

# TD 17 : Traction universelle

N. BILLON

Les essais mécaniques sont indispensables à l'étude des matériaux. Pourtant, tous sont des essais de structure, dont les résultats ne sont pas une image simple du comportement intrinsèque des matériaux. En fait, l'expérimentateur n'a accès qu'aux grandeurs mesurables (force, déplacement, couple), alors que l'analyse mécanique doit s'appuyer sur des grandeurs intrinsèques (contraintes, déformations). Une modélisation de l'essai est donc toujours nécessaire pour relier sans ambiguïté les contraintes aux forces et les déformations aux déplacements. De même, contraintes et déformations sont des concepts destinés à représenter l'état mécanique du milieu supposé continu, alors que la compréhension du comportement nécessite une connaissance des processus physiques à l'origine de cet état. Ce TD illustre ces deux niveaux de conceptualisation (modélisation mécanique de l'essai et modélisation du matériau) dans le cas d'un essai de traction simple.

## 1 De la réponse force-déplacement à la courbe contrainte déformation

Soit un cylindre de longueur 30 mm et de diamètre 10 mm d'un matériau '1' supposé homogène (Fig. 1). Une des extrémités du cylindre est fixée (en  $Z=0$ ), tandis que l'autre extrémité est soumise à un déplacement parallèle à l'axe  $z$  à une vitesse,  $V_z$ , constante de 0,0083 mm/s. La force,  $F$ , nécessaire à la sollicitation est mesurée au cours du temps. Les données brutes sont représentées sur la figure 1.

1-1) Cette courbe est-elle une représentation du comportement du matériau ?

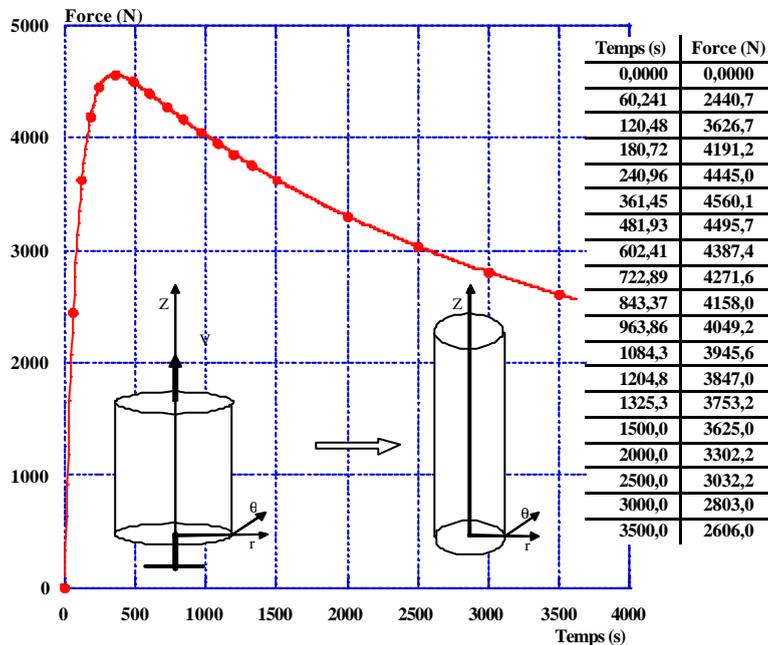


Figure 1 : Schémas de l'éprouvette et évolution de la force. Cas du matériau '1'.

1-2) Comment extraire de ces données des indications sur le comportement intrinsèque du matériau. Pour cela on reconstruira la figure 1 en détaillant toutes les hypothèses posées et en supposant que le matériau obéit à l'équation (1)<sup>1</sup>.

$$s = 65,310(1 - \exp(-40 e)) \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

1-3) Les résultats en termes de contrainte nominale,  $\sigma_n$  (force rapportée à la section initiale de l'éprouvette), et « vraie »,  $\sigma_v$  (force rapportée à la section courante de l'éprouvette), sont donnés figure 2. Commentez leurs formes.

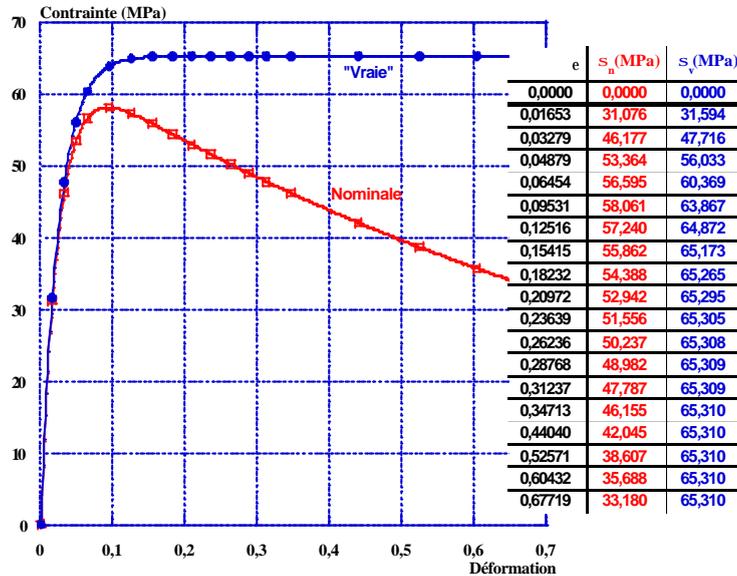


Figure 2 : Evolution des contraintes axiales vraie et nominale pour le matériau '1'.

1-4) Imagions qu'un matériau '2' (Eq. (2))<sup>1</sup> est soumis à la même expérience (figure 3). La contrainte  $\sigma_v$  reste t'elle intrinsèque au matériau ? Pour répondre on s'interrogera sur la vitesse de déformation au cours du temps.

$$s = 68.62 \left( 1 - \exp(-40 e)^{0.1} \right) e \quad (MPa) \quad (2)$$

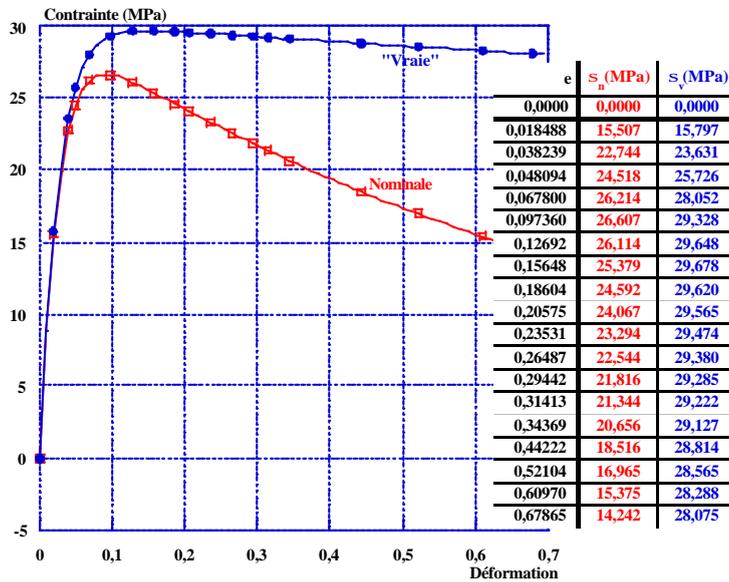


Figure 3 : Evolution des contraintes axiales vraie et nominale pour le matériau '2'.

1-5) Quelle explication alternative existe-t-il à la forme de la contrainte si on ignore la dépendance à la vitesse ? Comment peut-on discriminer les deux hypothèses ?

<sup>1</sup>  $\epsilon$  : Déformation axiale.  $\sigma$  : Contrainte axiale.  $\dot{\epsilon}$  : Vitesse de déformation axiale.

1-6) En fait, la sollicitation décrite à la figure 1 est difficilement réalisable. Dans la réalité le matériau '2' doit être solidement collé sur deux pastilles indéformables, elles-mêmes collées solidement sur deux tubes de 0,5 mm d'épaisseur, de diamètre externe 10 mm, de module d'Young 20 000 Mpa et de longueur 85 mm. La sollicitation est transmise par les tubes. C'est le déplacement de l'extrémité libre d'un des deux tubes que nous mesurons, l'autre tube étant maintenu fixe. Les résultats obtenus avec cet équipement sont représentés figure 4 (essai 2) et sont comparés aux résultats précédents (essai 1).

- Montrez que le module du matériau constitutif des tubes est significativement supérieur à celui du matériau '2'.
- Expliquez les différences entre les essais 1 et 2. *On analysera successivement la déformation des tubes et l'hypothèse d'homogénéité (figure 5).*

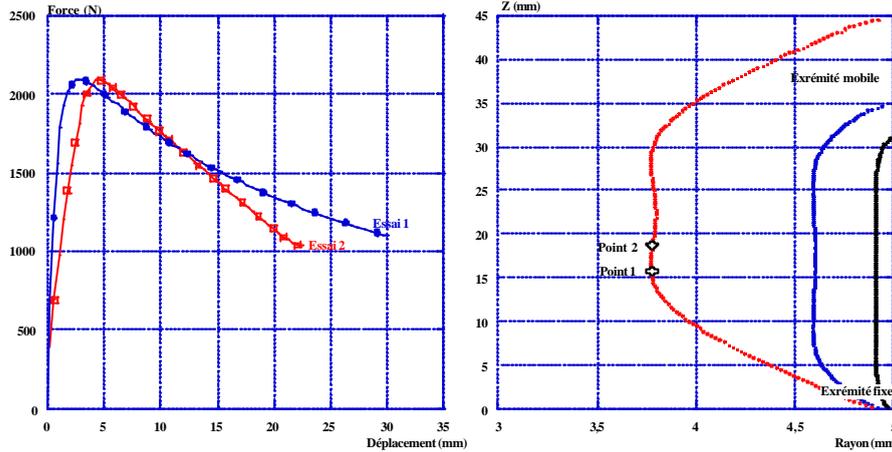


Figure 4 : Comparaison des essais 1 et 2. Figure 5 : Profils d'éprouvette (essai2) .

1-7) Quelles solutions peut-on envisager pour déduire le comportement intrinsèque ? *On s'appuiera sur les données du tableau I.*

Temps (s)	Rayon en 2 (mm) $R_2$	Distance entre les 2 points (mm)	Force (N)
0	5.0000	0.69231	0
127	4.9627	0.70254	1202
213	4.9359	0.71042	1550
333	4.8874	0.72442	1921
468	4.8134	0.74669	2092
562	4.7522	0.76589	2080
692	4.6609	0.79598	2020
779	4.5995	0.81723	1971
867	4.5370	0.83975	1920
958	4.4732	0.86368	1867
1099	4.3750	0.90258	1787
1195	4.3075	0.93081	1741
1295	4.2375	0.96149	1686
1395	4.1660	0.99443	1631
1498	4.0923	1.0301	1575
1659	3.9766	1.0900	1489
1771	3.8955	1.1351	1430
1829	3.8535	1.1595	1401
2009	3.7212	1.2417	1310
2129	3.6304	1.3031	1251
2245	3.5417	1.3676	1195
2301	3.4980	1.4011	1168
2410	3.4121	1.4706	1116

Tableau I: Evolution de la distance entre deux points de l'éprouvette dans une zone de déformation homogène (points 1 et 2 de la figure 5) et évolution du rayon au point 2.

1-8) Il est possible d'associer à un essai de traction une mesure de la température de surface de l'éprouvette, dans la zone concentration de déformation, à l'aide d'un dispositif infra rouge. Les résultats d'un tel essai expérimental (dans le cas d'un polycarbonate) sont reportés sur les figures 6 et 7. On note, de plus, que dans des conditions similaires à la figure 6, un PEhd voit sa température augmenter de 5 °C.

- Quelle est l'origine de l'échauffement observé ?
- Comment pourrait-on en tenir compte dans le cas adiabatique ?
- De quoi dépend l'ampleur de cet échauffement dans la réalité ?
- Quel est l'impact de cet échauffement ?
- En toute généralité quelles sont les grandeurs physiques dont la connaissance devient nécessaire à l'exploitation de l'essai ?
- Quelles alternatives existent à cette difficulté ?

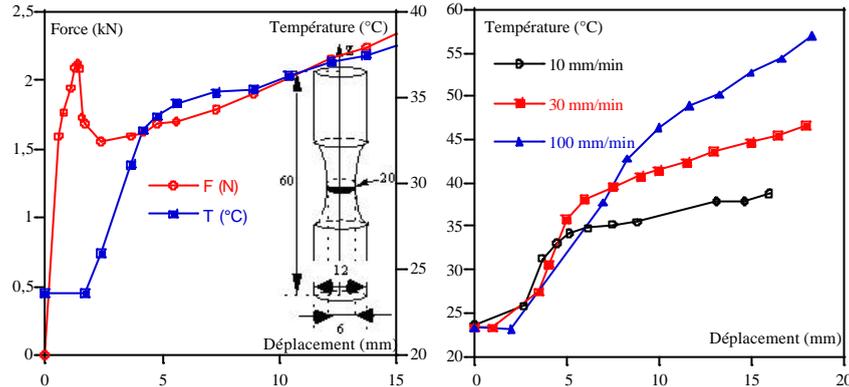


Figure 6 et 7 : Comportement d'un polycarbonate en tension;  
 6) Comparaison entre la force (o) et la température de surface (■) pour une vitesse de 10 mm/ (initialement  $0.02 \text{ s}^{-1}$ ) et schémas de l'éprouvette.  
 7) Température de surface pour différentes vitesses de traction.

## 2 Le durcissement structural et la variété de phénomènes associés

2-1) La figure 8 illustre le comportement expérimental d'une éprouvette de polycarbonate (PC) sollicitée en traction.

- Les matériaux imaginaires précédents pourraient-ils se comporter comme le PC ?
- Quel processus peut expliquer le comportement du PC ?

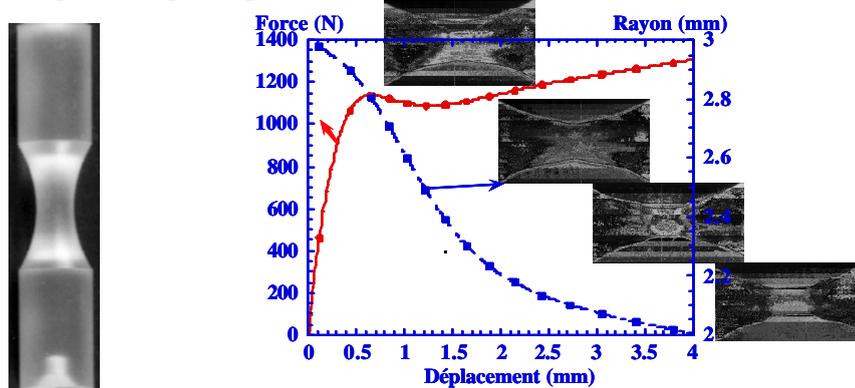


Figure 8 : Comportement en traction (vitesse de traverse constante) d'une éprouvette de polycarbonate. Le rayon est celui de la section minimale.

2-2) Compte tenu de ce qui précède nous allons nous focaliser sur des essais réalisés à basse vitesse (isothermes) à l'aide de système vidéo métrique qui autorise à la fois

le suivi de la géométrie de l'éprouvette (mesure de la déformation locale) et le maintien d'une vitesse de déformation constante. Nous disposons donc de courbes contrainte-déformation à vitesses de déformation constantes, qui peuvent être analysées sans ambiguïté. Soit donc des essais réalisés à  $0.001 \text{ s}^{-1}$  (Fig. 9) sur différents polymères et classés en fonction de leur position par rapport à la transition vitreuse  $T_g$  des matériaux respectifs. Commentez les similitudes et différences de ces comportements et les causes possibles du durcissement de chacun des matériaux sachant que :

- Le PET, ou polyéthylène téréphthalate, peut être obtenu soit amorphe soit semi cristallin. En dessous de sa transition vitreuse (en haut à gauche) il présente une plasticité réduite avec amorçage d'une striction instable s'il est semi cristallin et développement d'une bande de cisaillement s'il est amorphe (figure 9). La déformation n'est plus réversible (à la température de l'essai) au-delà du seuil apparent sur les courbes.
- Le PET amorphe au dessus de sa transition vitreuse (en bas à droite) présente une grande déformation avec une striction marquée et stable. Il est le siège d'une augmentation très nette de sa densité au-delà d'une déformation dépendant de la température de l'essai mais généralement supérieure à 0.98. Cette densification s'accompagne de l'apparition d'une texture de fibre mise en évidence par diffraction des rayons X aux grands angles. La déformation reste majoritairement réversible à la température de l'essai.
- Le polycarbonate (PC en bas à gauche) est amorphe non cristallisable. Sa déformation s'accompagne d'une densification mais d'aucune diffraction aux grands angles. Par contre, une diffusion aux petits angles et une analyse de la biréfringence laissent apparaître une orientation dans le matériau. La déformation n'est plus réversible (à la température de l'essai) au-delà du seuil apparent sur les courbes avec existence d'une striction marquée et stable (cf. figure 8).
- Le polypropylène (PP en haut à gauche) est semi cristallin. Sa déformation s'accompagne d'une densification est d'une texturation progressive de sa microstructure au-delà du seuil, tandis que sa déformation perd sa réversibilité (à la température de l'essai). Une striction marquée et stable est observée.

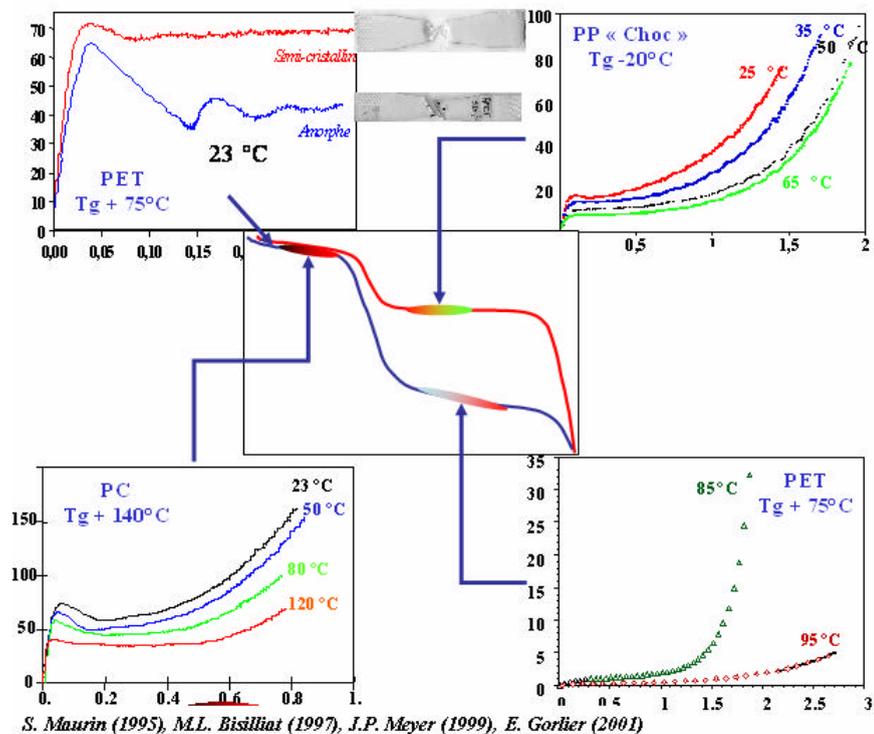


Figure 9 : Exemple de comportements polymère.

2-3) Le polystyrène au dessus de sa transition vitreuse présente un comportement qualitativement proche de celui du PET en bas à droite sur la figure 9. Dans ce cas aucune cristallisation n'est possible, le durcissement est moins rapide, la déformation est réversible et le coefficient de Poisson est de 0.5. A quel type de comportement est-on confronté ? Quelle est l'origine du durcissement ?

### 3 Plasticité et variation de volume

3-1) Des essais de traction cyclée réalisés sur le PET vitreux de la figure 9 (en haut à gauche) laissent clairement apparaître une décroissance progressive de son module d'Young. Une observation équivalente a pu être faite sur un polypropylène d'une autre nature que celui présenté à la figure 9. Que peut-on déduire de ces observations ?

3-2) Des mesures de volume en cours de déformation font apparaître une augmentation de volume  $DV/V$  positive (baisse de la densité), pour le PP et pour le PET quand il est chargé de nodules élastomère (figure 10).

- Que peut-on imaginer du processus en jeu ?
- Comment peut-on mesurer la variation de volume ?
- En quoi ces mesures complètent-elles les précédentes ?

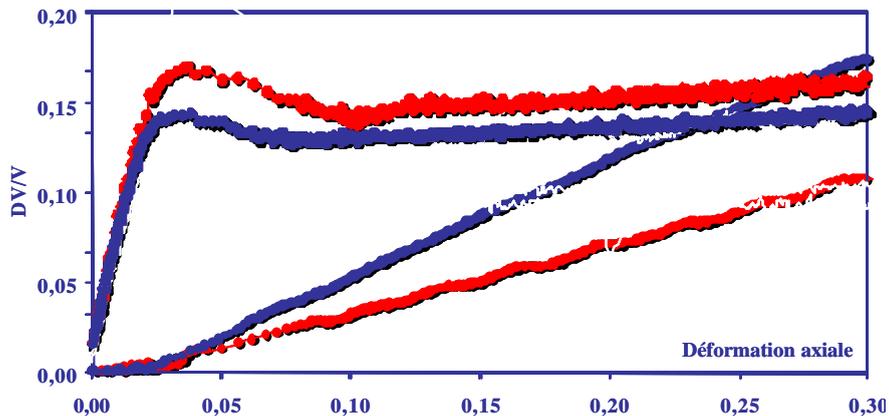


Figure 10 : Variation de volume pour un PET semi cristallin (en rouge) et amorphe (en bleu) chargé de core-shell (nodule élastomère).