frac{K_{IC}}{\sigma_e} \right]^2 \quad \text{III.12}$$

Dans le cas des polymères WILLIAMS propose :

$$W \geq 6,25 \left[\frac{K_{IC}}{\sigma_e} \right]^2 \quad \text{III.13}$$

Dans le cas des composites, on ne peut parler de zone plastique mais plutôt de zone endommagée dont les dimensions sont beaucoup plus importantes que la zone plastique, ce qui représente une limitation pour la M. L. E. R. Pratiquement la zone endommagée n'est que la propagation des fissures donc elle n'est pas le siège de dissipation d'énergie s'opposant au développement de la rupture comme dans le cas des métaux [8].

Dans le cas où la zone endommagée prend des dimensions importantes par rapport à celles de la pièce, K_C et G_C ne peuvent représenter des paramètres qui décrivent la résistance à la fissuration du matériau qui varie avec l'augmentation de la fissure. Cette instabilité dépend de la géométrie de la pièce figure (III.8).

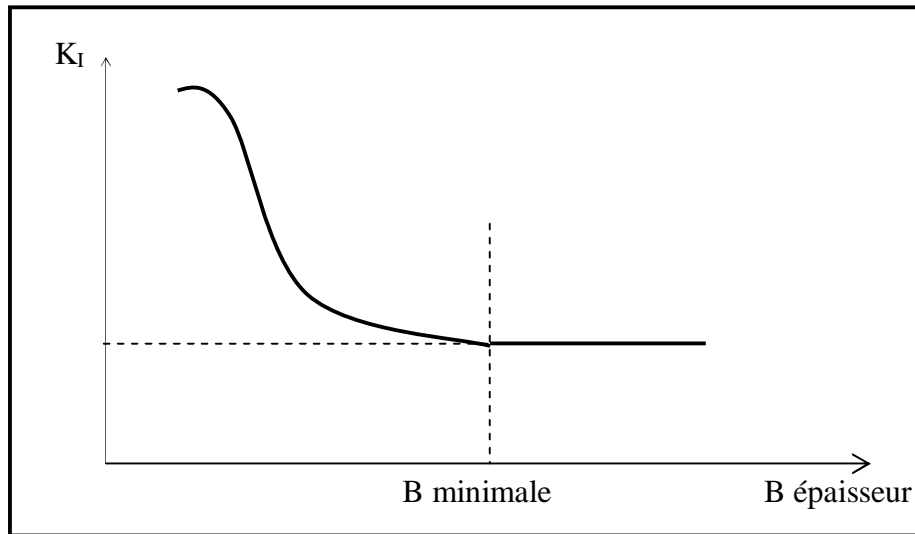


Fig. (III.8) : Evolution de la résistance à la fissuration en fonction de l'épaisseur

III.5. LE CONCEPT DES COURBES R :

L'instabilité de la résistance à la fissuration est décrite selon une courbe unique appelée courbe (R) figure (III.9). Cette courbe représente un paramètre intrinsèque, elle permet de déterminer le (K) instable ou le (G) instable. L'utilisation des courbes (R) permet de distinguer la phase de propagation stable et instable de la rupture.

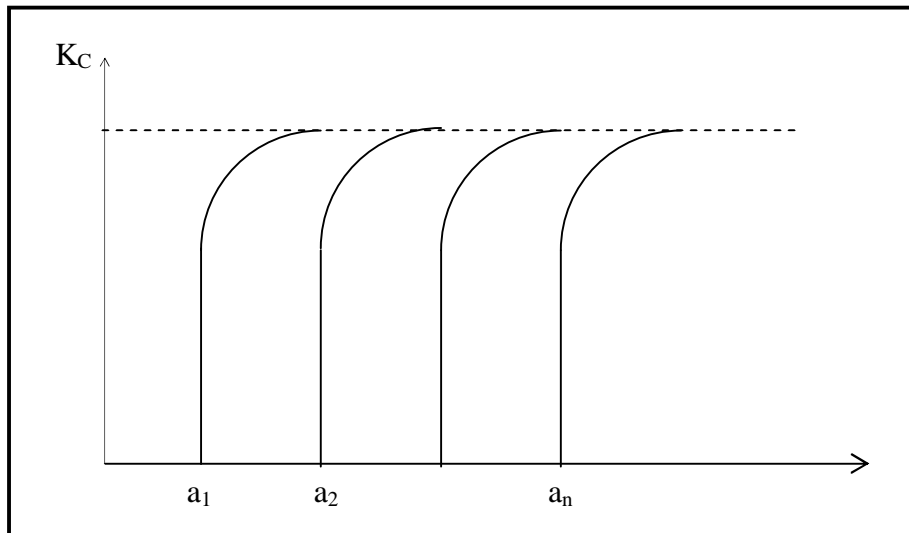


Fig. (III.9) : Représentation graphique de l'évolution de la résistance à la fissuration en fonction de la longueur de fissure

On distingue la propagation stable et instable de la rupture, les courbes (R) peuvent être tracées soit en énergie G_R soit en facteur de contraintes K_R .

Le traçage d'une courbe R nécessite la connaissance en tout instant de la longueur de fissure propagée et de la charge correspondante.

En pratique la difficulté réside en la mesure de la longueur instantanée de la fissure, cette longueur effective instantanée est donnée par l'expression suivante: [19]

$$a_{\text{eff}} = a_0 + a_{\text{st}} \quad \text{III.14}$$

a_0 : longueur initiale de la fissure

a_{st} : longueur de la propagation stable de la fissure mesurée.

III.6. METHODE EXPERIMENTALE POUR TRACER LES COURBES R :

Pour tracer la courbe R, il faut connaître à tout instant la longueur de fissure évoluant en fonction de la charge. Pour ce faire la méthode expérimentale utilisée est celle des compliances.

Cette méthode consiste à solliciter en traction des éprouvettes identiques avec différentes longueurs de fissure, on enregistre la charge en fonction du déplacement.

La mesure de la pente de la partie linéaire pour les différentes longueurs de fissures croissantes permet d'établir les différentes longueurs de fissures figure (III.10) :

$$C = f\left(\frac{a}{W}\right) \quad \text{III.15}$$

La méthode de la compliance consiste à mesurer la pente de la droite passant par l'origine en un point de chargement P_i de la courbe charge - déplacement.

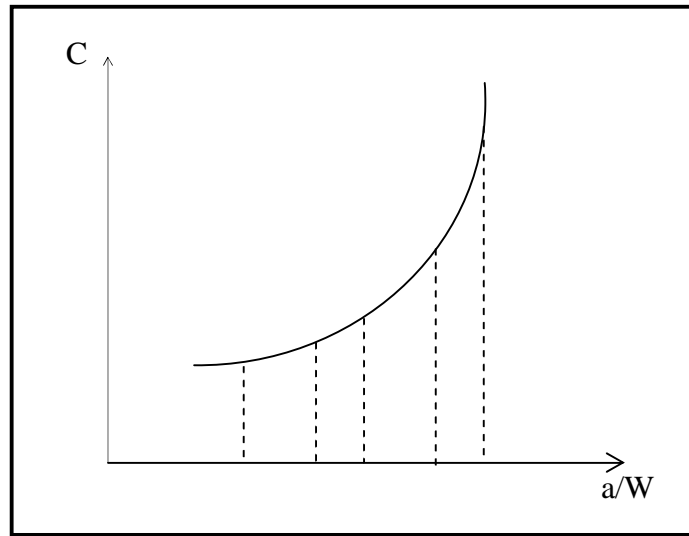


Fig. (III.10) : Courbe C en fonction de a/W

Connaissant les (C_i) on peut trouver les (a_i) correspondantes, ce qui permettra de tracer les courbes R soit en énergie soit en contraintes en fonction de la longueur de propagation de fissures. Figure (III.11).

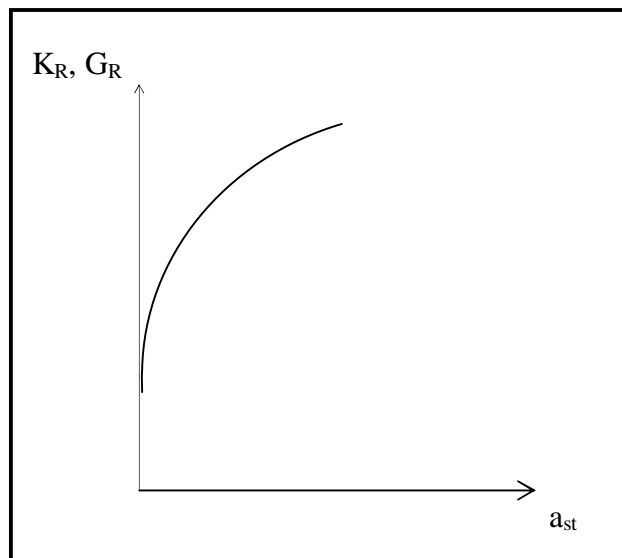


Fig. (III.11) : Courbe (R) unique indépendante de la longueur de fissure initiale