

# Chapitre I : La rupture des matériaux - classification et faciès

## I. Introduction

La rupture d'un matériau ou d'une pièce mécanique correspond à la perte de sa continuité et donc de sa capacité à assurer sa fonction structurelle. Classiquement, la mécanique des milieux continus permet de décrire le comportement des matériaux sous sollicitation, en supposant que la matière est homogène et dépourvue de discontinuités. Cependant, lorsqu'une fissure ou un défaut est présent, cette approche rencontre une limite : la fissure introduit une singularité dans le champ des contraintes, qui ne peut plus être correctement décrit par la seule théorie continue.

C'est précisément pour répondre à cette difficulté qu'est née la mécanique de la rupture. Cette discipline combine la mécanique des milieux continus aux lois de comportement des matériaux tout en intégrant les conditions aux limites imposées par la présence d'une fissure. Elle vise à caractériser les mécanismes de propagation des fissures, à quantifier la résistance résiduelle d'une structure endommagée et à prévoir les modes de rupture associés.

L'étude de la rupture des matériaux présente ainsi un double intérêt. Sur le plan théorique, elle permet de mieux comprendre les mécanismes microscopiques et macroscopiques conduisant à la perte de cohésion du matériau. Sur le plan pratique, elle constitue un outil essentiel pour les ingénieurs, car la connaissance des différents types de rupture et de leurs faciès permet de classer les modes de défaillance, d'identifier l'origine d'un endommagement et d'améliorer la conception des structures mécaniques.

## II. Aperçu historique sur la rupture

L'étude de la rupture des matériaux ne date pas de l'ère moderne. Depuis toujours, les concepteurs et bâtisseurs ont cherché à éviter la destruction prématurée de leurs ouvrages. Les édifices encore debout issus de l'Égypte ancienne ou de l'Empire romain illustrent l'attention portée à la stabilité structurelle. Toutefois, les matériaux disponibles avant la Révolution industrielle (bois, pierre, brique et mortier) limitaient les possibilités. En raison de leur fragilité en traction, ces matériaux étaient majoritairement employés dans des configurations de **compression**. C'est pour cette raison que les structures monumentales antiques — pyramides, arcs, ponts et aqueducs — ont traversé les siècles.

Le véritable essor des structures capables de supporter des efforts de traction n'apparaît qu'au XIXe siècle, avec la généralisation de l'acier et la compréhension de ses propriétés mécaniques. Ce progrès marque le début de la conception moderne où la **mécanique de la rupture** devient incontournable.

### ✓ Premiers essais et concepts empiriques

Bien avant la formalisation de la discipline, Léonard de Vinci avait observé, lors d'expériences sur des fils métalliques, que la résistance à la traction décroissait avec la longueur du fil. Cette constatation montrait déjà que des défauts internes contrôlent la rupture : plus le volume sollicité est grand, plus la probabilité de contenir une fissure critique augmente.

### ✓ Griffith et la théorie énergétique (1920)

Alan A. Griffith franchit une étape décisive en 1920 avec une analyse fondée sur la thermodynamique. Il montra, en s'appuyant sur les travaux de Inglis sur la distribution des contraintes autour d'un trou elliptique, que la résistance des matériaux fragiles dépend de la taille des fissures internes. Selon la théorie de Griffith, une fissure se propage dès que l'énergie libérée par son extension est supérieure à l'énergie de création de nouvelles surfaces. Cette approche permettait enfin d'expliquer quantitativement pourquoi les matériaux fragiles comme le verre et la céramique cèdent à des contraintes bien inférieures à leur résistance théorique.

### ✓ Extension aux matériaux ductiles : les travaux d'Irwin

La limite de la théorie de Griffith apparaissait clairement pour les matériaux ductiles (métaux et alliages). Dans ces matériaux, la pointe de fissure s'accompagne de plastification et donc d'une importante dissipation d'énergie, non prise en compte par Griffith.

À partir de 1948, George R. Irwin compléta la théorie énergétique en intégrant l'énergie dissipée par plastification. En 1956, il introduisit le concept de **taux de restitution d'énergie**, rendant la théorie directement exploitable par les ingénieurs. En 1957, grâce aux solutions élastiques de Westergaard, il montra que le champ de contraintes au voisinage de la fissure pouvait être décrit par un paramètre unique : le **facteur d'intensité des contraintes (K ou FIC)**, désormais central dans la mécanique linéaire de la rupture (LEFM).

### ✓ Développements modernes

Depuis ces travaux fondateurs, la mécanique de la rupture s'est élargie à divers contextes :

- Ruptures en **régime non linéaire** (plasticité, grandes déformations),
- Étude des fissures en **modes mixtes** et phénomènes de bifurcation,
- **Propagation dynamique** des fissures sous sollicitations transitoires,
- Comportement des matériaux complexes tels que **composites et laminés**,
- Développement de puissants **outils numériques** pour la simulation et le dimensionnement fiable de structures modernes.

### III. Généralités sur les ruptures

#### III. 1. Faciès macroscopiques de rupture :

L'observation des surfaces de rupture à l'échelle macroscopique constitue une première étape dans la classification des mécanismes de rupture. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, ces surfaces présentent rarement des géométries idéalisées et s'avèrent souvent complexes. Néanmoins, deux grands types de morphologie peuvent être distingués :

##### ☞ *Rupture plate :*

La surface de rupture est perpendiculaire à la direction de la contrainte principale maximale. Ce type de fissuration est généralement lié à une propagation rapide et à une faible plasticité. On le rencontre typiquement dans des mécanismes de rupture fragile, comme dans le cas des aciers soumis à la transition ductile-fragile.

##### ☞ *Rupture inclinée :*

Le plan de rupture est incliné par rapport à la contrainte principale maximale. Ce type de rupture s'accompagne généralement d'une forte déformation plastique, révélant que le matériau a absorbé une partie de l'énergie de fracture par des mécanismes de glissement ou de déformation permanente.

##### ☞ *Ruptures mixtes :*

Dans la majorité des cas réels, le faciès de rupture résulte d'une combinaison des deux formes élémentaires précédentes. Les ruptures observées présentent alors à la fois des zones plates et des zones inclinées, comme illustré en Figure I. 1 (cas c, d et e).

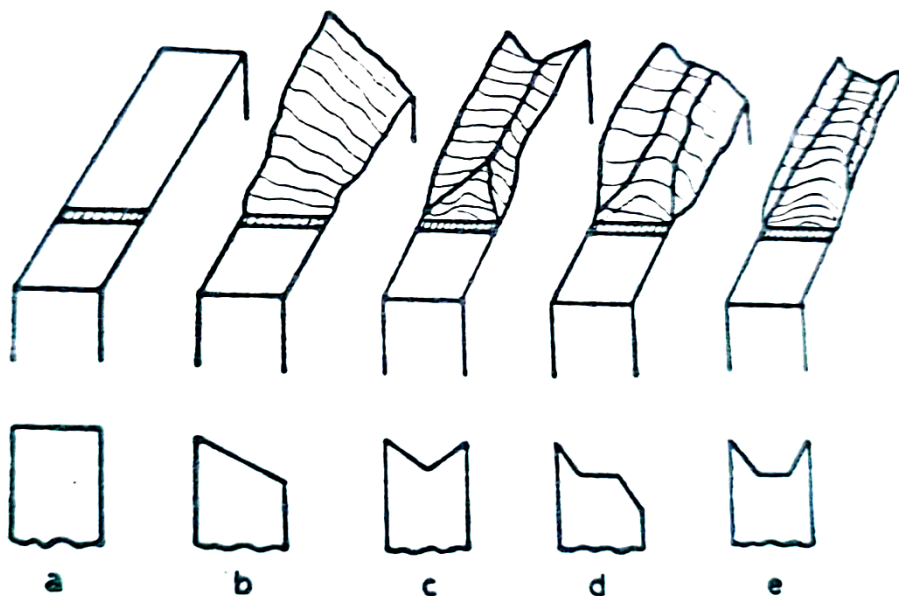


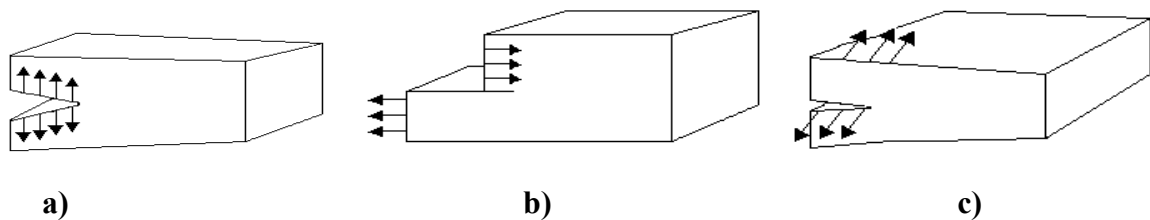
Fig. I. 1 : Différents faciès macroscopique de rupture

- a) Rupture plate
- b) Rupture inclinée
- c) d) et e) Rupture mixte

Les faciès macroscopiques constituent donc une première approche, permettant une **classification visuelle** de la rupture avant d'aller vers des analyses plus fines (métallographiques, fractographiques).

### III. 2. Modes de rupture :

La mécanique linéaire de la rupture (MLR) a permis de simplifier la description de la propagation des fissures en définissant trois modes élémentaires, notés I, II et III. Ces modes se distinguent par le mouvement relatif des lèvres de la fissure sous l'effet des sollicitations externes (**figure I. 2**).



**Fig. II. 2 : Modes de rupture**

- a) **Mode I**
- b) **Mode II**
- c) **Mode III**

➤ **Mode I – Ouverture (tension normale) :**

Les lèvres de la fissure s'écartent perpendiculairement au plan de fissure, comme si la fissure s'ouvrait. C'est le mode le plus étudié, car il correspond à la propagation la plus critique. La concentration de contraintes atteint alors un maximum à l'extrémité de la fissure.

➤ **Mode II – Cisaillement dans le plan (glissement) :**

Les lèvres se déplacent parallèlement au plan de la fissure et perpendiculairement au front de fissure. Ce mouvement correspond à un glissement tangentiel, analogue au cisaillement pur.

➤ **Mode III – Cisaillement anti-plan (déchirement) :**

Les déplacements interviennent parallèlement au front de fissure et dans le plan de la fissure. Ce mode correspond à un déchirement par cisaillement hors plan.

Dans les conditions réelles de fonctionnement des structures, les fissures sont rarement sollicitées suivant un mode unique. On observe plus fréquemment des modes mixtes, combinant ouverture (Mode I) et cisaillements (Modes II et III). Cependant, il est établi que les ruptures les plus dangereuses résultent principalement d'une sollicitation en Mode I, ce qui explique pourquoi la plupart des études expérimentales et théoriques de la mécanique de la rupture se concentrent sur ce cas.

## IV. Classification des différents types de ruptures

L'étude de la **rupture des matériaux** repose en grande partie sur l'analyse des faciès, c'est-à-dire des *surfaces de rupture* observées après fracture. La **microfractographie**, en particulier au microscope électronique à balayage (MEB), permet de décrire ces faciès de manière fine et de les relier aux **mécanismes physiques** qui ont conduit à la rupture.

Certaines ruptures présentent des morphologies caractéristiques, ce qui permet de les classer en grandes familles. Les faciès les plus typiques sont :

- Les **ruptures par clivage** (ruptures fragiles intra-cristallines),
- Les **ruptures ductiles** (caractérisées par la présence de cupules),
- Les **ruptures intergranulaires** (propagation le long des joints de grains),
- Les **ruptures par fatigue** (empreintes de striations liées à la propagation progressive).

Il faut toutefois noter que plusieurs de ces faciès peuvent **coexister sur une même surface de rupture**, traduisant la complexité des mécanismes en jeu et leur évolution au cours de la propagation de la fissure.

### Classification générale des faciès

#### 1) Ruptures intra-cristallines

Ces ruptures se propagent à **l'intérieur des grains**, le long de plans cristallographiques ou à travers les atomes du réseau :

☞ **Rupture par clivage** : séparation nette du cristal suivant des plans préférentiels, sans déformation plastique.

☞ **Ruptures fragiles dans les matériaux très durs ou fragiles** :

✚ Faciès à **lignes de Wallner** (observés dans le verre, les céramiques, etc.),

✚ Ruptures de certains **composés intermétalliques**.

☞ **Ruptures ductiles** : faciès caractérisés par des **cupules** issues de la nucléation, croissance et coalescence de microcavités.

☞ **Ruptures par fatigue** : faciès présentant des zones d'amorçage, des striations successives et la rupture finale.

#### 2) Ruptures intergranulaires

Ces ruptures se propagent **aux joints de grains** ou aux interfaces entre phases :

☞ Ruptures accentuées par la présence de **précipités fragilisants aux joints**.

☞ Ruptures intergranulaires **fragiles**, même en l'absence d'impuretés visibles.

☞ Ruptures **intergranulaires à chaud**, associées à des phénomènes de fluage ou de ségrégation locale.

### Cas particuliers et phénomènes associés

Certaines causes externes modifient ou miment les faciès classiques :

☞ **La corrosion sous contrainte** : entraîne des ruptures prématurées fragiles.

☞ **La fragilisation par l'hydrogène** : redoutée dans les aciers à haute résistance, car elle produit des faciès quasi identiques à ceux obtenus lors d'essais mécaniques classiques.

Dans ces cas, la microfractographie seule ne suffit pas pour identifier l'origine de la rupture. Elle doit être complétée par d'autres approches (analyse chimique, essais mécaniques complémentaires, observations métallographiques).

### Exemple détaillé : le cas du clivage

#### Définition

Le **clivage** est une rupture fragile qui correspond à la **séparation des plans atomiques préférentiels** du cristal, pratiquement sans déformation plastique. C'est le mode de rupture opposé au mécanisme ductile.

#### Conditions favorables

✚ Matériaux à **symétrie cristalline faible** (cubic centré, hexagonal compact).

✚ Températures **basses**, où les mécanismes de plasticité sont inhibés (moins d'activation du glissement et du maclage).

✚ Observé dans les **cristaux ioniques** (NaCl, MgO) et les métaux (Fe  $\alpha$ , Zn, Mg).

#### Plans de clivage observés expérimentalement

| Matériau                                  | Système cristallin       | Plans de clivage observés               |
|-------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|
| Fer $\alpha$ (BCC)                        | Cubique centré           | {100}, {110}                            |
| Fer $\gamma$ (FCC)                        | Cubique à faces centrées | Clivage limité, rupture souvent ductile |
| Zinc, magnésium (HC)                      | Hexagonal compact        | {0001}, {10-10}                         |
| NaCl (ionique)                            | Cubique                  | {100}                                   |
| Alumine (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | Trigonal                 | Plans basaux et prismatiques            |