

2.1 Les propriétés de l'essai de traction

2.1.1 Définition de l'essai

L'essai le plus courant permettant de déterminer le comportement mécanique d'un matériau est l'essai de traction. On applique une force de traction sur un barreau de dimension standardisée, jusqu'à sa rupture suivant un processus de mise en charge à vitesse de déformation constante.

2.1.2 Eprouvette

Les éprouvettes de l'essai de traction uni-axiale ordinaires sont de forme généralement cylindrique ou prismatique, elles sont soigneusement polies et calibrées (figure 2-2).

La longueur de la partie calibrée l_0 doit être proportionnelle à la section selon l'expression suivante : $l_0 = 5,65\sqrt{S_0}$, où (l_0) : longueur initiale entre repères en mm, et (S_0) : Section initiale de l'éprouvette en mm².

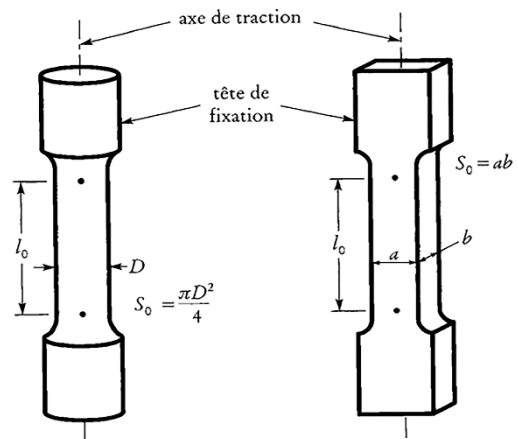


Figure 2-2 : Eprouvette de traction

2.1.3 Principe d'essai de traction

L'essai est réalisé sur une machine de traction (figure 2-3), en appliquant lentement et progressivement un effort de traction croissant, dont l'intensité varie de 0 jusqu'à F, sur une éprouvette maintenue solidement entre les mâchoires de la machine. Des appareils adaptés à la machine permettent de mesurer à chaque instant l'effort de traction ou la charge (à l'aide d'un dynamomètre) et l'allongement de l'éprouvette (à l'aide d'un extensomètre).

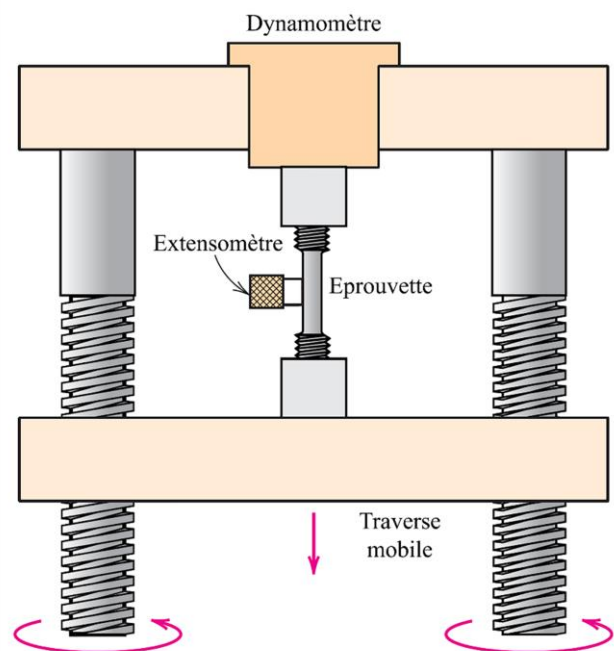


Figure 2-3: Machine d'essai de traction

2.1.4 Contraintes et déformations conventionnelles

Dans l'essai de traction, En enregistrant la force appliquée à l'éprouvette par la machine de traction et son allongement progressif, on détermine une série de caractéristiques mécaniques essentielles. On ne connaît généralement pas la variation de la section de l'éprouvette durant la mesure et, en règle générale, on exprime la force F et l'allongement Δl par rapport aux dimensions initiales de l'éprouvette. On obtient ainsi la **contrainte nominale** (σ) et la **déformation conventionnelle** (ε):

- **Contrainte conventionnelle** : est la charge rapportée (F) à la section initiale (S_0). La contrainte conventionnelle (Nominale) se note σ , par définition :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad \text{Eq 2-1}$$

- **Déformation conventionnelle** : est l'allongement absolu (Δl) rapporté à la longueur initiale (l_0). La déformation conventionnelle se note (ε). Par définition :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad \text{Eq 2-2}$$

2.1.5 Courbe conventionnelle contrainte-déformation

Rappelons que la courbe de traction charge-déplacement, $F = f(\Delta l)$ où $\Delta l = l - l_0$ étant l'allongement absolu de l'éprouvette suite à l'application de la charge (F), est une caractéristique de l'échantillon. Celle-ci peut être modifiée de façon que les résultats obtenus ne soient fonction que du matériau étudié et non de la géométrie de l'éprouvette. Ainsi, on obtient $\sigma = f(\varepsilon)$ [courbe contrainte-déformation].

À titre d'exemple, les figures 2-4 et 2-5 représentent la courbe de traction d'un métal à comportement ductile. Une courbe de traction de ce type permet de déterminer les caractéristiques mécaniques essentielles.

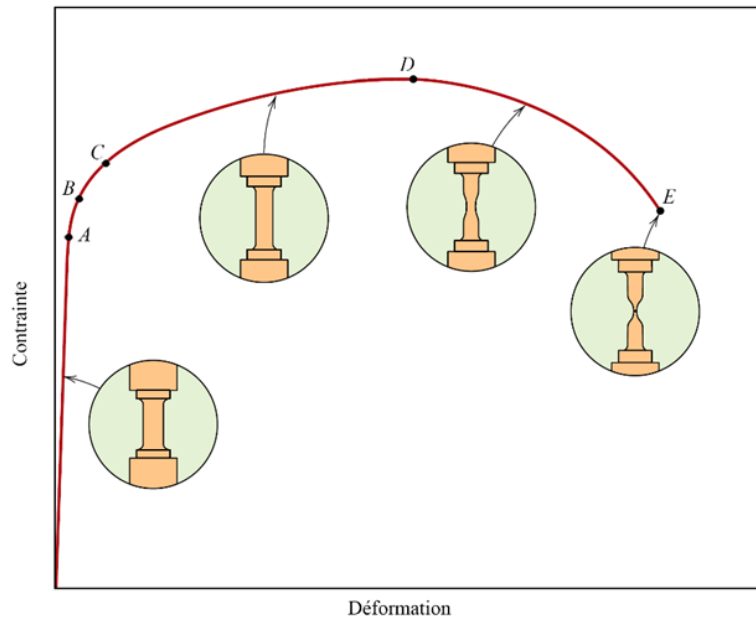


Figure 2-4 : Courbe de contrainte-déformation typique jusqu'à la rupture au point E. Les médaillons représentent la forme de l'éprouvette déformée en divers points de la courbe.

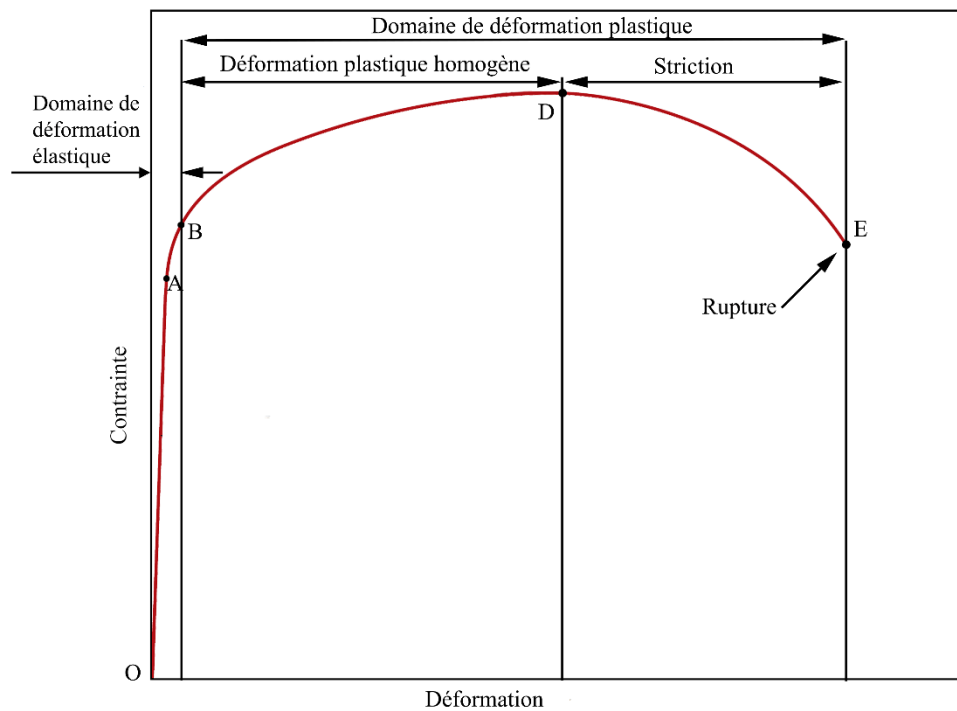


Figure 2-5 : Courbe de contrainte-déformation d'un métal ductile représente les différentes zones de déformations.

2.1.6 Caractéristiques mécaniques des métaux en traction

2.1.6.1 Déformation élastique :

Une déformation proportionnelle à la contrainte appliquée est appelée *déformation élastique*. La déformation élastique n'est pas permanente, c'est-à-dire que la pièce reprend sa forme initiale quand on supprime la charge appliquée. Comme le montre le diagramme contrainte-déformation (figure 2-6), appliquer une charge revient à se déplacer vers le haut, sur le segment rectiligne. Dès la suppression de la charge, on parcourt le segment dans le sens contraire et on revient à l'origine.

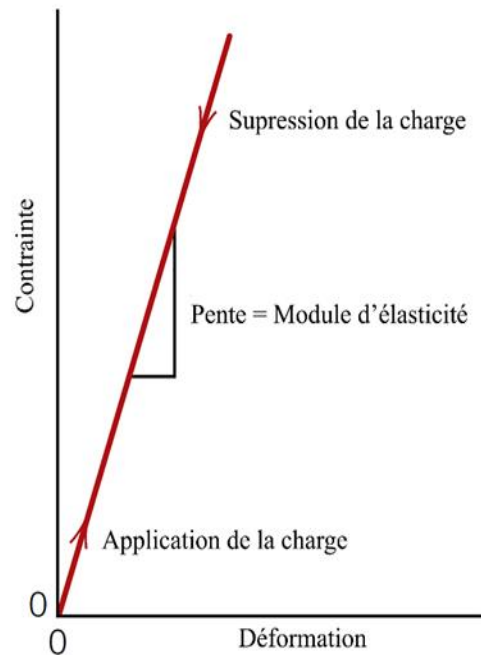


Figure 2-6 : Diagramme schématisé contrainte-déformation montrant la déformation élastique linéaire pendant les cycle d'application et de suppression de charge

2.1.6.2 Déformation plastique :

Est une déformation qui est permanente ou irréversible après la suppression de la charge appliquée et qui s'accompagne de déplacement des atomes permanents.

2.1.6.3 Loi de Hook

Pour la plupart des métaux soumis à des contraintes de traction relativement faibles, la contrainte et la déformation sont proportionnelles selon la relation suivante :

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{Eq 2-3}$$

Cette égalité est appelée *loi de Hook* et la constante de proportionnalité E (GPa) est appelée *Module d'élasticité, ou Module de Young*.

2.1.6.4 Module d'élasticité

Le *module d'élasticité* E ou *module de Young* donné par la pente de la partie élastique de la courbe contrainte σ – déformation ε (figure 2-6). Ce module élastique est fonction de l'énergie des liaisons entre les atomes ou molécules constituant le matériau. On peut considérer que ce

Chapitre 2 : Propriétés mécaniques

module est *la rigidité* ou *la résistance à la déformation élastique* d'un matériau. Plus le module est grand, plus le matériau est rigide. Pour la plupart des métaux typiques, la valeur de ce module est comprise entre 45 GPa pour le magnésium et 407 GPa pour le tungstène. Le tableau 2-1 donne la valeur du module d'élasticité pour plusieurs métaux et alliages à la température ambiante.

Tableau 2-1: Modules d'élasticité et de cisaillement, et coefficient de Poisson pour divers alliages métalliques, à la température ambiante.

Alliage métallique	Module d'élasticité (GPa)	Module de cisaillement (GPa)	Coefficient de poisson
Acier	207	83	0,30
Aluminium	69	25	0,33
Cuivre	110	46	0,34
Laiton	97	37	0,34
Magnésium	45	17	0,29
Nickel	207	76	0,31
Titane	107	45	0,34
Tungstène	407	160	0,28

Pour certains matériaux (dont la fonte grise, le béton et de nombreux polymères), ce segment élastique initial de la courbe contrainte-déformation n'est pas linéaire (figure 2-7); et on ne peut alors pas déterminer un module d'élasticité comme ci-dessus. Dans tel cas de comportement non linéaire, on utilise normalement *le module tangent* ou *le module sécant*. Le module tangent est considéré comme la pente de la courbe contrainte-déformation pour une valeur donnée de la contrainte ; le module sécant représente la pente d'une sécante tracée de l'origine à un point donné de la courbe contrainte-déformation. La détermination de ces modules est illustrée à la figure 2-7.

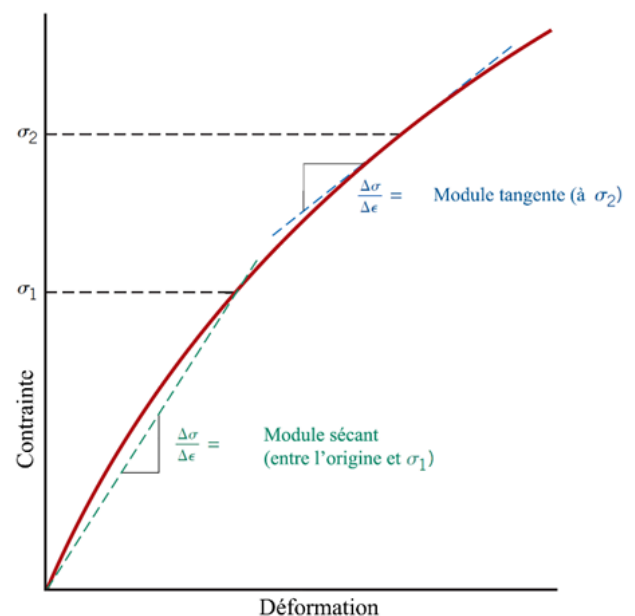


Figure 2-7: diagramme schématisant le comportement élastique non linéaire et la détermination des modules tangent et sécant.

2.1.6.5 Limite de proportionnalité :

Correspond à la fin du domaine proportionnel (point A, figure 2-4), on peut écrire la limite proportionnelle comme suite :

$$\sigma_{pr} = \frac{F_{pr}}{S_0} \quad \text{Eq 2-4}$$

2.1.6.6 La limite d'élasticité :

Correspond le point B (figure 2-4), qui donne la valeur de la contrainte nominale à partir de laquelle le matériau commence à se déformer d'une façon irréversible. On peut écrire la limite d'élasticité comme suite :

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0} \quad \text{Eq 2-5}$$

2.1.6.7 La limite d'écoulement :

Représenté par le segment horizontal (figure 2-8b), appelé aussi le palier d'écoulement. La limite d'écoulement est la contrainte à partir de laquelle la déformation croît sans accroissement notable de la charge.

$$\sigma_{ec} = \frac{F_{ec}}{S_0} \quad \text{Eq 2-6}$$

2.1.6.8 Limite conventionnelle d'élasticité

La courbe de plusieurs matériaux soumis à la traction ne présente pas de palier d'écoulement bien marqué (en particulier l'aluminium, le duralumin, le bronze, aciers à haut carbone et alliés) ; pour de tels matériaux, on considère que l'écoulement commence au point où la courbe contrainte-déformation cesse d'être linéaire. Mais comme on ne peut pas déterminer précisément ce point, on convient de tracer une droite parallèle à la partie élastique de la courbe contrainte-déformation avec un décalage précis, habituellement de 0,002. La contrainte correspondant à l'intersection de cette parallèle avec la courbe contrainte-déformation. La figure 2-8a illustre la détermination de cette valeur.

$$\sigma_{0,2\%} = \frac{F_{0,2\%}}{S_0} \quad \text{Eq 2-7}$$

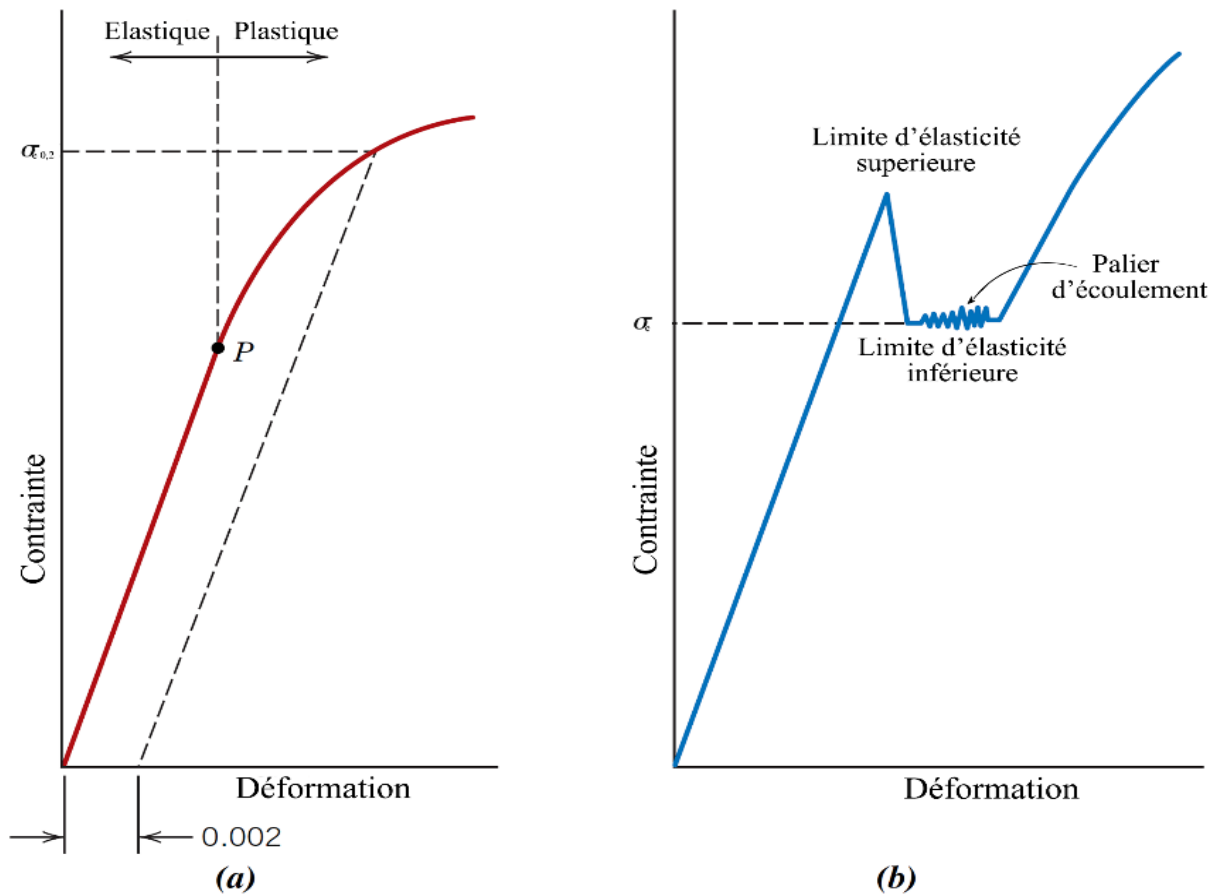


Figure 2-8 : a) Courbe contrainte-déformation typique d'un métal montrant les déformations élastique et plastique, la limite de proportionnalité (Point P) et la limite conventionnelle d'élasticité ($\sigma_{e0,2}$) déterminée par la méthode de la parallèle décalée de 0,002. b) Comportement contrainte-déformation représentatif de quelques aciers illustrant le phénomène d'écoulement plastique à la limite d'élasticité (palier d'écoulement).

2.1.6.9 La résistance à la traction :

Correspond le point D de la courbe contrainte-déformation (Figure 2-4) qui est définie par la contrainte nominale maximale supportée par l'éprouvette.

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad \text{Eq 2-8}$$

2.1.6.10 La contrainte à la rupture:

Correspond le point E de la courbe contrainte-déformation (Figure 2-4) qui est définie par la contrainte à la rupture de l'éprouvette.

$$\sigma_r = \frac{F_r}{S_0} \quad \text{Eq 2-9}$$

À partir de la résistance maximale à la traction observé dans la courbe de contrainte-déformation (Figure 2-4), la contraction de la section de l'éprouvette cesse d'être homogène. On observe que celle-ci devient plus importante, de façon aléatoire, en un endroit précis de l'éprouvette. À cet emplacement, la section locale de l'éprouvette diminue de manière inhomogène. Ce phénomène est appelé *la striction* (Figure 2-9) et la rupture y survient.

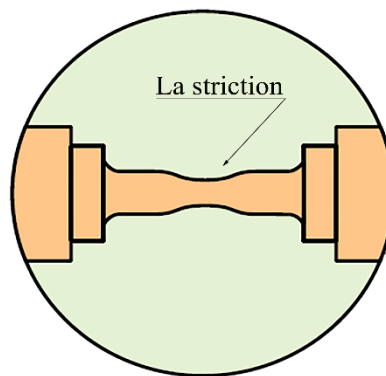


Figure 2-9 : Zone de la striction

2.1.6.11 Ductilité

La *ductilité* est une autre propriété mécanique importante. Elle indique le degré de la déformation plastique à la rupture. Un matériau qui à la rupture a subi une très petite déformation plastique ou qui n'en a subi aucune est dit *fragile*. La figure 2-10 illustre schématiquement le comportement contrainte-déformation en traction de matériaux ductiles et fragiles. La ductilité s'exprime quantitativement par un *pourcentage d'allongement* après la rupture ou un *coefficient de striction* exprimé en pourcentage.

- **Allongement :** L'allongement à la rupture (A) est le pourcentage de la déformation plastique à la rupture, soit:

$$A(\%) = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100 \quad \text{Eq 2-10}$$

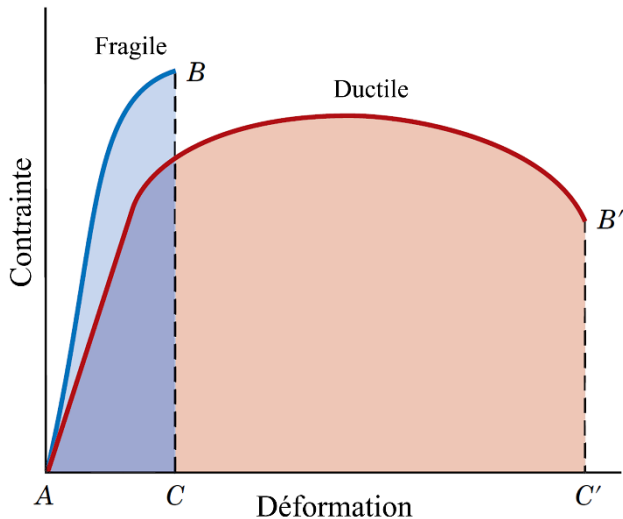


Figure 2-10 : Représentation schématique du comportement contrainte-déformation en traction des matériaux fragiles et ductiles soumis à une force jusqu'à la rupture.

Où (l_f) est la distance entre les repères à la rupture, et (l_0), la distance initiale entre les repères, tel qu'illustré précédemment. Comme une proportion importante de la déformation plastique à la traction est confinée dans la zone de striction, la valeur de (A) dépend de la distance entre les repères de l'éprouvette. Plus (l_0) est petit, plus la fraction de l'allongement total causé par la striction est grande et donc plus la valeur de (A) est grande. C'est pourquoi il faut préciser (l_0) quand on donne le pourcentage d'allongement à la rupture; habituellement, (l_0) est de 50 mm.

- **Striction :** Par définition, l'expression du coefficient de striction (Z) est:

$$Z(\%) = \left(\frac{S_0 - S_f}{S_0} \right) \times 100 \quad \text{Eq 2-11}$$

Où (S_0) est l'aire initiale de la section transversale, et (S_f) l'aire de la section transversale au point de rupture.

Il faut connaître la ductilité des matériaux pour au moins deux raisons. Premièrement, elle indique au concepteur jusqu'à quel point une structure se déforme plastiquement avant la rupture. Deuxièmement, elle spécifie la déformation admissible durant la fabrication. On dit parfois que les matériaux relativement ductiles, en ce sens qu'ils peuvent subir des déformations

Chapitre 2 : Propriétés mécaniques

locales sans se rompre si la contrainte appliquée localement excède la contrainte admissible. Les essais de traction permettent donc de déterminer plusieurs propriétés mécaniques importantes des métaux. Le tableau 2-2 présente quelques valeurs types de la limite conventionnelle d'élasticité, de la résistance à la traction et du pourcentage d'allongement à la rupture pour plusieurs métaux courants. Ces propriétés sont sensibles à toute déformation antérieure, à la présence d'impuretés et à tout traitement thermique auquel le métal a déjà été soumis. Le module d'élasticité est une propriété mécanique relativement insensible à ces traitements. Comme le module d'élasticité, la limite conventionnelle d'élasticité et la résistance à la traction diminuent lorsque la température augmente; l'inverse est observé pour la ductilité, habituellement, elle augmente avec la température. La figure 2-11 montre comment le comportement contrainte-déformation du fer varie avec la température.

Tableau 2-2 : Propriétés mécaniques typiques de plusieurs métaux et alliages recuits.

<i>Alliage métallique</i>	<i>Limite conventionnelle d'élasticité (MPa)</i>	<i>Résistance à la traction (MPa)</i>	<i>Pourcentage d'allongement à la rupture A% (dans 50mm)</i>
Acier (1020)	180	380	25
Aluminium	35	90	40
Cuivre	69	200	45
Fer	130	262	45
Laiton (70 Cu-30 Zn)	75	300	68
Molybdène	565	655	35
Nickel	138	480	40
Titane	450	520	25

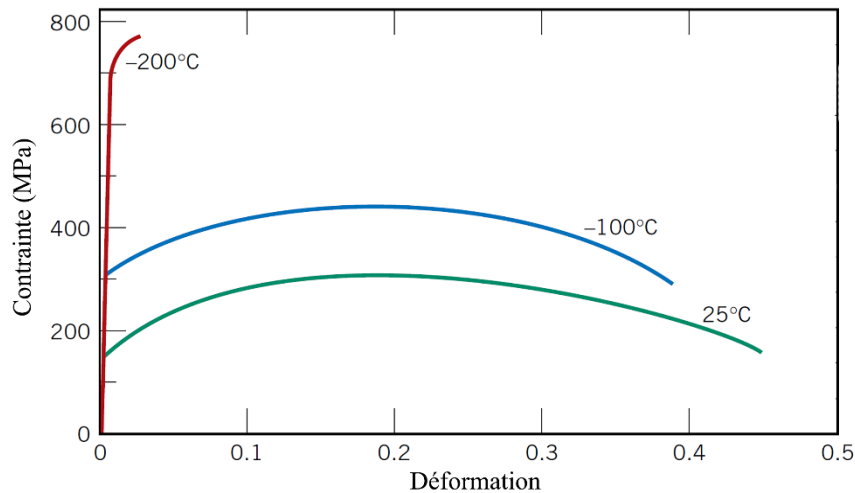


Figure 2-11 : Courbe de traction du fer à trois températures.

2.1.6.12 Résilience

La **résilience** est la capacité d'un matériau d'emmagasiner de l'énergie lorsqu'il se déforme d'une manière élastique et de libérer cette énergie quand la charge est supprimée. La propriété qui y est associée est la capacité d'adsorption d'énergie élastique par unité de volume (W) requise pour contraindre un matériau jusqu'à la limite conventionnelle élastique. Mathématiquement, pour une éprouvette soumise à un essai de traction uniaxe, cette propriété correspond à l'aire sous la courbe contrainte-déformation jusqu'à la limite conventionnelle d'élasticité (figure 2-12), soit :

$$W = \int_0^{\varepsilon_y} \sigma d\varepsilon \quad \text{Eq 2-12}$$

En supposant une région linéaire,

$$W = \frac{1}{2} R_{0,2} \varepsilon_y \quad \text{Eq 2-13}$$

Expression dans laquelle (ε_y), est la déformation pour une contrainte égale à la limite conventionnelle d'élasticité.

L'unité utilisée pour exprimer la capacité d'absorption d'énergie élastique par unit de volume est le joule par mètre cube (J/m^3 , équivalent à Pa). Elle correspond au produit des unités de chacun des deux axes du diagramme contrainte-déformation. Le joule est une unité d'énergie,

Chapitre 2 : Propriétés mécaniques

et l'aire sous la courbe contrainte-déformation représente donc l'énergie emmagasinée par unité de volume (en mètre cube) de matériau.

L'insertion de l'équation 2-3 dans l'équation 2-13 donne :

$$W = \frac{1}{2} R_{0,2} \varepsilon_y = \frac{1}{2} R_{0,2} \left(\frac{R_{0,2}}{E} \right) = \frac{R_{0,2}^2}{2E} \quad \text{Eq 2-14}$$

Ainsi les matériaux résilients sont ceux qui ont une grande limite conventionnelle d'élasticité et un petit module d'élasticité ; de tels alliages servent dans les ressorts.

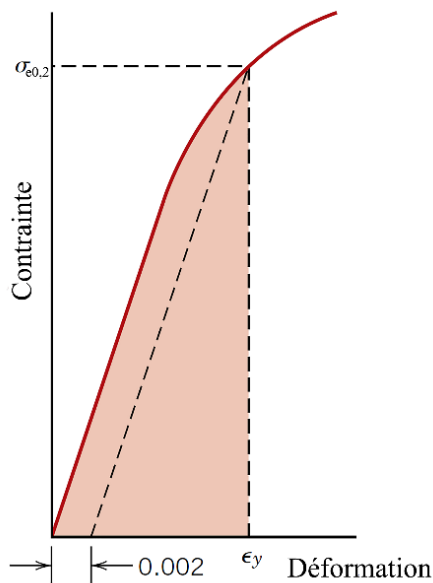


Figure 2-12: Représentation schématique montrant la façon de calculer l'énergie élastique emmagasinée par unité de volume (correspondant à l'aire sous la trame) à partir de la courbe de traction d'un matériau.

2.1.6.13 Ténacité :

Utilisé dans divers contextes en mécanique, le mot **ténacité** désigne la capacité d'un matériau à absorber de l'énergie avant sa rupture. La forme de l'éprouvette et la façon d'appliquer la charge jouent un rôle important dans la détermination de la ténacité.

Dans le cas d'une charge statique (faible vitesse de déformation), on mesure la ténacité à l'aide des résultats d'un essai de traction. C'est l'aire sous la courbe contrainte-déformation jusqu'à la rupture. Les unités de la ténacité sont les mêmes que celles de la capacité d'absorption d'énergie élastique par unité de volume. Un matériau est tenace s'il est résistant et ductile; les matériaux ductiles sont d'ailleurs souvent plus tenaces que les matériaux fragiles. Cela apparaît à la figure 2-10, qui donne les courbes contrainte-déformation pour les deux types de matériaux. Ainsi, même si un matériau fragile a une limite conventionnelle d'élasticité et une résistance à la

traction plus grandes, sa ténacité est inférieure celle d'un matériau ductile, en raison, justement, de son manque de ductilité; cela se déduit de la comparaison des aires (ABC) et ($AB'C'$) de la figure 2-10.

2.1.6.14 Coefficient de poisson

Une éprouvette métallique soumise à une contrainte de traction s'allonge et subit une déformation (ϵ_z) dans le sens de la contrainte appliquée (arbitrairement pris comme sens z), comme l'indique la figure 2-13. Cet allongement fait apparaître une contraction dans les sens x et y , perpendiculaires à la contrainte appliquée; ces contractions permettent de calculer les déformations (ϵ_x) et (ϵ_y) dues à la compression. Si la contrainte appliquée est uniaxe seulement dans le sens z , et le matériau, isotrope, alors ($\epsilon_x = \epsilon_y$). Par définition, **le coefficient de Poisson** (ν) est égal au rapport entre la déformation latérale et la déformation axiale, soit:

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \quad \text{Eq 2-15}$$

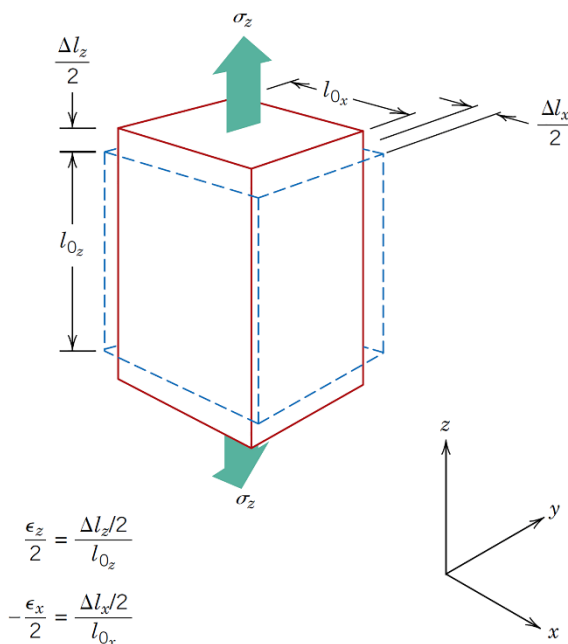


Figure 2-13 : Allongement axial z (déformation positive) et contractions latérales x et y (déformation négatives) en réponse à l'application d'une contrainte de traction. Les dimensions avant et après l'application d'une contrainte sont représentées respectivement par les traits discontinus et les traits pleins.

On inclut un signe négatif dans l'expression pour que (ν) soit toujours positif, puisque (ϵ_x) et (ϵ_z) sont toujours de signe contraire. Théoriquement, le coefficient de Poisson pour les matériaux isotropes devrait être de $1/4$; de plus, la valeur maximale de (ν) (ou celle pour laquelle

il n'y a aucune variation de volume) est de 0,50. Le coefficient de Poisson de nombreux métaux et autres alliages varie entre 0,25 et 0,35. Le tableau 2-1 donne la valeur de (ν) de plusieurs métaux et alliages courants.

2.1.7 Contraintes et déformations réelles

A la figure 2-4, la diminution de la contrainte nécessaire pour que la déformation se poursuive au-delà du maximum (point M), semble indiquer que le matériau s'affaiblit. Cela est complètement faux; en fait, sa résistance augmente. Cependant, l'aire de la section transversale diminue rapidement dans la zone de striction où se produit la déformation, ce qui réduit la capacité de l'éprouvette à supporter une charge. L'équation 2-1 donne la contrainte pour l'aire de la section transversale avant toute déformation et ne tient donc pas compte de la réduction de la section dans la zone de striction.

Il est parfois plus juste de considérer la combinaison contrainte réelle-déformation réelle. Par définition, **la contrainte réelle** (σ_r), est égale à la charge (F) divisée par l'aire instantanée de la section transversale (S_i) au-dessus de laquelle la déformation a lieu (c'est-à-dire à la striction au-delà du point de rupture en traction), soit:

$$\sigma_r = \frac{F}{S_i} \quad \text{Eq 2-16}$$

Parfois, il est plus pratique d'utiliser la déformation réelle (ε_r). Par la définition,

$$\varepsilon_r = \ln \frac{l_i}{l_0} \quad \text{Eq 2-17}$$

Si ce volume ne varie pas durant la déformation, c'est-à-dire si ;

$$S_i l_i = S_0 l_0 \quad \text{Eq 2-18}$$

Les relations entre les contraintes réelle et nominale, d'une part, et les déformations réelles et conventionnelle, d'autre part, sont respectivement:

$$\sigma_r = \sigma(1 + \varepsilon) \quad \text{Eq-2-19}$$

$$\varepsilon_r = \ln(1 + \varepsilon) \quad \text{Eq-2-20}$$

Chapitre 2 : Propriétés mécaniques

Les équations 2-19 et 2-20 ne sont valides qu'à l'apparition de la striction; au-delà de ce point, il faut calculer la contrainte et la déformation réelles à l'aide des valeurs véritables de la charge, de l'aire de la section transversale et de la distance entre repères.

La figure 2-14 compare schématiquement les comportements contrainte-déformation conventionnelle et contrainte-déformation réelles. Remarquez qu'il faut continuer à augmenter la contrainte réelle au-delà du point de striction (M') pour que la déformation augmente encore.

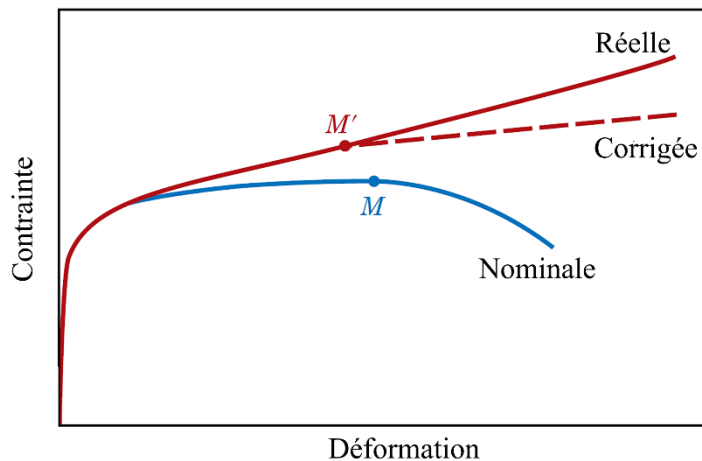


Figure 2-14 : Courbe contrainte-déformation-typique : contrainte déformation conventionnelle, et contrainte-déformation réelles. La striction commence au point M sur la courbe nominale, lequel correspond au point (M') sur la courbe réelle. La courbe contrainte-déformation réelles (corrigée) tient compte de l'état de contrainte complexe dans la zone de striction

Simultanément à la formation d'une striction apparaît un état de contrainte complexe dans la région de l'étranglement (c'est-à-dire l'existence d'autres composantes de contrainte en plus de la contrainte axiale). Par conséquent, la contrainte axiale correcte dans la zone de striction est légèrement inférieure à celle calculée d'après la charge appliquée et l'aire de la section transversale à cet endroit. Cela donne la courbe « corrigée » de figure 2-14. Pour quelques métaux et alliages, on peut estimer la région de la courbe contrainte-déformation réelles comprise entre l'apparition de la déformation plastique et le point où débute la striction, à l'aide de l'équation suivante:

$$\sigma_r = K \varepsilon_r^n$$

Eq 2-21

Dans laquelle (K) et (n) sont des constantes, soit des valeurs qui varient d'un alliage à l'autre et qui dépendent aussi de l'état du matériau (c'est-à-dire s'il a été déformé plastiquement, s'il a été traité thermiquement, etc.). Le paramètre (n) est souvent appelé *coefficient d'écrouissage* et est inférieur à 1. Le tableau 2-3 donne les valeurs de (K) et (n) pour quelques alliages.

Chapitre 2 : Propriétés mécaniques

Tableau 2-3 : Valeurs de (n) et de (k) (équation 6.19) pour quelques alliages

<i>Matériau</i>	<i>n</i>	<i>K(MPa)</i>
Acier doux (recuit)	0,26	530
Acier allié (type 4340, recuit)	0,15	640
Acier inoxydable (type 304, recuit)	0,45	1275
Alliage d'aluminium (type 2024, traité thermiquement)	0,16	690
Aluminium (recuit)	0,20	180
Cuivre (recuit)	0,54	315
Laiton (70 Cu—30 Zn, recuit)	0,49	895