

Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux

Marc Blétry

2006-2007

Table des matières

1	Introduction	2
2	Essais mécaniques uniaxiaux	3
2.1	Fluage	3
2.2	Essais de traction	6
2.3	Essais dynamiques	8
3	Essais multiaxiaux	12
3.1	Traction biaxiale	12
3.2	Traction-torsion	13
4	Essais d'indentation	14
4.1	Macroducté	14
4.2	Microducté	15
4.3	Nanoducté (indenteur Berkovitch)	16
5	Essais de fatigue	17
5.1	Eprouvettes et essais	17
5.2	Résultats	18
6	Caractérisation de la rupture	20
6.1	Essais de résilience	20
6.2	Mesure de ténacité	23
6.3	Contrôle non destructif	24
A	Extensométrie	25
A.1	Extensométrie avec contact	25
A.2	Extensométrie sans contact	27
B	Mesures de champs cinématiques : corrélation d'images	28
B.1	Principe	28
B.2	Aspects pratiques	28
C	Pour aller plus loin	30

Chapitre 1

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, l'annexe C à la fin de ce document s'efforçant de proposer quelques pistes pour aller plus loin.

Chapitre 2

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. La figure 2.1 présente les techniques à utiliser en fonction de la vitesse de déformation à laquelle la loi de comportement du matériau doit être évaluée.

Toutes ces techniques ne peuvent pas non plus mettre en jeu les mêmes énergies, comme le montre l'image de gauche de la figure 2.1, et ne permettent donc pas de caractériser des échantillons de même taille. Certaines d'entre elles sont très consommatrices de matière, ce qui peut poser des problèmes de coût ou de faisabilité, alors que d'autres peuvent être pénalisantes en ne permettant pas de tester des échantillons de taille satisfaisante. Tout cela dépend, bien sûr, de ce que l'étude est appelée à caractériser.

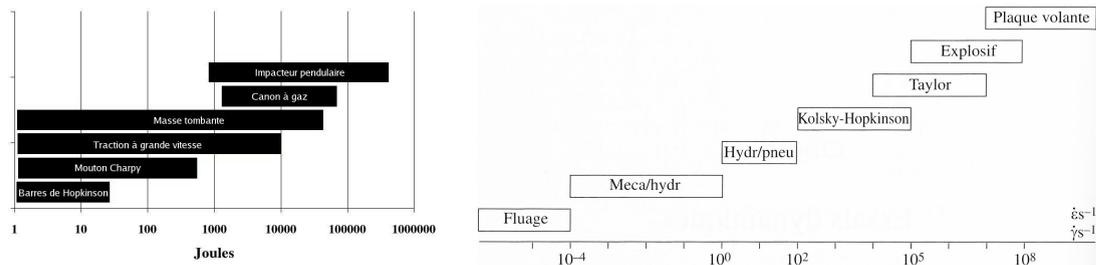


Fig. 2.1: Image de gauche : gamme d'énergies atteignables par les différentes techniques de caractérisation. Image de droite : techniques à utiliser en fonction de la plage de vitesse de déformation visée (tiré de [ec01]).

Dans ce chapitre, nous allons présenter quatre types d'essai : les essais de fluage et l'essai de traction (quasistatique) d'un usage très répandu, alors que les deux autres, traction à grande vitesse et essais Hopkinson, par leur complexité de mise en œuvre, se rencontrent plutôt dans le cadre des laboratoires de recherche.

2.1 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 mode (les fissures perpendiculaires à l'axe de sollicitation ne pouvant pas se développer).

2.1.1 Eprouvettes

Les éprouvettes de fluage sont analogues à celles utilisées en 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.

2.1.2 Dispositif d'application de la charge

Lors d'une expérience de fluage, il est plus courant de travailler à charge qu'à contrainte constante, toutefois il est possible d'effectuer des essais à contrainte constante, ce qui implique de faire varier la charge appliquée au fur et à mesure de la déformation de l'échantillon. Les dispositifs de fluage sont généralement composés d'un poids et d'un bras de levier relié à un mors sur lequel l'éprouvette est fixée (cf. figure 2.2 pour une photo d'un montage de fluage type). Il peut être nécessaire, pour conserver l'équilibre de cette balance, de disposer d'un moteur qui compense l'élongation de l'éprouvette, les dispositifs correctement conçus pouvant tout de même assurer une précision satisfaisant les normes pour des angles du bras de levier de l'ordre de 10° . Il faut porter une attention particulière à l'alignement des têtes d'amarrage, afin de limiter les moments de flexion imposés à l'éprouvette (la norme ASTM recommande une déformation en flexion inférieure à 10 % de la déformation axiale).

Une étape sensible de l'essai de fluage est la mise en charge qui doit être accomplie de façon soignée pour éviter de perturber l'essai. L'éprouvette doit déjà être à la température de l'essai pour cette opération. La mise en charge peut être réalisée soit de manière "instantannée" pour s'approcher de la courbe théorique de fluage, mais cela peut entraîner une perturbation du dispositif de mesure de la déformation ou un effet de choc sur l'éprouvette qui entraîne l'apparition d'un transitoire. Autrement, on peut procéder à un chargement progressif qui a l'avantage d'être reproductible, soit par paliers discontinus (ajout de masses), soit en augmentant continûment la charge, typiquement à l'aide de petites billes de plomb.

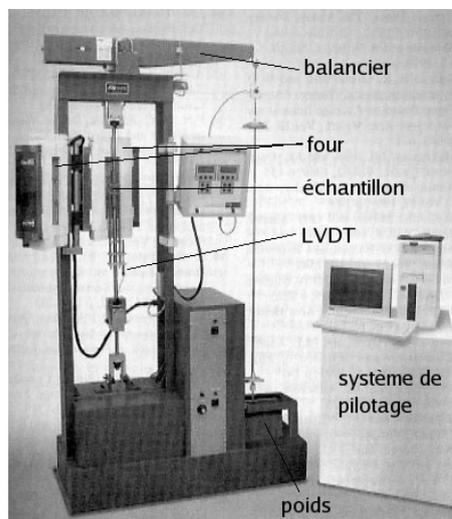


Fig. 2.2: Dispositif d'essai de fluage (tiré de [Han]).

2.1.3 Four

Les fours utilisés sont en général des fours tubulaires à résistance électrique qui chauffe par radiation. Les variations de température ayant un impact fort sur les résultats de fluage, il est important d'assurer un contrôle précis de la température (la norme fixe une variation maximale de $\pm 1,7$ °C au-dessous de 980 °C et $\pm 2,8$ °C au-dessus. La montée en température à elle seule peut durer plusieurs heures pour éviter de dépasser la température d'essai, ce qui invaliderait les résultats. La mesure de température est généralement effectuée par un thermocouple fixé sur l'échantillon. Les éprouvettes longues peuvent imposer d'utiliser plusieurs thermocouples afin de s'assurer de l'homogénéité de la température.

2.1.4 Mesure du déplacement

La mesure du déplacement est effectuée par extensométrie. L'annexe A.1 détaille les différentes techniques d'extensométrie existantes. Dans le cas des essais de fluage, la température élevée interdit le plus souvent de placer l'extensomètre directement dans le four et on utilise un système de tiges capables de supporter la température d'essai, transférant la déformation à un LVDT (cf annexe ??) comme présenté sur la figure 2.3. Il est aussi possible de faire appel à de l'extensométrie sans contact, ce qui implique de disposer d'une fenêtre dans le four pour suivre la déplacement des points de la surface pris comme repères.

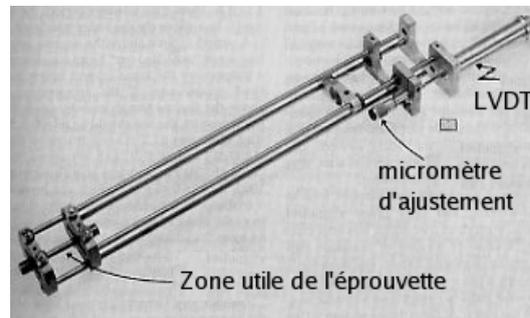


Fig. 2.3: Dispositif de mesure de la déformation pour essai de fluage (tiré de [Han]).

2.1.5 Résultats types

Typiquement, le fluage des matériaux présente trois phases : le fluage primaire, pendant lequel la vitesse de déformation décroît 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.

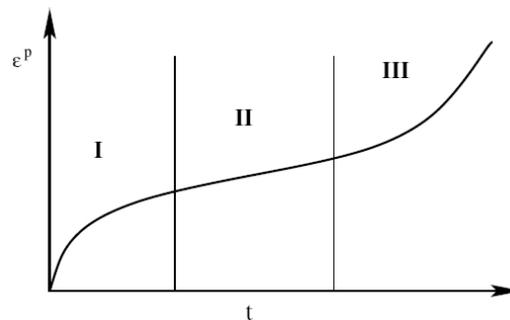


Fig. 2.4: Courbe type de fluage.

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 uniaxiale. 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.

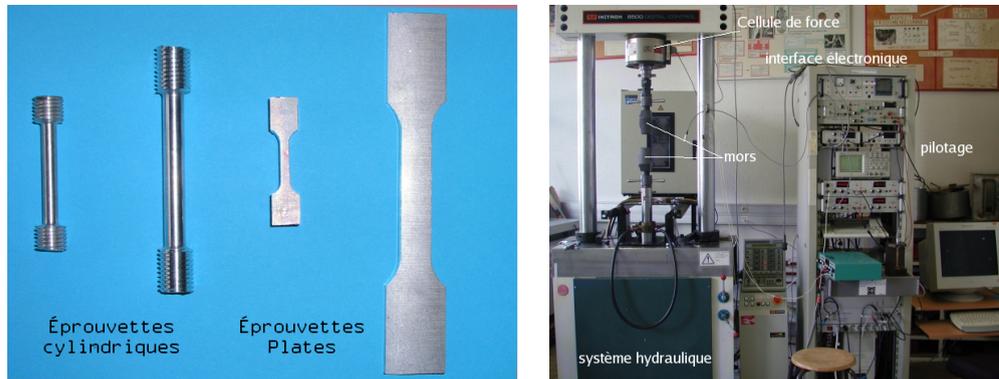


Fig. 2.5: Image de gauche : éprouvettes de traction plates et cylindriques ; les extrémités sont plus épaisses pour moins se déformer, elles se raccordent à la section utile (plus étroite et longue pour obtenir un état de contrainte réellement uniaxial) par des congés usinés de façon à éviter de trop fortes concentrations de contraintes (donc avec un rayon de courbure aussi grand que possible). Image de droite : exemple de dispositif de traction du Centre des Matériaux.

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.

Déplacement de la traverse

Cette méthode de mesure implique l'ensemble de l'éprouvette, et donc des zones où l'uniaxialité de la contrainte n'est pas vérifiée, ce qui introduit une erreur dans la mesure. En outre, lorsque le déplacement est évalué directement grâce à celui de la traverse, la raideur de la machine intervient dans les résultats de déformation obtenus : elle se comporte comme un ressort de raideur K (N/m) en série avec l'éprouvette. Si la force mesurée par la cellule de charge est F , v le déplacement de la traverse ou du vérin, L_0 la longueur initiale de l'éprouvette et ϵ la déformation, on peut écrire :

$$\Delta L/L_0 + F/(KL_0) = v/L_0 \quad (2.1)$$

Si K est grand, il est clair que la déformation mesurée est proche de celle du matériau testé : il faut donc disposer d'une machine aussi raide (ou "dure") que possible. Plus la machine sera molle, plus les résultats différeront du comportement vrai du matériau, au point de masquer des phénomènes comme des chutes de la charge. L'équation 2.1 se dérive en :

$$\dot{F} = \dot{v} \frac{S_0}{L_0} \frac{d\sigma}{d\epsilon} \left(1 + \frac{1}{K} \frac{S_0}{L_0} \frac{d\sigma}{d\epsilon} \right)^{-1} \quad (2.2)$$

où $d\sigma/d\epsilon$ représente l'écrouissage. Dans le cas où le matériau présenterait un adoucissement ($d\sigma/d\epsilon < 0$) et si la machine de traction est trop molle (K petit), la variation de la force n'est pas forcément négative et peut tendre vers 0 et donc masquer la diminution de la contrainte d'écoulement.

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. L'extensométrie est présentée dans l'annexe A. Il est possible également de mesurer la variation de section d'une éprouvette pour évaluer l'effet Poisson.

2.2.4 Cellule de charge

La mesure des forces repose sur l'évaluation de la déformation d'un corps dont le module est connu ; la théorie de l'élasticité permet alors de remonter de la déformation à la force appliquée. Ce principe est utilisé à plusieurs échelles, de la mesure des forces impliquées dans le déplacement des cellules (en biologie), de l'ordre de 2 à 3×10^{-9} N [dRSB+05], à la pesée de l'A 380, d'un poids d'environ 6×10^6 N. Dans le cas des essais de traction, le principe des cellules de charge repose sur la déformation d'un corps d'épreuve sur lequel ont été disposées des jauges de déformation (cf. annexe A.1.1) qui permettent de mesurer la déformation par une variation de signal électrique. Il est alors possible de déduire la charge appliquée de la tension lue aux bornes des extensomètres. Plus ce corps aura un module faible, plus il permettra de mesurer des forces faibles, mais il risquera alors de perturber l'expérience puisque la cellule de charge est en série avec les mors et l'éprouvette. En outre, la force mesurable maximale est bornée supérieurement par la limite élastique du corps d'épreuve. Pour éviter le risque d'endommager la cellule, certaines d'entre elles sont équipées d'une butée qui interdit la mesure au-delà d'une certaine force. La géométrie de la cellule de force dépendra de la sensibilité souhaitée ou de la rigidité nécessaire. La figure 2.6 présente un certain nombre de géométries de cellules de force classiques. En pratique, l'erreur de mesure sur les cellules de force commerciales varie typiquement de 0,02 à 2 % environ (selon la charge mesurée et... le prix de la cellule).

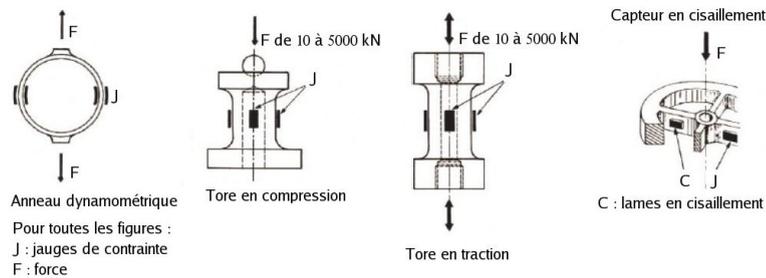


Fig. 2.6: Différents types de cellules de charge (tiré de [Mon94]).

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 10^2 s^{-1} , 10^3 s^{-1} , 10^4 s^{-1} et plus de 10^7 s^{-1} . Les deux méthodes expérimentales présentées ici intéresseront les plages allant de 1 à 10^5 s^{-1} .

Pour les essais de traction uniaxiale classiques présentés dans la section précédente, les vitesses de déformation atteintes vont de 10^{-4} à $0,1 \text{ s}^{-1}$, environ, ce qui n'est de toute évidence pas suffisant face aux vitesses de déformation rencontrées dans certaines conditions réelles, comme celles mentionnées 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 10^2 à 10^5 s^{-1} (cf. figure 2.1).

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 œuvre de techniques de mesure spécifiques 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, afin 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 effectuées directement sur l'éprouvette, par un système d'extensométrie adapté. Les

extensomètres laser à effet Doppler peuvent être utilisés dans ce cas¹. La figure 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 effet 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 finis 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>.

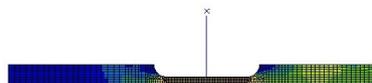


Fig. 2.8: Exemple de modélisation éléments finis d'un essai de traction : maillage d'une demi-éprouvette. Une version animée montrant l'évolution des ondes élastiques peut se trouver sur le site <http://mms2.ensmp.fr> (crédit : B. Tanguy, ENSMP, CdM). On voit sur cette image que les ondes élastiques 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 reflétées 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 diffusion qui diffuseront 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.

2.3.2 Essais Hopkinson

Principe

Les essais Hopkinson consistent à placer l'échantillon entre deux barres à haute limite élastique. Un projectile vient heurter la barre d'entrée (propulsé par un canon à air comprimé constitué d'un compresseur et d'une électro-vanne) ce qui génère un train d'ondes se propageant dans toute la chaîne mécanique, provoquant la compression de l'échantillon, les mesures étant effectuées sur le corps des deux barres. On préfère utiliser des barres longues qui permettent l'approximation élastique unidimensionnelle car la situation devient trop complexe pour être exploitable dans le cas 2D. Pour les essais Hopkinson, l'hypothèse d'homogénéité de la contrainte n'est pas toujours tenable - surtout aux plus hautes vitesses - et il s'avère nécessaire de prendre en compte la propagation des ondes dans l'échantillon lorsque l'on traite des régimes transitoires. Dans ce cadre, on a les relations suivantes : $\Delta\sigma = -\rho C\Delta V$, $\Delta V = -C\Delta\epsilon$, avec $\Delta\sigma$ le saut de contrainte, de vitesse particulière ΔV , $\Delta\epsilon$ le saut de déformation à travers le front d'onde, ρ la masse volumique et C la célérité des ondes élastiques.

Une jauge de déformation est collée au milieu de chacune des barres (d'entrée et de sortie). Ces jauges permettent d'enregistrer les déformations longitudinales associées aux ondes mécaniques se propageant dans les barres. Les mesures faites au niveau des jauges doivent être transportées virtuellement aux faces des barres pour déduire les efforts et déplacements au niveau des faces de l'échantillon, par intégration des vitesses. Les vitesses particulières aux faces entrantes et sortantes s'écrivent :

$$V_e(t) = -C(\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t)) \quad (2.3)$$

$$V_s(t) = -C\varepsilon_t(t) \quad (2.4)$$

avec ε_i la déformation incidente, ε_r la déformation réfléchie et ε_t la déformation transmise, et les forces :

$$F_e(t) = S_b E(\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)) \quad (2.5)$$

$$F_s(t) = S_b E\varepsilon_t(t) \quad (2.6)$$

où S_b est la surface des barres et E leur module d'Young.

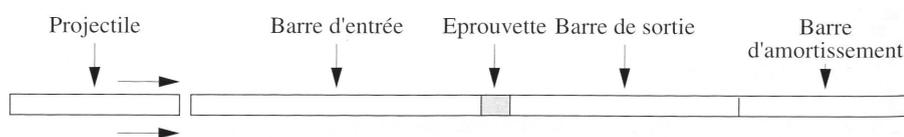


Fig. 2.9: Schéma du principe de l'essai Hopkinson.

On s'intéresse à trois types d'onde : incidente, transmise et réfléchie. Il est donc nécessaire, de toute évidence, de pouvoir distinguer les ondes incidentes des ondes réfléchies (cf. l'analyse détaillée de la situation dans [Gar]), ce qui ne permet plus d'effectuer de mesure lorsque deux trains d'onde se superposent. Le temps de mesure est donc donné par $\Delta t = L/C$, avec L la longueur de la barre entrante et C la célérité de l'onde. Par exemple, pour une barre d'acier ($C = 5000$ m/s) de 2 m de long, $\Delta t = 400$ μ s, ce qui autorise une déformation de 40 % pour une vitesse de déformation moyenne de 10^3 s^{-1} . Ainsi, des vitesses de déformation trop faibles ne permettent pas de mesurer des déformations suffisamment importantes pour présenter un intérêt réel en termes de lois de comportement.

Aspects pratiques

Les dimensions types utilisées en pratique sont des barres de 3 m de long pour 20 mm de diamètre (cf. une photo d'un dispositif expérimental présenté figure 2.11), pour un échantillon

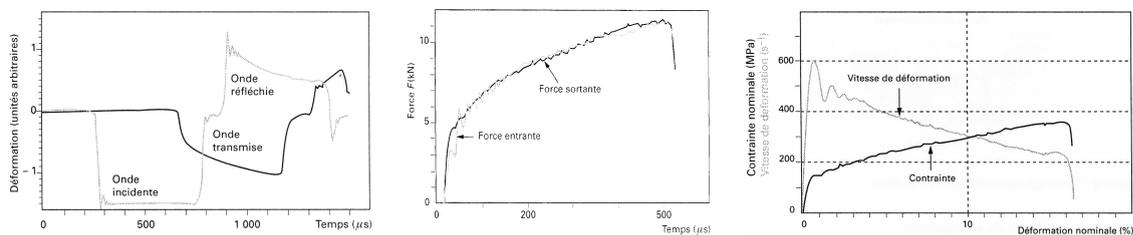


Fig. 2.10: Résultats de mesures par essai Hopkinson (tiré de [Gar]). A gauche : déformation en fonction du temps : on voit se succéder les ondes incidente, transmise et réfléchie. Au milieu : superposition des courbes force - temps déduites des mesures et des équations 2.3 à 2.6. A droite : contrainte et déformation nominales en fonction du temps, déduite des valeurs de force et de déplacement.



Fig. 2.11: Dispositif expérimental d'essai Hopkinson, NTNU, Trondheim (Norvège).

millimétrique. Les temps de mesure sont très faibles, inférieurs à la seconde, car elle ne peut être effectuée que sur des ondes se propageant dans une seule direction. Lorsque les ondes réfléchies et incidentes se mélangent, il devient impossible d'utiliser la proportionnalité entre les grandeurs mécaniques associées à une onde. Tout ceci impose des contraintes fortes sur le dispositif électronique d'acquisition des données qui doit travailler à haute fréquence afin de permettre d'enregistrer un nombre significatif de points de mesure. Un autre élément auquel il faut prêter attention est la lubrification des contacts barres-échantillons afin d'éviter des frottements qui génèrent l'expansion radiale de l'éprouvette au cours de l'essai. Les effets mesurés pouvant être extrêmement faibles, il peut s'avérer important de disposer de jauges de déformation à semi-conducteur (cf. annexe A.1.1) pour effectuer les mesures. Les jauges sont montées en pont, deux jauges longitudinales diamétralement opposées et deux transversales sensibles à l'effet Poisson, également diamétralement opposées.

La figure 2.10 présente un enregistrement de mesures réalisées et des courbes contraintes-déformations et vitesse de déformation-déformation qui peuvent en être déduites dans le cas d'un alliage d'aluminium.

Chapitre 3

Essais multiaxiaux

Les essais multiaxiaux apportent une information précieuse pour tester les modèles de déformation, mais ils sont malheureusement peu pratiqués en raison des difficultés 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 effectués suivant deux modes : en phase ou hors phase, selon que l'éprouvette subit simultanément ou non les différentes sollicitations. Les déplacements et les forces appliquées peuvent être enregistrés 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 présentée figure 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 fixées et on peut effectuer des chargements dans l'espace de contraintes tels que celui présenté figure 3.1 (image de gauche).

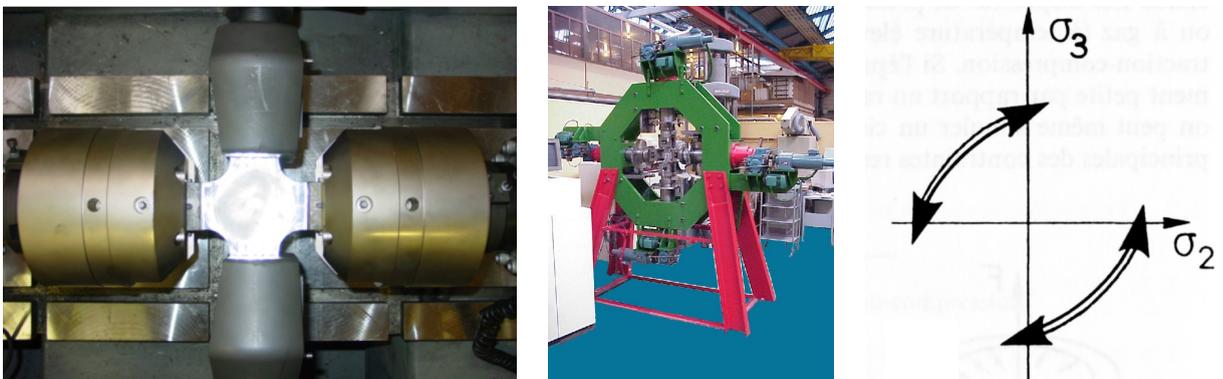


Fig. 3.1: Image de gauche : éprouvette de traction biaxiale montée. Image du centre : dispositif de traction biaxiale du laboratoire 3S à Grenoble. Image de droite : chemin mécanique pouvant être appliqué sur une éprouvette lors d'essais de traction biaxiale (tiré de [LC])

3.2 Traction-torsion

Ce type d'essai permet d'étudier des trajets de chargement avec modification des directions principales des contraintes. La machine est constituée d'un vérin linéaire et d'un vérin torique avec dispositif de découplage. La figure 3.2 présente un dispositif de traction-torsion du CdM et un exemple de chemin mécanique dans l'espace des contraintes pouvant être appliqué à une éprouvette.



Fig. 3.2: Photo de gauche : dispositif de traction-torsion du Centre des Matériaux, image de droite : chemin mécanique pouvant être appliqué sur une éprouvette lors d'essais de traction torsion (tiré de [LC])

Chapitre 4

Essais d'indentation

Les essais d'indentation évaluent la "dureté" du matériau en mesurant la pression de contact pendant l'enfoncement d'un indenteur (pyramidal, conique ou sphérique). La dureté est calculée soit après l'essai, par mesure de la surface de l'empreinte (cf. l'image de gauche de la figure 4.1), soit pendant l'essai, par mesure de l'enfoncement de l'indenteur (cf. image de droite de la figure 4.3), dans les deux cas en fonction de la charge appliquée. Le résultat obtenu a la dimension d'une pression, mais s'exprime dans une unité liée à la géométrie de l'indenteur qui s'écrit : H (pour hardness – dureté en anglais) suivi d'un caractère indiquant le type d'indenteur utilisé (V pour Vickers (tête pyramidale) ou B pour Brinell (tête sphérique)).

Ces essais sont faciles à mettre en œuvre, puisqu'ils ne nécessitent qu'un polissage et peuvent être réalisés sur des échantillons de petite taille. Les essais de dureté peuvent porter sur des échelles millimétriques à nanométriques, selon le dispositif expérimental utilisé. Les essais classiques sont peu coûteux et selon les applications ils peuvent être considérés comme non destructifs. Cependant, contrairement aux essais de traction, les essais de dureté sont d'une interprétation beaucoup plus délicate et ne permettent pas d'accéder directement aux paramètres de la loi de comportement d'un matériau mais nécessitent une analyse inverse. En première approximation, on peut voir toutefois le lien entre limite élastique et dureté ainsi : au fur et à mesure que s'enfonce l'indenteur, à force constante, l'aire de contact augmente et donc la contrainte appliquée diminue. Lorsque l'indenteur ne s'enfonce plus, c'est que la contrainte moyenne a atteint la limite d'élasticité du matériau.

Hertz a analysé le contact de deux solides élastiques (1882) et en a déduit des formules qui permettent de déduire le module élastique des essais de dureté. Hill [HLT47] a analysé le problème de l'indentation d'un plan parfaitement plastique par un coin rigide et a montré qu'il existe une proportionnalité, dans ce cas, entre la limite élastique du matériau et la dureté. Toutefois, en général, on ne peut déduire les propriétés de traction monotone à partir des essais de dureté seuls.

L'analyse de la courbe d'indentation permet, elle, d'accéder à davantage d'informations, si elle est couplée à la profilométrie des surfaces après indentation et à des calculs éléments finis de l'essai. Par méthode inverse, et sous réserve de certaines hypothèses, il est alors possible d'accéder aux propriétés de traction du matériau. Il existe donc deux manières d'exploiter les essais de dureté, plus ou moins faciles à mettre en œuvre et donnant accès à moins ou plus d'information.

4.1 Macroducté

Les essais Vickers (pyramide à base carrée) et Brinell (bille) sont les plus couramment utilisés. Ils consistent à mesurer la taille de la trace laissée par l'indenteur après chargement.

4.1.1 Essai Vickers

L'indenteur de l'essai Vickers est une pyramide à base carrée (voir image de gauche, figure 4.1), dont les faces forment entre elles des angles de 136° . La dureté est le rapport de la force appliquée (en Kgf) sur la surface de contact (en mm^2), c'est-à-dire la pression moyenne dans le contact. L'épaisseur de l'échantillon doit être supérieure à 1,5 fois la diagonale des empreintes (soit

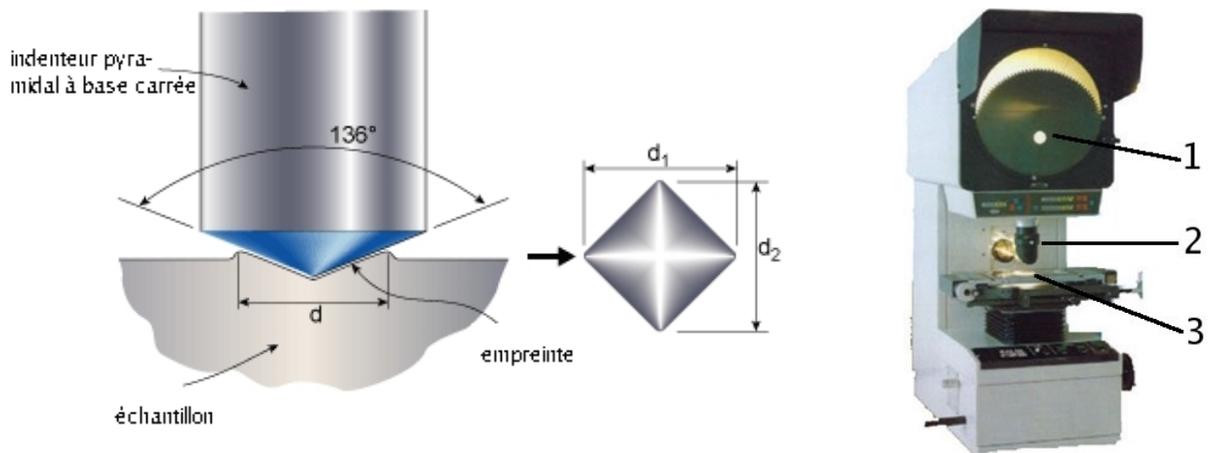


Fig. 4.1: Image de gauche : indenteur type Vickers et empreinte type laissée par l'indenteur. Image de droite : dispositif d'essai de macrodureté. 1) écran de visualisation de l'empreinte 2) indenteur 3) platine porte-échantillon.

environ 7,5 fois la profondeur d'enfoncement h) et la distance entre les centres de deux empreintes successives supérieure à 6 fois la diagonale pour éviter l'interaction entre celles-ci.

4.2 Microdureté

La microdureté consiste à utiliser des indenteurs de taille submillimétrique. Les empreintes ne couvrent alors qu'un à quelques grains, et les résultats présentent une dispersion significative, ce qui nécessite de multiplier les mesures. Dans ce cas, les mesures de dureté peuvent être décrites par une loi de probabilité Gaussienne. Si l'on note μ_d la valeur moyenne des mesures de diagonales et σ_d la variance de la série d'essais, le nombre N de mesures à effectuer pour obtenir une mesure de dureté avec une confiance α , est donné par :

$$N \propto \left(\frac{2A}{(1-\alpha)} \frac{\sigma_d}{\mu_d} \right) \quad (4.1)$$

où A dépend très peu de α . La figure 4.2 (image de gauche) présente un dispositif d'essais de microdureté asservi par ordinateur qui permet de faire des cartographies d'un échantillon, comme par exemple un profil de dureté à travers une soudure.

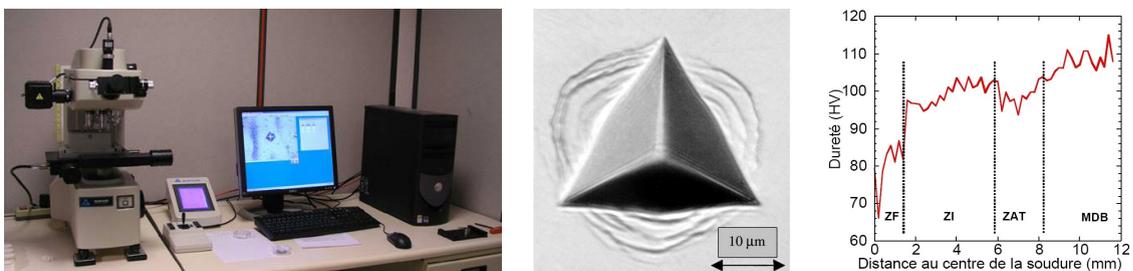


Fig. 4.2: Image de gauche : dispositif pour essai de microdureté piloté par ordinateur, avec acquisition d'images, ce qui permet de faire des cartes ou des profils automatiques de microdureté. Image du centre : trace d'un indenteur (Berkovitch) après une expérience de microindentation sur un verre métallique obtenue par microscopie électronique à balayage, la forme de l'indent et sa profilométrie peuvent renseigner sur la loi de comportement du matériau, tiré de [LC01]. Image de droite : profil de microdureté dans un joint soudé révélant les zones mécaniquement faibles en raison du procédé de soudage (tiré de [Fab04]).

4.3 Nanodureté (indenteur Berkovitch)

Les essais de nanodureté permettent de mesurer des empreintes de taille inférieure au micron (sous la limite de résolution de la microscopie optique). Le mode opératoire de ces essais est un peu différent (cf. figure 4.3) : le dispositif expérimental effectue une première indentation à faible charge pour localiser la surface puis la mesure à pleine charge. La courbe d'indentation est enregistrée et la profilométrie des surfaces peut être mesurée, par exemple par microscopie à force atomique. Cette méthode permet de mesurer la dureté des grains un par un dans un matériau biphasé, ou l'efficacité de traitements thermomécaniques qui portent sur de très faibles profondeurs.

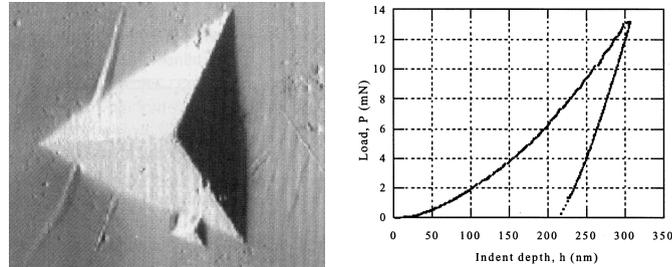


Fig. 4.3: Image de gauche : Empreintes d'un essai de nanodureté observée en microscopie électronique à balayage. La petite empreinte correspond à la recherche de la surface par le dispositif expérimental, alors que la seconde empreinte – plus grande – constitue l'essai de nanodureté proprement dit (tiré de [ec01]). Image de droite : courbe charge/déplacement obtenue par nanoindentation d'un verre métallique, tiré de [GIK⁺01].

Chapitre 5

Essais de fatigue

La fatigue est un endommagement structural, progressif et localisé qui se produit quand un matériau est sollicité cycliquement à des niveaux de contrainte inférieurs voire bien inférieurs à sa contrainte à rupture quasistatique. La figure 5.1 présente un faciès type de rupture en fatigue où l'on peut distinguer la zone d'initiation de la fissure, la zone de propagation en fatigue (zone lisse) et la rupture finale catastrophique (zone à grain cristallin ou à nerf).



Fig. 5.1: Fracture d'un tirant d'assemblage de rotor d'alternateur amorcé (à droite) au niveau de la flèche par une fissure de fatigue ayant amené la rupture fragile, caractérisée par l'aspect de chevrons (à gauche) (tiré de [CPRJ69]).

Les essais de fatigue caractérisent la capacité d'un matériau à résister à une sollicitation cyclique. Si le nombre de cycles est petit, on parlera de fatigue oligocyclique. Il existe plusieurs modes de sollicitations possibles : flexion, efforts axiaux (traction et/ou compression) et torsion, et des modes combinés, statiques et dynamiques (torsion / flexion, tension / torsion, etc.).

5.1 Eprouvettes et essais

Les éprouvettes peuvent être de géométries variées, en fonction de ce que l'on cherche à caractériser. Classiquement, elles peuvent être à section circulaire ou parallélépipédique, et d'épaisseur constante ou variable. Les plus générales sont les éprouvettes toroïdales, à section circulaire variable, comme celle présentée sur l'image de gauche de la figure 5.2. Enfin, les éprouvettes peuvent être lisses ou entaillées. L'état de surface doit être particulièrement soigné et répétitif, et l'usinage ne doit pas introduire de contraintes résiduelles importantes. L'étalonnage dynamique des dispositifs de fatigue est crucial, les efforts indiqués en essai quasi-statique ou dynamique pouvant différer sensiblement pour une même indication du dynamomètre. La coaxialité des têtes d'amarrage est également un paramètre essentiel pour obtenir une répartition homogène des contraintes dans les éprouvettes.

Il est possible d'effectuer différents types de sollicitations cycliques, par exemple en alternant uniquement de la traction, ou uniquement de la compression, ou bien encore en faisant intervenir de la traction et de la compression, comme le présente l'image de droite de la figure 5.2. En outre,

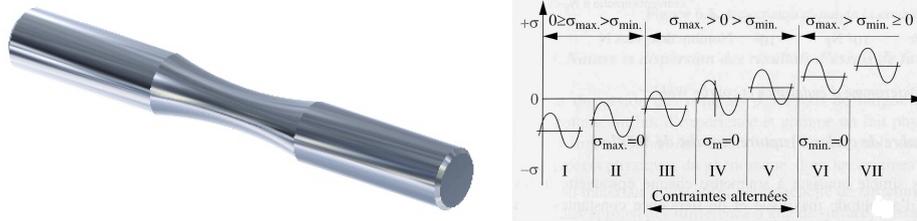


Fig. 5.2: Image de gauche : éprouvette toroïdale de fatigue. Comme on peut le voir, la surface de l'éprouvette est parfaitement polie pour retarder au maximum la rupture par fatigue, celle-ci s'initiant la plupart du temps en surface (cf. [FPZ95]). Image de droite : Différents types de sollicitations appliquées en fatigue : I) contrainte ondulée de compression II) contrainte répétée de compression III) contrainte alternée dissymétrique IV) contrainte purement alternée V) contrainte alternée dissymétrique VI) contrainte répétée de traction VII) contrainte ondulée de traction (tiré de [ec01])

comme cela a déjà été signalé, ces modes de sollicitations peuvent être combinés avec de la torsion ou de la flexion.

5.2 Résultats

5.2.1 Courbe de Wöhler

Les essais de fatigue permettent de déterminer le nombre de cycles à rupture pour une sollicitation donnée. Ces résultats sont présentés sous la forme d'une courbe semi-logarithmique dite de Wöhler (ou courbe SN, pour Stress et Number of cycles to failure, en anglais). Une courbe type est présentée figure 5.3 (courbe de gauche). On y distingue les zones de :

- fatigue oligocyclique : sous une forte contrainte, la rupture intervient après un très petit nombre de cycles et succède à une forte déformation plastique.
- zone d'endurance limitée ou de fatigue : la rupture est atteinte après un nombre limité de cycles, nombre qui croît lorsque la contrainte diminue.
- zone d'endurance illimitée ou de sécurité : sous faible contrainte, la rupture intervient après un nombre très grand de cycles, d'une durée supérieure à la durée de vie de la pièce.

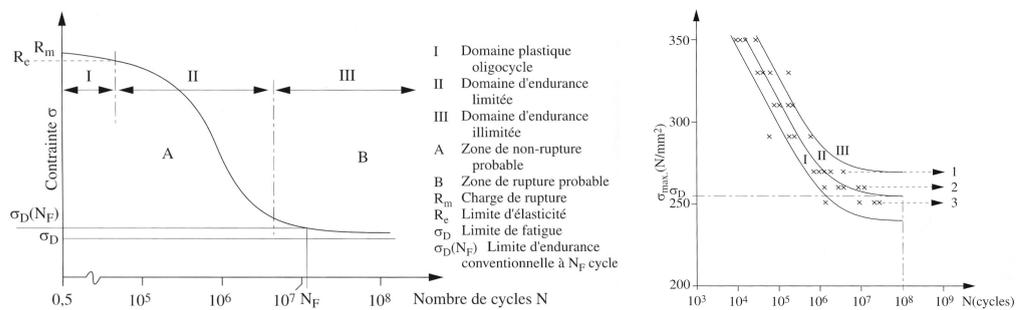


Fig. 5.3: Courbe de gauche : schéma idéal d'une courbe de Wöhler, courbe de droite : dispersion des résultats des mesures de fatigue (tirées de [ec01]).

5.2.2 Dispersion des résultats

Les essais de fatigue présentent une dispersion importante (cf. figure 5.3, courbe de droite), c'est-à-dire qu'il y a rupture, pour un même niveau de charge, à un nombre de cycles variable selon les éprouvettes, en raison :

- du matériau (inclusions, hétérogénéités de structure...)
- des éprouvettes (état de surface variable, tolérances dimensionnelles...)

- des conditions d’essai (centrage des éprouvettes, fréquence des cycles, effets d’environnement...)

Ainsi, pour un nombre de cycles fixé, on peut déterminer la probabilité de rupture en fonction de la contrainte. Ces courbes sont généralement des sigmoïdes normales. Dans ces conditions, l’analyse de statistique de la fatigue permet d’estimer les paramètres de la courbe de réponse : μ , amplitude de la contrainte pour laquelle la probabilité de rupture est de 0,5 et s l’écart-type de la dispersion en contrainte. En déterminant ces courbes pour un nombre de cycles variables, il est possible de définir la courbe d’équiprobabilité de rupture en fonction du nombre de cycles. En général, chaque courbe d’équiprobabilité de rupture possède une asymptote. En particulier, la courbe d’équiprobabilité 0,5 tend vers la limite d’endurance σ_D . Cette limite est inaccessible en pratique et on la remplace par une limite d’endurance conventionnelle pour un nombre de cycles donnés (10^7 , 10^8 ...). A cette valeur est associé un écart type s de la zone d’endurance, écart-type de la courbe de réponse en contrainte.

En pratique, il est possible d’estimer la limite à rupture à partir d’un essai de traction, grâce à des relations telles que : $0,4R_m \leq \sigma_{D8} \leq 0,5R_m$ pour des alliages d’aluminium corroyés, σ_{D8} correspondant à la limite à 10^8 cycles. Il existe différentes méthodes statistiques pour déterminer σ_D par des séries d’essais de fatigue : la méthode des probits, la méthode de l’escalier ou la méthode d’itération (cf. [ec01] pour plus de détails). Ces techniques sont nécessaires pour gagner du temps, un seul essai pouvant durer jusqu’à plusieurs mois, lorsque le matériau ne casse pas avant 10^7 voire 10^8 cycles, en fonction, bien sûr, de la fréquence de sollicitation.

Chapitre 6

Caractérisation de la rupture

Le phénomène de rupture est un événement dont la prise en compte est d'importance cruciale, de toute évidence, pour les problèmes liés à la sécurité des constructions. Il est donc important de pouvoir la caractériser expérimentalement de façon satisfaisante. Il existe deux types de rupture : ductile ou fragile, selon que le matériau présente ou non un phénomène de plasticité accompagnant la rupture. La transition ductile fragile - quand elle existe - peut être caractérisée par des essais de résilience, que l'on s'attachera à présenter tout d'abord. Par ailleurs, un autre type d'essais permet d'étudier finement la propagation d'une fissure : ce sont les mesures de ténacité, qui seront introduites dans une deuxième section. Enfin, nous présenterons brièvement les techniques de caractérisation non destructive, qui permettent d'évaluer l'état d'une structure au cours de sa vie ou pendant un essai mécanique.

6.1 Essais de résilience

Les essais de résilience permettent de caractériser la fragilisation d'un matériau. Ils consistent à rompre une éprouvette entaillée (l'entaille a pour but de fragiliser le matériau) - éprouvette Charpy - sous l'impact d'un "mouton-pendule". On mesure l'énergie absorbée par la rupture, ce qui permet de remonter à la résilience du matériau (énergie absorbée ramenée à la surface (en J/cm^2)). Cet essai permet également d'accéder au taux de rupture fragile (cristallinité - évalué par l'opérateur ou par analyse d'images) ou à l'expansion latérale des éprouvettes suite à la rupture. En effectuant des essais à différentes températures, il est possible d'évaluer la température de transition ductile/fragile (cf. figure 6.2) et de suivre ainsi la fragilisation de matériaux au cours du temps, par exemple sous l'effet d'irradiation ou de vieillissement thermique. Un point important à noter est que ces essais caractérisent les deux phases : initiation et propagation de la rupture, alors que les essais de ténacité (cf. section 6.2) caractérisent uniquement la phase de propagation. En outre, les valeurs d'énergie obtenues dépendent de différents phénomènes et paramètres, tels que la géométrie de l'éprouvette et du couteau, une plastification potentiellement intense (si le matériau n'est pas fragile), la rupture proprement dite... ainsi, cet essai a une nature plus comparative que caractéristique du matériau lui-même.

6.1.1 Eprouvette

Une éprouvette Charpy est un barreau de section $10 \times 10 \text{ mm}^2$ entaillée en son milieu. Deux types d'éprouvettes existent, les éprouvettes KCU et KCV, selon que l'entaille a une forme de U ou de V. Les différences essentielles entre ces types d'éprouvettes sont la surface de matière testée (respectivement $0,5$ et $0,8 \text{ cm}^2$) et le rayon de courbure de l'entaille et donc la triaxialité des contraintes. Les éprouvettes KCU ne sont pratiquement plus utilisées et ne servent plus qu'à des comparaisons avec des résultats anciens (suivi de vieillissements thermiques, notamment).

6.1.2 Mouton Charpy

Le mouton Charpy est constitué d'un couteau fixé sur un marteau qui oscille dans un plan vertical autour d'un axe (cf. figure 6.1). Pour un essai, le couteau est amené à une hauteur h_i qui correspond à l'énergie de départ W_i . Dans sa chute, le couteau va provoquer la rupture de l'éprouvette qui sera accompagnée d'une absorption d'énergie W_a , et le marteau remontera à une hauteur h_f à laquelle est associée une énergie potentielle $W_f = mgh_f$. Il vient alors simplement : $W_a = W_i - W_f$. Plus h_f , la hauteur de remontée est faible, plus le matériau est résilient.

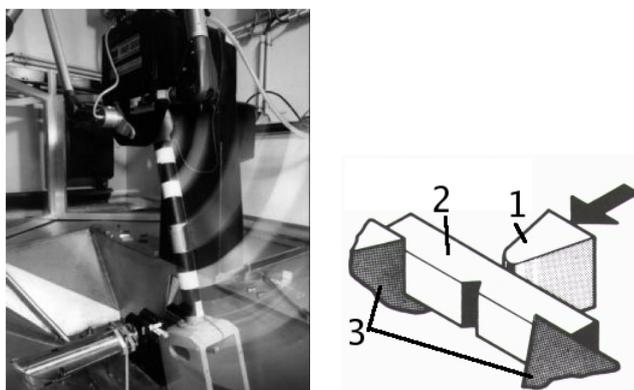


Fig. 6.1: Figure de gauche : dispositif pour essais Charpy en fonctionnement (tiré de [Tan05]). Figure de droite : schéma de fonctionnement : 1) couteau 2) éprouvette KV 3) appuis.

6.1.3 Instrumentation

Il est possible de réaliser des essais instrumentés par des jauges de déformation collées sur les faces opposées du couteau, formant un pont de Weathstone avec deux jauges de compensation. La chaîne de mesure doit avoir une réponse d'au moins 100 kHz étant donné la rapidité de l'expérience. Ces systèmes permettent d'obtenir une précision sur les résultats en force enregistrée de l'ordre de 1 à 2 %. Le déplacement $s(t)$ peut être mesuré par intégration des résultats en force $F(t)$, puis en vitesse $v(t)$ avec :

$$v(t) = v_0 - \frac{1}{m} \int_{t_0}^t F(t) dt \quad (6.1)$$

et

$$s(t) = \int_{t_0}^t v(t) dt \quad (6.2)$$

où m est la masse du couteau, v_0 la vitesse initiale d'impact, t_0 le temps au début de la déformation et t le temps ultérieur. Ces mesures permettent d'estimer la cristallinité de la rupture en évaluant la proportion de propagation stable et de propagation instable sur la courbe force déplacement. Si la rupture est entièrement instable, le matériau est fragile, si la rupture n'est jamais instable, la cristallinité sera de 0 % et le matériau parfaitement ductile. La figure 6.3 présente trois courbes résultant d'essais Charpy instrumentés. L'essai instrumenté apporte une interprétation beaucoup plus riche que celle de l'énergie. En effet deux matériaux avec des comportements en traction très différents peuvent donner la même énergie. L'étude des courbes $F-\delta$ permettra de distinguer les deux matériaux. De plus, lorsque l'on souhaite étudier le vieillissement d'un matériau, les courbes instrumentés permettront de distinguer si c'est la partie de l'initiation ou de la propagation de la fissure qui est affectée par ce vieillissement alors que le distinguer n'est pas possible à partir de la seule énergie.

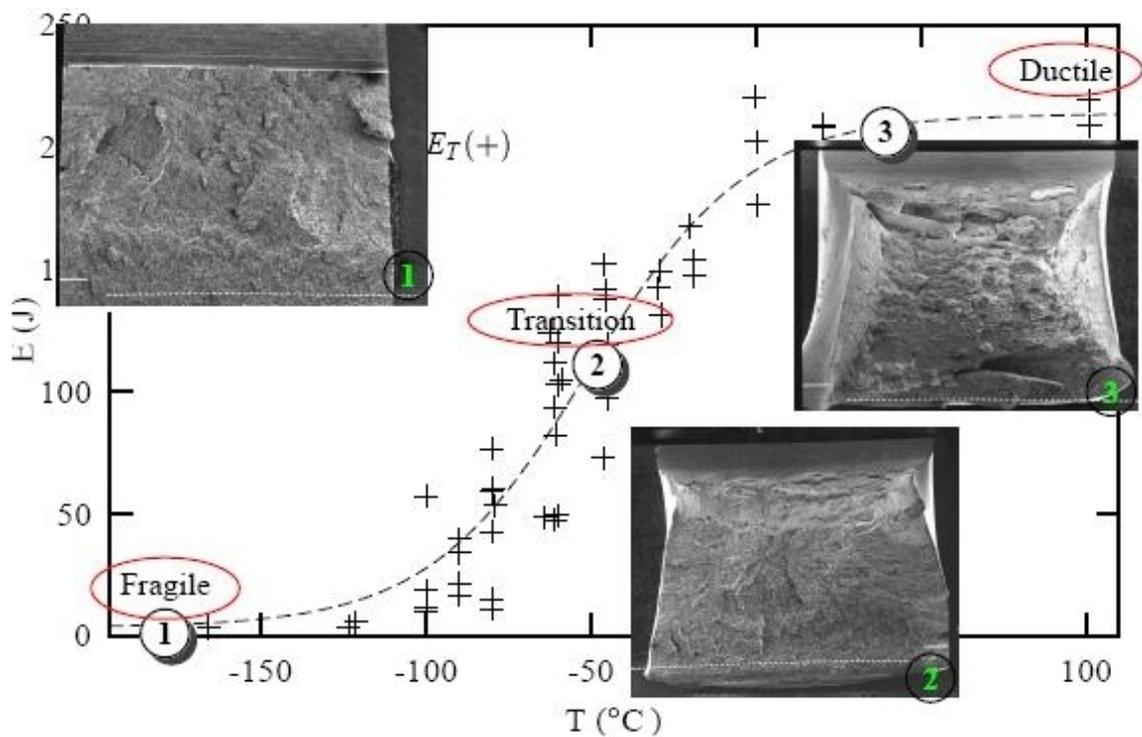


Fig. 6.2: Transition ductile-fragile mesurée par des essais de résilience. La photographie 1 en incrustation montre qu'à basse température, alors que le matériau est fragile, la rupture a lieu sans déformation macroscopique notable i.e. sans expansion latérale. A haute température, dans le domaine ductile, la résilience augmente fortement et l'éprouvette se déforme macroscopiquement, comme on peut le constater sur la photographie 3 en incrustation (tiré de [Tan05]).

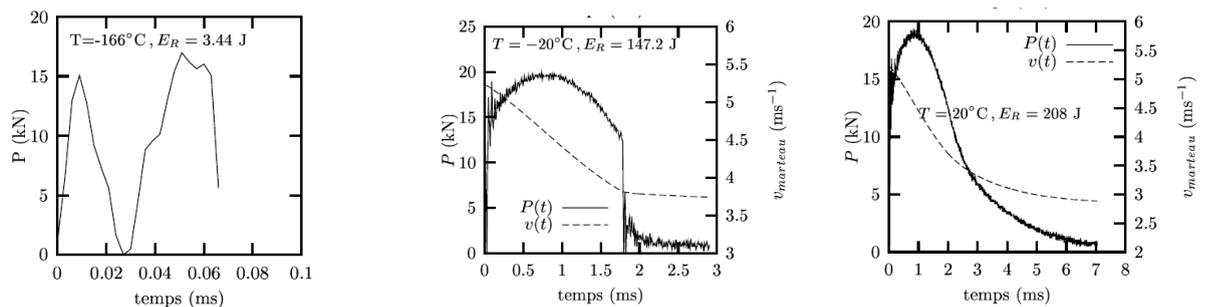


Fig. 6.3: Courbes f - δ issues de trois essais Charpy instrumentés (tiré de [Tan01]). La courbe de droite caractérise un matériau fragile, celle du milieu une rupture fragile après propagation ductile et celle de droite une rupture ductile.

6.2 Mesure de ténacité

6.2.1 Définition

La ténacité est une grandeur qui caractérise la résistance à la propagation brutale de fissure d'un matériau. Lors de l'application d'une contrainte sur un matériau fissuré, deux mécanismes sont en compétition : l'accommodation de la contrainte par la déformation plastique et la propagation de la fissure par déchirement. La taille de la zone plastique est minimale en déformation plane, qui constitue ainsi le mode le plus pénalisant et dans lequel les mesures doivent être effectuées. Le principe de l'essai consiste à mesurer la valeur du facteur d'intensité de contraintes K_c à rupture (facteur critique d'intensité de contraintes). Ce facteur d'intensité de contrainte est présent dans les équations de la mécanique de la rupture et dépend des conditions macroscopiques du chargement. Une première approximation généralement satisfaisante pour une fissure plane de longueur $2a$ dans une plaque de grandes dimensions chargée perpendiculairement à son plan par une contrainte σ est $K = \sigma\sqrt{\pi a}$ (l'unité de K est le $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$), avec a la longueur de la fissure et σ la contrainte à l'infini. On voit clairement que plus un matériau résiste à la rupture, donc plus il faut appliquer une contrainte élevée pour le rompre, plus son K_{IC} (où I dénote le mode de rupture et C signifie critique) sera élevé. En outre, il existe une relation linéaire entre K et l'ouverture de la fissure. L'essai consiste alors à augmenter progressivement la charge sur une éprouvette préfissurée, jusqu'à rupture.

6.2.2 Principe

La méthode la plus utilisée consiste à effectuer un essai de traction sur une éprouvette entaillée, appelée éprouvette CT (compact tension), et préfissurée en fatigue au fond de l'entaille. La propagation de la fissure se fait en mode I. Un problème crucial est de déterminer une grandeur propre au matériau, c'est-à-dire indépendante de la forme et de la dimension de la fissure et de la pièce ; ceci implique de pouvoir se placer dans le cadre de l'élasticité linéaire, ce qui n'est jamais rigoureusement possible, des déformations irréversibles se produisant systématiquement en tête de fissure. Des normes d'essai existent pour fixer les conditions à respecter pour que l'approximation de l'élasticité linéaire soit convenable. On autorise un écart à la linéarité de 5 % sur la courbe charge/déplacement. En outre, pour être en condition de déformation plane, il faut que la taille de la zone plastique R soit petite devant l'épaisseur B de l'éprouvette ($R < B/25$) qui peut se traduire par : $B \geq 2,5(K_{IC}/\sigma_E)^2$, ce qui ne peut être évalué qu'a posteriori. Pour des matériaux tenaces et/ou à faible limite d'élasticité, la taille de l'éprouvette satisfaisant ces conditions peut devenir prohibitive.

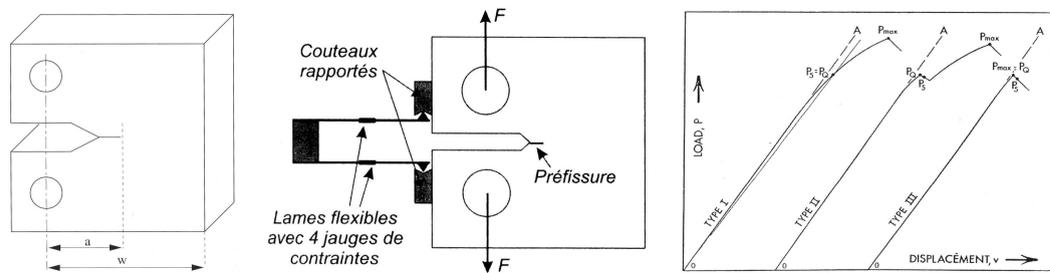


Fig. 6.4: Figure de gauche : schéma d'une éprouvette CT (tiré de [ec01]) Figure du centre : schéma d'un dispositif expérimental pour des mesures de ténacité (tiré de [CH06]). Figure de droite : résultats types de mesures de ténacité (tiré de [Lem03]).

6.2.3 Dispositif expérimental et résultats types

Au cours de l'essai, on mesure l'écartement des bords de l'entaille en fonction de la force appliquée. Un schéma du dispositif expérimental est présenté figure 6.4, avec des résultats types. De ces résultats, seul le type III est recevable. Le type I présente une trop forte perte de linéarité et le type II présente une propagation stable de la fissure.

6.3 Contrôle non destructif

Le dernier type de méthodes de caractérisation "mécanique" que nous abordons, est le groupe des méthodes de contrôle non destructif (CND). Ces techniques ont pour but de détecter la présence de défauts au sein des structures sans avoir à pratiquer dessus des tests qui entraînent la ruine du matériau : elles sont donc essentielles pour le suivi en service. Elles sont particulièrement utilisées dans les secteurs sensibles à la sécurité comme l'industrie aéronautique, l'industrie navale, l'énergie, les ouvrages d'art...

Il existe plusieurs types de techniques permettant le CND, comme la radiographie X ou γ , les ultrasons, les courants de Foucault, la magnétoscopie et le ressuage. Nous ne présenterons ici que les deux premières, le lecteur intéressé pouvant se reporter aux ouvrages indiqués dans l'annexe C.

6.3.1 Radiographie X et γ

Cette technique est analogue à celle utilisée en médecine pour réaliser une radiographie des os : un rayonnement électromagnétique traverse l'élément à contrôler et il est d'autant plus absorbé qu'il y a de matière sur son trajet ; les fissures apparaissent alors en transmettant plus de rayonnement que les zones non endommagées. La résolution de ces dispositifs atteint, au mieux, $150 \mu\text{m}$ et permet de détecter des défauts de matière de l'ordre de 1 % de l'épaisseur traversée. L'atténuation du rayonnement est de la forme :

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (6.3)$$

avec μ le coefficient d'atténuation et x la distance parcourue. Les défauts les plus facilement repérés sont donc ceux dont l'axe principal est parallèle à la direction de propagation du rayonnement.

6.3.2 Ultrasons

Cette technique est encore une fois analogue à une technique utilisée dans le milieu médical : l'échographie. Elle consiste à envoyer dans la pièce un train d'ondes élastiques qui vont se trouver reflétées par les défauts. Contrairement aux techniques radiographiques, cette technique permet de mieux détecter les défauts orientés perpendiculairement au front de propagation des ondes ultrasonores. Elle permet également de mesurer la profondeur du défaut par le temps de propagation du signal, ce qui permet de dresser une carte tridimensionnelle de la localisation des défauts. La résolution de la technique dépend de l'épaisseur de la pièce à caractériser et varie d'une fraction de millimètre pour les pièces d'épaisseur supérieure au décimètre, à quelques dizaines de microns pour des pièces de quelques millimètres d'épaisseur.

Annexe A

Extensométrie

Le but de l'extensométrie est de mesurer un déplacement et de permettre l'acquisition de cette mesure, ce qui revient, en général, à traduire une déformation en signal électrique ou optique. Il existe deux grandes catégories d'extensométrie : avec ou sans contact. Nous présentons tout d'abord les dispositifs avec contact (jauges de déformation et extensomètre à pinces) puis plus brièvement l'extensométrie sans contact.

A.1 Extensométrie avec contact

A.1.1 Jauges de déformation

Un premier type d'extensomètres avec contact sont des dispositifs traduisant en variation de résistance électrique leur propre déformation, en principe égale à celle de la structure à l'endroit où ils sont collés. Ils permettent typiquement de mesurer des déformations de $\pm 1\mu m/m$. L'image de gauche de la figure A.1 présente le schéma de fonctionnement de ces dispositifs. Le conducteur est soit d'origine métallique, souvent des alliages à base de nickel, soit un semi-conducteur. Le nombre de brins de la grille diffère selon le type de conducteur. Il varie entre 10 et 20 pour un conducteur métallique et vaut 1 pour les jauges semi-conductrices. La relation qui lie déformation de l'extensomètre et résistance est :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{K} \frac{\Delta R}{R} \quad (\text{A.1})$$

où R est la résistance électrique et K le facteur de jauge, qui dépend très fortement du coefficient de Poisson ($K = C(1 - 2\nu) + 1 + 2\nu$, où C dépend du matériau – il varie d'environ 2 pour les métaux à plus de 100 pour les semiconducteurs). Plus le facteur de jauge sera grand, plus la sensibilité de la jauge sera grande. Les résistances mises en jeu sont classiquement comprises entre 120 et 350 Ω . On peut facilement mesurer des déformations de plus de 4 %. La variation de résistance d'une jauge soumise à déformation reste faible. Par exemple, pour $\varepsilon = 0,0014$ et $K = 2,1$, $\delta R/R = 0,3\%$. Il est plus pratique alors de mesurer la variation du potentiel ΔV plutôt que celle de la résistance elle-même, via un pont de Wheatstone. Les jauges classiques produisent un signal de ± 2 mV/V avec une tension d'alimentation maximale de 10 V environ, ce qui constitue donc un signal de sortie relativement faible, d'où la nécessité de disposer au minimum d'un bon amplificateur. Il faut également se méfier des effets de la température, qui peuvent induire une variation de la résistance et donc une déformation apparente qui n'existe pas réellement, ainsi qu'une dilatation différente de la jauge et de l'éprouvette et enfin une dilatation différentielle selon l'hétérogénéité de la température le long de l'extensomètre. Une analyse détaillée peut se trouver, par exemple, dans les transparents du [cours d'extensométrie de l'université de Metz](#).

Les jauges semi-conductrices ont une sensibilité bien supérieure par rapport aux jauges métalliques. Cependant elles ont une moins bonne linéarité et sont plus sensibles aux effets de la température, elles trouvent leur intérêt dans la mesure de faibles déformations, dans un domaine de température restreint. Les jauges métalliques sont utilisées pour la mesure précise de déformation pouvant atteindre des amplitudes importantes et dans des domaines de température étendus,

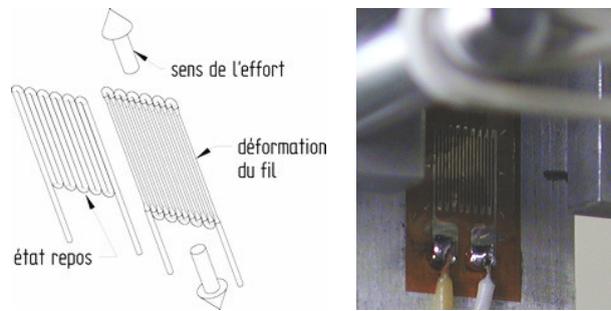


Fig. A.1: Image de droite : schéma de principe du fonctionnement d'une jauge de déformation. Image de gauche : jauge collée sur une éprouvette (image CdM).

typiquement entre -40 et $+200$ °C pour des temps de mesure pas trop prolongés. Leur élongation maximale est d'environ 3 % et leur durée de vie de 10^5 à 10^6 cycles.

L'image de droite de la figure A.1 présente un montage de traction incluant deux jauges de déformation, une axiale et une transversale, ainsi qu'une mesure par extensomètre à pince (cf. paragraphe A.1.2).

A.1.2 Extensomètres à pinces

Le deuxième type d'extensomètres avec contact sont les extensomètres à pinces. Il en existe deux types. Les extensomètres à LVDT (Linear variable differential transformer) ont un corps constitué d'un noyau central autour duquel s'enroulent trois bobines. Une de ces bobines - primaire - est alimentée en courant et lorsque le noyau coulisse, cela induit du courant dans les bobines secondaires dont les variations sont proportionnelles au déplacement du noyau. Le courant augmente dans l'une des bobines et diminue dans l'autre, ce qui permet de mesurer la position du noyau. Le noyau est lui-même relié à l'éprouvette via des pinces qui l'enserrent légèrement, et il coulisse librement. Son déplacement autour de la position d'équilibre du pont génère deux tensions représentatives de l'amplitude du déplacement et de son sens. La valeur de ce déplacement est obtenue par comparaison des valeurs crêtes de chaque signal. La résolution est de l'ordre de 0,1 % de la plage de mesure qui peut varier de 1 à 100 mm environ. On peut donc espérer mesurer des déplacements, dans des conditions optimales, de l'ordre de $1 \mu\text{m}$. La résolution en déformation est d'environ 0,5 %.

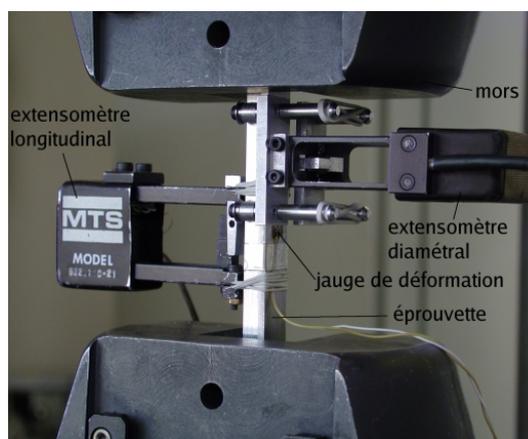


Fig. A.2: Extensomètres diamétral et longitudinal sur une éprouvette de traction (cliché CdM).

Le deuxième type d'extensomètre à pince repose sur la mesure de la déflexion d'une barre par des jauges de déformation. Cette barre, située dans le corps de l'extensomètre, fléchit sous le déplacement des couteaux suite à la déformation de l'échantillon.

A.2 Extensométrie sans contact

Il est également possible de réaliser des mesures de déplacement sans contact avec l'échantillon. Cela peut être particulièrement commode pour des essais en température, par exemple. Dans ce cas là, on dépose sur la surface de l'échantillon deux points colorés dont les déplacements pourront être suivis par corrélation d'images, celles-ci étant prises à l'aide d'une caméra. Les mesures sans contact sont vues plus en détails dans la partie «Mesures de champs».

Annexe B

Mesures de champs cinématiques : corrélation d'images

La mesure des champs de déformation permet de faire apparaître des phénomènes inaccessibles aux seules mesures de déformation globales par extensométrie. Il existe une grande variété de techniques pour ce faire, telles que la photoélasticimétrie, le moiré, la méthode des caustiques, des speckles, etc. Chacune d'elle possède avantages et inconvénients et est utilisée pour des mesures diverses et variées, sur éprouvette ou sur structure réelle et selon que l'on désire accéder à des déformations dans le plan ou hors du plan, avec une précision plus ou moins grande, etc. Nous présentons brièvement ici la méthode de corrélation d'images, d'usage simple et répandu. Pour plus de détails sur les techniques de mesure de champ on pourra se reporter aux documents signalés dans l'annexe C.

B.1 Principe

Les méthodes de mesure de champs de déformation consistent à suivre le déplacement de marqueurs à la surface de l'éprouvette et, pour ce faire, il est nécessaire d'avoir un contraste suffisant. Au cours de la déformation de l'éprouvette, le motif adhérent à la surface suivra la déformation de celle-ci. Il est alors possible, à l'aide d'une caméra CCD, d'enregistrer la position des points à un instant t et, grâce à un logiciel de corrélation d'images, de remonter au vecteur déplacement de chacun d'eux et ainsi à une mesure du champ de déplacement en un grand nombre de points de la surface. On peut ensuite en déduire une estimation du champ de déformation sur la surface de l'échantillon.

Ces techniques sont utilisées à différentes échelles : macroscopique, par exemple dans le cas de procédés d'emboutissage (cf. figure B.1), ou pour des mesures très locales de la déformation, par exemple ici (figure B.2) pour des analyses autour du phénomène de fissuration, qui permettent de mesurer la localisation de la déformation. Toutefois, dans le cas de ces mesures très locales, les résultats obtenus portent sur un volume inférieur au volume élémentaire représentatif (VER) et peuvent donc avoir une déformation qui diffère notablement de la déformation moyenne de l'éprouvette.

B.2 Aspects pratiques

La méthode de corrélation d'images peut avoir une précision atteignant jusqu'à 10^{-4} en déformation. Par comparaison, la méthode de speckle permet d'atteindre une précision de l'ordre de 10^{-7} en déplacement, mais sur une surface limitée. Il est possible, en laboratoire, dans le cadre d'expériences in situ en microscope électronique à balayage, de réaliser des mesures très locales à l'aide de la méthode de corrélation des images, qui autorisent alors une très grande résolution des champs de déformation. A l'inverse, comme signalé dans la section A.2, il est possible d'utiliser deux points colorés pour réaliser des mesures de déformation globale, en suivant le déplacement de

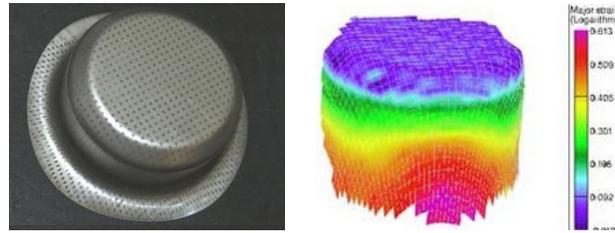


Fig. B.1: Image de gauche : échantillon embouti couvert de la grille de points (ici, régulière) permettant la mesure par corrélation d'image. Image de droite : champ de déformation reconstruit par corrélation d'images (tiré du site du [MMRI](#))

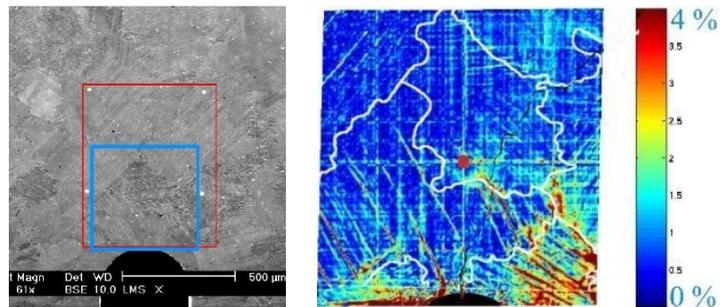


Fig. B.2: Image de gauche : cliché de microscopie électronique à balayage lors d'essais in-situ et image de droite : champ de déformation déduit par corrélation d'images, révélant la localisation de la déformation (tiré de [\[Hér06\]](#)).

ces points au cours de la déformation. L'avantage de ces techniques est de permettre des mesures en température (cas illustré par le dispositif de la figure 2.5 page 6), dans des conditions rédhibitoires pour les mesures avec contact.

Annexe C

Pour aller plus loin

- Essais mécaniques et lois de comportement - Dominique François et al., collection Mécanique et Ingénierie des Matériaux, Hermès Science : lois de comportement, essais de traction et de compression, essais de dureté, essais dynamiques, etc.
- La rupture des matériaux - Clément Lemaignan, EDP Science : mécanique de la rupture, méthodes de caractérisation et de mesure.
- ASM Handbook - Vol 8 - Mechanical testing and evaluation Modes opératoires, fonctionnement de toute la chaîne de mesure et d'essai.
- Cours de Mécanique Expérimentale - J. Molimard, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2005, disponible à l'adresse <http://www.librecours.org/documents/52/5266.pdf> : mesures de déformation (uniaxiale et champ), capteurs de force, plans d'expériences, traction, etc.
- Cours Images Optiques ; mesures 2D et 3D - Yves Surrel, Conservatoire National des Arts et Métiers, disponible à l'adresse <http://www.cnam.fr/.../Optique%20C1/11851KCN&B.pdf> : toutes les techniques de mesures optiques de la déformation
- Cours Mesures mécaniques - Marc François, disponible ici : <http://www.librecours.org/cgi-bin/doc?callback=info&elt=540>, qui traite de mesures globales, locales et de champ.

Bibliographie

- [CH06] A. Cornet and F. Hlawka. Propriétés et comportement des matériaux. Ellipses, 2006.
- [CPRJ69] R. Cazaud, G. Pomey, P. Rabbe, and C. Janssen. La fatigue des métaux. Dunod, 1969.
- [dRSB⁺05] O. du Roure, A. Saez, A. Buguin, R. H. Austin, P. Chavrier, P. Silberzan, and B. Ladoux. Force mapping in epithelial cell migration. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(7) :2390–2395, February 2005.
- [ec01] Dominique Francois et coll. Essais mécaniques et lois de comportement. Hermès science, 2001.
- [Fab04] D. Fabrègue. Microstructure et fissuration à chaud lors du soudage laser d’alliages d’aluminium 6000. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004.
- [FPZ95] D. Francois, A. Pineau, and A. Zaoui. Comportement Mécanique des Matériaux. Hermès, 1995.
- [Gar] G. Gary. Comportement des métaux à grande vitesse de déformation. Modélisation. In *Techniques de l’Ingénieur, traité Génie Mécanique*.
- [GIK⁺01] Y. I. Golovin, V. I. Ivolgin, V. A. Khonik, K. Kitagawa, and A. I. Tyurin. Serrated plastic flow during nanoindentation of a bulk metallic glass. *Scripta Materialia*, 45 :947–952, 2001.
- [Han] ASM Handbook. Mechanical testing and evaluation, volume 8.
- [Hér06] E. Héripré. Méthode de couplage multi-échelles entre simulations numériques polycristallines et mesures de champs pour l’identification des paramètres de lois de comportement et de fissuration des matériaux métalliques. PhD thesis, Ecole Polytechnique, 2006.
- [HLT47] R. Hill, E. H. Lee, and S. J. Tupper. Theory of wedge indentation of ductile metals. *Proceedings of the Royal Society*, A188(273) :162, 1947.
- [LC] J. Lemaître and J.-L. Chaboche. Mécanique des matériaux solides - 2ème édition. Science Sup. Dunod.
- [LC01] D. C. C. Lam and A. C. M. Chong. Model and experiments on strain gradient hardening. *Materials Science and Engineering A*, 318 :313–319, 2001.
- [Lem03] C. Lemaignan. La rupture des matériaux. EDP Science, 2003.
- [Mon94] P. Montmintonnet. Le laminage, aspects mécaniques. ENSMP/CEMEF, 1993-1994.
- [Tan01] B. Tanguy. Modélisation de l’essai Charpy par l’approche locale de la rupture - Application au cas de l’acier 16MND5 dans le domaine de transition. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2001.
- [Tan05] B. Tanguy. Quelle(s) modélisation(s) de l’essai charpy pour une meilleure prédiction de la courbe de résilience. Séminaire, LMT, octobre 2005.