

Tout matériau soumis à des forces extérieures se déforme. Lorsque la force appliquée devient excessive, on assiste à la **rupture**.

Le terme de fragilité recouvre deux significations usuelles : mauvaise tenue aux chocs (faible résilience) et impossibilité de déformation plastique. La plupart des céramiques ont un comportement à la fois non ou peu résilient et non ductile. A l'opposé, les métaux manifestent leur non fragilité à la fois par leur tenue aux chocs et par leur ductilité.

Les propriétés intrinsèques du matériau (nature et importance des forces de liaisons atomiques,...) sont essentielles et un matériau peut être caractérisé selon son mode de rupture (fragile ou ductile).

II. 1. La rupture fragile :

La rupture fragile se produit après très peu de déformation plastique. La figure 1 schématise le comportement en traction d'un matériau qui a subi une rupture fragile.

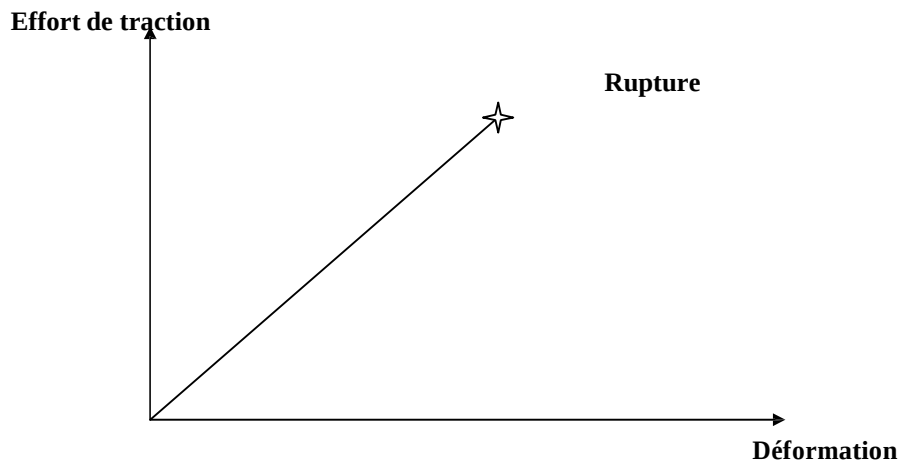


Fig. II. 1 : courbe de traction d'un matériau fragile.

La rupture fragile est particulièrement dangereuse puisqu'elle est brutale et peut se produire même quand le niveau de contrainte global ne dépasse pas la limite d'élasticité du matériau. Par conséquent, le calcul d'une structure ou d'une pièce ne doit pas se limiter aux lois classiques de la résistance des matériaux, mais doit prendre en compte également les lois de la mécanique de la rupture.

La rupture fragile correspond à une cassure granulaire (figure 2). Elle peut se produire soit par une décohésion intergranulaire (c'est-à-dire, les fissures se propagent suivant les joints de grains), soit par cassures des grains (clivage).

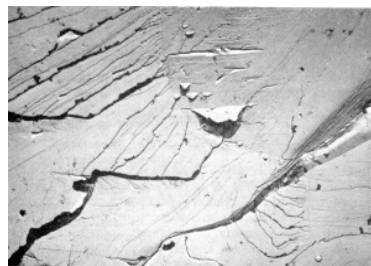


Fig. II. 2 : micrographie au microscope électronique (agrandissement = 4000) d'une rupture fragile par clivage.

II. 2. Rupture ductile

Ce type de rupture est précédé d'une déformation plastique importante. La figure 3 représente le comportement d'un matériau qui a subi une rupture ductile causée par des sollicitations statiques en traction.

L'examen à l'œil nu montre que la rupture ductile entraîne une cassure fibreuse. L'examen au microscope électronique permet de caractériser plus sûrement la rupture ductile (figure 4) : on

observe que la surface se présente comme la juxtaposition de cupules au fond desquelles se trouve souvent un précipité ou une inclusion. La rupture se produit suivant trois stades (figure 5) :

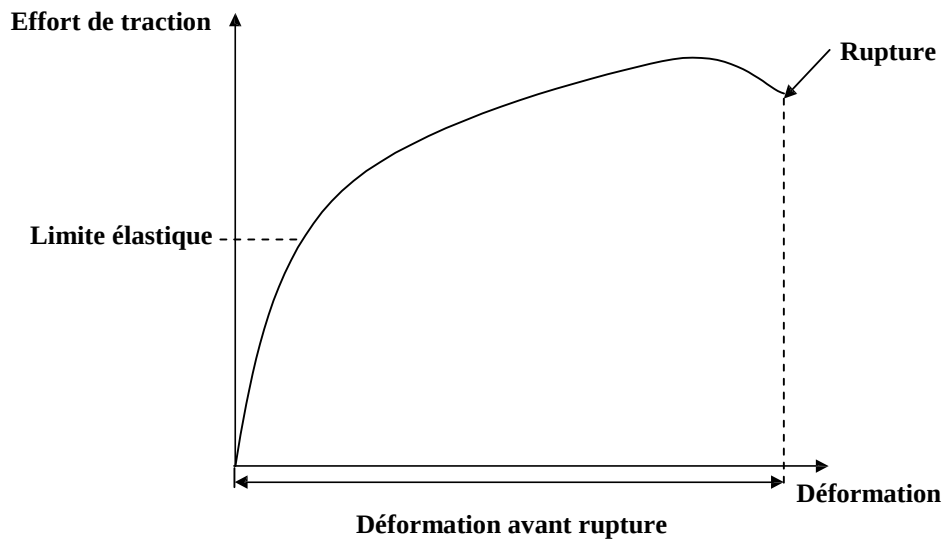


Fig. II. 3 : Courbe de traction dans le cas d'une rupture ductile.

- Formation de fissures à l'interface des particules (précipités ou inclusions) présentes dans le métal. Ces particules étant plus dures que la matrice, elles ne se déforment pas.
- Croissance à partir de ces fissures de trous qui s'allongent dans le sens de la déformation.
- Rupture des pédoncules de métal séparant les trous par striction complète ou par cisaillement, ce qui donne naissance aux cupules.

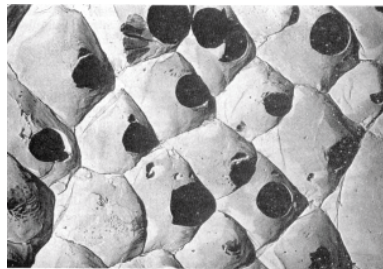


Fig. II. 4 : micrographie au microscope électronique (agrandissement = 10000) d'une rupture ductile. Les fissures ont été amorcées par les inclusions visibles en noir.

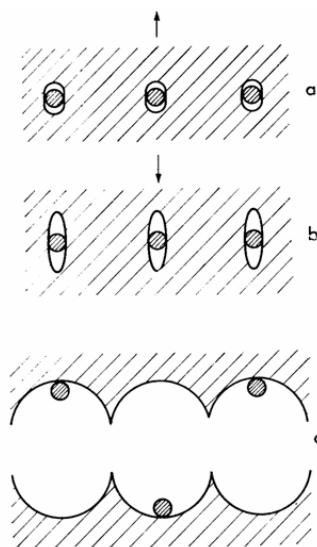


Fig. II. 5 : mécanisme de la rupture ductile ;
 (a) formation de microfissures ; (b) croissance des trous ; (c) rupture : formation de cupules.

II. 3. Température de transition ductile – fragile :

On définit la température de transition selon diverses règles : soit la température pour laquelle l'énergie de rupture est égale à la moyenne de palier ductile et du palier fragile, soit la température pour laquelle on obtient une égale fraction surfacique de clivage et de rupture ductile.

Si certains matériaux restent ductiles des plus basses jusqu'aux plus hautes températures (métaux à structure C.F.C par exemple), la plupart des autres matériaux tendent à être fragiles à basse température, ductile à haute température. La transition à l'état fragile vers l'état ductile se fait dans un domaine de transition centré autour d'une température T_t (souvent de l'ordre de $0.5 T_f$, si T_f est le point de fusion du matériau). Il est à noter que T_t est fonction de la vitesse de déformation (ou de sollicitation), T_t augmente avec la vitesse.

Pour un même matériau, les mécanismes physiques qui contrôlent la rupture vont donc dépendre de température (Figure. 7) : on distingue ainsi trois domaines :

- Région **A** : rupture fragile qui se produit par propagation des défauts préexistants.
- Région **B** : rupture fragile ou semi – fragile, initiée ou assistée par déformation plastique.
- Région **C** : rupture ductile qui se produit après déformation plastique important.

* Dans un solide ductile : la rupture intervient par *glissement* (active par la présence de défauts : dislocation).

* Dans un solide fragile : la rupture se produit par *clivage* selon un plan atomique (ce qui nécessite une force de traction pour briser les liaisons).

II. 4. Essais classiques de rupture fragile :

Lorsqu'on fait la conception mécanique, on ne s'intéresse pas à un chargement faible mais on s'intéresse aux chocs c – à – d le corps a une certaine absorption de l'énergie de chocs.

L'essai de résilience précise la tenue aux chocs. La fragilisation est l'inverse de la résilience.

La résilience **k** est mesurée par l'énergie dissipée au choc pour obtenir la rupture d'une éprouvette :

$$k = \frac{w}{s} = \frac{\text{Travail de rupture}}{\text{Section de l'éprouvette}} \quad \text{en} [\text{J.m}^{-2}]$$

La variation de k avec la température permet de mettre en évidence la transition fragile-ductile.

Pour les métaux relativement résilients, on opère généralement par le choc d'un mouton rotatif (Guillery), mouton verticale (Pellini) ou pendulaire (Charpy) sur une éprouvette entaillée. L'entaille est en forme de U ou de V.

Ce type d'essai permet de s'affranchir plus ou moins de la dispersion caractérisant la phase d'amorçage des défauts.

Dans cette catégorie, l'essai le plus ancien (1901) et le plus pratiqué dans le monde est l'essai Charpy, du nom de son inventeur.

Essai Charpy

L'essai Charpy a pour but de déterminer la résistance aux chocs des matériaux. On mesure ce que l'on appelle leur résilience, c'est-à-dire l'énergie consommée pour rompre une éprouvette de référence de section égale à 1 cm^2 en utilisant un "mouton-pendule" (Figure 8 a).

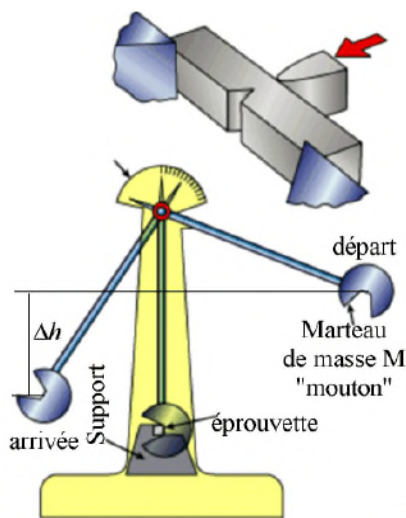
L'éprouvette de référence utilisée est un barreau de longueur 55 mm, à section carrée de dix par dix millimètres et entaillée sur une profondeur de 5 mm. L'entaille peut revêtir diverses formes : en U ou, le plus souvent, en V. Comme il ne s'agit pas d'une fissure parfaite mais d'une entaille, on peut observer une dispersion des résultats liée à la nucléation d'une fissure principale au fond de l'entaille.

L'énergie consommée pour rompre le barreau est mesurée en faisant la différence d'énergie potentielle entre la hauteur de chute du « mouton » et celle à laquelle il remonte après avoir rompu le barreau. Si ce dernier était complètement fragile, le « mouton » remonterait à la même hauteur que celle d'où il a chuté ; s'il était au contraire extrêmement tenace, il ne serait pas rompu et le pendule ne remonterait pas du tout. L'énergie de rupture ainsi déterminée s'appelle la résilience. Plus elle est élevée, plus le matériau est tenace.

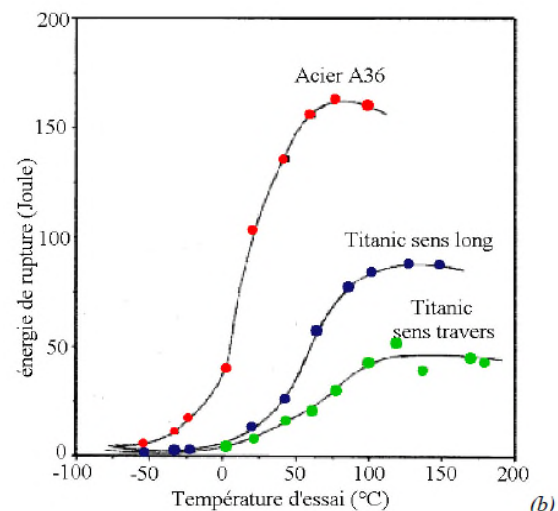
Ainsi la résilience, généralement notée K_{CV} se calcule comme suit :

$$K_{CV} (J / \text{cm}^2) = \frac{M \cdot g \cdot \Delta h}{1 \text{ cm}^2}$$

Remarque : si l'on utilise une éprouvette dont la section est double de celle de référence l'énergie à fournir ne sera pas double, car l'éprouvette est entaillée et il faut tenir compte de l'existence du défaut initial. Or ce défaut n'est pas vraiment une fissure, donc le concept de facteur d'intensité des contraintes n'est pas non plus directement applicable. Cette mesure est donc essentiellement qualitative.



(a)



(b)

Fig.II. 8: (a) principe de fonctionnement du "mouton" Charpy. (b) Mesure de la résilience en fonction de la température, sur un acier actuel (A36) de même composition chimique (mais de meilleure qualité) que l'acier employé pour la réalisation de la structure de la coque du Titanic.

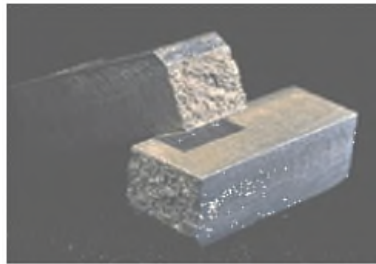
La grande simplicité de l'essai en fait, en partie, le succès. Il est susceptible de divers aménagements. Les mesures se font souvent à diverses températures, notamment à basses températures.

Cependant, si la simple mesure de la résilience n'est pas compliquée, elle ne procure que des informations qualitatives et ne peut pas être utilisée directement dans un modèle pour dimensionner une structure. En revanche elle permet de classer les matériaux ou d'étudier la dépendance de la résilience à la température par exemple.

Lorsque l'énergie consommée par la rupture est grande, on dira que la rupture est ductile, en revanche lorsque cette énergie est faible on parlera de rupture fragile. Dans les métaux de structure cubique centrée (aciers par ex.) on observe une transition ductile-fragile lorsqu'on abaisse la température.

Sur les aciers de bonne qualité, la transition se produit à basse température (-30°C à -50°C) mais lorsque la qualité de l'acier est médiocre cette transition peut être observée autour de la température ambiante.

C'est ce qui explique par exemple les conséquences dramatiques de l'impact d'un iceberg sur la coque du Titanic. L'acier, de qualité médiocre, présentait une transition ductile fragile aux alentours de la température ambiante (Figure b). Lors du choc le métal s'est rompu de manière fragile, comme du verre.



Acier du Titanic



Acier A36 actuel

II. 5. Les principaux paramètres de fragilité

Le phénomène de fragilisation, il s'agit d'une modification de la résistance à la rupture par suite d'évolutions structurales, de migration d'impuretés avant tout. Celles-ci peuvent venir bloquer les dislocations par formation d'atmosphère, ou se rassembler dans les joints de grain.

Lorsque, pour diverses raisons, les joints des grains sont plus fragiles que l'intérieur des grains, les fissures se développent le long de ceux-ci. Les causes de fragilisation sont nombreuses, dont on peut citer:

✓ La fragilité de revenu réversible des aciers : cette fragilisation apparaît dans les aciers trempés – revenus qui ont séjourné dans l'intervalle de température $350-550^{\circ}\text{C}$. Elle est mise en évidence par une augmentation de la température de transition de faciès de rupture qui peut atteindre 100°C .

✓ Ségrégation des impuretés sur les joints : la solubilité des éléments n'est pas la même à l'intérieur des grains et dans les joints. En effet, un soluté dans un joint de grain produit une énergie de distorsion différente de celles qu'il crée à l'intérieur du grain.

✓ Fragilisation par les métaux liquides : certains métaux liquides produisent une fragilisation spectaculaire d'autres métaux. Par exemple l'indium fragilise le zinc, le gallium l'aluminium, le plomb les aciers etc. Elle intervient au voisinage du point de fusion du métal liquide.

✓ Surchauffe des aciers : ce type de fragilisation est celui qui se produit lorsque l'acier ayant été chauffé à haute température de façon à dissoudre tous les précipités, est refroidi lentement dans une zone de température critique où les atomes d'impuretés commencent par se concentrer dans les joints de grains.

✓ Fragilisation par l'hydrogène : elle revêt des aspects spécifiques liés surtout à la très grande mobilité de cet atome dans les alliages.

II. 6. Paramètre métallurgique

a) La transition fragile – ductile est associée à un chargement de processus physique de rupture. Elle n'existe pas dans le C.F.C qui ne se clivent pas. En revanche, le phénomène se produit avec les métaux C.C et hexagonaux.

b) Le paramètre métallurgique le plus important est la taille de grain. Une diminution de celle-ci augmente la limite d'élasticité, mais plus encore le contrainte de clivage. Le résultat est une diminution de la température de transition

c) Les éléments gammagènes, en abaissant la température de la transformation de l'austénite, favorisent les formations de petits grains : ils abaissent donc la température de transition. C'est le cas du Nickel dont l'addition donne des aciers pour emploi à très basse température. Le Manganèse a un effet analogue tout en étant moins coûteux. En revanche, les éléments alphagènes, comme le Chrome, le molybdène, augmentent la température de transition.

d) Les interstitiels comme C et N font croître la seule limite d'élasticité. Il en résulte de plus fortes températures de transition.

e) La température de laminage à chaud conditionne la taille de grain. Plus l'opération se termine à basse température, plus petit est le grain et plus faible la température de transition.

f) D'une façon générale, tout facteur tendant à mieux répartir les glissements en diminuant les hétérogénéités locales de déformation est bénéfique.

II. 7. Analyse statistique de la rupture :

Dans le cas des matériaux fragiles, se rompant par clivage comme les céramiques ou les aciers à basses températures, on observe une dispersion significative des résultats expérimentaux. Les modèles de rupture fragile s'intéressent essentiellement aux mécanismes d'amorçage de la fissure. Pour cela, il existe différentes théories dont on peut citer :

- ✓ Théorie du maillon le plus faible.
- ✓ Théorie de Weibull.
- ✓ Théorie de Btdorf.

Il n'est jamais possible d'affirmer qu'un solide fragile ne se cassera pas sous une contrainte de traction donnée car la rupture dépend de la taille inconnue du plus grand défaut maillon le plus faible. Or celle-ci peut varier de manière considérable d'une éprouvette à l'autre. Seule la probabilité de survie d'une pièce en fonction de la contrainte σ externe appliquée peut être déterminée pour un matériau fragile.

La craie à tableau est un solide fragile. Certains bâtons de craie sont plus fragiles que d'autres. En écrivant au tableau, on constate qu'en moyenne 3 bâtons sur 10 cassent tandis que les 7 autres survivent. La probabilité de rupture **PR** pour cette craie, sollicitée en flexion sous la force normalisée d'écriture vaudra **PR**=0,3. Si la pièce est un outil de coupe en céramique, une probabilité de rupture de 1 sur 100 peut être acceptable, car un outil se remplace facilement. Mais s'il s'agit d'un hublot d'installation sous vide, dont la rupture peut causer des blessures, on souhaitera limiter fortement le risque d'accident en choisissant une probabilité de rupture **PR** de l'ordre de 10^{-6} . Pour une tuile du bouclier de navette spatiale, quand la rupture d'une sur 10000 peut être fatale, on visera une probabilité de rupture **PR** de l'ordre de 10^{-8} .

Si un risque acceptable (la probabilité de rupture) peut être affecté à la fonction remplie par la pièce, il est alors effectivement possible de la concevoir de sorte que le risque n'excède pas ce maximum acceptable.

Distribution statistique de défauts

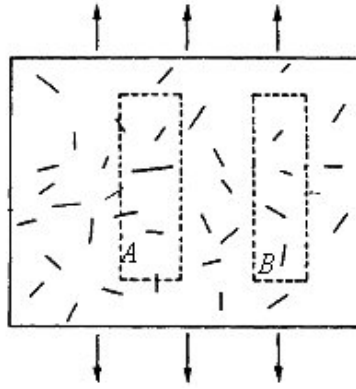


Fig. II. 9: Distribution statistique de défauts

La craie est une céramique poreuse de faible ténacité $K_C = 0,9 \text{ MPa.m}^{1/2}$ mal consolidée, pleine de fissures et de pores. Sa résistance moyenne à la traction R^M est de l'ordre de **15 MPa** correspondant à une taille de défaut de l'ordre du mm. Mais la craie contient une distribution de défauts de différentes longueurs. Deux morceaux de craie **A** et **B** géométriquement identiques peuvent avoir des résistances notablement différentes, d'un facteur 3 ou plus. Ceci provient du fait que l'un (morceau **B**) a été découpé de telle sorte que, par hasard, il ne contienne que des fissures courtes, tandis que l'autre (morceau **A**) a été taillé de sorte qu'il contienne l'une des plus longues fissures de la distribution.

Si de petits échantillons géométriquement identiques sont découpés dans un gros bloc de céramique fragile, ils présenteront une dispersion de résistance mécanique due à la dispersion de la taille des défauts. En moyenne un gros échantillon ayant plus de chances de contenir l'un des plus longs défauts cassera pour une contrainte plus faible qu'un échantillon plus petit. Il y a dépendance de la résistance par rapport au volume.

Hypothèse du maillon le plus faible

Les ruptures par clivage prennent naissance à partir d'éléments microstructuraux, grains, indentations, qui présentent une distribution statistique et c'est en général le grain le plus gros et le plus favorablement orienté pour cliver, élément le moins résistant, qui déclenche la rupture. La théorie statistique **du maillon le plus faible** s'applique à ces ruptures **fragiles**. Elle repose sur quelques hypothèses fondamentales à vérifier soigneusement en pratique :

- Le solide est considéré comme la juxtaposition de N éléments *parfaitement indépendants* et la rupture de l'élément le plus faible entraîne la rupture du solide entier.

- A chaque élément correspond une probabilité de rupture $P_0(\sigma)$ sous une contrainte σ donnée. La probabilité de survie de l'élément étant $1 - P_0(\sigma)$, celle des N éléments vaut selon l'hypothèse d'indépendance $[1 - P_0(\sigma)]^N$ et la probabilité de rupture $P_R(\sigma) = 1 - [1 - P_0(\sigma)]^N$ s'écrit aussi sous la forme

$$P_R(\sigma) = 1 - \exp(-N \ln[\frac{1}{1 - P_0(\sigma)}]) = 1 - \exp(-N f(\sigma)) \quad \text{avec} \quad f(\sigma) = \ln[\frac{1}{1 - P_0(\sigma)}]$$

Où la fonction $P_0(\sigma)$ est inconnue.

Effet de volume

Le volume total V ayant été subdivisé en N éléments de volume V_0 , la probabilité de rupture du solide de volume V s'écrit :

$$P_R(\sigma, V) = 1 - \exp(-\frac{V}{V_0} f(\sigma))$$

fonction croissante de V .

Effet de contrainte inhomogène

Lorsque la pièce est soumise à une contrainte hétérogène, on la divise en un grand nombre de volumes élémentaires ΔV , chacun soumis à une contrainte σ supposée homogène sur ΔV mais

fonction de la position du volume ΔV considéré dans la structure. Pour chacun de ces volumes ΔV la probabilité de rupture $P_R(\sigma, \Delta V)$ est donnée par l'expression précédente avec $V = \Delta V$. La probabilité de survie de la pièce est le produit des probabilités de survie de chacun de ses éléments (tous doivent survivre pour que la pièce survive) et vaut :

$$1 - P_R(\sigma, V) = \prod [1 - P_R(\sigma, \Delta V)] = 1 - \exp\left(-\sum \frac{\Delta V}{V_0} f(\sigma)\right) \quad P_R(\sigma, V) = 1 - \exp\left(-\int_V f(\sigma) \frac{dV}{V_0}\right)$$

En passant à la limite continue sachant que le volume V_0 reste petit devant le volume dV sur lequel on admet que la contrainte σ est constante. La probabilité de rupture est fonction de la répartition des contraintes dans la pièce. Mais quelle valeur faut-il attribuer à σ ? En général on utilise la plus grande des contraintes principales lorsqu'elle est positive. Ainsi une éprouvette en flexion a une probabilité de rupture plus faible que celle de la même éprouvette en traction sous une contrainte égale à celle qui agit sur la fibre la plus tendue en flexion. En traction, tout le volume est soumis à la contrainte alors qu'en flexion seule une mince couche proche de la surface tendue supporte la contrainte de traction maximale. La contrainte de rupture en flexion est plus grande que la résistance à la traction.

Si la dépendance en volume est une conséquence directe de l'hypothèse de la théorie du maillon le plus faible, reste à préciser la fonction $f(\sigma)$.

Théorie de Weibull

Weibull a proposé la forme empirique suivante :

$$f(\sigma) = \left(\frac{\sigma - \sigma_s}{\sigma_u}\right)^m \quad f(\sigma) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_u}\right)^m$$

qui rend bien compte de la dispersion expérimentale des contraintes de rupture des matériaux fragiles en traction. Dans cette expression, σ_s représente un seuil de contrainte en dessous duquel la probabilité de rupture est nulle. Dans la plupart des cas on suppose que $\sigma_s = 0$, ce que nous ferons par la suite. Le module de Weibull m est un indicateur de la dispersion. Plus il est faible, plus cette dispersion est importante :

- Pour les faibles module de Weibull, ($m < 20$), la distribution des défauts est très variable d'un échantillon à l'autre, d'où la dispersion des contraintes de rupture.

- Pour les forts modules de Weibull, la distribution des défauts est très peu variable d'un échantillon à l'autre, d'où faible dispersion des contraintes de rupture, la contrainte de rupture σ_R est une grandeur quasi déterministe.

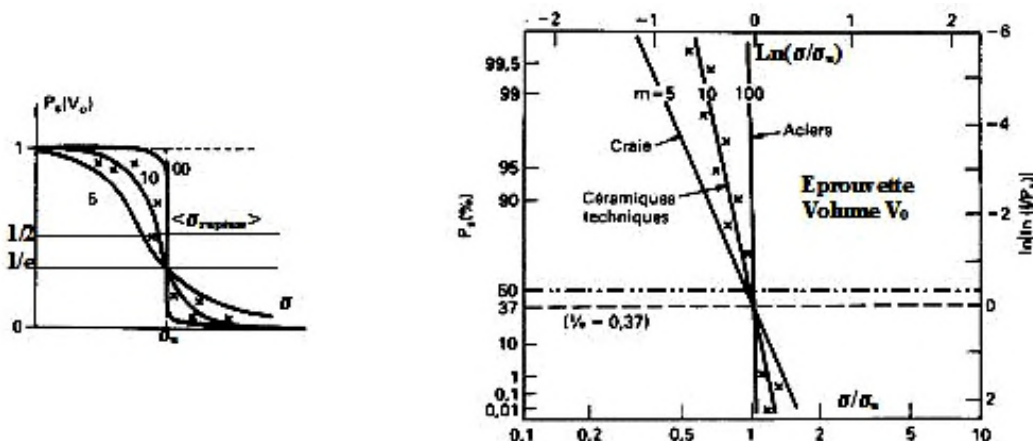


Fig. II. 10 : Loi de Weibull de la rupture fragile

En mesurant la probabilité de survie $P_S(\sigma, V_0) = 1 - P_R(\sigma, V_0)$ comme le nombre d'échantillons de même volume V_0 n'ayant pas cassé sous la contrainte σ , la loi de Weibull

$$P_S(\sigma, V_0) = 1 - P_R(\sigma, V_0) = \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_u}\right)^m\right]$$

est vérifiée si les points s'alignent dans le plan $\ln(\ln[\frac{1}{1-P_R}])$ en σ sur une droite dont la pente est égale au module de Weibull m . A contrainte nulle, $P_S=1$, tous les échantillons survivent. Lorsque σ augmente P_S diminue tendant vers 0 pour les fortes contraintes et tous les échantillons cassent. σ_u est la contrainte telle que $P_S(\sigma_u, V_0) = \approx 0,37 \frac{1}{e}$ laissant survivre 37% des échantillons.

Le volume effectif et la contrainte de Weibull .

Dans la loi de Weibull complète $P_S(\sigma, V) = \exp(-\frac{V\sigma^m}{V_0\sigma_u^m})$ intégrant les effets de volume, les paramètres V_0 et σ_u ne sont pas indépendants, seul leur produit $V_0\sigma_u^m$ intervient. σ_{Max} étant dans une pièce de volume V la valeur maximale de la contrainte majeure positive solution du problème élastique en contrainte inhomogène la probabilité de survie de la pièce s'écrit :

$$P_S(\sigma, V) = \exp(-\int_V (\frac{\sigma}{\sigma_u})^m \frac{dV}{V_0}) = \exp(-(\frac{\sigma_{Max}}{\sigma_u})^m \frac{V_{eff}}{V_0}) \quad \text{avec} \quad V_{eff} = \int_V (\frac{\sigma_{Max}}{\sigma_u})^m dV$$

La probabilité de survie d'une pièce soumise à contrainte inhomogène de maximum σ_{Max} est égale à celle d'une pièce équivalente de volume V_{eff} en état de contrainte homogène σ_{Max} . L'application à la flexion trois points conduit à la relation $\sigma_r = R_t^M [2(m+1)^2]^{\frac{1}{m}}$ entre la résistance en traction R_t^M et le module de rupture en flexion σ_r , soit $\sigma_r \approx 1,7 R_t^M$ annoncé pour la valeur typique $m = 10$ des céramiques.

On peut également définir la contrainte de Weibull σ_w (liée au volume effectif V_{eff}) telle que

Les limites de l'approche statistique

$$P_S(\sigma, V) = \exp(-\int_V (\frac{\sigma}{\sigma_u})^m \frac{dV}{V_0}) = \exp\{-(\frac{\sigma_w}{\sigma_u})^m\} \quad \text{avec} \quad \sigma_w = [\frac{1}{V_0} \int_V \sigma^m dV]^{\frac{1}{m}} \quad \text{et} \quad \frac{\sigma_w}{\sigma_{Max}} = (\frac{V_{eff}}{V_0})^{\frac{1}{m}}$$

Cette approche n'est plus valide lorsqu'une des hypothèses de départ, notamment celle concernant l'indépendance des éléments de volume est mise en défaut.

– Si la contrainte normale est négative, une propagation de la microfissure est possible, mais elle se fait en général avec une bifurcation telle que le facteur d'intensité de contrainte diminue. Une telle fissure cesse d'être activée. Elle participe néanmoins à un endommagement progressif du matériau, mais l'hypothèse du maillon le plus faible n'est pas utilisable.

– Il en est de même si les microfissures se propagent mais s'arrêtent sur des obstacles qui les stabilisent (béton et céramiques).