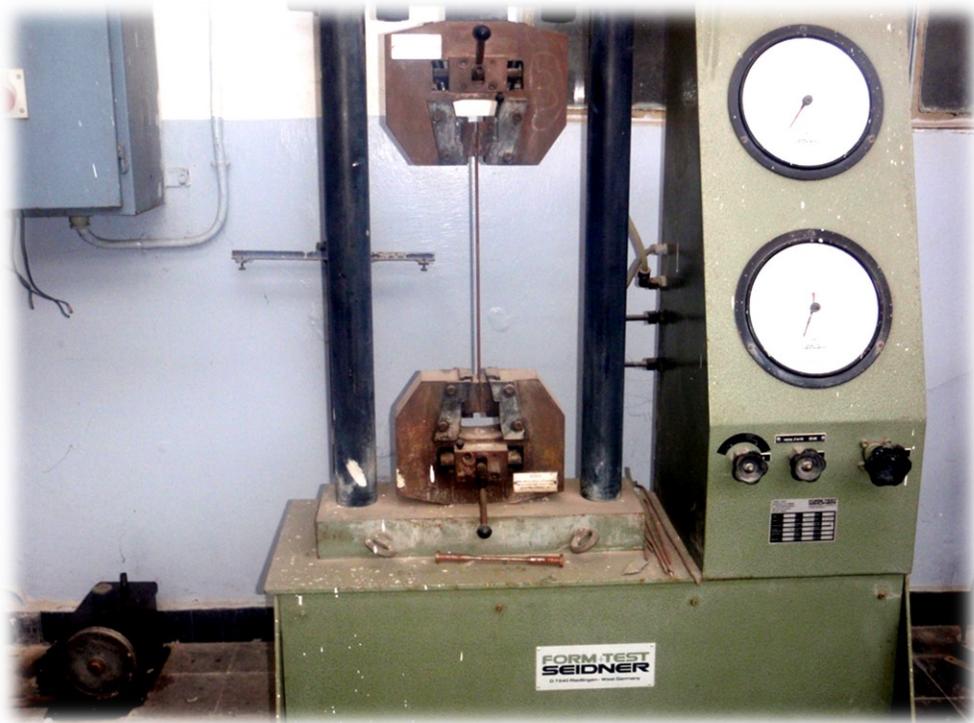




**TP 11 : ESSAI DE TRACTION SUR EPROUVETTE EN ACIER**



- Module d'Young**
- Limite proportionnelle d'élasticité  $R_{e,1}$**
- Limite conventionnelle d'élasticité  $R_{e,2}$**
- Résistance à la traction  $R_M$  (résistance à la rupture conventionnelle)**
- Energie élastique  $W$  emmagasinée par une éprouvette dans le domaine élastique (résilience)**
- Energie absorbée par une éprouvette avant la rupture (ténacité)**
- Ductilité exprimée en pourcentage d'allongement**
- Ductilité exprimée en pourcentage de striction**
- Contrainte réelle à la rupture**
- Mesure de la résistance moyenne**
- Mesure de l'écart type**

# ESSAI DE TRACTION SUR EPROUVETTE EN ACIER

## 1. Généralités

La caractérisation des aciers est principalement étudiée par l'essai de traction directe, l'essai de compression étant difficile à réaliser.

L'essai de traction est normalisé sur un matériau homogène et isotrope (Fig.1.a). L'éprouvette est cylindrique afin de faciliter l'interprétation de la striction. Les têtes sont en *os de chien* pour éviter le glissement de l'éprouvette dans les mors. Le rapport entre diamètre et longueur permet l'établissement d'un champ de contraintes uniforme dans la zone de travail. Le rayon de raccordement permet d'éviter la localisation de la rupture dans les mors.

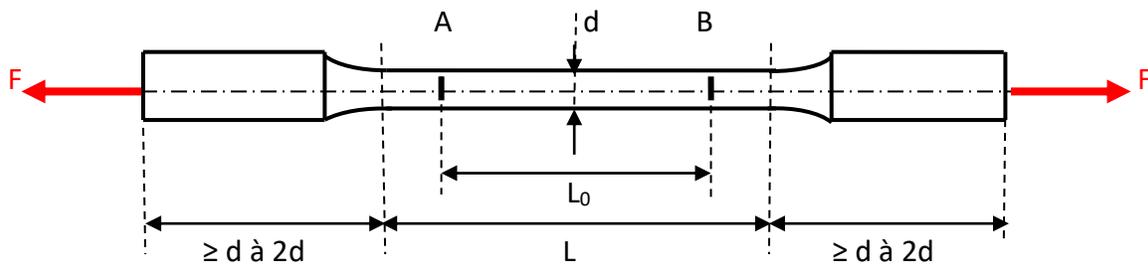


Figure 1.a : Eprouvette d'essai

Où,

$S_0$  : section initiale de l'éprouvette

$L_0$  : longueur initiale =  $5 \times d$

$L$  : longueur de la partie calibrée =  $(L_0 + d/2)$  à  $(L_0 + 2d)$

$d$  : diamètre initial de l'éprouvette

### 1.1. Diagramme de traction de l'acier doux

La courbe contrainte-allongement d'un acier doux est représentée ci-dessous (Fig.2.a).

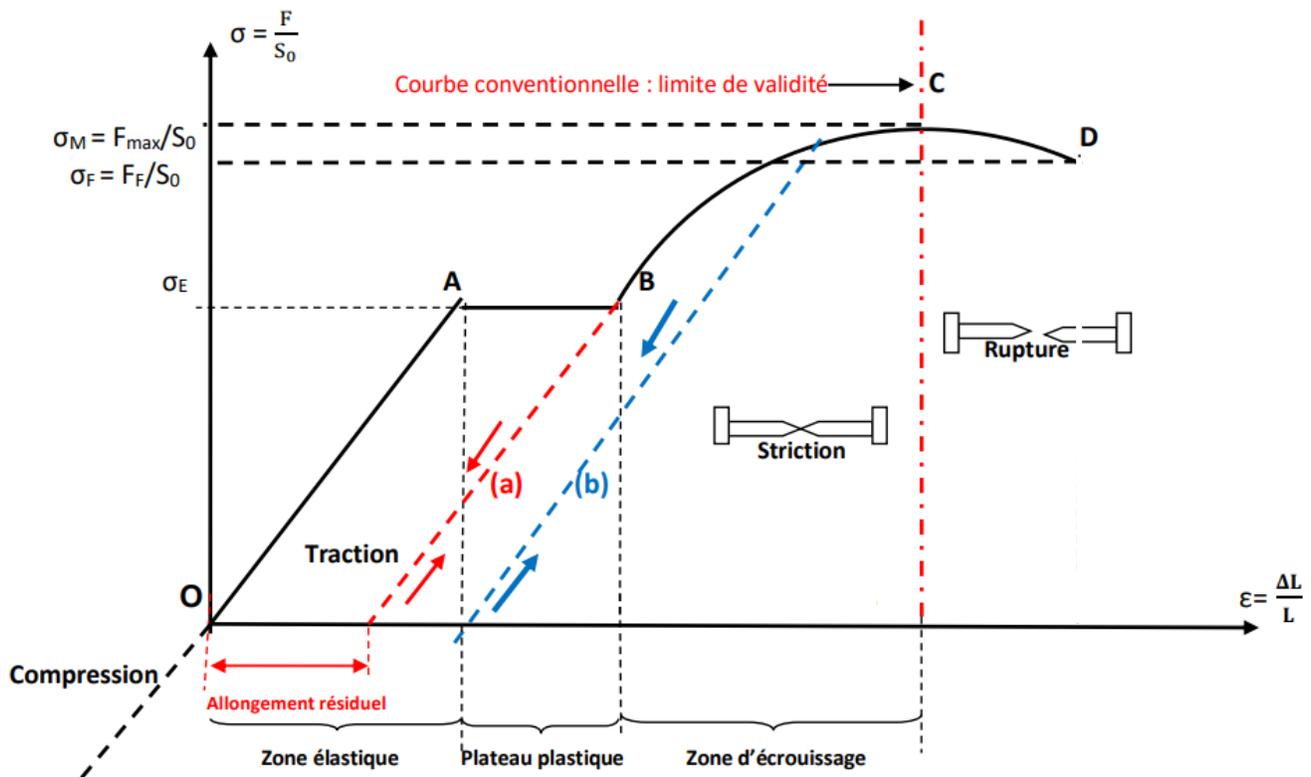


Figure 2.a : Courbe de traction  $\sigma = f(\epsilon)$

Ce diagramme fait apparaître plusieurs phases de comportements bien distinctes, à savoir :

- **Domaine OA : phase élastique**

La courbe est sensiblement rectiligne. Cela signifie que les allongements dans ce domaine sont proportionnels aux forces : *c'est la phase élastique linéaire*. Autrement dit, les déformations sont réversibles et proportionnelles à la sollicitation. L'expression de la résistance en fonction de l'allongement (loi de Hooke) s'écrit comme suit :

$$\sigma = E \frac{\Delta L}{L}$$

Où,

$\sigma$  : résistance moyenne dans la partie médiane de l'éprouvette

$E$  : module d'élasticité longitudinale ou module d'Young (il a les dimensions d'une résistance)

Le point A indique la fin de la zone élastique de la courbe. La contrainte  $\sigma_E$  ( $\sigma_E = \frac{F_E}{S_0}$ ) correspondante est appelée *limite d'élasticité*. Le module d'Young avoisine 210 GPa.

Dans ce domaine, si on relève les dimensions transversales de l'éprouvette, on constate que celles-ci se rétractent proportionnellement à la résistance. Dans le cas d'une section circulaire, de rayon  $r$ , on obtient la relation suivante :

$$u = \frac{\Delta r/r}{\Delta L/L}$$

$u$  est le coefficient de Poisson, il varie entre 0,20 et 0,30 pour les aciers.

- **Domaine AB : phase plastique**

Au-delà du point A (limite de proportionnalité), *c'est la phase plastique* où des déformations irréversibles apparaissent. Cela veut dire, qu'après déchargement (branche a), l'éprouvette garde une longueur supérieure à la longueur initiale. Cette déformation résiduelle est appelée *déformation rémanente*. Entre A et B, l'éprouvette s'allonge à un effort de traction sensiblement constant : *c'est la zone d'étirement ou d'écoulement de l'acier*, qu'on appelle aussi *palier de ductilité*.

- **Domaine BC : zone de raffermissement ou d'écrouissage**

Après le point B, commence la zone des grandes déformations. Si l'on décharge l'éprouvette, puis l'on sollicite à nouveau, celle-ci se comporte comme si sa limite élastique était égale au niveau maximal de contrainte atteinte avant déchargement (branche b). C'est ce phénomène que l'on appelle *écrouissage*. Il peut être utilisé pour augmenter la limite élastique des aciers. De plus, pour une même augmentation de l'allongement relatif  $\epsilon$  que dans la zone élastique, l'accroissement de la charge  $y$  est plusieurs centaines de fois plus lent : *c'est la phase de striction* qui précède la rupture de l'éprouvette. Celle-ci apparaît lorsque l'écrouissage ne compense plus l'augmentation de la contrainte causée par la diminution de la section. Ce phénomène instable se localise dans une section qui diminue alors fortement, et où survient la rupture (Fig.3.a).



Figure 3.a : Rupture juste après le phénomène de striction

**Remarque**

La limite élastique des aciers présentant un palier de ductilité (Fig.2.a) est facile à déterminer. Pour les aciers ne présentant pas ce palier, on définit une limite conventionnelle correspondant à un allongement égal à 0,2%.

## 1.2. Caractéristiques fondamentales des aciers pour béton armé

### 1.2.1. Module d'Young

La valeur du module d'Young est égale à la pente de la courbe *contrainte-déformation* dans sa partie linéaire. Soit :

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{S_0} \times \frac{L_0}{\Delta L}$$

Où,

$S_0$  : section initiale

$L_0$  : longueur initiale de l'éprouvette

Ce module prend une valeur caractéristique pour chaque matériau.

### Remarque

Pour certains types de matériaux, le segment initial de la *contrainte-déformation* n'est pas linéaire, et l'on ne peut pas alors déterminer le module d'élasticité comme précédemment (Fig.4.a). Dans ce cas, on utilise généralement le *module sécant* ou le *module tangent*, qui sont :

- Module sécant : c'est la pente d'une sécante tracée à l'origine en un point donné du diagramme  $\sigma - \epsilon$ .
- Module tangent : c'est la pente du diagramme pour une valeur donnée de la contrainte.

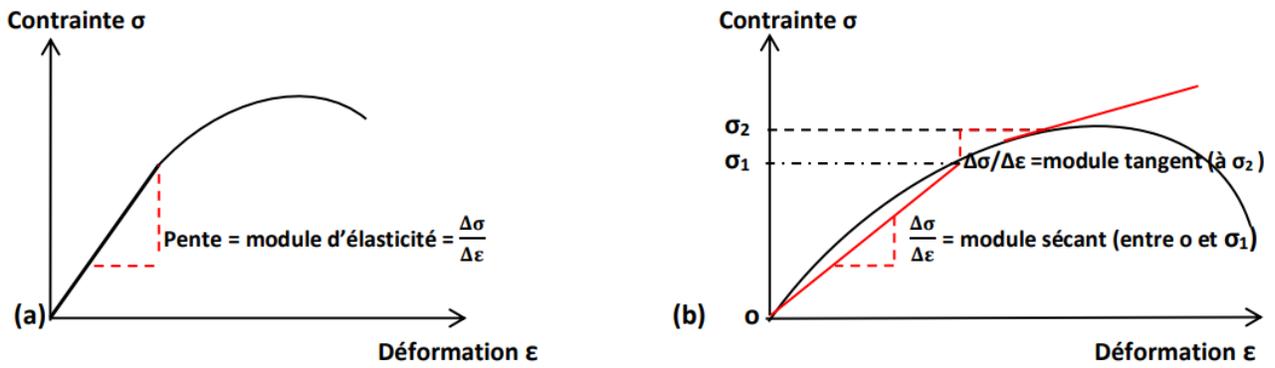


Figure 4.a : Courbes contrainte - déformation pour deux types d'acier

### 1.2.2. Limite proportionnelle d'élasticité $R_{e,1}$

La limite proportionnelle d'élasticité (transition entre le domaine de déformation élastique et le domaine de déformation plastique)  $\sigma_E$  est égale à :

$$\sigma_E = \frac{F_E}{S_0} = R_{e,1}$$

### 1.2.3. Limite conventionnelle d'élasticité $R_{e,2}$

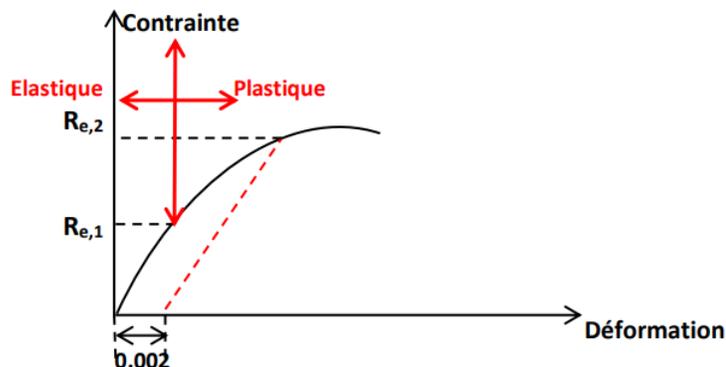


Figure 5.a : Détermination de la limite conventionnelle d'élasticité

La limite conventionnelle d'élasticité\* est déterminée par la méthode de la parallèle décalée à 0,002 (Fig.5.a).

### (\*) Remarque

L'écoulement commence au point où la courbe contrainte-déformation cesse d'être linéaire, point que l'on appelle parfois *limite de proportionnalité*. Cependant, comme ce point ne peut pas être déterminé avec précision, on trace une droite parallèle à la partie élastique de la courbe avec un décalage pris égal à 0,002. La contrainte correspondant à l'intersection de cette parallèle avec la courbe est appelée *limite conventionnelle d'élasticité*  $R_{e,2}$ . Pour l'acier, cette limite correspond à sa résistance de déformation plastique.

#### 1.2.4. Résistance à la traction ou contrainte conventionnelle à la rupture $R_M$ ( $\sigma_M$ )

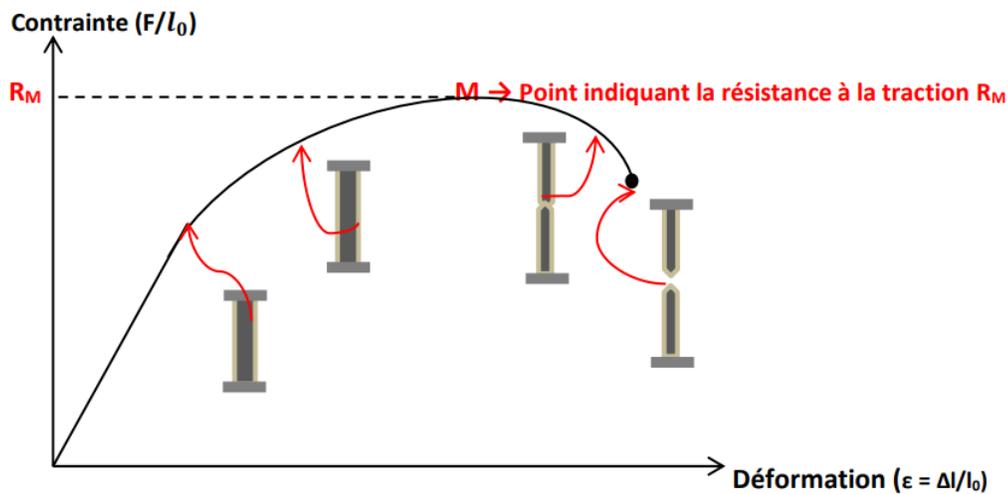


Figure 6.a : Détermination de la contrainte conventionnelle à la rupture  $R_M$

Par définition, la contrainte conventionnelle à la rupture  $R_M$  est égale à la charge maximale  $F_{max}$  divisée par l'aire de la section  $S_0$ . Soit :

$$R_M = \sigma_M = \frac{F_{max}}{S_0}$$

#### 1.2.5. Mesure de la contrainte réelle $\sigma_R$ à la rupture

Au-delà du point M (Fig.6.a), on remarque que la déformation s'accompagne d'une diminution de la contrainte. Ceci semble donc indiquer que l'éprouvette testée s'affaiblit. En réalité, sa résistance augmente. On peut expliquer cette augmentation par le fait que l'aire de la section transversale diminue rapidement dans la zone de striction où se produit la déformation. Cette diminution réduit donc la capacité de l'éprouvette à supporter une charge.

Généralement, pour le calcul de la contrainte à la rupture  $\sigma_R$ , on utilise l'équation  $\sigma = \frac{F}{S_0}$  qui ne tient pas compte de la réduction de la section dans la zone de striction. Il est parfois nécessaire de prendre en considération la contrainte réelle  $\sigma_R$  avec la déformation correspondante.

Par définition, la contrainte réelle  $\sigma_R$  est égale à la charge F divisée par l'aire instantanée de la section  $S_i$  au-dessus de laquelle la déformation a lieu, c'est-à-dire dans la zone de striction au-delà du point M. Soit :

$$\sigma_R = \frac{F}{S_i} = \frac{F}{S_f}$$

Où,

$S_i$  : aire de la section transversale à la rupture =  $S_f$

### 1.2.6. Evaluation de la ductilité

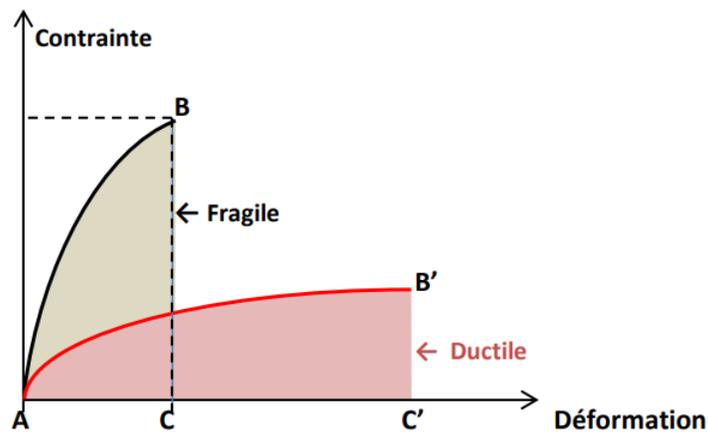


Figure 7.a : Différence entre matériaux ductiles et fragiles

La ductilité est une propriété mécanique importante. Elle permet d'indiquer le niveau de déformation plastique à la rupture (Fig.7.a). Un matériau ayant subi une très faible déformation plastique à la rupture (ou pas du tout) est dit *fragile*.

La ductilité peut s'exprimer quantitativement de deux manières :

- Par un pourcentage d'allongement après la rupture.
- Par un coefficient de striction exprimé en %.

Le pourcentage d'allongement A de la déformation plastique à la rupture est :

$$A (\%) = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 \rightarrow \begin{cases} l_f : \text{distance entre repères à la rupture} \\ l_0 : \text{distance initiale entre les repères} \end{cases}$$

Par définition, le coefficient de striction est donné par l'expression suivante :

$$Z (\%) = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \times 100 \rightarrow \begin{cases} S_0 : \text{aire initiale de la section transversale} \\ S_f : \text{aire de la section à la rupture} \end{cases}$$

### 1.2.7. Mesure de la résilience

La résilience est la capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie quand il se déforme élastiquement et à libérer cette énergie lorsque la charge est supprimée. Autrement dit, la résilience représente la capacité d'absorption d'énergie élastique  $W$  par unité de volume pour soumettre un matériau à une contrainte allant de 0 à la limite conventionnelle d'élasticité  $R_{e,2}$  (limite déterminée par la méthode de la parallèle décalée).

Mathématiquement, pour une éprouvette soumise à la traction, la résilience correspond à l'aire sous la courbe contrainte-déformation jusqu'à la limite conventionnelle d'élasticité (Fig.8.a), soit :

$$W = \int_0^{\epsilon_y} \frac{1}{2} d\epsilon$$

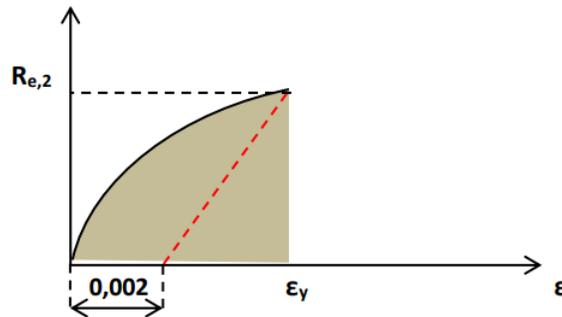


Figure 8.a : Mesure de la résilience

En considérant la région élastique linéaire, on obtient :

$$W = \frac{1}{2} \epsilon_y R_{e,2}$$

Où,

$\epsilon_y$  : déformation correspondant à la limite conventionnelle d'élasticité  $R_{e,2}$

L'unité utilisée pour exprimer la capacité d'absorption d'énergie élastique par unité de volume est le joule par mètre cube ( $J/m^3$  ou Pa).

En appliquant la loi de Hooke ( $\sigma = E \epsilon$ ), il vient :

$$W = \frac{1}{2} \epsilon_y R_{e,2} = W = \frac{1}{2} \left[ \frac{R_{e,2}}{E} \right] R_{e,2} = \frac{R_{e,2}^2}{2E}$$

$$W = \frac{R_{e,2}^2}{2E}$$

À partir de cette expression, on remarque que les matériaux résiliants sont ceux qui ont une grande limite conventionnelle et un faible module d'élasticité (matériaux utilisés pour confectionner des ressorts).

### 1.2.8. Evaluation de la ténacité

La ténacité désigne la capacité d'un matériau à absorber de l'énergie avant sa rupture. Dans le cas d'un chargement statique (faible vitesse de déformation), la ténacité est mesurée à l'aide des résultats d'un essai de traction : c'est l'aire sous la courbe contrainte-déformation jusqu'à la rupture (Fig.7.a). Les unités de la ténacité sont les mêmes que celles de la résilience.

*Un matériau est tenace s'il est résistant et ductile.* Les matériaux ductiles sont souvent plus tenaces que les matériaux fragiles. Ce phénomène apparaît clairement sur la Figure 7.a (aires ABC et AB'C').

### 1.2.9. Détermination de la résistance moyenne à la traction

L'étudiant doit savoir que la dispersion des résultats d'essais est inévitable. Aussi, il doit en tenir compte d'une manière appropriée. Il doit donc traiter les données selon les règles de statistiques et de probabilité.

À titre d'exemple, l'étudiant au lieu de se poser la question : *Quelle est la résistance à la rupture de cette éprouvette ?* Il devrait plutôt s'habituer à se demander : *Quelle est la résistance probable de rupture de cette éprouvette dans de telles conditions ?*

Aussi, compte tenu de la variabilité des propriétés des métaux, il est souhaitable de définir une *valeur typique*. Cette valeur est le plus souvent la moyenne des données. Elle est obtenue en divisant la somme de toutes les mesures par le nombre de mesures réalisées.

L'expression mathématique de la moyenne  $\bar{x}$  d'un paramètre  $x$  est :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Où,

$n$  : nombre de mesures ou d'observations

$x_i$  : valeur d'une mesure

### 1.2.10. Quantification de la dispersion (ou la variabilité) des données

La mesure la plus courante pour quantifier la variabilité des résultats d'essais est l'écart type  $s$ . Il est défini par l'expression suivante :

$$s = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \right]^{1/2}$$

Un grand écart type correspond à une grande dispersion

## 1.3. Critères de plasticité

### 1.3.1. Seuil de plasticité pour un matériau écrouissable

La figure ci-dessous représente le diagramme contrainte-déformation ( $\sigma - \epsilon$ ) relevé lors d'un essai de traction simple sur une éprouvette en acier écrouissable.

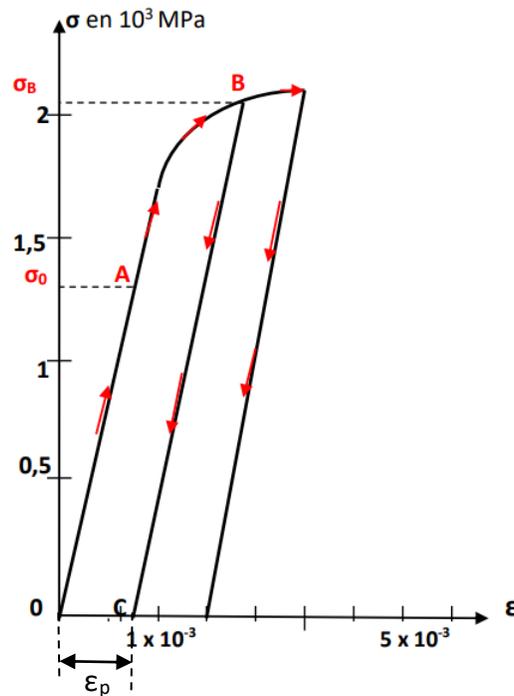


Figure 9.a : Essai de traction simple sur un matériau écrouissable

L'essai est effectué à vitesse de déformation fixée  $v$ . La figure ci-dessus montre l'existence d'un seuil correspondant à une contrainte  $\sigma_0$ . À partir de ce seuil, le comportement du matériau devient *irréversible*.

Après avoir chargé l'éprouvette au-delà de A jusqu'en B, on effectue un déchargement. Ce dernier suit sur le diagramme le tracé BC, et non le circuit BAO.

D'autre part, on constate qu'après déchargement total, il reste une déformation de l'éprouvette  $\epsilon_p$  représentée par le segment OC sur la figure : c'est la *déformation permanente*.

Par la suite, on réalise un nouveau chargement : tant que la contrainte demeure inférieure à  $\sigma_B$  celui-ci se s'effectue suivant le chemin CB identique au parcours précédent, c'est-à-dire celui décrit lors du déchargement : le comportement demeure réversible tout au long de CB.

Lorsque  $\sigma$  dépasse  $\sigma_B$ , le point figuratif suit la courbe du premier chargement au-delà de B, c'est-à-dire, la courbe représentant la traction sans déchargement. Aussi, lors du nouveau chargement réalisé à partir de C,  $\sigma_B$  apparaît comme le nouveau seuil en traction.

Ici,  $\sigma_0$  est appelé *seuil de plasticité initial* ou *limite d'élasticité initiale*, et  $\sigma_B$  correspond au *seuil de plasticité actuel* ou *limite d'élasticité actuelle*.

Le phénomène observé durant l'essai précédent (Fig.9.a) correspond au cas d'un matériau dit *écrouissable*, où  $\sigma_B$  est le seuil de plasticité ( $\sigma_B$  fonction de  $\epsilon_p$ ),.

### 1.3.2. Seuil de plasticité pour un matériau doux

La figure qui suit représente le diagramme contrainte-déformation ( $\sigma - \epsilon$ ) d'une éprouvette d'acier doux soumise à la traction simple. On remarque que cet acier présente un palier pour des déformations allant de  $10^{-3}$  à  $10^{-2}$  (ordre de grandeur). Ce type de comportement peut être modélisé par le diagramme ci-dessous [Fig.10.a(b)]. Celle-ci montre un palier plastique illimité : on dit que le matériau correspondant est *élastique-parfaitement plastique*. Pour ce type de matériau, la contrainte ne peut pas dépasser la valeur de  $\sigma_0$ , et si elle atteint la valeur  $\sigma_0$ , il y a possibilité d'allongement illimité.

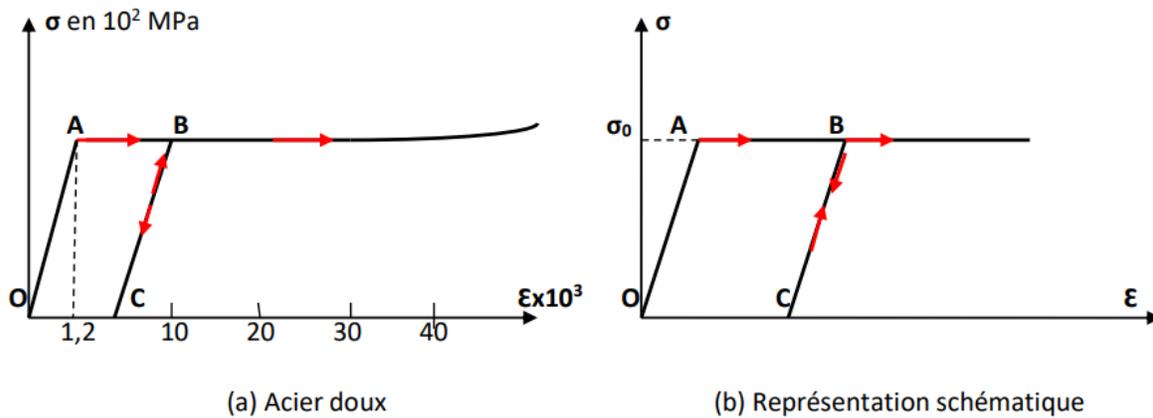


Figure 10.a : Essai de traction simple sur un matériau élastique parfaitement plastique

### 1.3.3. Effet Bauschinger

Dans le cas d'un matériau écrouissable, si après déchargement de l'éprouvette suivant BC (Fig.9.a), on la sollicite à nouveau mais en compression. On remarque que le seuil de plasticité en compression, initialement égal à  $-\sigma_0$ , passe à la valeur  $\sigma_B$ , supérieure (algébriquement) à  $-\sigma_0$ .

On peut donc en conclure que l'écrouissage en traction s'accompagne d'une hausse du seuil de plasticité, tandis qu'en compression, il correspond à une diminution du seuil de plasticité (Fig.11.a). Ce phénomène est connu sous le nom *d'effet Bauschinger*.

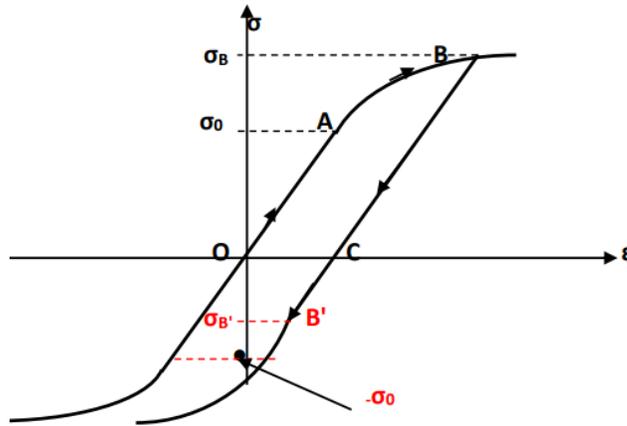


Figure 11.a : Essai de traction - compression : Effet Bauschinger

Par ailleurs, si on effectue sur une éprouvette en acier doux un premier chargement en traction jusqu'à obtenir une déformation plastique sous une contrainte constante égale à  $\sigma_0$ , on constate, après déchargement de la traction et chargement en compression, que le seuil de plasticité en compression est ramené à une valeur  $\sigma_{B'}$  légèrement supérieure à  $-\sigma_0$  (algébriquement). Et, si on poursuit le chargement avec une déformation plastique en compression, la contrainte rejoint rapidement un palier à la valeur  $-\sigma_0$  [Fig.12.a(a)].

Ce phénomène n'est pas pris en considération dans la modélisation d'un matériau élastique parfaitement plastique qui suppose que les valeurs des seuils de plasticité en traction et en compression sont constantes [Fig.12.a(b)].

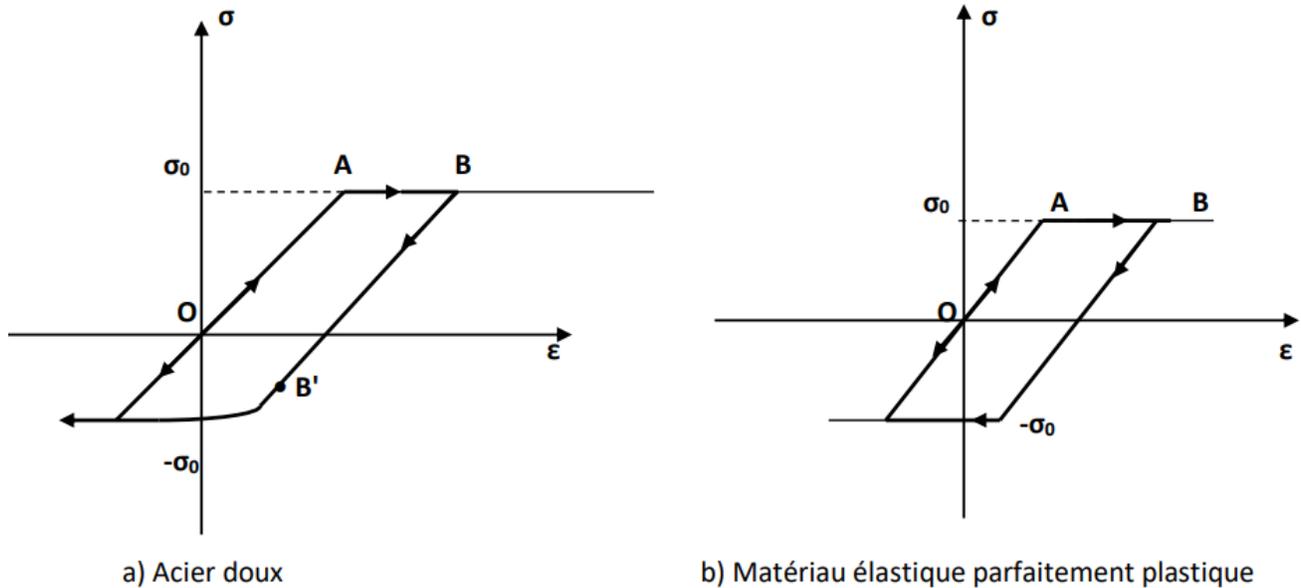


Figure 12.a : Essais de traction-compression

## 2. Manipulation

### 2.1. But de l'essai

Il s'agit d'analyser le comportement des aciers pour béton armé et de leurs caractéristiques mécaniques. Pour cela, on considère deux types d'acier : un acier doux et un acier écroui.

### 2.2. Mode opératoire

Pour ces essais, il faut :

- Préparer le corps d'éprouve (Fig.13.a).
- Placer les extensomètres mécaniques ou les jauges pour le relevé des déformations longitudinales et transversales.
- Conduire l'essai en procédant par palier de chargement pour permettre le relevé des différentes grandeurs.

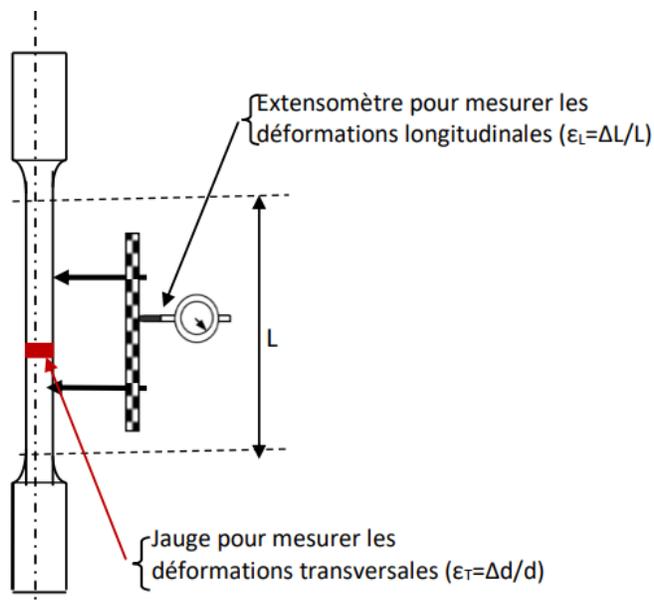


Figure 13.a: Préparation d'une éprouvette pour essai de traction

### 2.3. Exploitation des résultats

Pour chaque type d'acier, il faut :

- Tracer les diagrammes  $\sigma = f(\epsilon)$  sur des feuilles millimétrées.
- Déterminer les caractéristiques mécaniques (limite élastique, résistance à la rupture, etc.).

#### Remarque

Le principe de fonctionnement des jauges ohmiques est présenté plus loin (Annexe A).

## 2.4. Exploitation des résultats

Pour les deux types d'acier :

- Indiquer sur les courbes obtenues le domaine élastique, le domaine plastique, le palier de ductilité et le début du phénomène de striction.
- Comparer le diagramme expérimental au diagramme réglementaire.
- Comparer les résultats obtenus pour les deux types de barre et expliquer leur utilité dans le domaine de la construction parasismique.

## 2.5. Application : Détermination des caractéristiques mécaniques d'une éprouvette en acier à partir des diagrammes obtenus

### 2.5.1. Résultats obtenus

L'essai de traction sur une éprouvette en acier a donné le diagramme contrainte-déformation suivant :

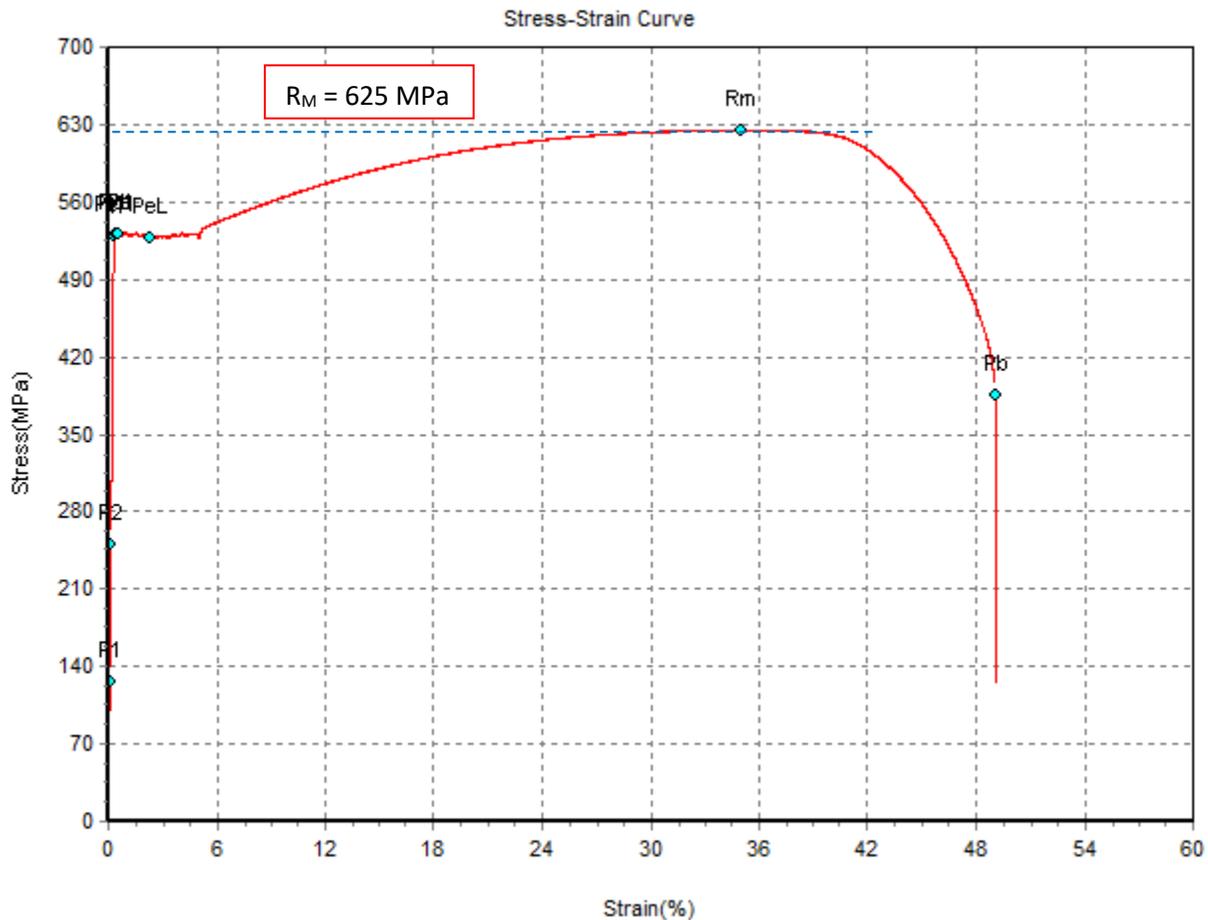


Figure 14.a : Courbe contrainte - déformation de l'éprouvette en acier

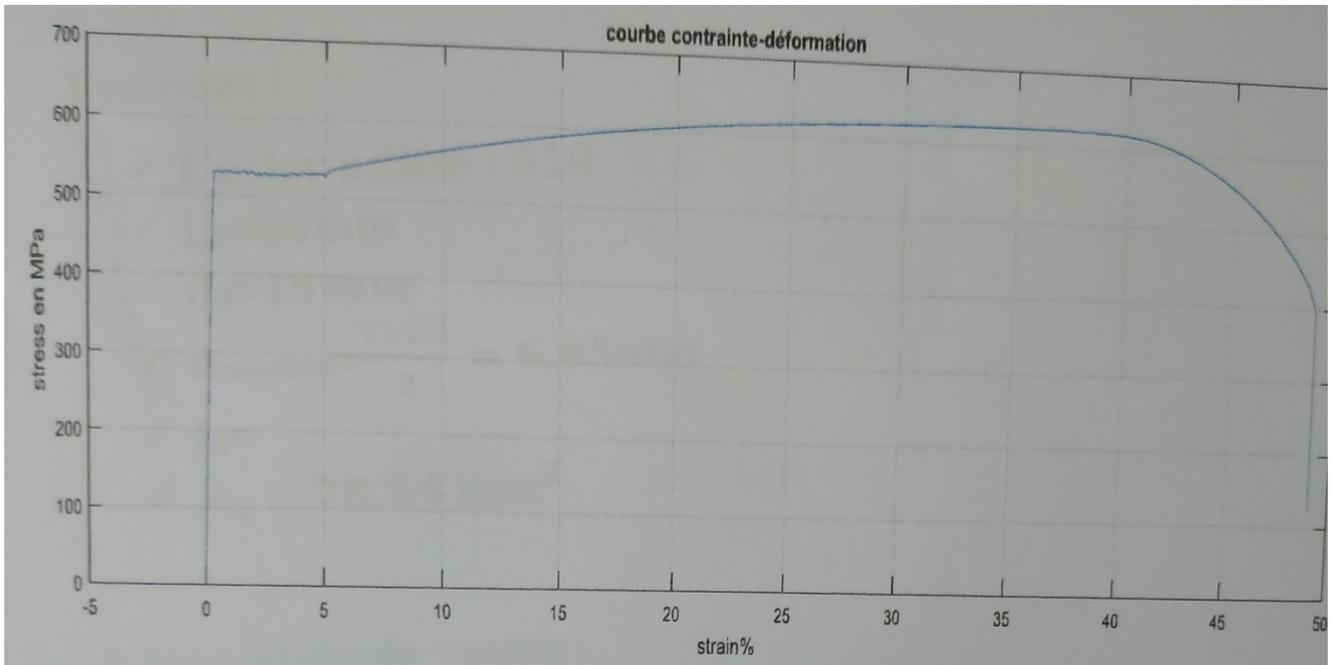


Figure 15.a : Courbe contrainte - déformation agrandie

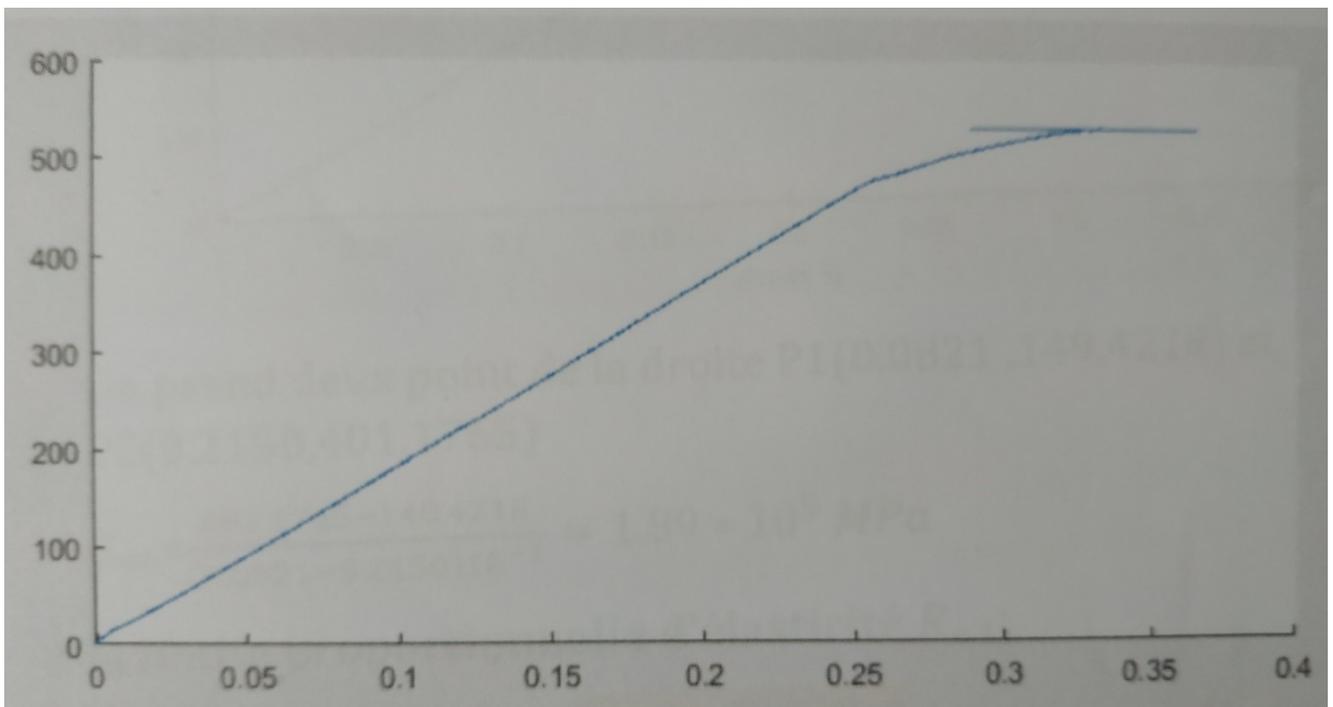


Figure 16.a : Vue agrandie de la zone élastique

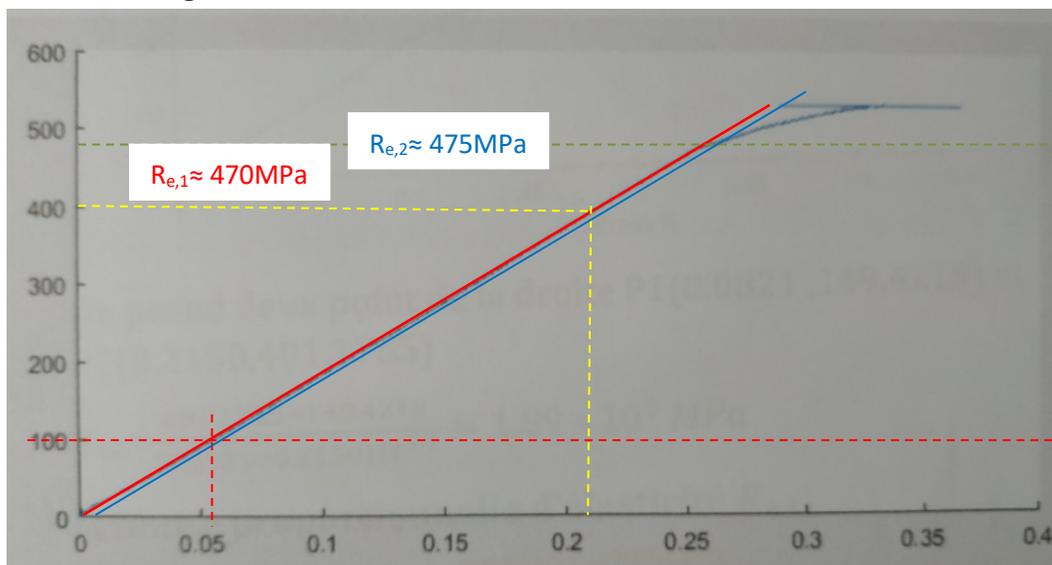
À partir des courbes ci-dessus, déterminez :

- 1) Le module d'Young (en GPa) sachant que les dimensions initiales de l'éprouvette sont :
  - $l_0 = 100 \text{ mm}$
  - $d_0 = 12 \text{ mm}$
  
- 2) La limite proportionnelle d'élasticité  $R_{e,1}$  (en MPa).

- 3) La limite conventionnelle d'élasticité  $R_{e,2}$  (en MPa).
- 4) La résistance à la traction  $R_M$  en MPa (résistance à la rupture conventionnelle).
- 5) La charge maximale que peut supporter l'éprouvette de diamètre initial 12 mm.
- 6) La variation de la longueur de l'éprouvette lorsqu'elle est soumise à une contrainte de 400 MPa.
- 7) L'énergie élastique  $W$  emmagasinée (joule/m<sup>3</sup> ou Pa).
- 8) Sachant que le diamètre à la rupture est 10 mm, calculez :
  - La ductilité exprimée en pourcentage de striction
  - La contrainte réelle à la rupture

### 2.5.2. Interprétation des résultats

#### 1) Module d'Young



Le module d'Young représente la pente du tronçon élastique linéaire de la courbe d'essai de traction. Mathématiquement, il représente la variation de la contrainte divisée par la variation correspondante de la déformation :

$$E = \text{pente} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Etant donné que le segment linéaire passe par l'origine, il est donc pratique de retenir les coordonnées de ce point ( $\sigma_1$  et  $\varepsilon_1$  nuls) et choisir une valeur de  $\sigma_2$ . Si  $\sigma_2 = 100 \text{ MPa}$ ,  $\varepsilon_2$  vaut à peu près 0,05 %. Aussi :

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{100 - 0}{(0,051 - 0) \cdot 10^{-2}} = 196078,43 \text{ MPa} \approx 1,96 \times 10^5 \text{ MPa}$$

$$E = 1,96 \times 10^5 \text{ MPa}$$

## 2) Limite proportionnelle d'élasticité $R_{e,1}$

Elle correspond à la limite du tronçon linéaire élastique. Soit :

$$R_{e,1} \approx 470 \text{ MPa}$$

## 3) Limite conventionnelle d'élasticité $R_{e,2}$

Elle est obtenue en traçant la parallèle décalée de 0,002. Celle-ci coupe la courbe de traction à environ 475 MPa.

$$R_{e,2} \approx 475 \text{ MPa}$$

## 4) Résistance à la traction $R_M$ (résistance à la rupture conventionnelle)

La résistance à la traction est donnée par la courbe contrainte - déformation. Elle avoisine :

$$R_M \approx 625 \text{ MPa}$$

## 5) Charge maximale admissible

La charge maximale admissible que peut supporter l'éprouvette est donnée par la formule suivante :

$$F_{\max} = \sigma \times S_0 = \sigma \times \left(\frac{D_0}{2}\right)^2 \pi = (625 \times 10^6) \left(\frac{12 \times 10^{-3}}{2}\right)^2 \times \pi = 70\,650 \text{ N}$$

$$F_{\max} \approx 70\,650 \text{ N}$$

## 6) Variation de la longueur de l'éprouvette $\Delta_L$

Pour évaluer l'allongement  $\Delta_L$  subi par l'éprouvette, il faut d'abord déterminer la déformation produite par une contrainte de 400 MPa. Cela consiste donc à localiser cette contrainte sur la courbe de traction et lire la déformation correspondante sur l'axe des déformations. On peut lire :

$$\varepsilon \approx 0,0021 \text{ pour une contrainte de } 400 \text{ MPa}$$

Et, comme  $l_0 = 100 \text{ mm}$ , on obtient :

$$\Delta_L = \varepsilon \times l_0 = 0,0021 \times 100 = 0,21 \text{ mm}$$

$$\Delta_L = 0,21 \text{ mm}$$

## 7) Energie élastique emmagasinée $W$

L'énergie élastique emmagasinée est donnée par l'expression :

$$W_{el} = \frac{R_{e,2}^2}{2E} = \frac{475^2}{2 \times 1,96 \times 10^5} = 0,5755 \text{ MPa}$$

$$W_{el} \approx 0,576 \text{ MPa}$$

## 8) Ductilité exprimée en pourcentage de striction

L'expression du coefficient de striction est :

$$Z (\%) = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \times 100 = \frac{(12/2)^2 - (10/2)^2}{(12/2)^2} \times 100 = 30,56\%$$

$$Z (\%) = 30,56\%$$