

1- Diagrammes d'équilibre: Notions et généralités

2- Diagrammes d'équilibre: Microstructure

3- Diagrammes d'équilibre: Alliages fer-carbone

4- Transformations isothermes et anisothermes

5- Traitements thermiques, thermo-mécaniques et chimiques
des alliages

6- Diffusion et durcissement structurale des alliages

7- Corrosion: Mécanismes et préventions

8- Rupture: Notions et généralités

Rupture

Notions et généralités

Lamine HATTALI

IUT Cachan – 1^{ère} année Sciences des Matériaux

✉ lamine.hattali@u-psud.fr



Introduction

❑ Les liberty ships

- Pendant la seconde guerre mondiale, les Etats-Unis ont construit 2700 "liberty ships", des cargos de 134 mètres et 10000 tonnes. Pour faire face à l'urgence, les méthodes de production ont été revues : il fallait environ un mois pour construire un bateau, le record étant pour le "SS Patrick Henry", construit en 4 jours et 15h.
- 362 de ces bateaux ont connus des problèmes plus ou moins grave de fissuration affectant tantôt le pont, tantôt la coque. Plusieurs d'entre eux furent perdus en raison de ruptures complètes.
- Il semble bien que les ruptures ont été produites par le fait qu'on a remplacé le rivetage par le soudage, et que le matériau est devenu fragile.



Introduction

❑ Le Titanic

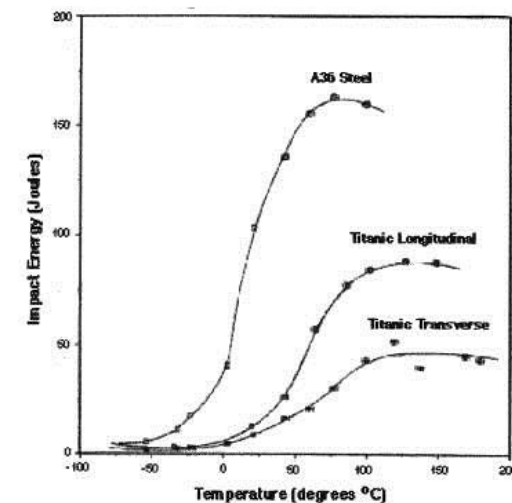
Deux théories ont été avancées pour expliquer le naufrage rapide:

- Faiblesse de la coque
- Faiblesse des rivets

- Limites d'élasticité du matériau est correcte

	Titanic	SAE 1020
Yield Strength	193.1 MPa	206.9 MPa
Tensile Strength	417.1 MPa	379.2 MPa
Elongation	29%	26%
Reduction in Area	57.10%	50%

- Forte proportion de sulfure → matériau fragile
- Essais de résilience à 0°C montrent:
 - A36 (S255) –Acier récent : plastification avant rupture
 - Titanic: résilience plus faible



Définitions

Introduction

Définitions

La rupture fragile

Éléments de mécanique de la rupture

Énergie de déformation

La théorie de Griffith

La rupture ductile

Exemple

Ce qu'il faut retenir

- ❑ La **rupture** est la séparation d'un matériau en deux ou plusieurs parties, sous l'action d'une contrainte. Cette séparation se produit à plus ou moins grande vitesse par *propagation de fissures* existant dans le matériau
- ❑ La rupture est donc fortement influencée par la présence de défauts internes comme les microfissures, les pores, les inclusions de particules fragiles et par la présence d'entailles (macrofissures) résultant de défauts de fabrication ou de conception
- ❑ Tous les matériaux contiennent un certain nombre de microfissures qui deviennent instables et conduisent à la rupture lorsque la force appliquée dépasse une valeur critique. Pour comprendre ce comportement, il faut analyser en détail les phénomènes se produisant à la pointe d'une fissure.

Introduction

Définitions

La rupture fragile

Éléments de mécanique
de la rupture

Énergie de déformation

La théorie de Griffith

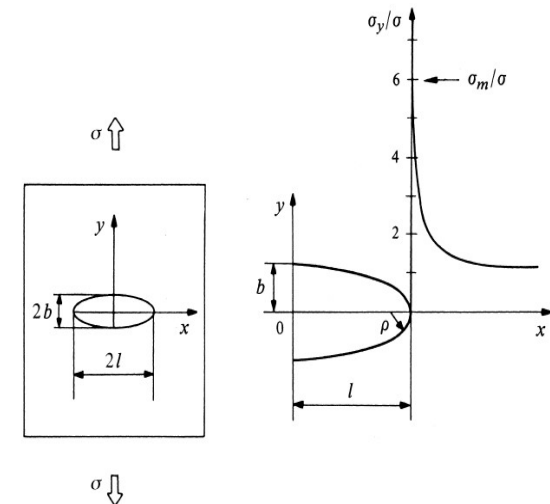
La rupture ductile

Exemple

Ce qu'il faut retenir

La rupture fragile

- ❑ L'étude du comportement d'une fissure sous contrainte constitue la base de la *mécanique de la rupture*
- ❑ Nous analyserons ici le phénomène de propagation d'une fissure dans un matériau idéalement fragile
- ❑ Fissures internes ou superficielles qui constituent des amorces de rupture
- ❑ Ces fissures concentrent les contraintes qui atteignent localement une valeur supérieure à la contrainte appliquée
- ❑ la contrainte maximale σ_m parallèle à σ se situe à l'extrémité du grand axe $2l$ de la fissure elliptique



$$\sigma_m = \sigma \left(1 + 2 \frac{l}{b} \right)$$

Introduction

Définitions

La rupture fragile

Éléments de mécanique
de la rupture

Énergie de déformation

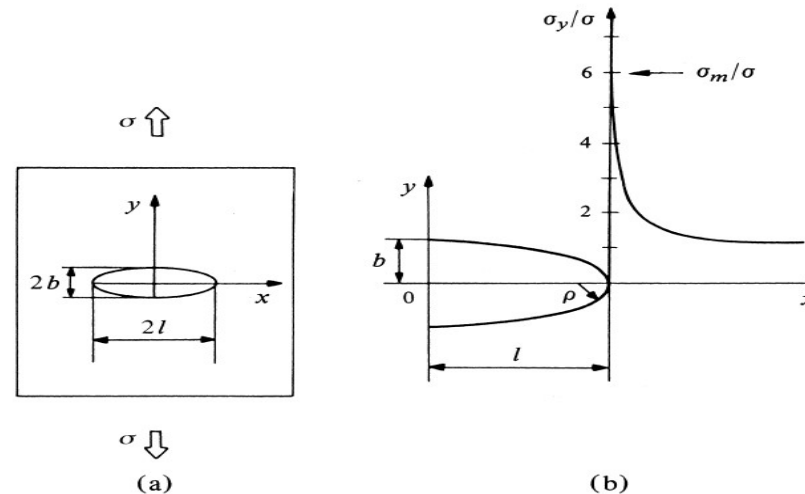
La théorie de Griffith

La rupture ductile

Exemple

Ce qu'il faut retenir

La rupture fragile



- ❑ L'accroissement d'intensité des contraintes ne dépend que du rapport l/b . La contrainte locale peut donc atteindre des valeurs très élevées dans le cas d'une fissure longue et aigüe (rapport l/b élevé). Dans le cas d'un trou circulaire, $l = b$ et $\sigma_m = 3\sigma$.
- ❑ Il est possible d'exprimer le coefficient de *concentration de contrainte* σ_m/σ en introduisant le rayon de courbure $\rho = b^2/l$

$$\frac{\sigma_m}{\sigma} = 1 + 2 \left[\frac{l}{\rho} \right]^{0,5}$$

La rupture fragile

Introduction

Définitions

La rupture fragile

*Éléments de mécanique
de la rupture*

Énergie de déformation

La théorie de Griffith

La rupture ductile

Exemple

Ce qu'il faut retenir

- ❑ La propagation d'une fissure peut se produire de deux façons:
 - Par propagation stable, c'est-à-dire par application à la pointe de la fissure de la contrainte juste nécessaire pour maintenir la propagation de la fissure;
 - Par propagation instable, caractérisée par la propagation brutale et catastrophique de la fissure lorsque la contrainte locale σ_y dépasse une valeur critique σ_c
- ❑ Deux phénomènes interviennent simultanément lors de la propagation d'une fissure:
 - Relaxation (relâchement) des contraintes autour de la fissure, la partie fissurée n'ayant pas de résistance mécanique
 - Création de nouvelles surfaces de rupture

Éléments de mécanique de la rupture

Introduction

Définitions

La rupture fragile

**Éléments de mécanique
de la rupture**

Énergie de déformation

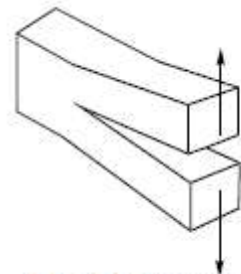
La théorie de Griffith

La rupture ductile

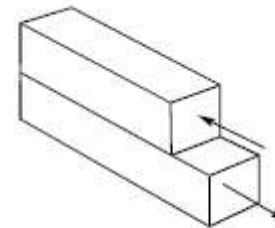
Exemple

Ce qu'il faut retenir

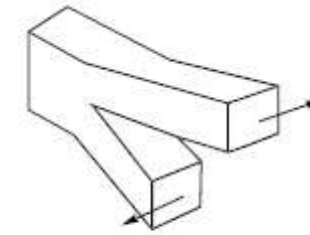
- ❑ Lors de la rupture, il se produit une libération brutale de l'énergie élastique accumulée qui se transforme instantanément en d'autres formes d'énergie: énergie cinétique, énergie de surface, chaleur, etc.
- ❑ Tout déplacement des lèvres d'une fissure sous l'action d'un champ de contraintes complexes se ramène à une combinaison des trois modes principaux:



Mode I: ouverture



Mode II: glissement



Mode III: déchirement

Introduction

Définitions

La rupture fragile

Éléments de mécanique
de la rupture

Énergie de déformation

La théorie de Griffith

La rupture ductile

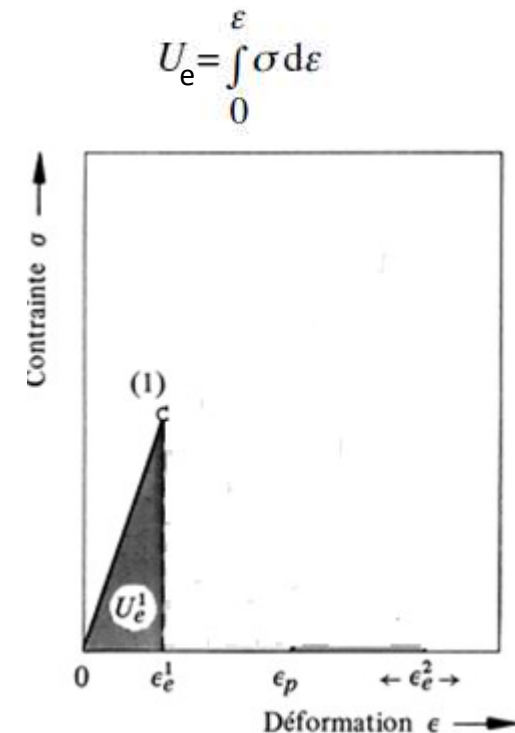
Exemple

Ce qu'il faut retenir

Énergie de déformation à la rupture

- L'énergie de déformation élastique volumique U_e stockée dans un matériau ayant un comportement élastique linéaire est égale à la surface du triangle $(0 - (1) - \epsilon_e^1)$.

$$U_e^1 = 0,5E(\epsilon_e^1)^2 = 0,5\sigma_e\epsilon_e = 0,5\frac{\sigma_e^2}{E}$$



Introduction

Définitions

La rupture fragile

Éléments de mécanique
de la rupture

Énergie de déformation

La théorie de Griffith

La rupture ductile

Exemple

Ce qu'il faut retenir

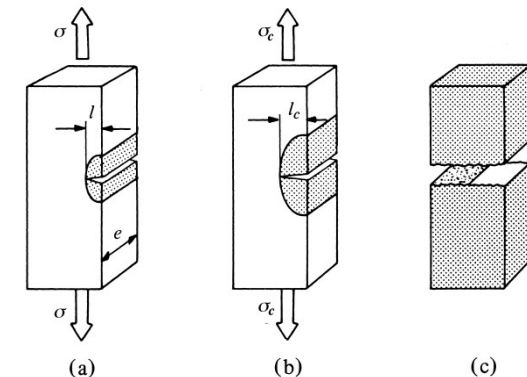
La théorie de Griffith

- La *contrainte critique* σ_c qui ne peut être dépassée dans un matériau fragile contenant les fissures internes de longueur $2l$ ou de fissures superficielles de longueur l :

$$\sigma_c = \left[\frac{2\gamma E}{\pi l} \right]^{0,5} = \left[\frac{EG_c}{\pi l} \right]^{0,5}$$

γ : énergie de *surface*

$G_c = 2\gamma$: énergie de propagation de la rupture



- Cette théorie postule l'existence de fissures dans les matériaux. *Toute contrainte appliquée qui dépasse la contrainte critique σ_c provoque une propagation rapide des fissures et entraîne la rupture.*

Introduction

Définitions

La rupture fragile

Éléments de mécanique

de la rupture

Énergie de déformation

La théorie de Griffith

La rupture ductile

Exemple

Ce qu'il faut retenir

La théorie de Griffith

- On peut définir un paramètre important de la mécanique de la rupture: le *facteur d'intensité des contraintes* K :

$$\sigma (\pi l)^{0,5} = (EG_c)^{0,5}$$

$$K = \sigma (\pi l)^{0,5}$$

- La rupture intervient lorsque le facteur d'intensité des contraintes K atteint la *valeur critique* K_c

$$K_c = \sigma_c (\pi l)^{0,5} = (EG_c)^{0,5}$$

La théorie de Griffith

- ❑ On mesure K_c par un essai normalisé sur une éprouvette contenant une fissure préexistante de longueur a . K_c est un autre paramètre qui permet de mesurer la ténacité d'un matériau.
- ❑ Connaissant K_c , les valeurs de G_c peuvent être déterminées
- ❑ La propagation d'une fissure est d'autant plus difficile que E et G_c sont élevés. Ce seront donc les matériaux ductiles à module d'élasticité élevé (métaux) qui seront le plus tenaces

Matériaux	G_c kJm ⁻²	K_C MNm ^{-3/2}	R_m MPa
Verres minéraux	0,01	0,7-0,8	30-90
Fibres de verre	0,01	0,7	300-3000
Alumine (Al ₂ O ₃)	0,02	3-5	10 000
Magnésie (MgO)	0,04	3	5000
Carbure de silicium (SiC)	0,05	3	3000
Polyester, époxy	0,1	0,3-0,5	50-90
Polyamide 6	2-4	3	100
Polypropylène (PP)	8	3	30
Polyéthylène (PE)	6-7	1-2	10-40
Polystyrène (PS)	2	2	35-80
Poly(méthacrylate de méthyle (PMMA))	0,3-0,4	0,9-1,4	60-80
Bois	10	11-13	40-80
Acier	100	140	400
Acier inoxydable	10-100	50	150
Cuivre, aluminium purs	100-1000	100-350	200-400

Introduction

Définitions

La rupture fragile

Éléments de mécanique

de la rupture

Énergie de déformation

La théorie de Griffith

La rupture ductile

Exemple

Ce qu'il faut retenir

Introduction

Définitions

La rupture fragile

Éléments de mécanique
de la rupture

Énergie de déformation

La théorie de Griffith

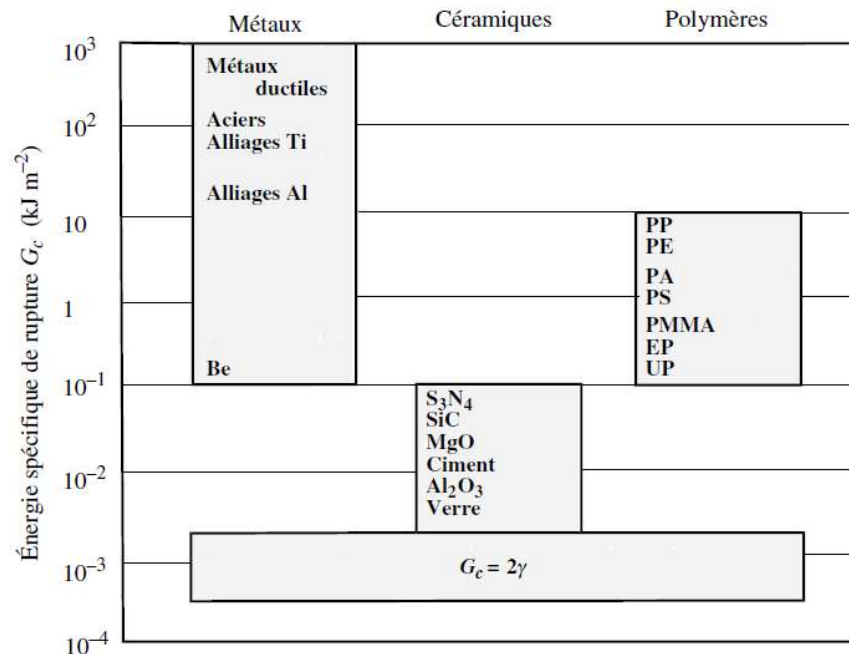
La rupture ductile

Exemple

Ce qu'il faut retenir

La rupture ductile

- ❑ Rupture fragile: l'énergie de propagation de la fissure correspond approximativement au double de l'énergie de surface.
- ❑ Dans tous les autres cas, l'énergie de propagation de la fissure est augmentée de manière plus ou moins importante par d'autres processus de dissipation d'énergie.



Introduction

Définitions

La rupture fragile

Éléments de mécanique
de la rupture

Énergie de déformation

La théorie de Griffith

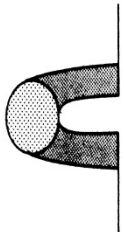
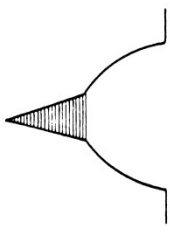
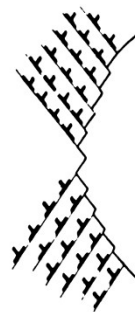
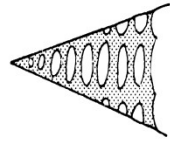
La rupture ductile

Exemple

Ce qu'il faut retenir

La rupture ductile

- ❑ Dans le cas des *métaux*, c'est le glissement des dislocations qui est le mécanisme principal de dissipation de l'énergie.
- ❑ La déformation plastique au fond de la fissure entraîne une augmentation du rayon de courbure et une diminution du facteur de concentration des contraintes. De plus, il se forme *une zone de déformation plastique* plus ou moins grande a la pointe de la fissure

Types de rupture		
Fragile	Ductile	
(a)		
(b)		
Rupture des liaisons primaires	Glissement	Microfissuration
	Métaux	Polymères

Introduction

Définitions

La rupture fragile

Éléments de mécanique
de la rupture

Énergie de déformation

La théorie de Griffith

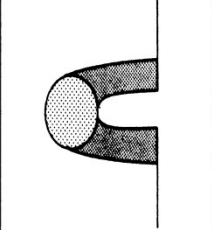
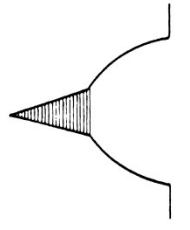
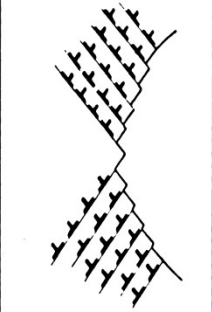
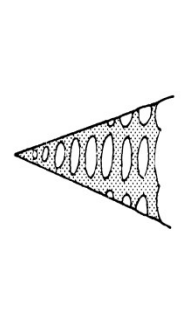
La rupture ductile

Exemple

Ce qu'il faut retenir

- ❑ Pour les *polymères*, il existe un mécanisme particulier de dissipation d'énergie qui fait intervenir le phénomène de *microfissuration (crazing)*
- ❑ A l'extrémité de la fissure, il se forme une languette de fibrilles de chaînes étirées qui freinent la propagation de la fissure dans le matériau. La longueur de ces fibrilles augmente à mesure que les lèvres de la craquelure s'écartent par extraction progressive des chaînes de polymère non encore déformé

La rupture ductile

Types de rupture		
Fragile	Ductile	
(a)		
(b)		
Rupture des liaisons primaires	Glissement	Microfissuration
	Métaux	Polymères

Introduction

Définitions

La rupture fragile

Éléments de mécanique

de la rupture

Énergie de déformation

La théorie de Griffith

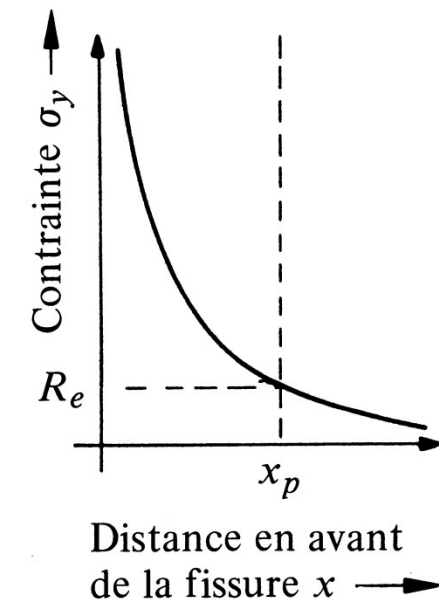
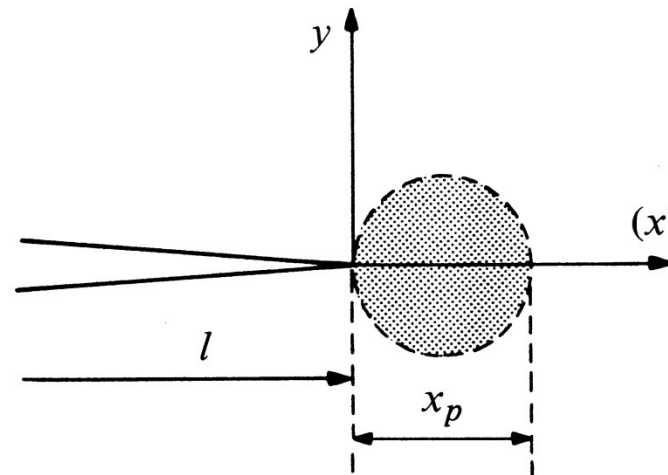
La rupture ductile

Exemple

Ce qu'il faut retenir

La rupture ductile

- La zone de déformation plastique qui se forme au front de la fissure est induite par le *phénomène de concentration de contraintes* au voisinage de la pointe de la fissure qui engendre un mouvement des dislocations



La rupture ductile

- D'une manière générale, il est nécessaire de tenir compte de la déformation plastique qui se produit au moment de la rupture en additionnant une *énergie de déformation plastique* γ_p à l'énergie de surface γ

$$G_c = 2\gamma + \gamma_p$$

- Pour les matériaux ductiles, 2γ est négligeable vis-a-vis de γ_p

Introduction

Définitions

La rupture fragile

Éléments de mécanique

de la rupture

Énergie de déformation

La théorie de Griffith

La rupture ductile

Exemple

Ce qu'il faut retenir

Introduction

Définitions

La rupture fragile

Éléments de mécanique
de la rupture

Énergie de déformation

La théorie de Griffith

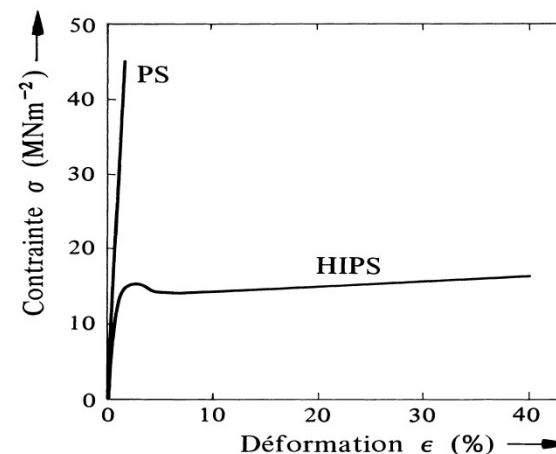
La rupture ductile

Exemple

Ce qu'il faut retenir

Exemple

- ❑ On peut *augmenter la ténacité des matériaux* en multipliant les possibilités d'absorption d'énergie par déformation plastique
- ❑ Un exemple est celui de l'augmentation de la ténacité des polymères vitreux comme le polystyrène par inclusion lors de la synthèse du polymère, de particules caoutchoutiques.
- ❑ Sous l'action d'un impact, les particules caoutchoutiques insérées dans la matrice vitreuse initient un réseau très dense de microfissures (*crazes*) qui absorbent l'énergie de l'impact. La présence des particules empêche la transformation des microfissures en fissures et bloque la rupture fragile du matériau.



Ce qu'il faut retenir

Introduction

Définitions

La rupture fragile

*Éléments de mécanique
de la rupture*

Énergie de déformation

La théorie de Griffith

La rupture ductile

Exemple

Ce qu'il faut retenir

- Définitions des trois modes de fissuration
- Concept de la théorie de Griffith
- Relation entre facteur d'intensité de contrainte et longueur de fissure
- Mécanismes de rupture fragile et ductile