

Essai de Traction

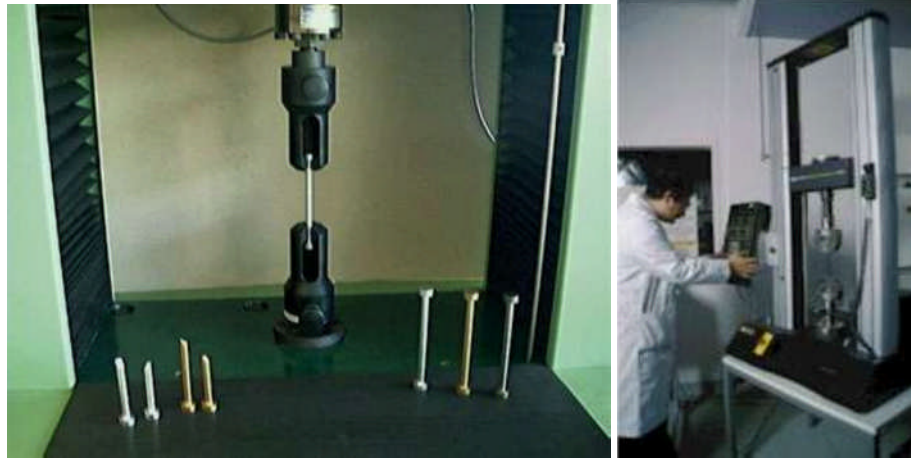
I. Etude des caractéristiques classiques	2
I.1. Description de l'essai (euro-norme 10002)	2
I.1.a. La machine	2
I.1.b. Les éprouvettes	2
I.1.c. Sens de prélèvement de l'éprouvette	2
I.1.d. Dimension des éprouvettes	3
I.1.e. Principe de l'essai	3
I.2. Exploitations de l'essai	3
I.2.a. Interprétation qualitative	3
I.2.b. Définitions	4
I.2.c. Le Processus thermo-mécanique	6
I.2.d. Influence de la température	6
I.3. Constantes d'élasticité	7
I.3.a. Définitions	7
I.3.b. Quelques valeurs usuelles de E :	7
I.4. Limite d'élasticité	8
I.4.a. Cas général	8
I.4.b. Cas des aciers	8
I.4.c. Limites conventionnelles	9
I.4.d. Essai de compression	10
II. Courbe rationnelle de traction	11
II.1. Contrainte vraie	11
II.2. Déformation rationnelle	11
II.3. Courbe rationnelle de traction	12
II.3.a. Équation de la courbe rationnelle	12
II.3.b. Concentration de contraintes	13
II.4. Ecoulement	13
II.4.a. Explication du phénomène	13
II.4.b. Coefficient d'anisotropie (source Usinor)	13
II.4.c. Bake-hardening (source Usinor)	14
III. Traction biaxiale	14

I. Etude des caractéristiques classiques

I.1. Description de l'essai (euro-norme 10002)

I.1.a. La machine

Un extensomètre mesure l'allongement de l'éprouvette et un dynamomètre mesure l'effort. Le résultat est visualisé sur un écran ou une table traçante via un système d'acquisition de données.



Figures 1

I.1.b. Les éprouvettes

Les **éprouvettes** de traction sont normalisées ($\varnothing \geq 4\text{mm}$ ou $e \geq 3\text{mm}$...).

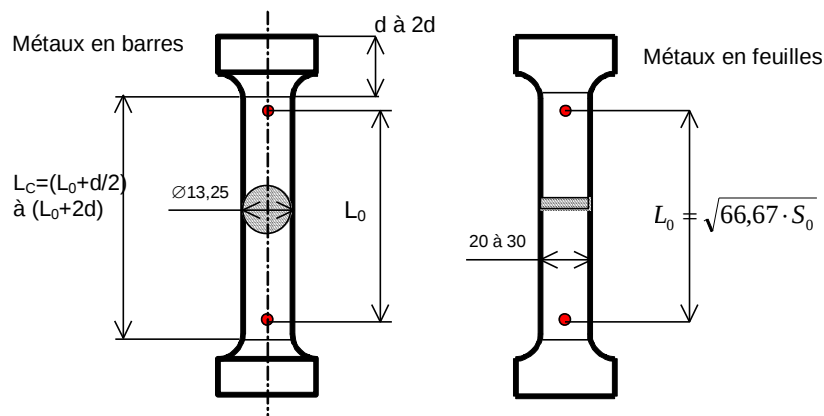


Figure 2 : sur une éprouvette de traction la longueur initiale entre repères L_0 est normalisée

On note :
 S_0 : section initiale en mm^2
 L_0 : longueur initiale entre repères
 L_C : longueur de la partie calibrée

S_u : section minimale après rupture
 L_u : Longueur ultime après rupture

I.1.c. Sens de prélèvement de l'éprouvette

Tous les paramètres qui sont déduits de l'essai de traction traduisent les propriétés de l'acier dans la direction de l'essai. Ces valeurs dépendent donc de la direction de prélèvement de l'éprouvette par rapport à d'éventuelles directions d'anisotropie (par exemple en carrosserie, la direction de laminage de la tôle mince).

Pour les tôles laminées, la direction de prélèvement doit donc toujours être précisée :

- sens long SL (repéré par l'indice 0°)
- sens travers ST (repéré par l'indice 90°)
- sens "oblique" (repéré par l'indice 45°).

...

I.1.d. Dimension des éprouvettes

La dimension des éprouvettes de traction diffère selon l'épaisseur du produit testé :

-ép. <3 mm : largeur 20mm et longueur 80 mm

-ép. >3 mm : largeur 30mm et longueur $5,65.S_0$, avec S_0 = largeur x épaisseur

La dimension des éprouvettes varie aussi selon les pays : Japon (norme JIS) USA (norme ASTM)

Ces variations de taille d'éprouvettes se traduisent par des **valeurs de caractéristiques mécaniques non comparables**, mais qui peuvent cependant être converties d'une norme à l'autre sur la base de corrélations largement vérifiées.

I.1.e. Principe de l'essai

Cet **essai destructif**, pratiqué à température ambiante 20°C, consiste à **imposer une déformation croissante** à vitesse constante **et à mesurer l'effort nécessaire** pour imposer cette déformation.

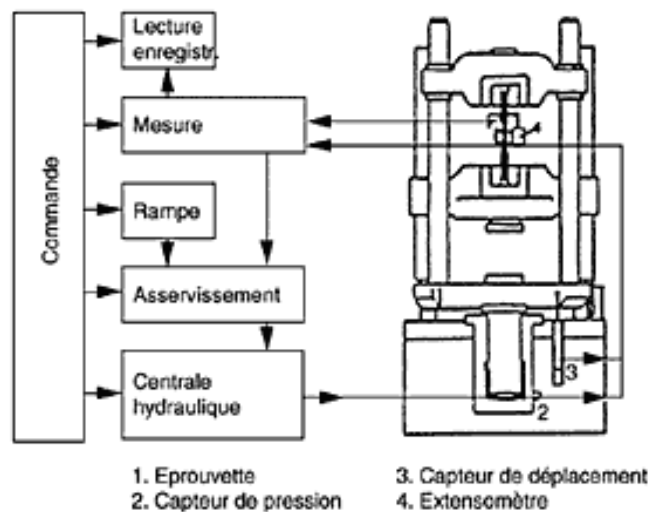


Figure 4

La vitesse de l'essai est limitée et dépend du matériau :

Acier $V_{MAX} \leq 0,15.L_0$ (mm/mn) ou $\leq 30N/mm^2/sec$

Aluminium $V_{MAX} \leq 0,009.L_0$ (mm/mn) ou $\leq 10N/mm^2/sec$

Cuivre $V_{MAX} \leq 0,006.L_0$ (mm/mn) ou $\leq 10N/mm^2/sec$

I.2. Exploitations de l'essai

I.2.a. Interprétation qualitative

Un diagramme Effort (F) - Allongement (ΔL) est déduit de l'essai. On en déduit un diagramme Contraintes - Déformations en portant sur l'axe des ordonnées l'effort par Unité de surface (F/S) et sur l'axe des abscisses l'allongement relatif ($\Delta L/L_0$)

Zone OA : domaine des **déformations élastiques ou réversibles** (zone parfois linéaire) si l'on cesse la charge, l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales

Zone AB : la déformation n'est plus complètement réversible. La **déformation est plastique (ou permanente)** homogène ; appelée aussi déformation plastique répartie. Les allongements croissent plus vite que les charges. L'allongement a lieu avec une diminution régulière de la section tout au long de l'éprouvette.

Zone BC : la **déformation plastique se localise** dans une petite portion de l'éprouvette et n'est plus homogène, c'est la **striction** on aboutit à la rupture en C. les allongements croissent avec une diminution de la charge.

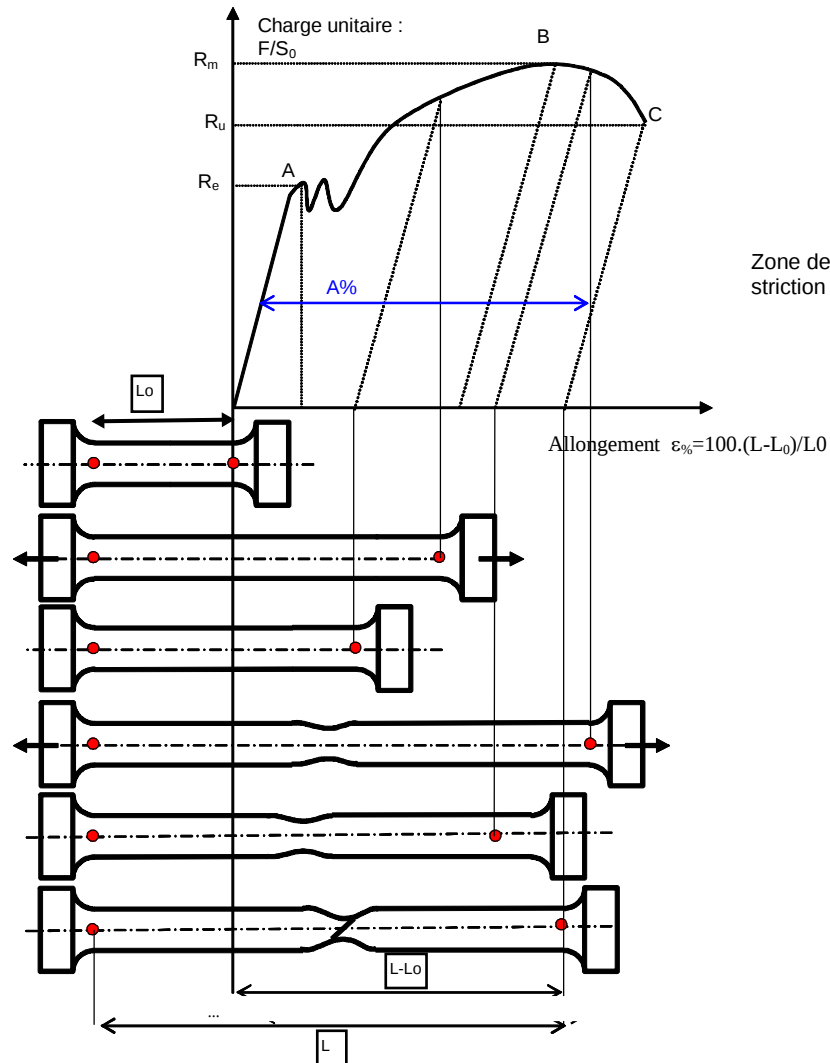


Figure 5

I.2.b. Définitions

Sur le diagramme précédent, qui peut être enregistré ou tracé par points, on utilise les coordonnées suivantes :

en abscisse, l'**allongement relatif** $\Delta L/L_0$ de l'éprouvette ou plutôt d'une certaine base de mesure L_0 (L_0 est la longueur initiale de l'éprouvette) ;

$$\epsilon\% = 100 \cdot \frac{L - L_0}{L_0}$$

- en ordonnée : la **charge unitaire**, définie à tout instant de l'essai, c'est le quotient de la charge par la section initiale de l'éprouvette S_0

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Le point A est la **limite d'élasticité** (ou résistance élastique à la traction) :

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

Le point B correspond à la charge maximale ; il est appelé **résistance à la traction** .

###

$$R_m = \frac{F_r}{S_0}$$

C'est la charge maximale atteinte durant l'essai de traction. A partir de ce point, la déformation commence à se localiser sous forme de striction, ce qui explique la décroissance de l'effort nécessaire aux déformations au delà du point B.

Un processus de mise en forme qui conduirait à franchir ce point se traduirait par des risques difficiles à contrôler de rupture ou de non-conformité géométrique.

Le point C correspondant, lui, à la **charge ultime**.

Après rupture de l'éprouvette et reconstitution de celle-ci, on mesure L_U et S_U respectivement longueur entre repères et section minimale ultimes.

L'allongement relatif total ou **A pour cent** de l'éprouvette est l'allongement de rupture :

$$A\% = 100 \cdot \frac{L_u - L_0}{L_0}$$

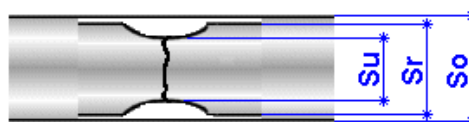
où L_u est la longueur de l'éprouvette après rupture. Il caractérise la ductilité du matériau.

###

La **striction** est la réduction de section maximale de l'éprouvette rompue c'est-à-dire dans la section de rupture (fig-3). Le coefficient de striction traduit l'aptitude à la déformation à froid.

$$Z\% = 100 \cdot \frac{S_0 - S_u}{S_0}$$

avec S_0 : section initiale et S_u : section après rupture.



S_0 : Dimension éprouvette initiale
 S_r : Dimension éprouvette après rupture
 S_u : Dimension de la striction après rupture

Figure 6

Cette déformation est également la somme de la déformation homogène répartie et de la déformation de striction proprement dite.

I.2.c. Le Processus thermo-mécanique

L'acier possède une structure granulaire. Elle influence le comportement mécanique des aciers à deux niveaux :

- A l'échelle microscopique, par les irrégularités d'alignement (les dislocations) et les éléments d'alliage en insertion ou en substitution que comporte chaque grain, qui est lui-même un mono-cristal de fer.

- A une échelle plus macroscopique, par la forme des grains (allongés ou bien massifs) ainsi que par leur taille. Pour une composition chimique donnée, ces caractéristiques de l'acier sont en relation avec les cycles thermo-mécaniques subis tout au long de la filière de fabrication :

- la solidification sous forme de brame,
- le laminage à chaud
- le laminage à froid
- le recuit.
- Le skin-pass.

Les températures de laminage, les vitesses de refroidissement, les températures de bobinage (pour les feuilles), les taux de réduction d'épaisseur au laminoir à froid, les cycles de recuit, les taux de skin-pass sont autant de paramètres permettant d'ajuster la structure cristalline et granulaire de l'acier et donc les propriétés finales du produit.

...

I.2.d. Influence de la température

Les limites élastique et de rupture dépendent de la température.

Cette propriété est utilisée pour la mise en forme par déformation plastique à chaud (forgeage).

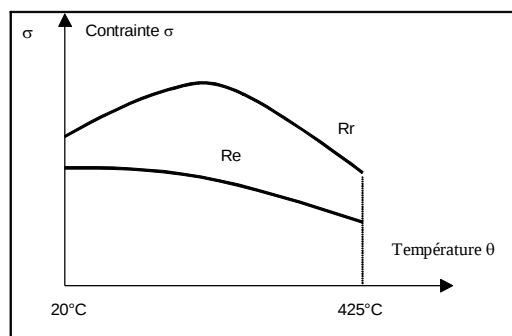


Figure 8

Remarque : en métrologie, on tient compte du fait qu'un acier admet une dilatation de $1\mu\text{m}/^\circ\text{C}/10\text{mm}$ environ.

I.3. Constantes d'élasticité

I.3.a. Définitions

Dans la première portion de la courbe, il y a proportionnalité entre charge unitaire et déformation, au moins en première approximation : c'est la **loi de Hooke**.

La caractéristique d'élasticité est la **pente** de cette droite qui est le **module d'élasticité E** (Coefficient d'élasticité longitudinal ou **module d'Young**) ; il exprime le rapport entre la charge unitaire appliquée et la déformation longitudinale de l'éprouvette.

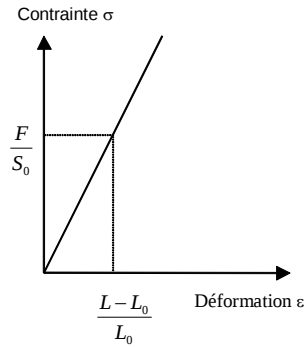


Figure 9 : Module d'Young

Bien que l'essai de traction permette difficilement de les mesurer, il est intéressant de rappeler les définitions des constantes élastiques et leurs relations

Lorsqu'on trace la courbe de σ en fonction de ϵ dans la zone élastique, la pente de la courbe est donnée par $\tan\theta$.

$$E = \frac{F \cdot L_0}{S_0 \cdot \Delta L}$$

Remarque : L'essai de traction n'est pas assez précis en général pour la mesure du module d'élasticité, car même si l'on amplifie suffisamment, et les techniques électroniques le permettent, de petites déformations parasites diminuent la valeur de la pente en plus des écarts à la loi de proportionnalité.

Ces écarts sont attribués à des microdéformations plastiques pour les aciers doux et à des contraintes résiduelles pour certains aciers traités qui conduisent à une plastification progressive de l'éprouvette.

ν le coefficient de Poisson,

G le module d'élasticité transversal ou de cisaillement.

Le coefficient de Poisson exprime le rapport entre la déformation longitudinale de l'éprouvette et la déformation transversale. Pour les Aciers on a environ : $\nu = 0,3$.

Le module de cisaillement G exprime le rapport entre le couple et la déformation par cisaillement, par exemple dans un essai de torsion.

Ces trois grandeurs sont liées par la relation suivante

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

I.3.b. Quelques valeurs usuelles de E :

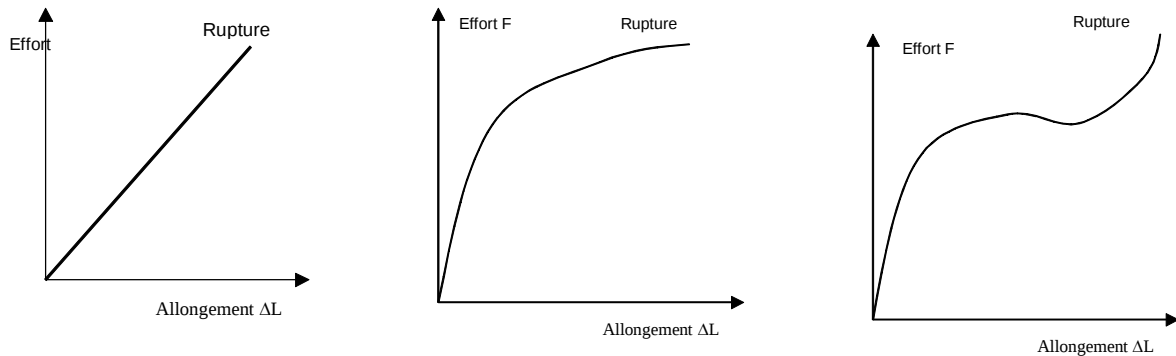
Tungstène -----	420 000 MPa
Aciers -----	200 000 à 220 000 MPa
Aciers inox -----	198 000MPa
Fontes graphite sphéroïdal -----	160 000 à 190 000MPa

Cuivre -----	126 000 MPa
Fontes graphite lamellaire-----	120 000 MPa
Laitons -----	105 000 MPa
Alliages d'aluminium -----	70 000 à 75 000 MPa
Plomb -----	17 000 MPa

I.4. Limite d'élasticité

I.4.a. Cas général

Le diagramme de l'essai de traction peut présenter différentes formes de courbes



Figures 10-a, b et c

Figure 10a : La rupture intervient très rapidement à l'issue de la période élastique. La période plastique est inexistante. C'est le cas de tous les **matériaux fragiles** tels que le verre, les céramiques, les bétons, les pierres à bâtir, les polymères thermodurcissables, la fonte grise et les aciers bruts de trempe (avant revenu).

Figure 10b : Le passage de la période élastique à la période plastique est progressif. La striction est pratiquement inexistante en fin d'essai. C'est le cas des aciers peu ductiles (aciers alliés et à fort pourcentage de carbone).

Figure 10c : Les périodes élastique et plastique sont très distinctes. La striction est importante. C'est le cas des aciers ductiles (aciers doux et à faible pourcentage de carbone). L'élasticité n'est pas linéaire et le comportement sous contrainte dépend du temps. C'est le cas des élastomères et de certaines matières plastiques.

I.4.b. Cas des aciers

Pour les aciers, on est conduit à distinguer 2 types principaux de courbes de traction suivant la présence ou non d'un crochet à la limite d'élasticité.

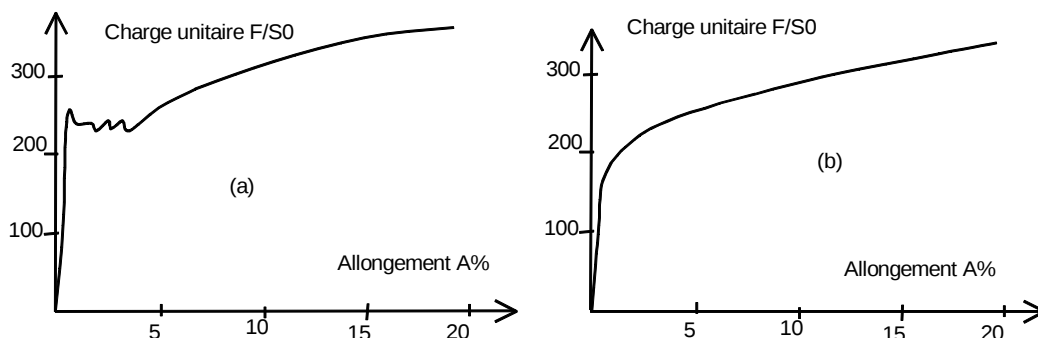


Figure 11 : courbes de traction des aciers

La courbe (a) correspond à des aciers ferritiques en général, mais peut se présenter avec moins de netteté pour des aciers plus durs traités, parfois même alliés. Ce type de courbes amène à la définition des grandeurs :

- la limite d'élasticité R_{eH} en MPa
- la limite d'élasticité inférieure R_{eL} en MPa
- et la longueur du palier A_p en %

La courbe (b), avec un passage progressif, correspond aux aciers durs ou aux aciers austénitiques.

Quand la limite est marquée par un palier de charge, la mesure ne semble pas poser trop de problèmes, alors que le passage progressif nécessite la définition de limites conventionnelles.

Lors des essais courants, on n'observe pas toujours de limite supérieure car, comme nous le verrons par la suite, elle est très sensible aux conditions d'essai et à la qualité de l'éprouvette.

La limite inférieure est moins sensible aux défauts géométriques de l'éprouvette, mais le palier est rarement horizontal (irrégularités de propagation des bandes de Piobert-Lüders).

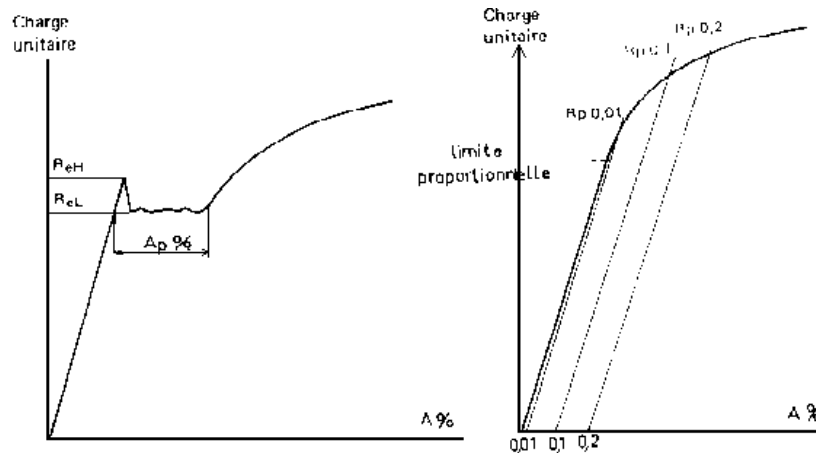


Figure 12

I.4.c. Limites conventionnelles

Comme le montre la figure ci-dessus, il y a passage progressif de l'élasticité linéaire à la déformation plastique. La limite d'élasticité pourrait être prise égale à la limite de proportionnalité, mais au fur et à mesure que l'on amplifie l'enregistrement de l'allongement pour mieux voir cette limite, on met en évidence le manque de linéarité de la montée élastique pour des raisons d'imperfections d'éprouvette et de non obéissance rigoureuse à la loi de HOOKE.

Il est donc préférable de définir des limites conventionnelles où l'on apprécie un allongement permanent faible mais mesurable avec précision, comme 0,2 % par exemple.

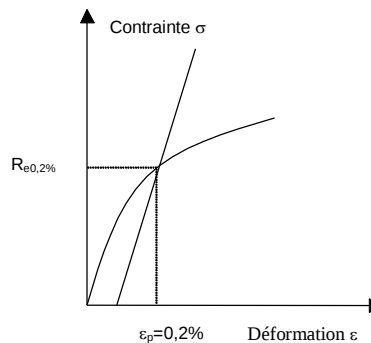


Figure 13

La limite élastique, notée $R_{e0,2\%}$ correspond au point où le comportement cesse **d'être** élastique pour devenir plastique.

Pour certains matériaux, le passage d'une zone à l'autre pouvant être progressif (*figure ci-contre*), il est nécessaire de définir un critère permettant de fixer tout de même une valeur de R_e .

Ainsi on choisit souvent **$R_{e0,2\%}$ qui correspond après décharge à un allongement plastique** (ou rémanent) de 0,2%.

On définit des limites conventionnelles à 0,2% - 0,1 % - 0,02 % ou 0,01 %

L'emploi le plus répandu de $R_{0,2}$ ($R_p 0,2\%$) est lié aux méthodes de mesure, puisque autrefois on soumettait l'éprouvette à des charges croissantes avec démontage et mesure de l'allongement rémanent ; il fallait donc que l'on puisse apprécier l'allongement rémanent avec une certaine précision dépendant des moyens métrologiques.

L'apparition des extensomètres mécaniques, puis des extensomètres électroniques à amplification forte, a amené à considérer de plus en plus l'allongement mesuré sur diagramme au détriment de l'allongement rémanent.

La limite conventionnelle s'obtient alors en traçant par la valeur d'allongement choisie une parallèle à la montée élastique ; la précision obtenue permet le cas échéant de prendre des valeurs plus petites que 0,2 %. Cette dernière est la plus fréquemment employée car elle est utilisable avec tous les types d'extensomètres.

On admet généralement que la limite d'élasticité proportionnelle est voisine de $R_p 0,01 \%$ mais ce n'est qu'une approximation.

...

II. Courbe rationnelle de traction

II.1. Contrainte vraie

Comme le montre la définition, la charge de rupture est une grandeur conventionnelle puisque l'on rapporte la charge maximale à la section initiale.

La contrainte vraie correspond à la charge rapportée à la section instantanée, soit :

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

F charge appliquée, S section instantanée.

II.2. Déformation rationnelle ou Déformation vraie

L'allongement ordinaire n'est pas additif, ce qui est gênant pour les calculs de plasticité ; on le remplace par la **déformation rationnelle**

$$\epsilon^* = \ln \frac{L}{L_0}$$

La déformation rationnelle s'introduit de la façon suivante.

Soit L la longueur entre repères de l'éprouvette à un instant donné si on l'allonge d'une quantité ΔL , l'allongement relatif sera $\frac{\Delta L}{L}$ et, depuis le début de l'essai, l'allongement relatif

$$\text{total sera égal à : } \epsilon^* = \sum_{L_0}^L \frac{\Delta L}{L}$$

ou en considérant des allongements infiniment petits dL

$$\epsilon^* = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0}$$

On peut aussi écrire

$$\epsilon^* = \ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{L}{L_0}$$

si l'on admet la constance du volume de la partie calibrée $S_0.L_0 = S.L$

$$\text{De plus, } \sigma^* = \frac{F}{S} = \frac{F}{S_0} \left(\frac{S_0}{S} \right) = \frac{F}{S_0} \left(\frac{L}{L_0} \right) = \frac{F}{S_0} \left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right) \text{ d'où :}$$

$$\sigma^* = \sigma(1 + \epsilon)$$

Cela n'est évidemment valable que dans la zone des allongements répartis et à condition que l'homogénéité de la déformation de la partie calibrée sur la base de mesure soit acceptable.

Cette déformation rationnelle diffère peu de l'allongement ordinaire $A\% = 100 \frac{L - L_0}{L_0}$ pour les faibles valeurs si on l'exprime en % ; on a la relation

$$\epsilon^* = \ln \left(1 + \frac{A\%}{100} \right)$$

la différence ne dépasse pas 2 % pour une déformation de 20 %, mais l'écart grossit pour les déformations importantes.

II.3. Courbe rationnelle de traction

Dans l'essai de traction, on mesure les efforts rapportés à la section initiale de l'éprouvette.

Il existe une représentation de la courbe de traction, de plus en plus utilisée en laboratoire, qui consiste à reporter la contrainte vraie σ en fonction de la déformation rationnelle ε^* ; c'est la courbe rationnelle de traction.

L'allure d'une telle courbe est représentée sur la figure ci après.

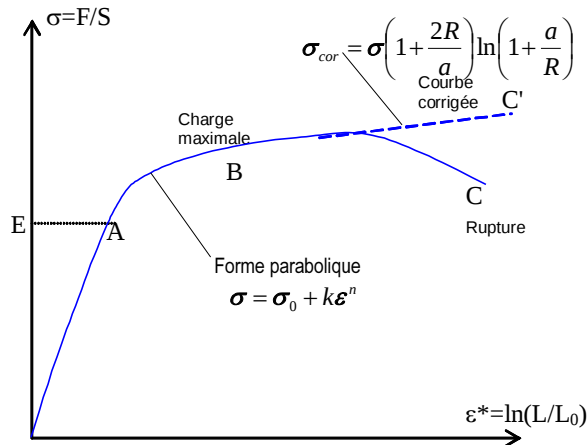


Figure 15

Sur cette courbe il n'y a pas de différence avec le tracé ordinaire pour la partie élastique et la limite d'élasticité R_e , car les déformations élastiques sont très faibles entre la limite d'élasticité et le point correspondant à la charge maximale, la courbe a une forme parabolique.

II.3.a. Équation de la courbe rationnelle

La portion d'allure parabolique de la courbe rationnelle peut être mise sous forme mathématique.

L'expression la plus utilisée est la parabole généralisée de la forme

$$\sigma = \sigma_0 + k.\varepsilon^n$$

σ_0 , k et n étant des constantes.

Pour les aciers doux, on observe expérimentalement que σ_0 est nul, d'où l'emploi de la formule simplifiée :

$$\sigma = k.\varepsilon^n$$

II.3.a.1. n est appelé coefficient d'écrouissage.

Il caractérise la propension de l'acier à se durcir au cours de la déformation dans le domaine plastique (plus n est élevé, plus l'acier se consolide vite) et à subir une déformation en expansion.

Si dans le domaine élasto plastique la contrainte croît en même temps que la déformation alors on dit que le matériau est écrouissable .

si on supprime la charge avant d'atteindre σ_{Max} alors la courbe revient parallèlement au domaine élastique ; l'éprouvette s'étant allongée de ε résiduel.

Si on soumet de nouveau cette éprouvette à un essai ,on s'aperçoit que σ_{Max} à augmenté.

L'écrouissage est souvent un inconvénient du à un procédé de fabrication ,mais peut-être exploité comme traitement mécanique (shot penning ; grenaillage).

II.3.a.2. Mesure du coefficient d'écrouissage

Si on reporte $\log \sigma$ en fonction de $\log \varepsilon$:

$$\log \sigma = \log k' + n \log \varepsilon$$

c'est-à-dire une droite de pente n si la loi est vérifiée.

Le coefficient d'écrouissage : n

II.3.b. Concentration de contraintes

Au-delà du point B jusqu'à la rupture en C, l'existence de la striction complique le calcul de la contrainte vraie car il faut tenir compte de l'effet de **concentration de contrainte** ; la formule de correction la plus utilisée est celle de BRIDGMANN .

$$\sigma_{cor} = \sigma \left(1 + \frac{2R}{a} \right) \ln \left(1 + \frac{a}{R} \right)$$

a étant le rayon de la section minimale,

R le rayon de courbure de la zone de striction.

Après correction, cette partie de la courbe rationnelle peut être considérée comme sensiblement linéaire.

II.4. Ecrouissage

II.4.a. Explication du phénomène

Si, au cours de l'essai et pendant la période de déformations plastiques, on supprime lentement l'effort de traction, on constate qu'il subsiste une déformation résiduelle permanente représentée par OF. De plus, la pente de la droite EF a pour valeur le module d'Young.

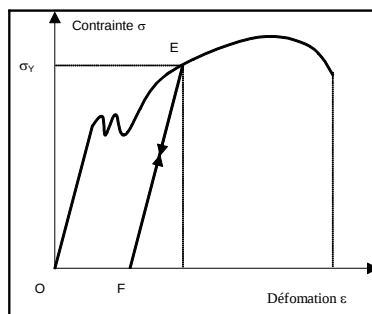


Figure 16

II.4.b. Coefficient d'anisotropie (source Usinor)

Ce coefficient mesure la tendance de l'acier à s'amincir au cours de l'essai de traction. Il exprime le rapport entre la déformation en largeur et la déformation en épaisseur de l'éprouvette. Il reflète ainsi l'aptitude de l'acier à **s'emboutir** profondément en accommodant la déformation en rétreint.

Certaines normes prescrivent une valeur d'anisotropie moyenne à l'aide de deux coefficients : - le coefficient d'anisotropie normale " $-r$ " et le coefficient d'anisotropie plane " r ".

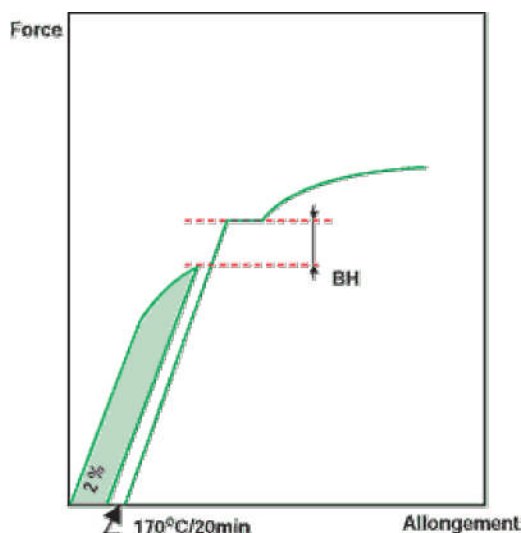
r mesure la tendance d'une tôle à s'emboutir de façon non uniforme et à former des cornes dans le flanc d'un embouti cylindrique. Les valeurs usuelles de $-r$, de l'ordre de 1 pour les tôles à chaud peuvent atteindre près de 3 pour les tôles minces pour emboutissage de qualité supérieure.

II.4.c. Bake-hardening (source Usinor)

Capacité de durcissement par vieillissement des aciers calmés lors de la cuisson de la peinture, cette capacité étant mise à profit pour provoquer une augmentation de la limite d'élasticité sur pièce finie.

Ainsi, ces aciers permettent de concilier une bonne aptitude à l'emboutissage (valeur de R_e "basse" sur métal à plat) et une bonne résistance à la déformation plastique de la pièce, et, en particulier une bonne résistance à l'indentation.

Il est déterminé par la mesure de l'augmentation de R_e lors d'un traitement thermique de 170 °C pendant 20 min simulant les conditions de cuisson de la peinture après prédéformation en traction uniaxiale de 2 % (usage le plus représentatif) : BH2 (voir fig. ci-contre)



-Work-hardening

Augmentation de la limite d'élasticité, par rapport au niveau de référence, après une déformation dans le domaine plastique.

III. Traction biaxiale

L'essai peut être effectué par exemple en réalisant deux essais de traction simultanés.

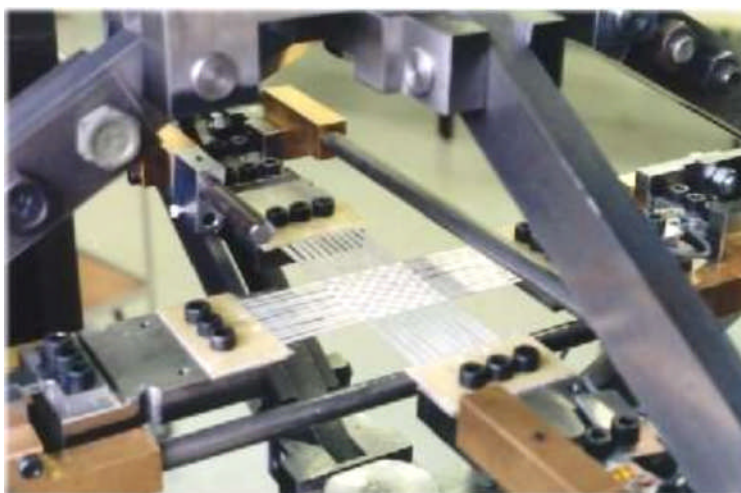


Figure 17 : traction biaxiale de fibres de matériau composite

Des éprouvettes spéciales permettent, à l'aide d'une sollicitation axiale, d'évaluer les contraintes dans deux directions (éprouvette de Monique BLANC ENSAM).