

TP Résilience

1. Introduction

L'essai de résilience a pour objet de déterminer la résistance des matériaux à la rupture sous l'effet d'un choc par l'intermédiaire de l'énergie de rupture (Fig. 1). Bien que la résistance à la rupture se mesure normalement avec un essai de traction classique, la résistance que l'on vise à étudier ici a peu en commun avec la résistance observée dans un essai de traction statique. Dans l'essai de traction, la déformation est graduellement imposée à l'éprouvette. La matière a ainsi assez de temps pour réagir et s'adapter au changement. Dans la pratique, une pièce est souvent soumise à des chocs brutaux. Pour cette situation, les valeurs observées dans un essai de traction ne donnent pas toujours satisfaction et peuvent même être trompeuses. De nombreux accidents spectaculaires survenus surtout à l'époque où l'on n'avait pas suffisamment reconnu cette différence, en témoignent (à la fin 19ème et au début 20ème siècle).

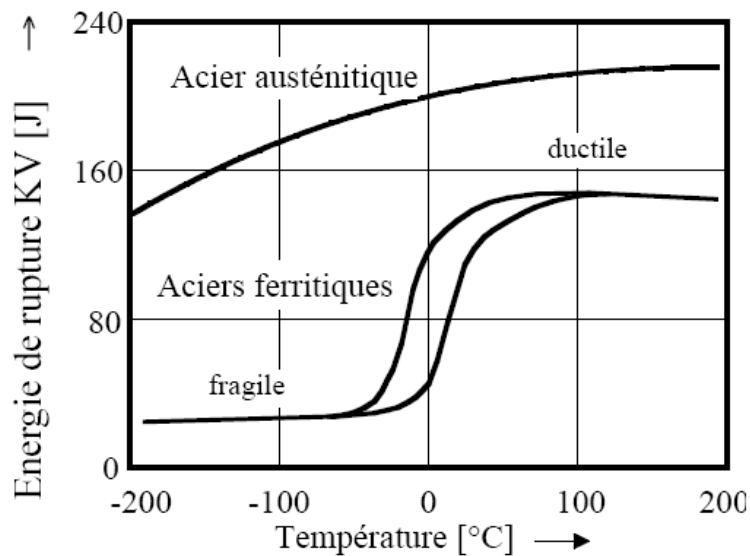


Fig. 1: L'énergie de rupture en fonction de la température pour les aciers de structure ferritique (valeurs typiques et domaine de dispersion) et les aciers austénitiques. Eprouvettes ISO-V.

Le problème se pose surtout avec les matériaux fragiles et les matériaux qui contiennent des retassures, des inclusions ou des fissures. Ces défauts provoquent un effet d'entaille, modifient localement les contraintes et entraînent surtout une triaxialité des contraintes.

Métaux

La température est un facteur déterminant dans la rupture fragile ou ductile des métaux. En effet, les aciers de structure ferritique présentent, même lors d'un choc, une rupture ductile à 20°C mais deviennent fragiles à des températures hivernales. La transition entre le régime ductile et

le régime fragile est assez rapide et se limite dans certains cas à un intervalle de 20°C seulement. Cet effet s'observe surtout sur les aciers au carbone, utilisés pour la construction des ponts, des chemins de fer et des bateaux. Pour ces aciers, le régime fragile commence parfois déjà à 0°C et limite leur utilisation aux régions tempérées. L'addition des éléments d'alliage, notamment du Ni, dans des aciers faiblement alliés permet d'abaisser cette température. L'apport massif de Ni et de Cr stabilisant la structure austénitique fait complètement disparaître cette transition. Ces aciers gardent une ténacité élevée et se prêtent donc parfaitement à des constructions cryogéniques (récipients et tuyaux pour l'air ou l'He liquide). Par contre, si la structure austénitique est stabilisée par l'azote en solution solide dans l'acier, une transition ductile-fragile intervient également à des températures inférieures mais pas loin de 0°C.

A noter que des métaux initialement ductiles peuvent également se fragiliser en raison :

- De la vitesse de déformation (ductiles à faible vitesse, mais fragiles sous des chocs)
- D'une exposition prolongée à des températures élevées (grossissement des grains, précipitation sur les joints ou précipitation des phases fragiles)
- De l'absorption de gaz (surtout H₂, O₂)
- D'une attaque corrosive le long des joints de grains
- D'une accumulation des dégâts d'irradiation

Polymères

La rupture ductile ou fragile des polymères s'explique principalement par la capacité de leurs chaînes à glisser les unes par rapport aux autres. Plus un polymère possède une réticulation élevée, plus il est difficile pour ses chaînes de bouger et plus sa rupture sera fragile. On distingue donc deux grandes catégories de polymères :

- Les polymères thermoplastiques (PE, PP, PMMA, ...), composés de longues chaînes de monomères (linéaires ou ramifiées) entremêlées entre elles via des liaisons hydrogènes ou de Van der Waals. Comme ses liaisons sont relativement faibles, il est simple de démêler ces chaînes par l'application d'une force, ce qui rend ces polymères peu résistants mécaniquement. Ces polymères peuvent également être classés par leur taux de cristallinité, i.e. l'organisation et l'alignement de leurs chaînes. Un polymère possédant un certain degré de cristallinité est dit cristallin ou semi-cristallin. A l'inverse, un polymère est dit amorphe lorsque ses chaînes sont totalement désorganisées. Les polymères amorphes sont particulièrement intéressants en raison de leur sensibilité aux changements de températures. En effet, ils possèdent une température de transition vitreuse ou T_v (habituellement entre 0.5 et 0.75 fois la température de fusion du polymère), en-dessous de laquelle ils deviennent durs et cassants comme du verre. A noter qu'il ne s'agit pas d'une température fixe, mais plutôt d'une fourchette de température pendant laquelle le polymère se durcit substantiellement.

Ce changement est réversible et si le polymère est réchauffé, il retrouvera sa ductilité. Des polymères qui n'ont pas ou peu de chaînes latérales, tels que le polyéthylène, ont tendance à avoir des températures de transition vitreuse plus basses que des polymères plus compliqués tels que le polystyrène (voir Tableau 1).

- Les polymères thermodurcissables (PU, ...), composés de longues chaînes de monomères très réticulées formant un dense réseau tridimensionnel. Ces chaînes sont solidement attachées les unes aux autres par des liaisons chimiques et n'ont que peu de liberté de mouvement. Ces polymères sont donc beaucoup plus résistants, mais aussi beaucoup plus fragiles. Ils ne possèdent pas de température de transition vitreuse.

Tab. 1: Exemple de températures de fusion et de transition vitreuse pour des polymères thermoplastiques communs

	Température de fusion	Température de transition vitreuse
LDPE, polyéthylène à basse densité	98 – 115	-90 – -25
HDPE, polyéthylène à haute densité	130 – 137	-110
PP, polypropylène	160 – 180	-25 – -20
PS, polystyrène	240	85 – 125
PET-G, polytéréphtalate d'éthylène glycol	212 – 265	66 – 85

2. L'énergie de rupture et la résilience

En principe, il serait bien utile de connaître les contraintes critiques qui provoquent la rupture sous l'effet d'un choc. Néanmoins dans la pratique et dans la théorie, le phénomène de la rupture dynamique est très complexe. Même au niveau expérimental, la détermination d'une contrainte critique s'avère déjà extrêmement difficile. Comme la fissuration sous l'effet du choc avance à très grande vitesse et que de ce fait les contraintes montent et descendent presque instantanément, leur mesure exacte n'est pratiquement pas possible. On doit reconnaître que les contraintes du choc se transmettent par une onde acoustique. L'information de la contrainte d'impact qui provoque la fissuration arrive donc avec un certain retard et une amplitude modifiée dans le capteur de force. De plus, une onde une fois émise ne se laisse pas arrêter facilement. Elle risque d'être réfléchiée sur une surface et de revenir vers le capteur avant que la fissuration soit terminée. Par contre, il est beaucoup plus facile de déterminer l'énergie (ou le travail) W nécessaire pour casser une éprouvette. Cette énergie est essentiellement une mesure pour l'intégrale de la courbe de traction $\sigma(\epsilon)$ enregistrée lors d'un choc $W = \int \sigma d\epsilon$.

Pour une rupture fragile, cette énergie comprend l'énergie élastique que l'on doit fournir jusqu'à ce qu'une fissure s'amorce ou une fissure existante commence à s'agrandir. Ensuite, la fissure se propage spontanément (critère de Griffiths) en consommant cette énergie élastique emmagasinée pour rompre les liaisons atomiques traversant la fissure.

Lors d'une rupture ductile, la fissure n'avance pas avant que le matériau ne se durcisse et se fragilise par écrouissage autour de la pointe de la fissure. L'énergie absorbée par cette déformation plastique peut atteindre des valeurs considérables. Elle s'additionne à l'énergie élastique déjà mentionnée pour la rupture fragile. L'énergie à fournir pour la rupture ductile est donc en général plus élevée que pour la rupture fragile. Néanmoins, on doit mentionner que la valeur de l'énergie de rupture seule ne permet pas d'affirmer s'il s'agit d'une rupture fragile ou ductile. Une valeur élevée peut résulter d'une rupture ductile d'un matériau à faible résistance ou bien d'une rupture fragile d'un matériau à résistance élevée.

La résilience peut être définie comme l'énergie de rupture (sous choc) ramenée à la section S de l'éprouvette à l'endroit de la fissure.

$$a_K = \frac{W}{S}$$

Bien qu'il s'agisse ici d'une grandeur spécifique (énergie par cm^2), la résilience ainsi définie dépend très fortement des dimensions géométriques de l'éprouvette. On ne peut donc pas utiliser cette valeur pour calculer l'énergie de rupture pour un échantillon d'une autre section par simple multiplication avec la nouvelle section. Afin de pouvoir comparer les mesures de différentes expériences, il est alors absolument nécessaire de standardiser la section et la taille des éprouvettes. Ceci est en fait la pratique adoptée aujourd'hui (norme EN ISO 148). Comme la section des éprouvettes normées est toujours la même, la division par la section n'apporte pas de nouvelle information c'est pourquoi l'on indique uniquement l'énergie de rupture K comme valeur de comparaison. L'utilité de ce paramètre se limite donc à la comparaison (pareille à la dureté) des états qui résultent d'une modification ou à la comparaison de différents matériaux qui se ressemblent. En se basant sur l'expérience, les normes de sécurité peuvent prescrire des valeurs minimales pour les matériaux utilisés à des applications particulières (chaudières à vapeur, éléments de construction pour réacteurs nucléaires). La machine d'essai la plus couramment utilisée pour sa détermination est le mouton de Charpy.

3. Mouton de Charpy

Dans sa configuration la plus répandue, le mouton de Charpy consiste en un marteau de masse m qui est fixé à l'extrémité d'un pendule (Figs. 2 et 3). Ce pendule peut tourner dans le plan vertical autour d'un axe horizontal. L'éprouvette repose sur un support et se trouve au point le plus bas sur la trajectoire du marteau. Pour effectuer un essai, on écarte le bras jusqu'à ce que le marteau atteigne sa position initiale P et on le lâche. Quand le pendule vient frapper l'éprouvette, il a une énergie cinétique qui est égale à l'énergie potentielle qu'il avait à sa position de départ

mgh_0 , h_0 étant la hauteur du marteau par rapport à sa position d'équilibre. Après la rupture, le marteau remonte. Dans son point culminant (hauteur h_1), l'énergie cinétique résiduelle s'est de nouveau transformée en énergie potentielle mgh_1 . L'énergie K dépensée pour rompre l'éprouvette vaut alors

$$K = mg(h_0 - h_1)$$

Comme l'énergie cinétique emportée par les débris après la rupture est négligeable, c'est l'énergie de rupture que l'on indique comme résultat de l'essai de résilience.

Il faut absolument mentionner le type d'échantillon normé utilisé dans cette expérience. Les éprouvettes les plus fréquemment utilisées aujourd'hui sont les types ISO-V et ISO-U (fig. 4). Ils ont une entaille en forme de V ou U pour fixer l'endroit de la fissure. L'énergie de rupture est indiquée en J (Joule), précédée par les lettres K_V ou K_U pour désigner qu'il s'agit d'une énergie de rupture (K , de l'allemand : Kerbschlagzähigkeit) mesurée avec une éprouvette ayant une entaille en forme de V ou U, respectivement. Notez que seul des résultats obtenus sur des éprouvettes de dimensions identiques devraient être comparés. Il n'y a pas de méthode générale de conversion de valeurs de résilience, obtenues par une méthode d'essai, en valeurs qui seraient obtenues par une autre méthode d'essai.

Pour obtenir la résilience a_K on divisera encore cette valeur par la section de l'échantillon à l'endroit de la fissure. L'unité habituelle pour exprimer la résilience a_K est le J/cm^2 . Comme la valeur a_K ne présente aucun avantage sur l'indication de l'énergie de rupture, **on indique uniquement l'énergie de rupture K** . Par contre, on constate une certaine ambiguïté dans l'utilisation du mot résilience. Il est utilisé parfois aussi pour désigner l'énergie de rupture.

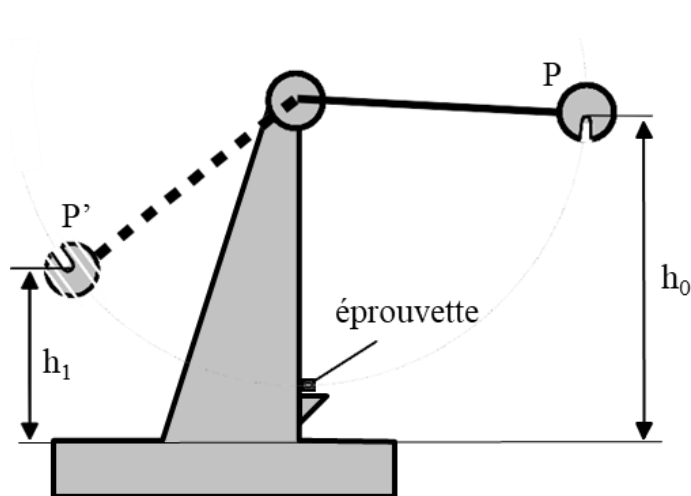


Fig. 2 : Arrangement schématique d'un mouton de Charpy

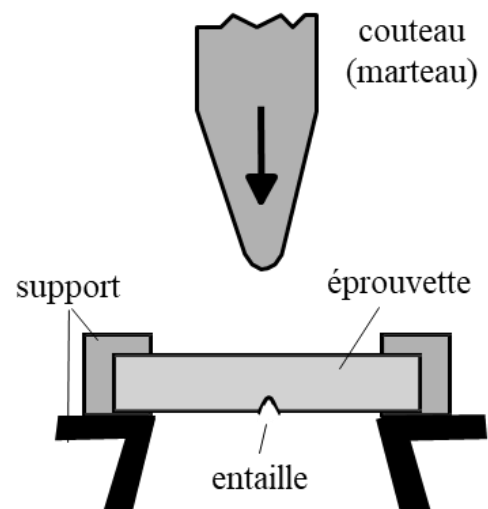


Fig. 3 : Appui de l'éprouvette vu d'en haut

4. Les éprouvettes

L'effet de la forme de l'éprouvette sur l'énergie de rupture est très prononcé. La Fig. 4 montre les formes et dimensions géométriques de trois types d'éprouvettes standardisées. Elles ont toutes une longueur de 55 mm et une section nominale de $10 \times 10 \text{ mm}^2$, mais se distinguent dans leur forme et leur profondeur d'entaille qui se trouve sur le côté opposé à l'endroit où le marteau frappe (Fig. 3). Cette entaille a pour objet de garantir un état de contrainte triaxiale, déjà lors de l'amorçage de la fissure, plutôt que de provoquer l'effet d'entaille. C'est pour cette raison que le fond de l'entaille n'est pas pointu mais cylindrique (rayon de 0.25 ou de 1 mm selon le type d'éprouvette). L'aire de la section restant à l'endroit de l'entaille est, selon la définition de la résilience a_K , la section à utiliser pour le calcul de sa valeur.

Les trois éprouvettes ne sont pas équivalentes. L'énergie de rupture (J) et la résilience (J/cm^2) varient avec la profondeur de l'entaille et le rayon de courbure au fond de l'entaille. Si l'on fait varier le rayon au fond de l'entaille, on modifie la concentration et la triaxialité des contraintes à son extrémité. La résilience est minimale pour une fissure aiguë (rayon = 0, effet d'entaille) et elle augmente avec le rayon. Si le comportement ne dépendait que des dimensions géométriques, on pourrait sans doute trouver une nouvelle définition de la résilience ne dépendant que d'une seule valeur pour différents types d'éprouvettes. Mais les différences des résiliences a_K entre différentes éprouvettes ne varient pas de façon systématique. Elles dépendent du matériau et, pire encore, de son état de ductilité, notamment le travail effectué par la déformation plastique qui est très variable. Si l'on fait varier la profondeur de l'entaille d'une éprouvette ductile, même l'énergie de rupture spécifique a_K augmente avec la hauteur restante. Pour un matériau fragile, par contre, la résilience ne dépend pratiquement pas de la profondeur. Finalement ce n'est pas seulement la valeur absolue qui en dépend, car même la température de la transition ductile-fragile n'est pas identique pour les différents types d'éprouvettes ($\pm 30^\circ\text{C}$). Un constructeur qui aimerait donner une garantie pour la sécurité de son produit doit donc tenir compte d'une importante marge d'incertitude.

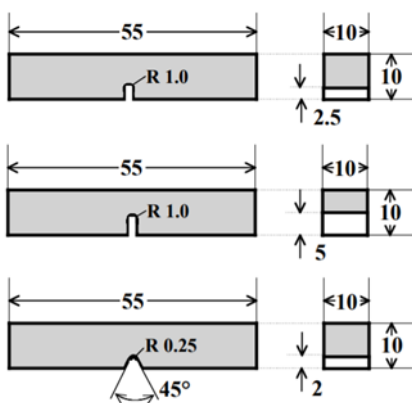


Fig. 4: Eprouvettes Charpy standardisées. Le type le plus utilisé est l'éprouvette ISO-V. Dimensions en mm.

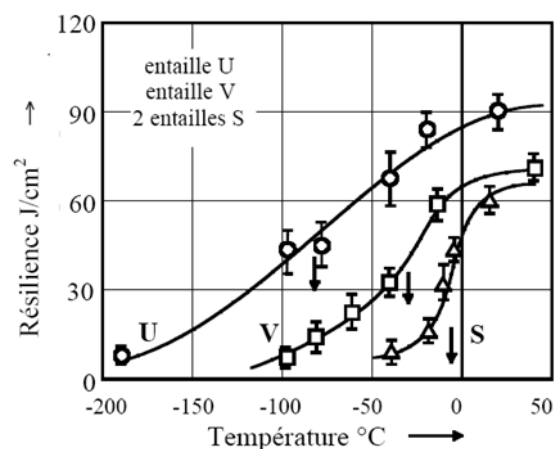


Fig. 5: Influence de la forme de l'entaille sur la courbe de résilience/température. Les flèches indiquent la température à 50% de la chute de la résilience. S est une éprouvette selon Schnadt qui a deux entailles.

5. L'expérience

Le but de cette expérience est de mesurer l'énergie de rupture en fonction de la température pour les différents matériaux mentionnés dans le tableau 2. La forme des éprouvettes utilisées dans ce TP ne correspond pas à la norme ISO-V. En ce qui concerne les éprouvettes métalliques, nous ne retenons que la forme "V" de l'entaille, mais pas la section carrée, car les deux aciers utilisés ne sont pas disponibles sous forme de barre à section carrée dans le commerce. Afin d'économiser les frais pour leur usinage, nous utilisons des éprouvettes à section ronde qui sont disponibles et montrent aussi bien que les autres la transition ductile-fragile.

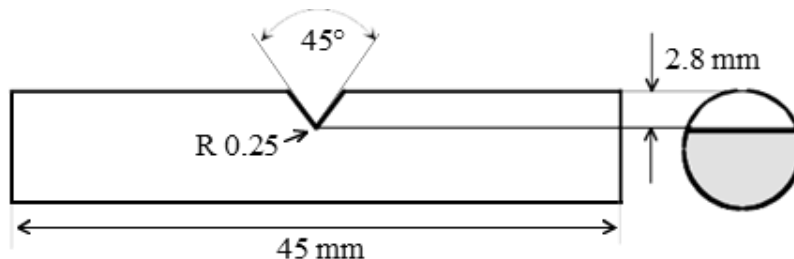


Fig. 6: Forme des éprouvettes de métal utilisées dans ce TP. L'entaille correspond à une entaille en « V » mais la section est celle d'une barre ronde.

La transition ductile-fragile des différents matériaux sera testée sur une large fourchette de températures. Comme nous n'avons pas besoin de faire varier la température de façon continue, nous pouvons nous contenter de quelques milieux de refroidissement classiques :

- Température d'évaporation de l'azote liquide -196 °C
- Température de sublimation de la neige carbonique (CO₂) -78.5 °C
- Glace fondante 0 °C
- Bains d'eau 50°C et 80 °C

Tab. 2: Désignation, composition et caractéristique des matériaux utilisés dans ce TP.

Désignation	Utilisation	Composition (wt%)	Couleur
C15Pb 1.0430	Acier de cémentation pour décolletage	0.15%C, 0.15-0.3%Pb	Rouge
15NiCr13 1.5752	Acier de cémentation	0.14%C, 0.8%Cr, 3.5%Ni	Bleu
X5CrNi 18 10 1.4301 (AISI 304)	Acier inoxydable austénitique	<0.07%C, 18%Cr, 10%Ni	Vert

6. Notice de sécurité

Le nom mouton est trompeur. Il s'agit plutôt d'un bélier. Le bras et le marteau sont dimensionnés pour casser des barres d'acier. Comme la résilience de nos os est nettement inférieure à celle des aciers, l'opérateur doit absolument s'assurer, avant de lâcher le pendule, que personne ne se trouve à proximité du rayon d'action du marteau. Il arrive parfois que des débris de l'éprouvette cassée partent dans des directions imprévues. Les arêtes vives de la surface de rupture sont tranchantes et peuvent créer de vilaines blessures. Il convient donc de protéger les yeux par des lunettes de sécurité et de se mettre derrière le marteau partant.

7. Bibliographie

- Dynamic fracture testing, dans Metals Handbook, 9th Ed. vol 8 Mechanical testing, American society for metals ASM Ohio, USA 1985 p. 259 et suiv.
- Essais de rupture, dans Matériaux métalliques, Techniques de l'ingénieur, Paris 1996, cahier: M 126
- Norme ISO 148: Acier - Essai de résilience Charpy (entaille V)
- D. Askeland, P. Fulay, W. Wright, The science and engineering of Materials, 6th Ed., Cengage Learning, Stamford, USA, 2011
- Instrumented Charpy Impact Tests of Additively Manufactured Specimens, Miron et al., International Symposium on Impact Engineering, p. 242-247, 2019