

## **Rupture ductile : Caractérisation expérimentale des propriétés de rupture de l'acier X100**

Maryse Gille, Thilo Morgeneyer

### Objectifs:

- *Caractériser les propriétés de traction d'un matériau ductile*
- *Evaluer les effet de la présence d'entailles sur les propriétés de rupture*
- *Caractériser les propriétés de propagation de fissure d'un matériau ductile*

Pour atteindre ces objectifs, des essais mécaniques seront réalisés et une première analyse des résultats sera effectuée. Ces essais seront utilisés tout au long de l'école lors des différents travaux pratiques numériques afin de poursuivre leur analyse et d'effectuer les simulations numériques correspondantes. **A la fin de la séance, il est demandé au groupe de faire une présentation qui détaillera les points suivants :**

- **Matériau de l'étude :** Composition, microstructure, applications, propriétés mécaniques ;
- **Essais mécaniques :** Géométries, conditions d'essais, grandeurs mesurées, résultats ;
- **Analyse des résultats :** Définition et évaluation des grandeurs d'intérêt, incertitudes, biais expérimentaux.

Les données expérimentales seront rassemblées dans un fichier excel afin d'être utilisées pour les travaux pratiques numériques.

## **1 Matériau**

Le matériau utilisé est de l'acier X100 (Fig. 1a). Il a un comportement mécanique de type élasto-plastique à température ambiante. Son nom indique la résistance mécanique en unités impériales : 100 kPsi (Pound-force/square inch). Les directions d'élaboration

du matériau sont données dans la figure (Fig. 1b). La composition chimique est donnée dans le tableau 1.

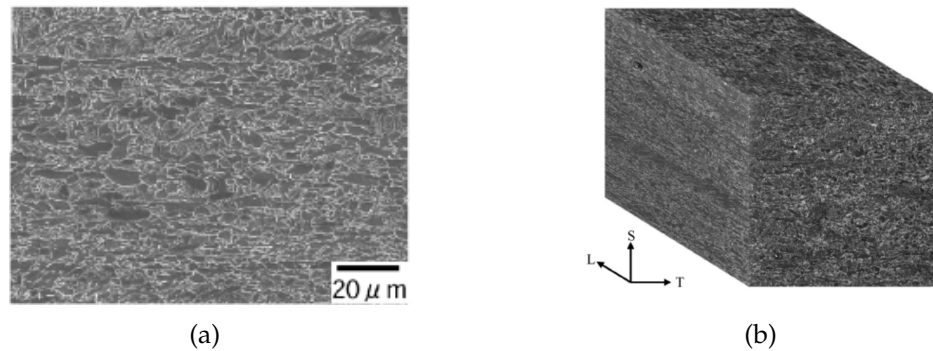


FIGURE 1 – (a) Microstructure du X100 (b) microstructure de l’X100 pseudo 3D avec directions d’élaboration : L, T, S

TABLE 1 – Composition chimique en fraction massique (wt.%) de l’acier X100

	C	Si	Mn	P	S	Ti	N
wt.%	0.51	0.2	1.95	0.007	0.0015	0.012	0.004

## 2 Caractérisation mécanique

Dans ces travaux pratiques, les questions auxquelles nous cherchons à répondre sont les suivantes :

- Quelles sont la limite d’élasticité et la résistance mécanique du matériau ?
- Quel est l’effet d’entaille sur la contrainte ingénieur maximale et la déformation à rupture ?
- Quelle est la résistance à la rupture du matériau ?
- Est-ce que la mécanique linéaire élastique à la rupture peut être appliquée ?
- Quelle est l’évolution de la longueur de fissure avec le chargement ?

Une machine de traction ainsi que des éprouvettes dont les plans sont donnés sur les Fig. 2 et Fig. 3 sont disponibles afin de réaliser des essais mécaniques.

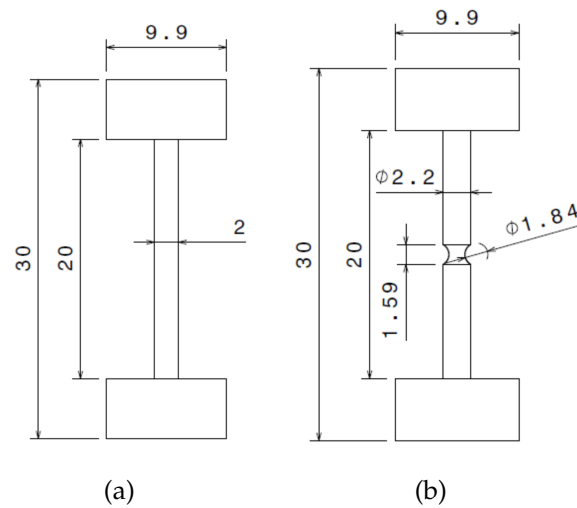


FIGURE 2 – (a) Géométrie de l'éprouvette de traction (b) Géométrie de l'éprouvette de traction entaillée

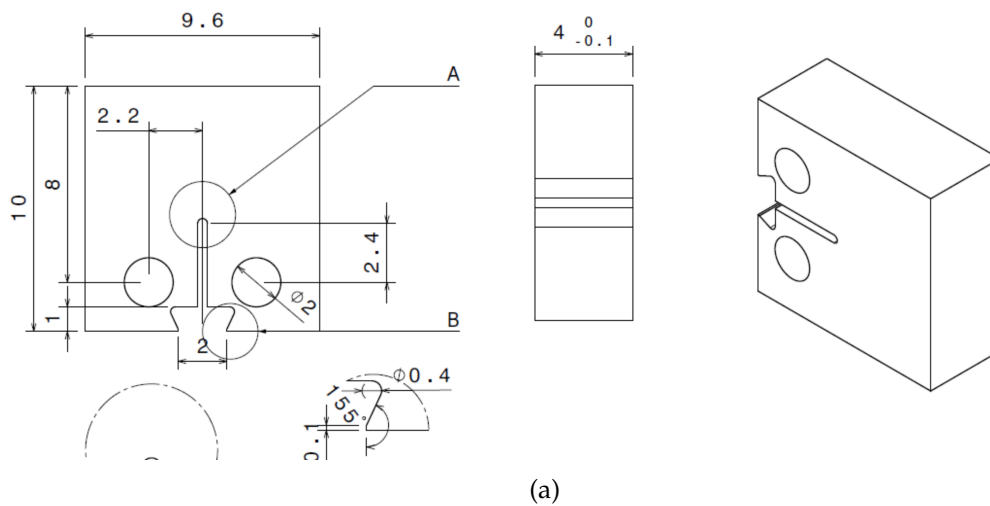


FIGURE 3 – (a) Géométrie de l'éprouvette de ténacité (taille non-standard)

### 3 Analyse des résultats

#### 3.1 Essais de traction et traction entaillée

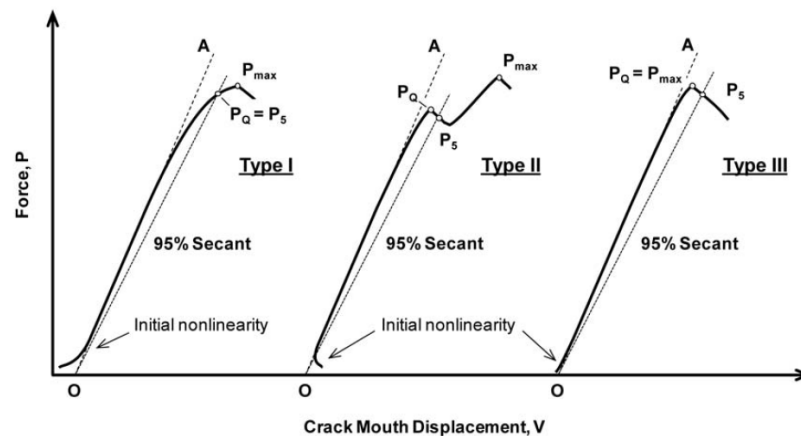
Essais de traction : *tracer la courbe de traction et déterminer la limite d'élasticité, la résistance à rupture et la déformation à rupture pour l'essai de traction.*

Pour l'essai de traction entaillée : *tracer la courbe de traction et cersus la contraction diamétrale.*

#### 3.2 Analyse de l'essai par mécanique linéaire élastique de la rupture

Les essais sur mini-éprouvettes CT peuvent être dépuillées dans un premier temps utilisant l'approche de la mécanique linéaire-élastique de la rupture (Les essais ne sont cependant peut-être pas valides selon la norme E399). Utiliser dans un premier temps la mécanique linéaire de la rupture pour estimer  $K_Q$ .

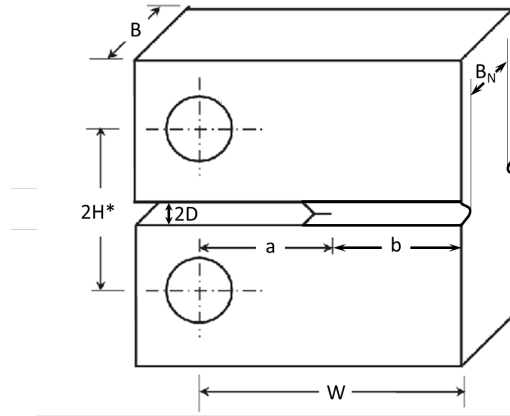
La norme différencie 3 sorte de courbes, voir figure4. Dans notre cas, la courbe type I est pertinente. Déterminer  $K_Q$  avec cette approche ainsi qu'avec les formules données dans figure6.



(a)

FIGURE 4 – détermination de  $K_{IC}$  : courbe force-CMOD charge décharge pour essai de ténacité pour une éprouvette CT

Les dimensions de l'éprouvette sont rappelées dans la figure 5



(a)

FIGURE 5 – dimensions de l'éprouvette CT selon la norme

$$K_Q = \frac{P_Q}{\sqrt{BB_N}\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right)$$

where:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \quad (A4.2)$$

$$\frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right) \left[ 0.886 + 4.64 \frac{a}{W} - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}}$$

for which:

- $P_Q$  = force as determined in 9.1.1, N (lbf),
- $B$  = specimen thickness as determined in 8.2.1, m (in.),
- $B_N$  = specimen thickness between the roots of the side grooves, as determined in 8.2.1, m (in.),
- $W$  = specimen width (depth) as determined in A3.4.1, m (in.), and
- $a$  = crack size as determined in 8.2.3 and A4.4.1, m (in.).

(a)

FIGURE 6

*Cette approche est-elle valide ? Utiliser les formules suivantes (figure 7) et discuter la validité des résultats !*

$$0.45 \leq a/W \leq 0.55$$

$$B, a \geq 2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_{YS}} \right)^2$$

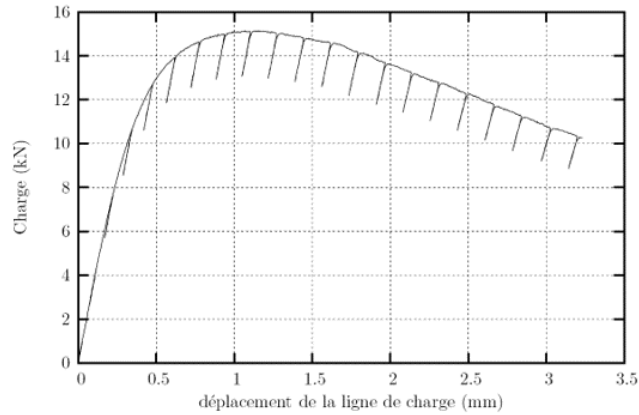
$$P_{\max} \leq 1.10 P_Q$$

(a)

FIGURE 7

### 3.3 Analyse des résultats selon la mécanique non-linéaire de la rupture

Les essais de ténacité avec décharges partielles seront effectués sur mini-éprouvettes CT. Une courbe typique obtenu par ce genre d'essai est montrée dans figure 8



(a)

FIGURE 8 – courbe force-CMOD charge décharge pour essai dJ-da pour une éprouvette CT

Les éléments pour l'analyse en termes de mécanique non-linéaire de la rupture des données pour l'acier X100 sont détaillés dans ce qui suit. Ils permettent de construire une courbe dJ/da.

**Courbe expérimentale utilisée pour le calcul de  $C_i$ ,  $a_i$  and  $J_i$  :**

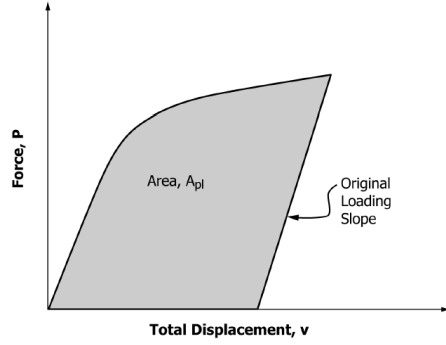


FIGURE 9 – Courbe expérimentale : illustration de l'aire sous la courbe  $A_{pl}$

**Complaisance :** Elle est calculée à partir de la pente de décharge à l'instant  $i$  :

$$C_i = \left( \frac{\Delta v}{\Delta P} \right)_i$$

**Taille de fissure  $a_i$  :** Elle est calculée à partir de la complaisance :

$$\frac{a_i}{W} = 1.000196 - 4.06319u + 11.242u^2 - 106.043u^3 + 464.335u^4 - 650.677u^5$$

avec :

$$u = \frac{1}{[B_e E C_i]^{1/2} + 1}$$

où :

- $B_e = B - (B - B_N)^2/B$  avec  $B_N$  l'épaisseur nominale de l'éprouvette [mm]. Si pas de rainure :  $B_N = B$  et  $B_e = B$
- $E$  : Module d'Young [MPa]
- $W$  : Largeur de l'éprouvette [mm]

**Calcul de l'aire sous la courbe  $A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}$  :** Ce calcul est effectué par la méthode des trapèzes :

$$A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)} = \frac{[P_{(i)} + P_{(i-1)}] [v_{pl(i)} - v_{pl(i-1)}]}{2}$$

avec  $v_{pl(i)} = v_i - (P_i C_i)$

**Calcul de  $J$  :**

$$J_i = J_{el(i)} + J_{pl(i)}$$

Partie élastique :

$$J_{el(i)} = \frac{(K_i)^2 (1 - \nu^2)}{E}$$

où :

—  $E$  : Module d'Young [MPa]

—  $\nu$  : Coefficient de Poisson

—  $K_i = \frac{P_i}{(BB_N W)^{1/2}} f\left(\frac{a_i}{W}\right)$

avec  $f\left(\frac{a_i}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a_i}{W}\right) \left[0.886 + 4.64 \left(\frac{a_i}{W}\right) - 13.32 \left(\frac{a_i}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a_i}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a_i}{W}\right)^4\right]}{\left(1 - \frac{a_i}{W}\right)^{3/2}}$

Partie plastique :

$$J_{pl(i)} = \left[ J_{pl(i-1)} + \left( \frac{\eta_{pl(i-1)}}{b_{i-1}} \right) \frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_N} \right] \left[ 1 - \gamma_{i-1} \left( \frac{a_i - a_{i-1}}{b_{i-1}} \right) \right]$$

où :

—  $\eta_{pl(i-1)} = 2 + 0.522b_{i-1}/W$

—  $\gamma_{pl(i-1)} = 1 + 0.76b_{i-1}/W$

Afin d'analyser les résultats des essais, les documents suivants pourront être consultés :

- ASTM E399 : Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials
- ASTM E1820-17 : Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness