

TP Résilience

Introduction

L'essai de résilience a pour objet de déterminer la température de transition vers une plus grande fragilité qui vient dans certains matériaux avec l'abaissement de la température. Cette transition d'un état ductile à un état fragile existe parmi bon nombre de matériaux, mais elle n'est pas toujours abrupte, et est particulièrement critique si elle se situe dans la gamme des températures que l'on rencontre habituellement sur la surface de la planète (soit d'environ -30 à +50°C). Parmi les métaux et alliages, les matériaux concernés sont principalement les aciers de maille cubique centrée, dits ferritiques. Outre les métaux et alliages, les polymères font souvent montre de cette caractéristique. Finalement, c'est aussi la température du métal lui-même qui détermine si la rupture est fragile ou ductile.

Les aciers de structure ferritique peuvent ainsi présenter, 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 sur 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 dans les aciers faiblement alliés permet d'abaisser cette température, rendant l'acier apte à l'utilisation à plus basse température. L'apport massif de Ni et de Cr dans les aciers austénitiques fait complètement disparaître cette transition car la structure de la maille change de cubique centré (ferritique) à cubique faces centrées (austénitique), où on ne voit pas ce phénomène. Ces aciers austénitiques gardent une ténacité élevée et se prêtent donc parfaitement à des constructions cryogéniques (récipients et tuyaux pour l'air ou l'He liquide).

L'essai de résilience mesure la résistance des matériaux à la rupture sous l'effet d'un choc. La raison principale de ce choix est qu'un essai de rupture dynamique prend peu de temps à implémenter. Une seconde motivation est le fait qu'en rupture dynamique, la transition ductile-fragile qui vient avec un abaissement de température a lieu avec clarté et à une température un peu plus élevée que n'est le cas avec des essais menés à vitesse plus basse (car certains métaux sont ductiles lorsqu'ils sont rompus à faible vitesse de déformation, mais sont fragiles lorsqu'ils sont soumis à des chocs); on obtient ainsi rapidement une mesure plutôt conservative de la température de transition ductile-fragile. Le succès de cet essai, qui fut inventé par Charpy il y a un peu plus d'un siècle, vient aussi de l'astuce qui consiste à quantifier l'apparition de la transition par l'intermédiaire de la mesure de l'énergie de rupture d'échantillons fortement normalisés, cassés lors d'un essai lui aussi fortement normalisé, à l'aide d'un appareil purement mécanique, relativement simple de construction, et pouvant donner directement l'énergie en question. De plus utiliser un essai dynamique permet de le casser avant qu'il ait eu le temps de se refroidir ou se réchauffer en contact avec l'air ambiant ou le support sur lequel il est placé avant rupture.

La résistance que l'on vise à étudier ici a peu en commun, sur le plan physique, avec la résistance mécanique (R_m) observée dans un essai de traction. Dans l'essai de traction une déformation uniaxiale est graduellement imposée à l'éprouvette, y créant un champ de contraintes uniforme ; tel est loin d'être le cas dans l'essai de résilience, où la distribution des contraintes est complexe et transitoire. Les données qui en ressortent ont aussi peu en commun avec la ténacité (K_{Ic}) des matériaux, car l'éprouvette de résilience est entaillée mais non préfissurée. Par contre, cette mesure fortement normalisée a l'avantage de définir sans ambiguïté ce qu'est la température de transition ductile-fragile pour un matériau donné. La résilience des matériaux est donc une valeur peu utile en soi ; ce sont ses variations qu'on regarde – à moins d'avoir des abaques la reliant à d'autres propriétés du matériau, comme sa limite d'élasticité ; de telles abaques existent pour les aciers du Génie Civil, raison pour laquelle la résilience y est souvent utilisée comme caractéristique des aciers qui y sont utilisés (typiquement des aciers ferritiques à faible teneur en carbone).

Il faut aussi noter que la fragilisation qui découle d'un abaissement de la température n'est pas la seule forme de fragilisation pouvant être observée (ou mesurée par cet essai). Des métaux initialement ductiles peuvent aussi se fragiliser en raison :

- 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
- de phénomènes de fragilisation lors de leur traitement thermique (e.g., la fragilisation de revenu des aciers trempés).

Mouton pendule ou mouton de Charpy

Un marteau de masse m est fixé à l'extrémité d'un pendule (Fig. 1). Ce pendule peut tourner dans un plan vertical autour d'un axe horizontal. L'éprouvette repose sur un support et se trouve au point le plus bas de la trajectoire du marteau (selon la norme, mais n'est pas le cas sur l'appareil utilisé pour ce TP). Pour effectuer un essai, on soulève le bras jusqu'à ce que le marteau atteigne sa position initiale P où on le fixe jusqu'à ce qu'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, par rapport à sa position face à l'éprouvette, à sa position de départ mgh_0 , h_0 étant la hauteur du marteau par rapport à sa position en contact avec l'éprouvette (qui est, dans l'essai normalisé où on place l'éprouvette au plus bas de sa trajectoire, sa position d'équilibre). Après la rupture, le marteau remonte. À 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

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

Un raffinement de l'essai est de soustraire à K l'énergie consommée par le frottement lors de la trajectoire du marteau : pour cela on lance le marteau sans mettre d'éprouvette, et on estime l'énergie de frottement K_f de la même façon, en mesurant jusqu'où va le marteau sans échantillon, avant de soustraire celle-ci à K . Mesurer h_1 est de plus facilité par la présence d'une petite tige flottante donnant l'angle fait par le marteau avec la verticale, laquelle est entraînée par le marteau quand il avance, mais pas quand il recule. 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. Le type d'échantillon normé utilisé pour la détermination de cette énergie est important (l'essai est, comme dit, fortement normalisé). Les éprouvettes les plus fréquemment utilisées aujourd'hui sont les types ISO-V et ISO-U (Fig. 3). Elles ont une entaille en forme de V ou U, respectivement, pour fixer l'endroit de départ 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.

Pour obtenir la résilience aK on divisera encore cette valeur par l'aire de la section de l'échantillon à l'endroit de la fissure. L'unité habituelle pour exprimer la résilience aK est le J/cm². Comme la valeur aK ne présente aucun avantage sur l'indication de l'énergie de rupture (l'essai ne donne, comme dit, pas une grandeur physique fondamentale et ne va généralement pas varier de façon simple avec les dimensions de l'échantillon), **on indique uniquement l'énergie de rupture K** . Par contre, on constate une certaine ambiguïté dans l'utilisation du mot résilience car il est utilisé parfois aussi pour désigner l'énergie de rupture des matériaux lors d'autres essais.

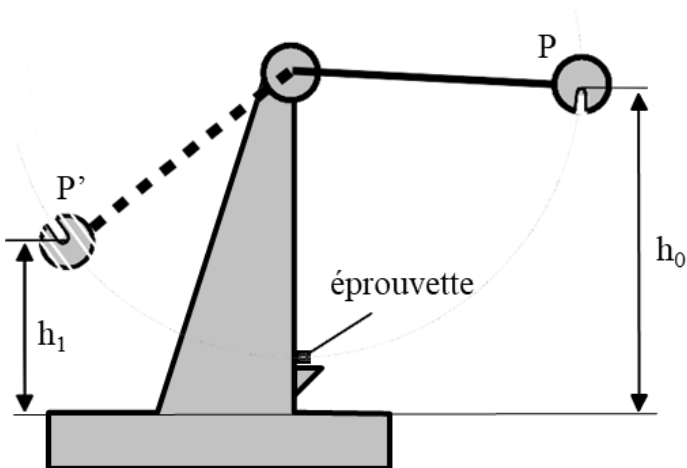


Fig. 1 : Arrangement schématique d'un mouton de Charpy

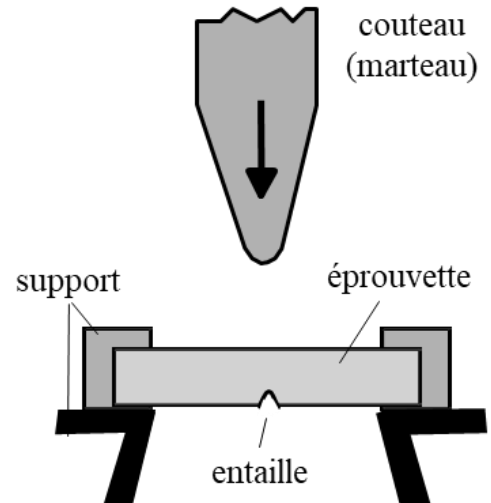


Fig. 2 : Appui de l'éprouvette vu d'en haut

Les éprouvettes

L'effet de la forme de l'éprouvette sur l'énergie de rupture ainsi mesurée est très prononcé. La Fig. 3 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 la forme et la profondeur de leur entaille, laquelle se trouve sur le côté opposé à l'endroit où le marteau frappe (Fig. 2). Cette entaille a pour objet de garantir un état de contrainte triaxiale, déjà lors de l'amorçage de la fissure, plutôt que de provoquer un effet de concentration intense des contraintes en fond 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 αK , la section à utiliser pour le calcul de sa valeur. Notez que seuls des résultats obtenus sur des éprouvettes de dimensions identiques peuvent 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. Un constructeur qui aimerait donner une garantie pour la sécurité de son produit doit donc se tenir strictement à citer des valeurs caractéristiques du protocole d'essai utilisé et tenir compte d'une marge d'incertitude si ces valeurs sont converties à l'aide d'abaques en valeurs d'autres propriétés, comme la contrainte à rupture en traction, ou même les résiliences obtenues avec une autre forme d'éprouvette.

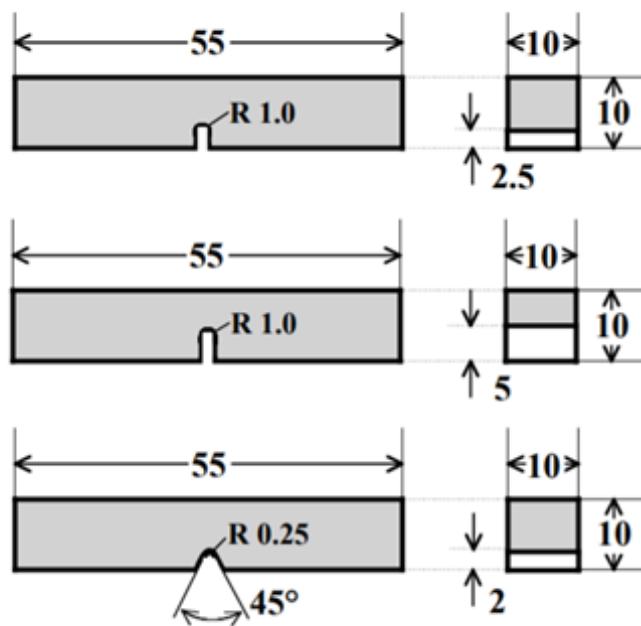


Fig. 3 Eprouvettes Charpy standardisées. Le type le plus utilisé est l'éprouvette ISO-V. Dimensions en mm

Pour des raisons d'organisation et pratiques, la géométrie des éprouvettes utilisées dans ce TP ne correspond pas aux normes décrites ci-dessus. Les éprouvettes sont entaillées de façon similaire à celles de la norme ISO-V mais sont prélevées dans des barreaux de section circulaire.

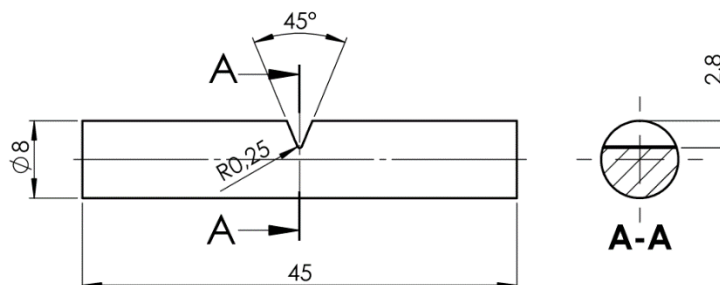


Fig. 4 Eprouvettes rondes avec entaille en V, dimensions en mm

Courbe énergie absorbée – température

La courbe énergie absorbée-température (courbe $KV-T$) donne l'énergie absorbée en fonction de la température d'essai pour une forme d'éprouvette donnée (Fig. 5). En général, la courbe est obtenue par tracé d'une courbe lissée à partir de valeurs individuelles. La forme de la courbe et la dispersion des valeurs d'essai dépendent du matériau, de la forme d'éprouvette, du nombre d'essais menés et de la vitesse du choc. Dans le cas d'une courbe avec une zone de transition, une distinction est faite entre le plateau supérieur, la zone de transition et le plateau inférieur.

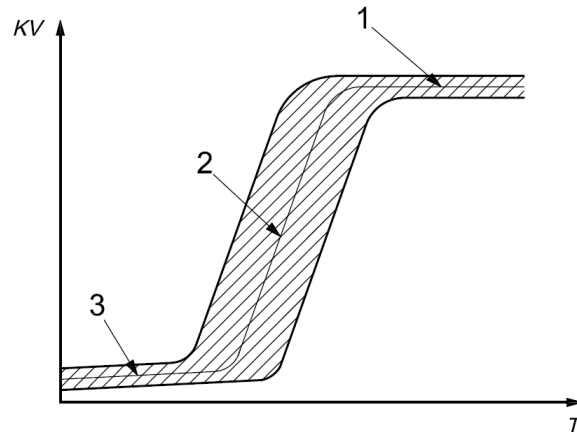


Fig. 5 Courbe schématique énergie absorbée – température, où 1 est le plateau supérieur, 2 est la zone de transition, 3 est le plateau inférieur

Température de transition T_t

La température de transition T_t caractérise la position de la partie fortement pentue de la courbe énergie absorbée-température. Comme la partie fortement pentue s'étend habituellement sur un intervalle de température assez large où elle prend une variété de formes possibles, il n'y a pas de définition applicable en général de la température de transition. Les critères suivants sont souvent utilisés, pour déterminer la température de transition :

La température de transition T_t est la température à laquelle :

- une valeur particulière d'énergie absorbée est atteinte, par exemple $KV_8 = 27J$ (KV_8 veut dire utilisation d'un marteau avec couteau de 8mm);
- un pourcentage particulier de la valeur d'énergie absorbée correspondant au plateau supérieur est atteint, par exemple 50% (critère à utiliser dans ce TP);
- un pourcentage particulier de rupture par cisaillement est observé, par exemple 50%; ou
- une valeur particulière d'expansion latérale est atteinte, par exemple 0,9mm.

Il convient de spécifier le choix du critère utilisé pour définir la température de transition dans la norme ou spécification de produit ou par accord.

Expérience

Objectifs

- Comprendre la finalité et le fonctionnement d'un essai de résilience.
- Connaître l'existence de comportements différents aux chocs selon le matériau et la température.
- Savoir tracer la courbe de transition ductile-fragile en résilience et déterminer la température de transition.
- Savoir déterminer visuellement si une rupture est fragile, ductile ou mixte.

Instruments à disposition

- Machine d'essai Hounsfield « Balanced Impact Machine », 65J

- Bains thermostatiques, plaque chauffante, neige carbonique, glace, azote liquide
- Pincés et divers récipients

Echantillons

- 6 échantillons cylindriques avec entaille en V en acier de construction C15Pb
- 6 échantillons cylindriques avec entaille en V en acier inoxydable X5 CrNi 18 10
- 6 échantillons cylindriques avec entaille en V en acier de cémentation 15NiCr13

Désignation	Composition en %poids	N° matière	Couleur
C15Pb	0.15C, 0.15-0.3Pb	1.0403	Rouge
X5 CrNi 18 10	<0.07C, 18Cr, 10Ni	1.4301	Vert
15NiCr13	0.14%C, 0.8%Cr, 3.5%Ni	1.5752	Bleu

Tab. 1 Matières fournies pour le TP

Travail à faire

- Amener une éprouvette de chaque acier aux températures suivantes en employant les bains et autres récipients à disposition : -196 °C, -78,5 °C, 0 °C, température ambiante, 50 °C, 80 °C.
- Préparer la machine : retirer la goupille et relever les marteaux.
- Faire un essai à vide pour contrôler le « zéro » de la machine.
- Disposer avec la bonne orientation et position un échantillon dans les supports et déclencher le marteau immédiatement, la norme donne un maximum de 5 s entre le temps de la prise de l'éprouvette depuis son four ou bain et le temps où elle est frappée, ceci afin de garantir la température visée au moment de l'essai.
- Lire la valeur du cadran et la convertir en Joules.
- Récupérer l'échantillon et observer le mode de rupture (fragile, ductile ou mixte). Si l'éprouvette n'est pas rompue, noter l'énergie entre parenthèses.
- Débloquent les marteaux et les remettre en position haute.
- Répéter l'opération pour toutes les éprouvettes.
- Tracer un graphe comprenant l'énergie de rupture en fonction de la température pour chacun des trois aciers.

ATTENTION : le mouton pendule est extrêmement dangereux !

- **Assurez-vous que personne n'est dans l'axe de la machine avant de déclencher l'essai. En cas du moindre doute stoppez l'essai avant de lâcher le marteau.**
- **Avertissez vos collègues avant le déclenchement.**
- **Des fragments d'échantillons peuvent partir lors du choc, portez des lunettes pour tous les essais et éloignez-vous des lieux situés le long de la trajectoire possible de ces fragments.**

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