

# Essais de caractérisation - Réponse en traction

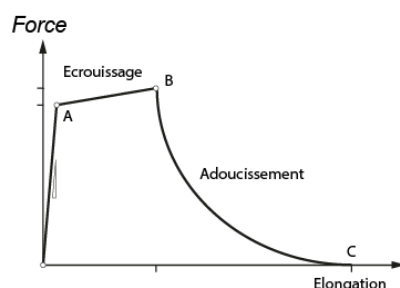
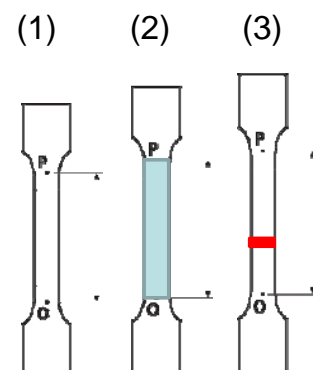
**Emmanuel Denarié**

Dr. ès sc. techn., Ing. civ. dipl. EPFL/SIA, MER  
Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages (MCS)  
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

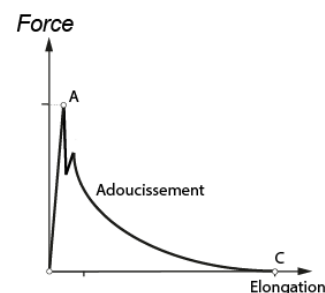
## 1. Comportement en traction

### 3 phases

- (1) Élastique : déformation répartie
- (2) Ecoulement : déformation répartie
- (3) Adoucissement : fissuration localisée



BFUP «Ecouissant en traction»  
= (1) + (2) + (3)



BFUP «Adoucissant en traction»  
= (1) + (3)

## 2 méthodes de caractérisation

- Directe = essai de traction uniaxiale
- Indirecte = essai de flexion + «analyse inverse»

**Analyse inverse** : extraction de la réponse en traction «cachée» dans la réponse en flexion mesurée expérimentalement

➔ Nécessite un modèle mécanique du comportement en flexion, prenant en compte le comportement non-linéaire (post élastique) en traction = phases (2) - écrouissage, et éventuellement (3) - adoucissement

3/15

## 2. Objectifs des essais

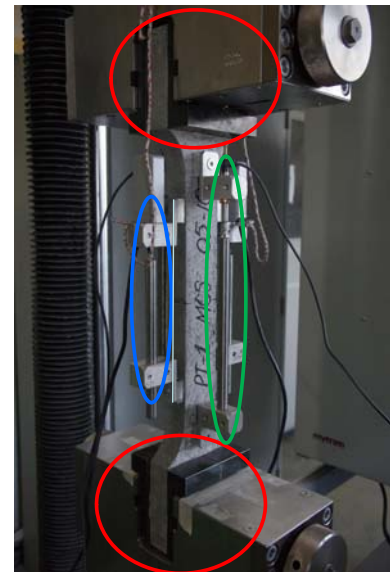
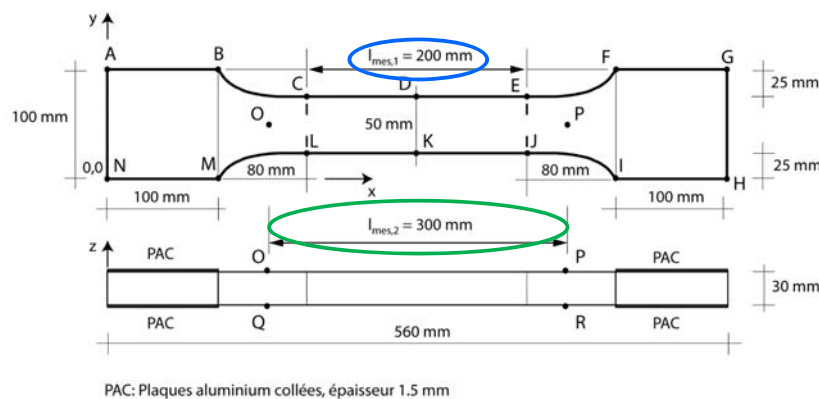
- Détermination du type de BFUP (écrouissant ou adoucissant)
- Détermination des résistances élastique  $f_{Ute}$  et ultime  $f_{Utu}$
- Détermination de l'étendue de l'écrouissage  $\varepsilon_{Utu}$  le cas échéant
- Détermination du module d'élasticité en traction  $E_{Ut}$  du BFUP

*!! Il n'existe pas de loi de comportement en traction absolue et unique pour des matériaux renforcés de fibres discontinues, tels que les BFUP !!*

La réponse du matériau dépend de sa composition et du mode de fabrication/coulage. Le résultat d'essai dépend donc entièrement du mode de préparation des éprouvettes tout autant que de la composition du BFUP.

4/15

### 3. Essai de traction uniaxiale



→ Conditions appui: encastree aux extremités

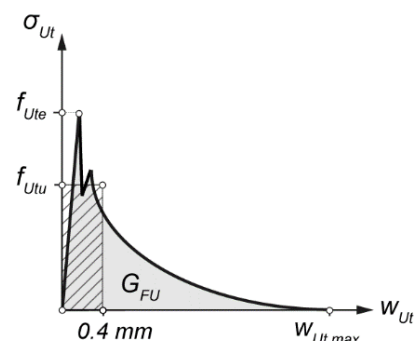
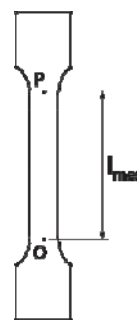
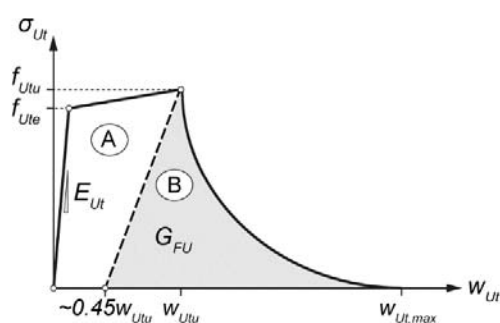
→ 2 paires de capteurs de déplacement

- Validation des déplacements imposés

- Zone de rupture dans la zone de mesure des déplacements

5/15

### Interprétation



→  $f_{Ute}$  et  $E_{Ut}$  définis par déviation irréversible de plus de 1% de la moyenne mobile du module d'élasticité sécant,  $G_{FU}$ : aires grisées

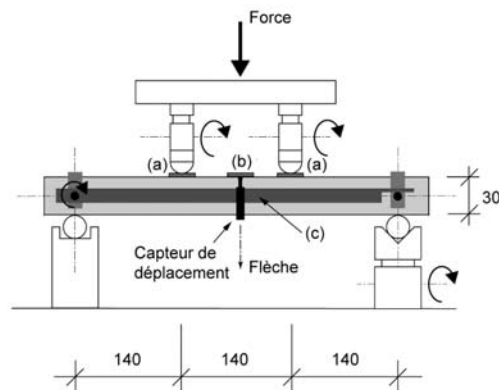
→ BFUP écrouissant:

$f_{Utu}$  défini par la force maximale  
 $\varepsilon_{Utu}$  = élongation pour la force maximale divisée par la base de mesure considérée

→ BFUP adoucissant:  $f_{Utu}$  défini par la contrainte moyenne jusqu'à 0.4 mm d'ouverture de fissure

6/15

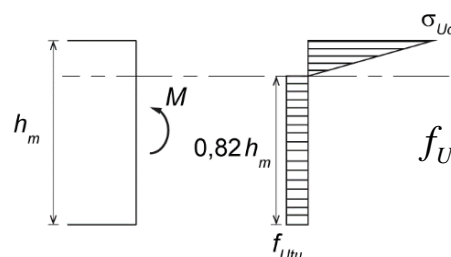
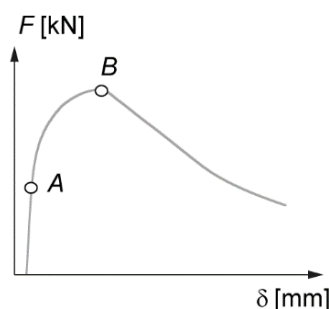
### 3. Essai de flexion 4 points sur bandes



- ➔ Eprouvettes 500/100/30 mm, face de fond de moule en compression, face de damage, rectifiée, en traction.
- ➔ Châssis de support des 2 capteurs de flèche, solidaire de l'axe médian de l'éprouvette sur appuis (pour éliminer tassements appuis, etc.).
- ➔ Vitesse de traverse (ou capteurs de flèche) imposée.

7/15

### Interprétation



$$f_{Utu} = 0.383 \cdot \frac{F_B \cdot l_m}{b_m \cdot h_m^2}$$

- ➔  $f_{Ute}$  et  $E_{Ut}$  définis par déviation irréversible de plus de 1% de la moyenne mobile du module d'élasticité sécant (point A)

$f_{Utu} > f_{Ute}$  : BFUP écrouissant

$f_{Utu} < f_{Ute}$  : BFUP adoucissant

–  $\varepsilon_{Utu}$  déterminée par analyse inverse

- Pas d'analyse inverse

8/15

## 4. Vue d'ensemble des essais recommandés

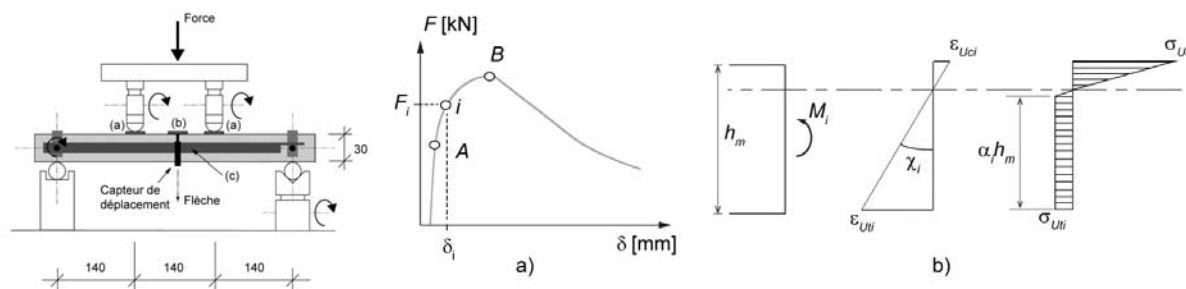
Type d'essais	Eprouvette	Préparation	Nombre
Initiaux	Traction uniaxiale	Moules individuels	6
Initiaux	Flexion sur plaque	Moules individuels	6
De convenance	Flexion sur plaque	Sciage de plaque carrée	2 x 6
De qualité	Flexion sur plaque	Moules individuels	6

➔ Essais initiaux et de qualité: éprouvettes moulées avec orientation systématique des fibres, optimisation de la reproductibilité, borne supérieure pondérée par le concept de sécurité appliqué lors du dimensionnement.

➔ Essais de convenance: éprouvettes découpées selon 2 directions perp. dans plaques larges coulées, représentatives de l'application, en rapport avec les valeurs de dimensionnement.

9/15

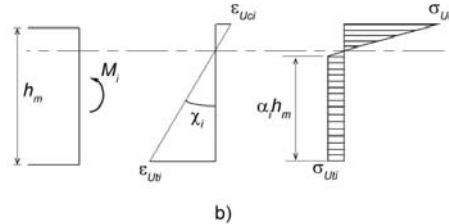
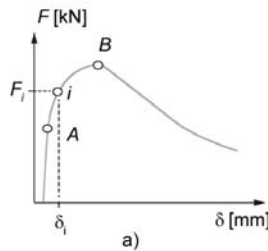
## 5. Analyse inverse



- ➔ Modèle de calcul flexionnel tenant compte du comportement non linéaire du BFUP mais pas de l'adoucissement.
- ➔ Correct jusqu'au point où le comportement adoucissant est activé, avant pic.
- ➔ Courbure dans la zone de moment constant admise «élastique».
- ➔ Estimation de la contrainte et déformation de traction pour des forces et flèches croissantes, après la limite élastique, avant pic.
- ➔ Arrêt du calcul quand la résistance à la traction  $f_{Utu}$  est atteinte.

10/15

## Modèle mathématique



$$M_i = \frac{F_i \cdot l_m}{6} \quad \sum M = M_i$$

$$\chi_i = \frac{216}{23} \cdot \frac{\delta_i}{l_m^2} \quad \sum N = 0$$

$$2\alpha_i^3 - 3\alpha_i^2 + 1 - \frac{M_i}{\chi_i \cdot E \cdot I} = 0$$

avec  $\lambda_i = \frac{M_i}{\chi_i \cdot E \cdot I} = \frac{12 \cdot M_i}{b_m \cdot h_m^3 \cdot \chi_i \cdot E}$

$$\rightarrow 2\alpha_i^3 - 3\alpha_i^2 + 1 - \lambda_i = 0$$

$$\sigma_{Uti} = 0.5(1 - \alpha_i)^2 h_m \chi_i E \quad \varepsilon_{Uti} = \frac{\sigma_{Uti}}{E} + \chi_i \alpha_i h_m$$

Calcul effectué pour une série de points espacés entre les points A et B. Le premier point "j" pour lequel la valeur de la contrainte calculée dépasse la résistance à la traction  $f_{Utu}$  permet d'estimer la limite d'écrouissage du BFUP  $\varepsilon_{Utu} = \varepsilon_{Uij}$

11/15

## Solutions tabulées de l'équation $2\alpha_i^3 - 3\alpha_i^2 + 1 - \lambda_i = 0$

$\lambda_i$	$\alpha_i$	$\lambda_i$	$\alpha_i$	$\lambda_i$	$\alpha_i$	$\lambda_i$	$\alpha_i$
0	0.988	0.25	0.674	0.5	0.5	0.75	0.326
0.01	0.941	0.26	0.666	0.51	0.493	0.76	0.319
0.02	0.915	0.27	0.658	0.52	0.487	0.77	0.311
0.03	0.896	0.28	0.651	0.53	0.48	0.78	0.303
0.04	0.879	0.29	0.644	0.54	0.473	0.79	0.295
0.05	0.863	0.3	0.636	0.55	0.467	0.8	0.287
0.06	0.85	0.31	0.629	0.56	0.46	0.81	0.279
0.07	0.838	0.32	0.622	0.57	0.453	0.82	0.27
0.08	0.826	0.33	0.615	0.58	0.446	0.83	0.261
0.09	0.815	0.34	0.608	0.59	0.44	0.84	0.253
0.1	0.804	0.35	0.601	0.6	0.433	0.85	0.244
0.11	0.794	0.36	0.594	0.61	0.426	0.86	0.235
0.12	0.784	0.37	0.587	0.62	0.419	0.87	0.226
0.13	0.774	0.38	0.58	0.63	0.412	0.88	0.216
0.14	0.764	0.39	0.574	0.64	0.406	0.89	0.206
0.15	0.755	0.4	0.567	0.65	0.399	0.9	0.196
0.16	0.746	0.41	0.56	0.66	0.392	0.91	0.185
0.17	0.738	0.42	0.553	0.67	0.385	0.92	0.174
0.18	0.729	0.43	0.547	0.68	0.378	0.93	0.161
0.19	0.721	0.44	0.54	0.69	0.37	0.94	0.149
0.2	0.712	0.45	0.533	0.7	0.363	0.95	0.135
0.21	0.705	0.46	0.527	0.71	0.355	0.96	0.12
0.22	0.697	0.47	0.52	0.72	0.348	0.97	0.104
0.23	0.689	0.48	0.513	0.73	0.341	0.98	0.082
0.24	0.681	0.49	0.507	0.74	0.334	0.99	0.06
						1	0

## Exemple de calcul - lecture

$$\lambda_i = \frac{12 \cdot M_i}{b_m \cdot h_m^3 \cdot \chi_i \cdot E}$$

$$F_i = 4.3 \text{ kN}, \delta_i = 2.4 \text{ mm}$$

$$l_m = 420 \text{ mm}, E = 43330 \text{ MPa}$$

$$b_m = 100 \text{ mm}, h_m = 29.3 \text{ mm}$$

$$M_i = F_i l_m / 6 = 300890 \text{ N.mm}$$

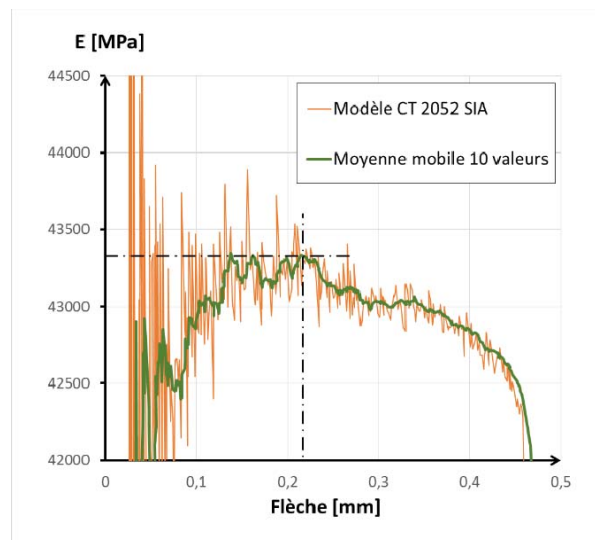
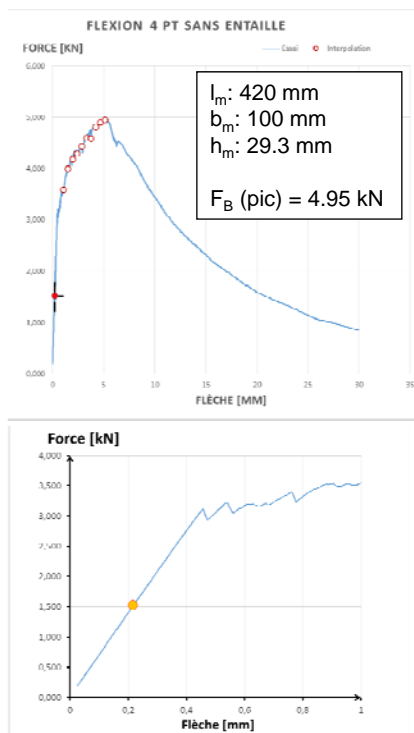
$$\chi_i = 1.28 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$$

$$\lambda_i = 0.26$$

$$\alpha_i = 0.666$$

12/15

## 6. Exemple : détermination de la limite d'élasticité et de la résistance à la traction



$$f_{Utu} = 0.383 \cdot \frac{F_B \cdot l_m}{b_m \cdot h_m^2}$$

$$f_{Ute} = 7.45 \text{ MPa}$$

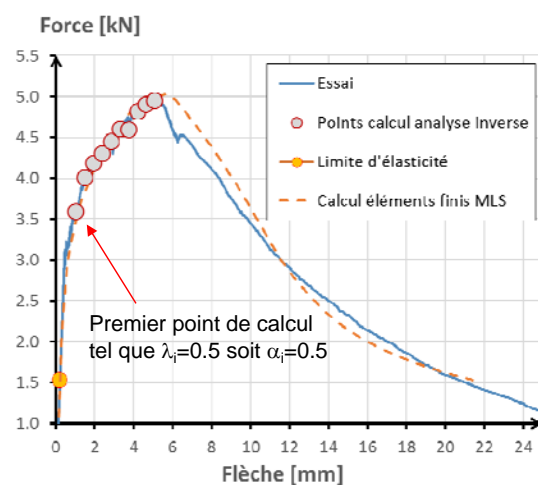
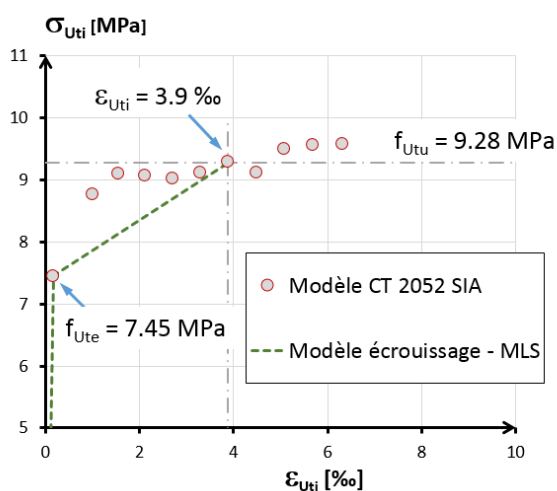
$$E_{Ut} = 43330 \text{ MPa}$$

$$f_{Utu} = 9.28 \text{ MPa}$$

$f_{Utu} > f_{Ute} \rightarrow \text{BFUP écouissant}$

13/15

## Exemple : analyse inverse



$\rightarrow \epsilon_{Utu} = 3.9 \text{ ‰}$  pour  $f_{Utu} = 9.28 \text{ MPa}$

$\rightarrow$  Excellente correspondance du modèle issu de l'analyse inverse, appliqué dans calcul logiciel éléments finis MLS (modèle non-linéaire).

14/15



## 5. Conclusions

- Deux essais et méthodes d'analyse proposés et validés
- Méthode originale pour l'identification fine de la limite d'élasticité
- Méthode originale pour l'analyse inverse de résultats d'essai de flexion
- Excellente correspondance avec prédictions calcul MEF
- Applications concluantes sur résultats chantiers récents Suisse

15/15

*Merci de votre attention !*

