**CARACTERISATION DES MATERIAUX**

**Introduction**

Les essais mécaniques sont l'étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux, du module d'Young à la limite d'élasticité, en passant par la ténacité ou la résistance à la fatigue, et ce dans des conditions variables, par exemple de température ou de vitesse de sollicitation.

Le propos de ce document est de présenter les techniques expérimentales les plus couramment utilisées, aussi bien dans les laboratoires universitaires qu'industriels, pour caractériser le comportement mécanique des matériaux. Les techniques abordées seront : les essais uniaxiaux (quasi-statiques et dynamiques), les essais multiaxiaux, les mesures d'indentation, les essais de fatigue et les techniques gravitant autour du phénomène de rupture. En outre, les annexes apportent un complément sur les méthodes de mesure de la déformation et de la contrainte.

Il s'agit ici de donner les grandes idées et les modes opératoires propres à chacune des techniques abordées, sans entrer dans trop de détails, chacune d'entre elles pouvant faire l'objet d'un ou de plusieurs ouvrages à elle toute seule. L'intention de ce document est de donner un "bon sens physique" au futur ingénieur sur ce que l'on peut mesurer, comment et avec quelle précision, dans un temps relativement restreint.

Essais mécaniques uniaxiaux

La caractérisation des lois de comportement des matériaux sur une plage de vitesses importante implique d'utiliser des techniques variées, avec des précautions propres à chacune d'entre elles. Les résultats sont d'exploitation plus ou moins aisée, et l'on distinguera les essais quasistatiques des essais dynamiques. Les premiers permettent, par leur caractère uniaxial, une exploitation relativement directe des résultats, alors que les seconds, qui impliquent des vitesses de déformation élevées, imposeront une modélisation qui prend en compte la propagation des ondes élastiques dans les matériaux et pourront imposer l'utilisation des éléments finis afin d'être "proprement" compris.

Fluage

Le fluage d'un matériau se produit à haute température et correspond à un régime de déformation lente, sous charge constante, la contrainte étant potentiellement inférieure à la limite d'élasticité. Ces essais intéressent donc les domaines où les matériaux sont soumis à des températures élevées, tels que l'aéronautique ou le nucléaire.

Les essais de fluage nécessitent l'usage d'une machine de mise en charge, d'un four et d'un extensomètre. Dans le cas des métaux, les essais de fluage sont le plus souvent effectués en traction, quoique des essais de compression sont également possibles pour des matériaux fragiles, le risque d'endommagement étant plus limité dans ce mo de (les fissures perpendiculaires à l'axe de sollicitation ne pouvant pas se développer).

Eprouvettes

Les éprouvettes de fluage sont analogues à celles utilisées pour les essais de traction uniaxiale ordinaires : éprouvettes cylindriques ou plates, encore que d'autres géométries peuvent être utilisées selon la disponibilité du matériau ou les contraintes géométriques. Il est préférable, toutefois, étant donnée la faible vitesse de déformation, de disposer d'éprouvettes relativement longues pour augmenter la précision de la mesure du déplacement.

Résultats types

Typiquement, le fluage des matériaux présente trois phases : le fluage primaire, pendant lequel la vitesse de déformation décroit continûment, le fluage secondaire, à vitesse de déformation minimum, et enfin le fluage tertiaire pendant lequel la vitesse de déformation augmente jusqu'à la rupture de l'échantillon. La figure 2.4 présente une courbe type d'essai de fluage.

III

I II

**Figure: Courbe type de fluage**

**2.2 Essais de traction**

L'essai de traction constitue un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des matériaux. Etant purement uniaxial du moins tant qu'il n'y a pas de striction (diminution catastrophique de la section de l'éprouvette au centre de celle-ci), il permet de s'affranchir des méthodes de calcul inverse pour aboutir directement à une loi de comportement uniaxial. Il permet de déterminer de nombreuses grandeurs normalisées, comme la contrainte à rupture, la contrainte maximale, la limites d'élasticité, etc. nécessaires dans les calculs de structure. Nous donnons ici tout d'abord la description générale d'une machine de traction, puis des éléments concernant les éprouvettes, les mesures de déformation et de charge appliquée.

**2.2.1 Description générale d'une machine de traction**

Une machine de traction est constituée d'un bâti portant une traverse mobile. L'éprouvette de traction, vissée ou enserrée entre des mors, selon sa géométrie, est amarrée à sa partie inférieure à la base de la machine et à sa partie supérieure à la traverse mobile (dans le cas d'une machine mécanique) ou au vérin de traction (dans le cas d'une machine hydraulique). Le déplacement de la traverse vers le haut réalise la traction. Une machine de traction comporte une cellule de charge, qui permet de mesurer l'effort appliqué à l'éprouvette et le déplacement de l'éprouvette peut être suivi de diverses façons. Les dispositifs expérimentaux sont généralement asservis et peuvent être pilotés à vitesse de montée en charge, à charge constante, à vitesse de déformation constante, etc. selon ce qui peut être proposé par le système de pilotage.

**2.2.2 Eprouvettes**

Les éprouvettes de traction adoptent deux géométries : cylindrique ou plate. La section doit être constante sur une longueur suffisante pour obtenir un état de contrainte homogène pendant l'essai.

Aux deux extrémités sont usinées des têtes d'amarrage avec des rayons de courbures suffisamment grands pour éviter des concentrations de contrainte excessives. Dans le cas des éprouvettes plates, le centrage de l'éprouvette peut devenir problématique si des trous calibrés ne sont pas percés dans les têtes.

**2.2.3 Mesure du déplacement**

La mesure du déplacement peut se faire de deux façons : soit en mesurant le déplacement de la traverse, soit en plaçant un dispositif de mesure sur la section utile de l'éprouvette. Les mesures peuvent atteindre une précision d'environ 1 à 0,1 μm avec les dispositifs les plus sensibles, hors mesures de champs.

**Extensométrie**

Un extensomètre est un dispositif permettant de mesurer le déplacement directement sur la partie utile de l'éprouvette (i.e. où l'état de contrainte est homogène). Cela permet de s'affranchir de la raideur de la machine et des effets de triaxialité, et d'obtenir une mesure plus précise que par la mesure du déplacement de la traverse. Il existe deux types d'extensométrie : avec ou sans contact ; on choisira l'une ou l'autre selon les conditions expérimentales.

.**2.3 Essais dynamiques**

Les essais dynamiques sont les techniques expérimentales qui permettent de solliciter un matériau à des vitesses de déformation élevées. Ils intéressent des applications diverses comme la protection sismique, les calculs de déformation lors de crash test dans l'automobile, les procédés de mise en forme de métaux, notamment par usinage, ou encore les problèmes liés à la perforation des blindages, qui impliquent des vitesses de déformation pouvant atteindre, respectivement, 1 à

102 s−1, 103 s−1, 104 s−1 et plus de 107 s−1. Les deux méthodes expérimentales présentées ici

intéresseront les plages allant de 1 à 105 s−1.

Pour les essais de traction uniaxiale classiques présentés dans la section précédente, les vitesses

de déformation atteintes vont de 10−4 à 0,1 s−1, environ, ce qui n'est de toute évidence pas su\_sant

face aux vitesses de déformation rencontrées dans certaines conditions réelles, comme celles mentionn

ées ci-dessus. Il est donc nécessaire de disposer de techniques expérimentales qui permettent de caractériser le comportement mécanique des matériaux dans des conditions contrôlées. Nous présenterons ici les essais de traction à grande vitesse, qui permettent de faire varier la vitesse de déformation de 1 à 400 s−1, environ, et les essais Hopkinson, dont la plage de vitesse de déformation est typiquement de 102 à 105 s−1 (cf. \_gure

**2.3.1 Traction grande vitesse**

Les essais de traction "grande vitesse" se distinguent des essais quasi-statiques, d'une part par

la nécessité d'obtenir des vitesses de vérin très élevées (jusqu'à 25 m/s), et d'autre part par la mise

en ÷uvre de techniques de mesure spéci\_ques que ce soit pour la mesure de la charge ou pour la

mesure de l'allongement de l'éprouvette. Pour cette dernière, l'extensométrie sans contact est une

des techniques les plus utilisées.

Déplacement et échantillon

Pour atteindre des vitesses de déplacement élevées (de l'ordre de 20 m/s), il est nécessaire d'utiliser des systèmes servo-hydrauliques ; en outre, a\_n d'obtenir des vitesses de déformation aussi constantes que possible, il est nécessaire de démarrer le déplacement de la partie mobile sans entraîner l'éprouvette avant que la vitesse désirée ait été atteinte, que ce soit par des systèmes qui permettent de serrer les mors "à la volée" ou bien par un dispositif qui entraîne la traverse avec un retard suffisant.

**Mesure de contrainte et de déformation**

A de telles vitesses de déformation, il s'avère nécessaire de disposer de systèmes d'acquisition travaillant à des fréquences très élevées, de l'ordre de quelques MHz. En outre, la cellule de force montée sur le bâti va recevoir un signal fortement bruité par les ondes mécaniques se propageant dans le dispositif, ce qui peut nécessiter de réaliser les mesures de contrainte directement sur l'éprouvette, à l'aide de jauges de déformation appliquées sur les parties de l'éprouvette déformées de manière purement élastique (hors de la section utile, donc). Les mesures de déformation doivent également être e\_ectuées directement sur l'éprouvette, par un système d'extensométrie adapté. Les 8 extensomètres laser à e\_et Doppler peuvent être utilisés dans ce cas1. La \_gure 2.7 présente le dispositif de traction à grande vitesse du Centre des Matériaux (CdM) de l'Ecole des Mines de Paris.

Fig. 2.7: Dispositif de traction grande vitesse (TGV) du CdM. 1) Cellules laser à e\_et Doppler pour la mesure de déformation 2) Dispositif de mors enserrant l'éprouvette "à la volée" lorsque la vitesse de déplacement désirée est atteinte. La vitesse de déplacement maximale de la traverse est de 25 m/s, la charge maximale de 80 kN, l'énergie d'environ 6 kJ ; il est possible de réaliser des essais en température, entre -135 et +250 \_C. (crédit photo : B. Tanguy, ENSMP, CdM)

Exploitation des résultats

Les essais de traction à grande vitesse imposent de prendre en compte la propagation des ondes

élastiques dans le système, et donc de modéliser chacun des essais. Par exemple, dans le cadre

des études réalisées au CdM, une modélisation éléments \_nis permet de reproduire la propagation

des ondes élastiques dans l'éprouvette. L'image 2.8 présente le maillage utilisé ainsi qu'un état de

contrainte au cours de la montée en charge. Une version "animée" de cette modélisation peut se

trouver sur le site http ://mms2.ensmp.fr.

Fig. 2.8: Exemple de modélisation éléments \_nis d'un essai de traction : maillage d'une demi-

éprouvette. Une version animée montrant l'évolution des ondes élastiques peut se trouver sur le

site http ://mms2.ensmp.fr (crédit : B. Tanguy, ENSMP, CdM). On voit sur cette image que les

ondes élastiques partant du bas (i.e. de la droite, sur cette image) ont franchi les deux congés

de raccordement ; la section utile se trouve dans un état de forte contrainte homogène, la partie

inférieure de l'éprouvette est encore parcourue d'ondes émises lors de la mise en charge et re\_étées

sur le premier congé, alors qu'au niveau de la partie supérieure (i.e. sur la gauche de l'image) un

premier front d'onde (bleu clair) se propage : le haut de la tête supérieure de l'éprouvette n'a pas

encore été sollicitée à ce stade de l'essai.

1Le principe de cette méthode est d'éclairer la surface de l'échantillon par deux faisceaux lasers issues de la même

source qui interfèrent sur la surface de l'échantillon, formant ainsi des franges dont la distance dépend de la longueur

d'onde du faisceau et de l'angle que forment les lasers entre eux. Lorsque la surface de l'éprouvette se déplace dans

le volume d'interférence des deux faisceaux, la rugosité procure une population naturelle de sources de di\_usion

qui di\_useront la lumière avec une intensité modulée par le contraste d'intensité local. La fréquence de modulation

est alors proportionnelle à la vitesse de déplacement de la surface. En mesurant simultanément deux points de la

surface, leur mouvement relatif peut être déduit ce qui permet de remonter à la déformation.

9

2.3.2

Chapitre 3

Essais multiaxiaux

Les essais multiaxiaux apportent une information précieuse pour tester les modèles de déformation,

mais il sont malheureusement peu pratiqués en raison des di\_cultés expérimentales. Les

essais possibles, classiquement, sont les essais de traction (ou compression) - torsion, les essais de

traction biaxiale et les essais de compression triaxiale. L'essai de traction cisaillement est le plus

riche pour tester les aspects d'anisotropie. Nous présenterons ici les essais de traction biaxiale et

les essais de traction - torsion.

Les essais multiaxiaux peuvent être e\_ectués suivant deux modes : en phase ou hors phase,

selon que l'éprouvette subit simulatément ou non les di\_érentes sollicitations. Les déplacements et

les forces appliquées peuvent enregistrées de la même façon que dans le cas des essais de traction

uniaxiale. Ces essais sont utilisés soit dans des conditions quasi statiques soit dans le cadre d'essais

de fatigue multiaxiale.

3.1 Traction biaxiale

Les essais de traction biaxiale consistent à exercer une contrainte dans deux directions perpendiculaires

sur une même éprouvette. Ceci impose d'utiliser des éprouvettes cruciformes, comme

celle présentées \_gure 3.1. Pour réaliser des états de contrainte uniformes, il faut que les bras de

la croix aient des rigidités transversales assez faibles, ce que l'on peut obtenir en les évidant. Les

directions principales des contraintes sont \_xées et on peut e\_ectuer des chargements dans l'espace

de contraintes tels que celui présenté \_gure 3.1 (image de gauche).

Fig. 3.1: Image