

Journées de rencontre de la Graduate Initiative

Energie et Industries du Futur

Lyon, 2 & 3 juillet 2026

Comportement mécanique en flexion de
structures multi-matériaux

Application aux structures mixtes bois – acier

B. Jurkiewicz, Département Mécanique, LMC2, Université Lyon 1

Nature du financement : Stage Recherche (5 m.)

Mouad BEN-HASSI (Polytech CF)

+

+

+

Laboratoire des Matériaux
Composites pour la Construction
EA 7427



Sommaire

- 1) Contexte
- 2) Travaux existants
- 3) Concept développé et objectifs
- 4) Démarche et principales étapes
- 5) Principaux résultats expérimentaux
- 6) Simulations numériques
- 7) Conclusions et perspectives

Réduire l'impact de la construction sur l'environnement

Le bois dans la construction :

- ✓ Faible impact environnemental
- ✓ Rapport résistance / poids élevé
- ✓ Faible conductivité thermique

MAIS

- ✗ Propriétés variables
- ✗ Fragile en traction
- ✗ Combustible



Association avec d'autres matériaux

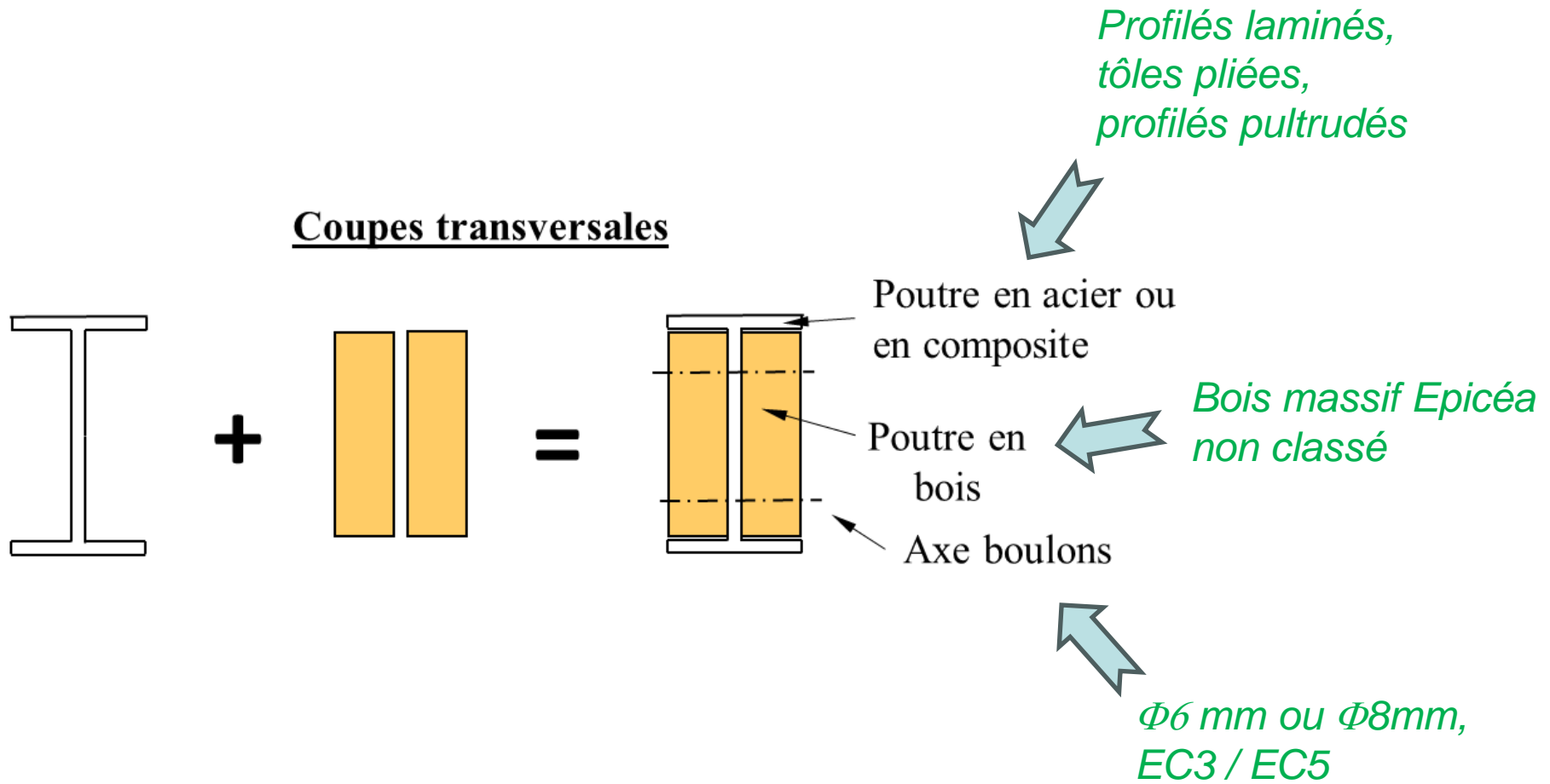
Travaux existants

Les travaux existants sur les structures hybrides acier - bois

P. Riola Parada (2016)

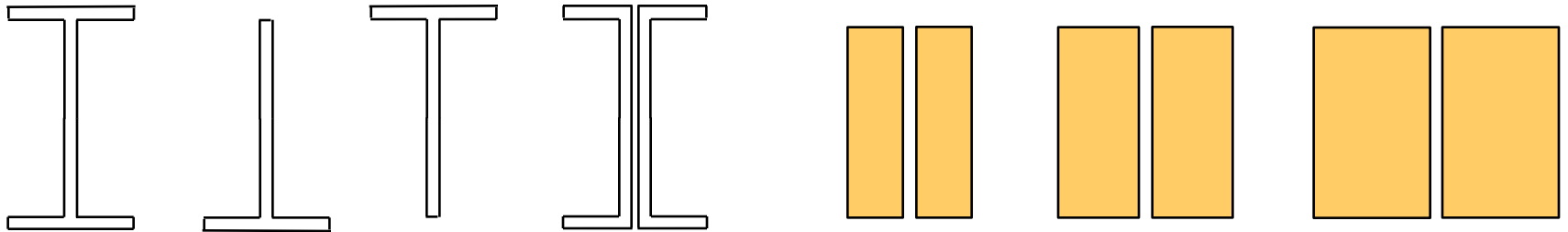
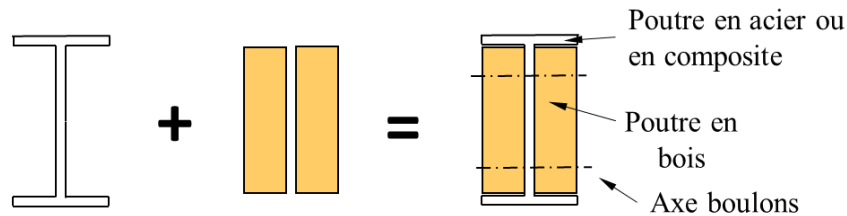
		PASSIVE					ACTIVE		
		In grain direction					In grain direction	Perp. to grain	
		T	C	S	T+C	T+C+S	T	T+S	T (p.g.)+S
H	Outer								
	Inner								
V	Outer								
	Inner								
H+V	Outer								
	Inner								

Structure mixte - Le bois = renfort



Les configurations géométriques étudiées

Coupes transversales

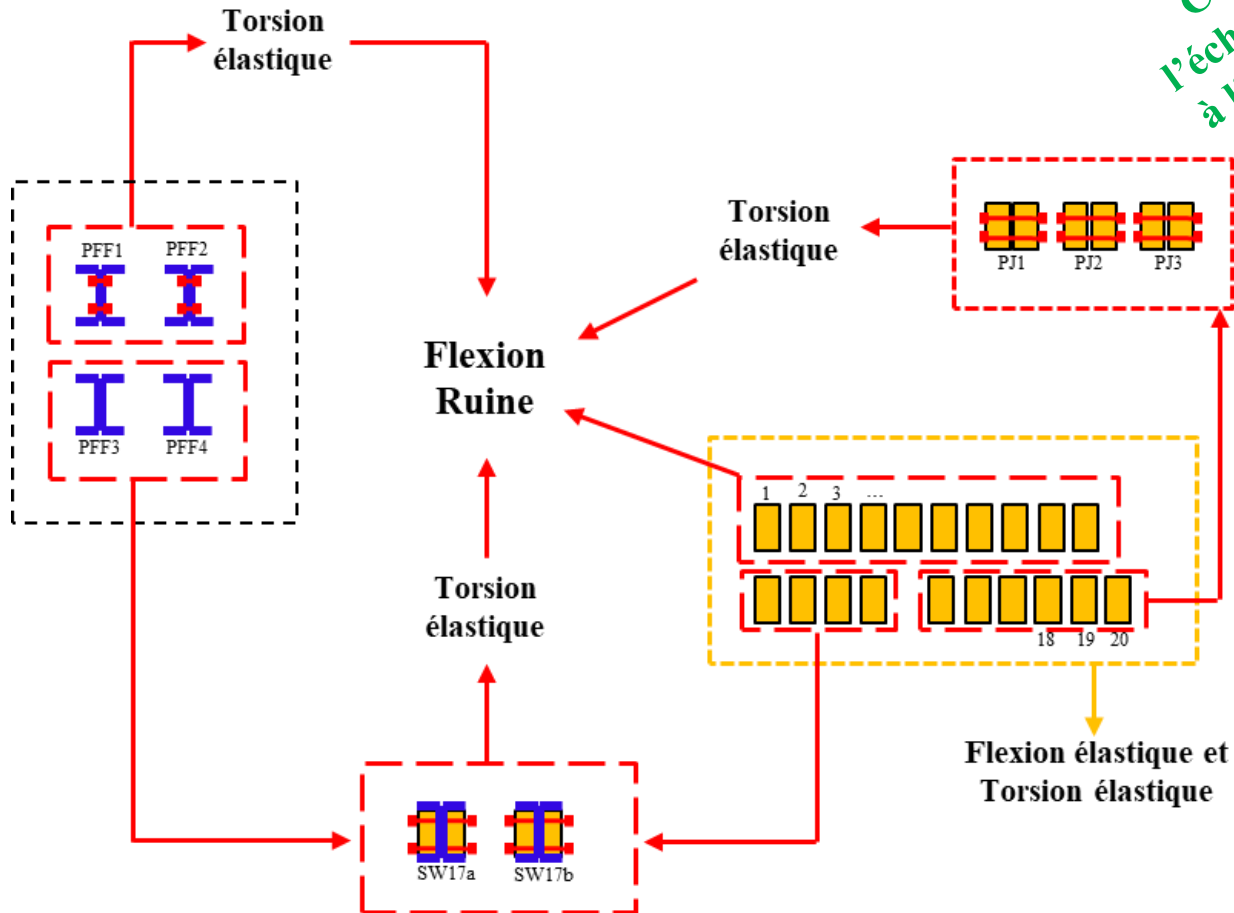


Principaux paramètres étudiés :

**configuration, nature des matériaux, dimensions,
densité de connecteurs**

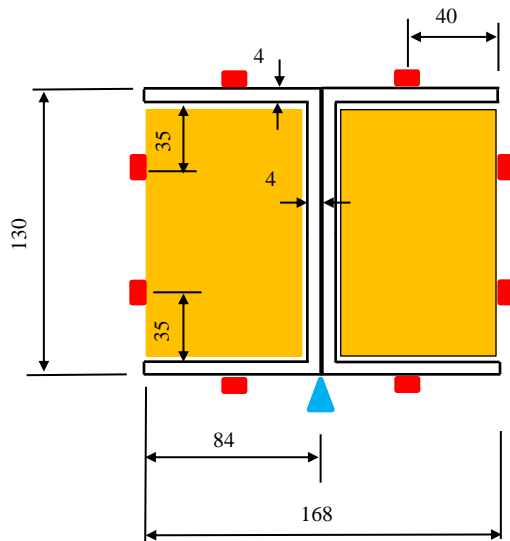
Démarche et principales étapes

Caractérisation à l'échelle du matériau et à l'échelle de l'élément



Configuration géométrique étudiée dans le stage de Master

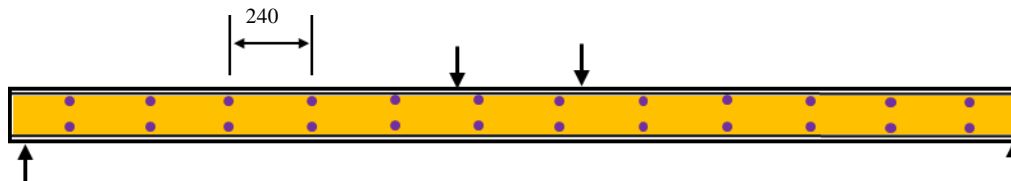
COUPE TRANSVERSALE
Mi-travée



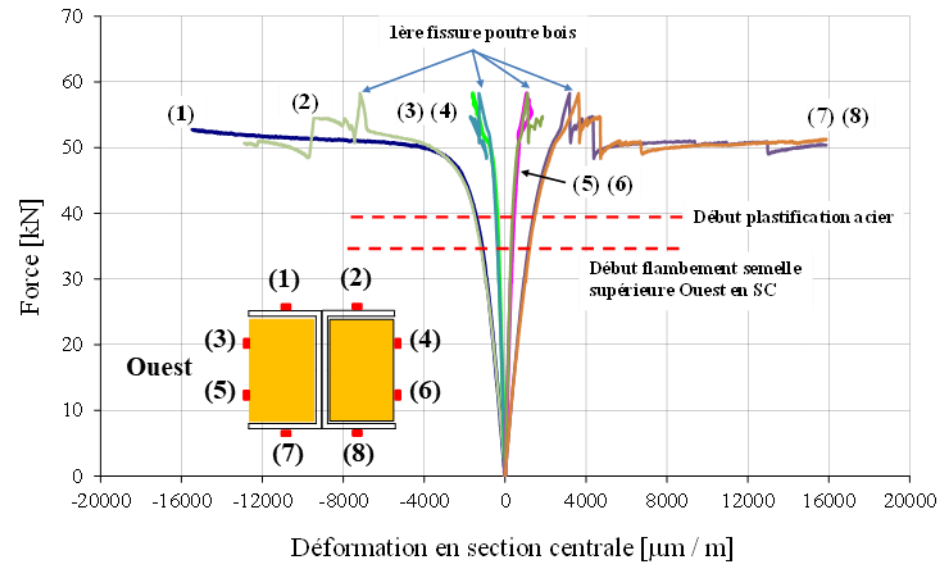
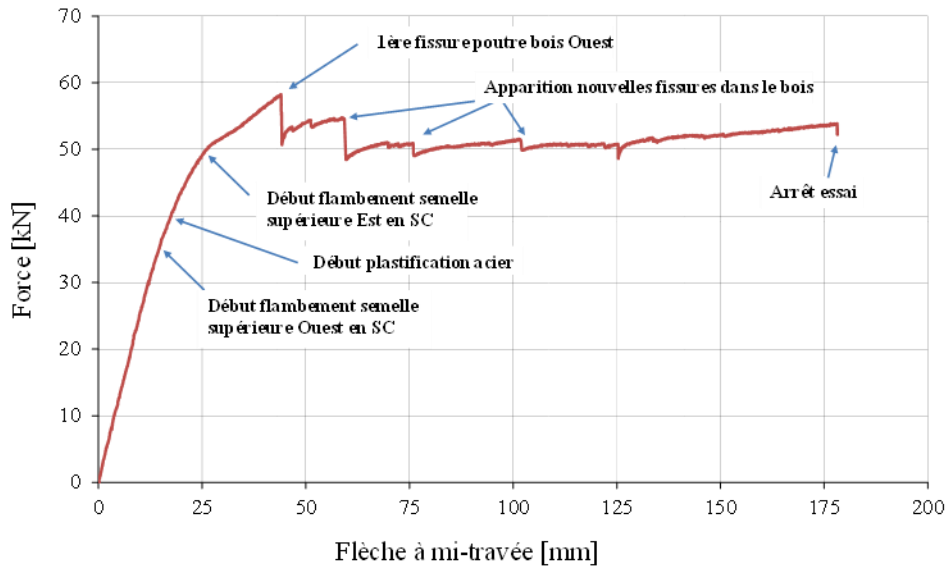
Flexion



Vue de côté



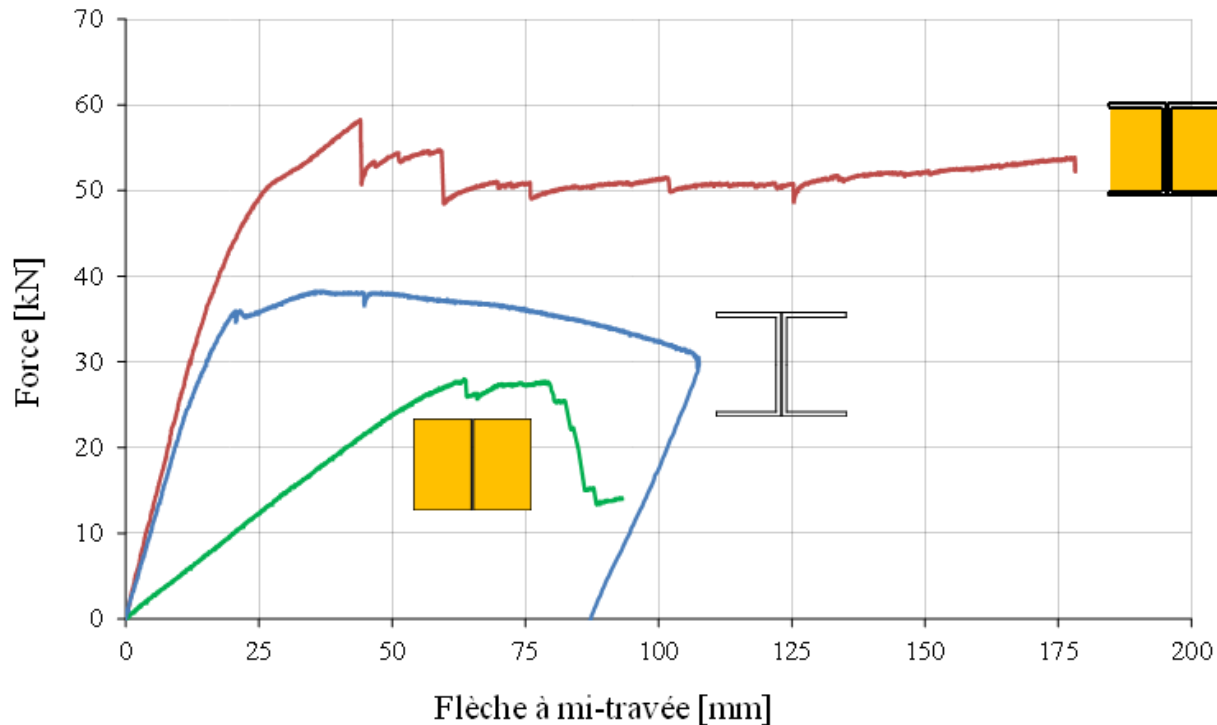
Comportement en flexion jusqu'à la ruine



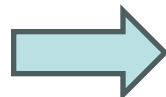
Flambement
semelle
supérieure



Comportement en flexion jusqu'à la ruine



Comment améliorer le comportement ?



Simulations numériques

Développer un outil numérique par éléments finis

Démarche générale :

✦ Du plus simple au plus complexe :

Elastique, non linéarité matérielle, non linéarité géométrique, les deux

✦ Choix des hypothèses de calcul :

Géométrie : fidèle aux essais

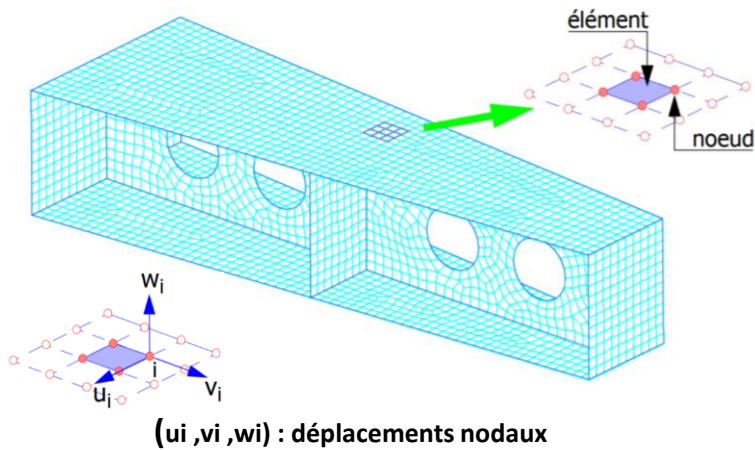
Propriétés matériaux : essais + littérature si besoin

*Conditions aux limites : le plus proche possible de la réalité des essais
(avec ses imperfections)*

Recherche du meilleur compromis entre précision et temps de calcul

Simulations numériques

1) Principe de la méthode des éléments finis:



Eléments	linéaires	paraboliques (quadratiques)	cubiques
unidimensionnels			
bidimensionnels			
tridimensionnels			

Méthode de Ritz (PTV) :

$$\delta J = \delta W_e$$

δJ : Travail interne.
 δW_e : Travail externe.

Champ de déplacement approché:

$$\{U\} = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) q_i = [N(x, y, z)]\{q\} = [N]\{q\}$$

$[N]$: Matrice des fonctions de forme.

$\{q\}$: Vecteur des déplacement nodaux.

Si le comportement est linéaire :

$$[K] \{q\} = \{F\}$$

Matrice de rigidité

Vecteur des déplacement nodaux

Vecteur des forces appliquées

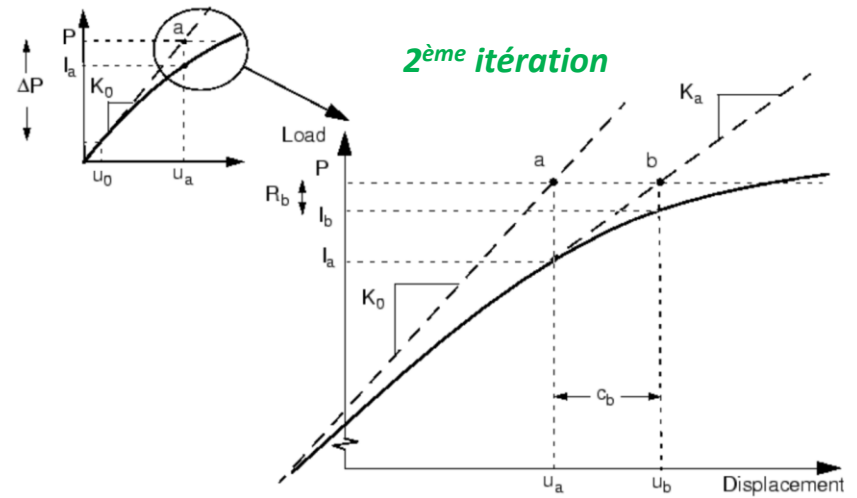
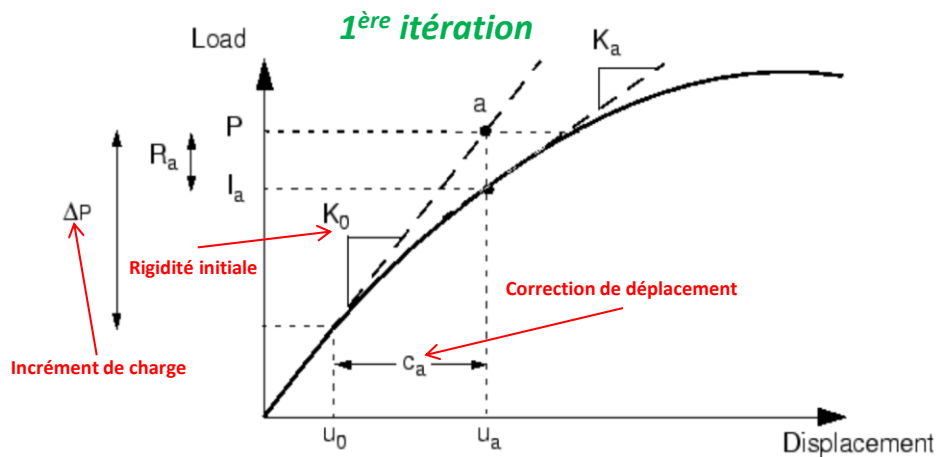
2) Non linéarité:

Géométrique

Matériel

Contact

Méthode de Newton – Raphson :



Critère de convergence :

$$R^{(i)} = P - I^{(i)} < 0, 5\% F_{moyenne}$$

$R^{(i)}$: résidu de force

$I^{(i)}$: Forces internes à l'itération i

P : Charge totale appliquée

$$c^{(i)} < 1\% \Delta u^{(i)}$$

$$\text{Avec : } \Delta u^{(i)} = u^{(i)} - u_0$$

u_0 : déplacement au début de l'incrément

$u^{(i)}$: déplacement à l'itération i de l'incrément

$c^{(i)}$: correction de déplacement à l'itération i

MODÉLISATION ÉLASTIQUE

Simulations numériques

1) Poutres en bois seules

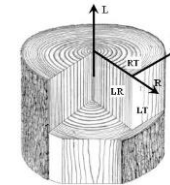
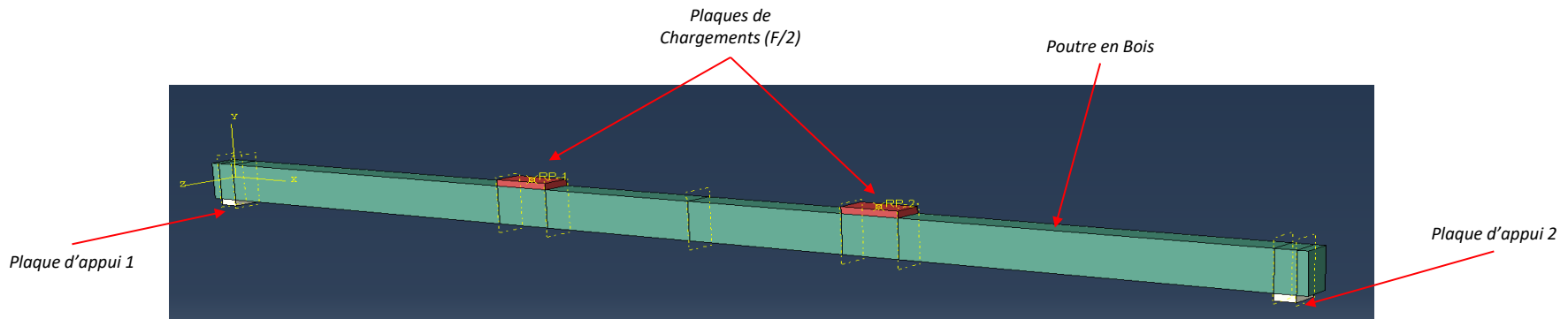
a. Modèle numérique :

Hypothèses de calcul :

1. **Géométrie** : Section rectangulaire.



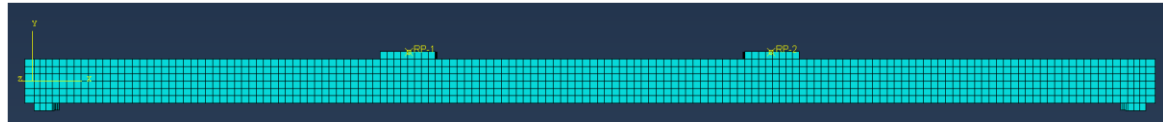
4. **Conditions aux limites** :



2. **Matériau** : Bois (Orthotrope).

Modules d'élasticité (Mpa)			Modules de cisaillement (Mpa)			Coefficients de Poisson		
E,L	E,T	E,R	G,LT	G,LR	G,RT	$\nu_{,LT}$	$\nu_{,LR}$	$\nu_{,RT}$

3. **Maillage** : Uniforme.



Simulations numériques

1) Poutres en bois seules

a. Modèle numérique :

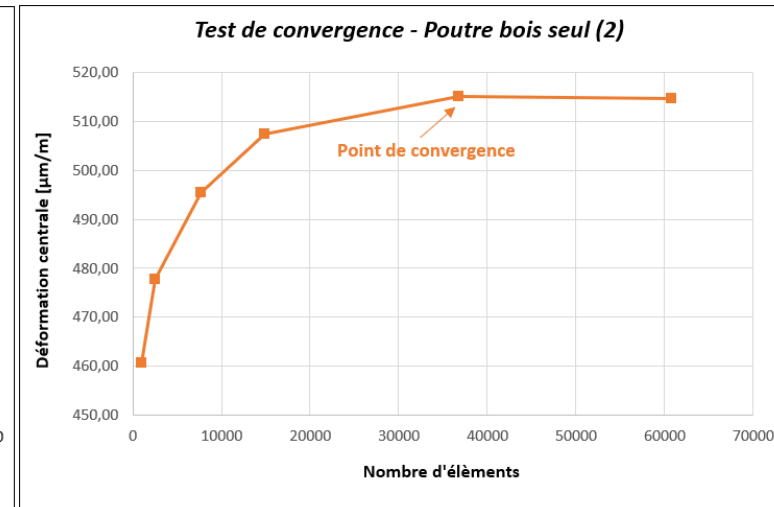
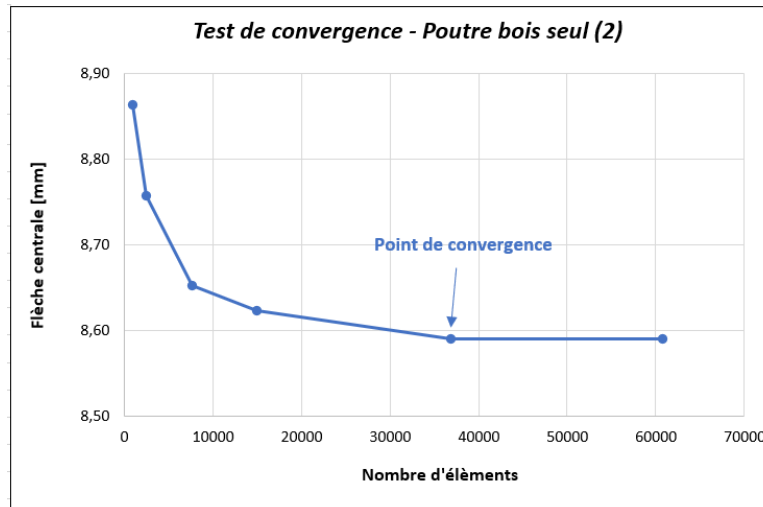
Optimisation:

Symétrie

Poutre bois seul (2)			
Au milieu de la poutre			
Poutre complète		Quart de poutre (symétrie)	
Flèche (mm)	Déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Flèche (mm)	Déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$)
8,9	461	8,9	461

Validation:

Maillage



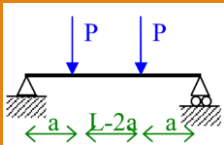
Simulations numériques

1) Poutres en bois seules

b. Résultats et comparaisons:

Tableau récapitulatif - Poutre Bois seul					
Flèche (mm)					
Au milieu de la poutre				Ecart NUM - EXP (%)	Ecart NUM - ANALYTIQUE (%)
Poutre	Numérique	Expérimentale	Analytique		
2	8,6	10,0	10,6	14	19
3	10,2	10,7	12,3	5	17
4	10,0	10,7	11,5	7	13
5	9,5	9,5	11,5	0	17

Calcul Analytique de la flèche



$$-f\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{Pa(3L^2 - 4a^2)}{24EI} + \frac{Pa}{GA'}$$

← Flèche centrale (mm)

Expérimentalement :

- Imperfection géométrique initiale.
- Incertitudes de mesure.
- Variation des caractéristiques mécaniques (Bois..)

Numériquement :

- Conditions aux limites idéalisées.
- Loi de comportement idéalisée.

Analytiquement :

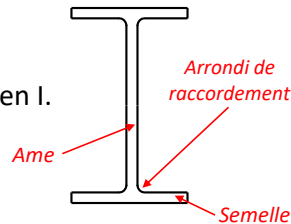
- La poutre 3D est modélisée uniquement par sa ligne moyenne et une section.

2) Poutre IPE (profilé métallique en forme de I):

a. Modèle numérique :

Hypothèses de calcul :

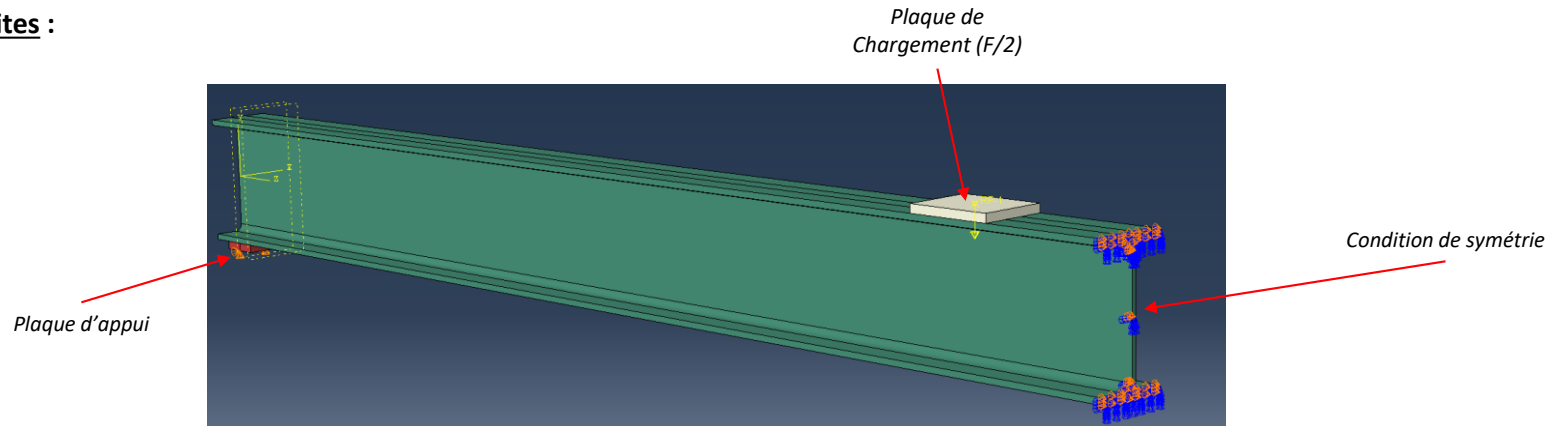
1. Géométrie : Section en I.



2. Matériau : Acier (Isotrope).

Module d'élasticité	Modules de cisaillement	Coefficient de Poisson
210 - 200 Gpa	80,8 - 76,9 Gpa	0,3

3. Conditions aux limites :

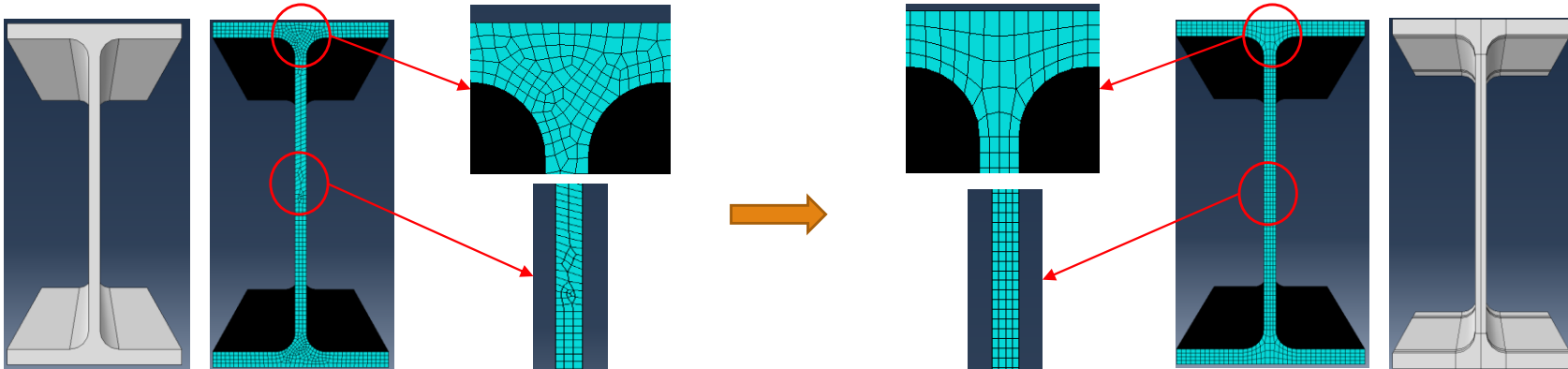


Simulations numériques

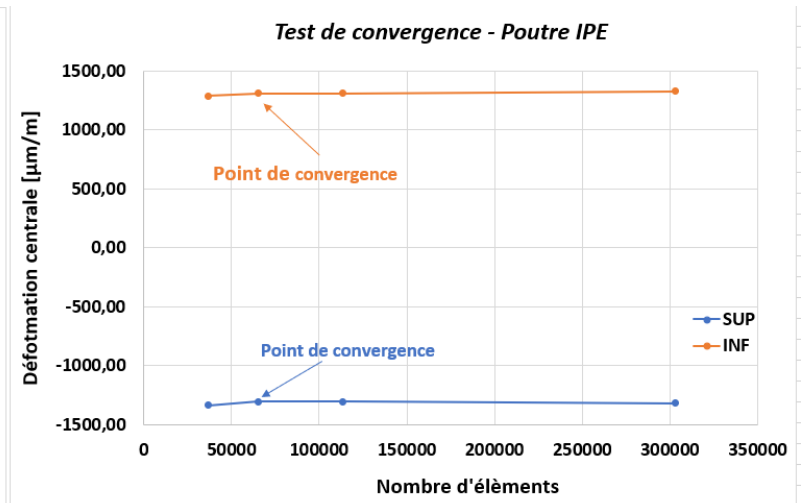
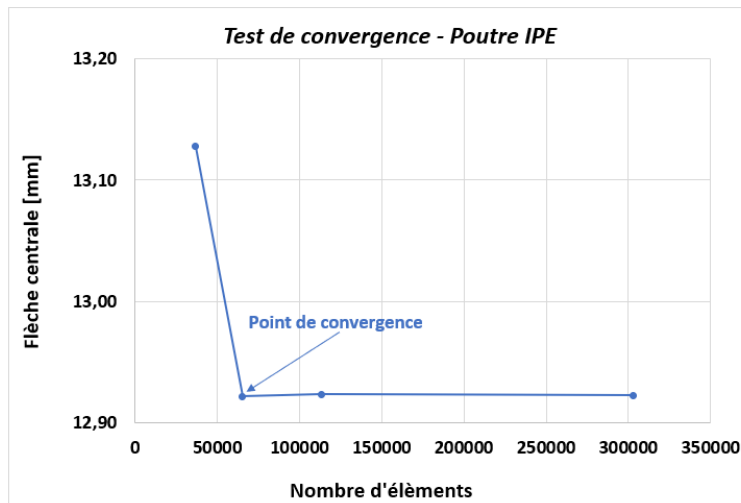
2) Poutre IPE (profilé métallique en forme de I):

a. Modèle numérique :

Maillage :



Validation :



Simulations numériques

2) Poutre IPE (profilé métallique en forme de I):

b. Résultats et comparaisons :

<i>Tableau récapitulatif - Poutre IPE</i>				
	Force Appliquée (KN)	Au milieu de la poutre		
		Flèche (mm)	Déformation (µm/m)	
			SUP	INF
Expérimentale	48,60	14,6	-1391	1401
Numérique		12,9	-1302	1306
Analytique		14,5	-1310	1310
<i>Ecart NUM -EXP (%)</i>		<i>12</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
<i>Ecart NUM -ANALYTIQUE (%)</i>		<i>11</i>	<i>1</i>	<i>0</i>

Calcul Analytique de la déformation

$$\epsilon_{xx} = \frac{M_z \cdot y}{E I_{Gz}}$$

Simulations numériques

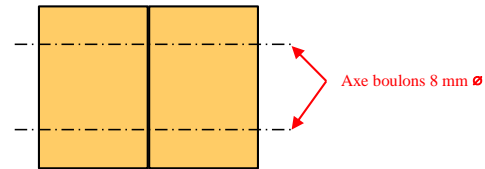
3) Poutre en Bois jumelle:

a. Modèle numérique :

Hypothèses de calcul :

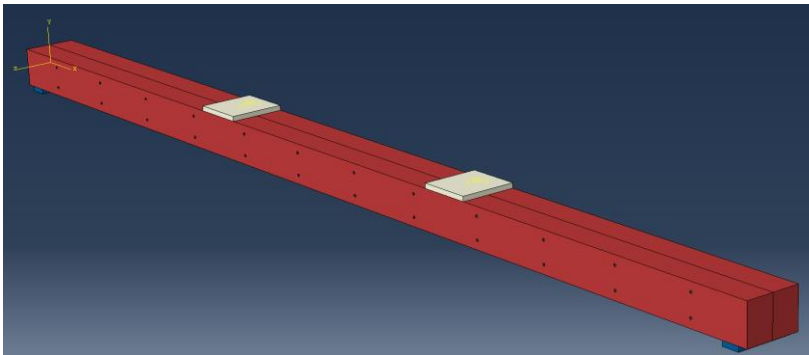
1. Géométrie :

- Double sections rectangulaires.
- Assemblage par des boulons.

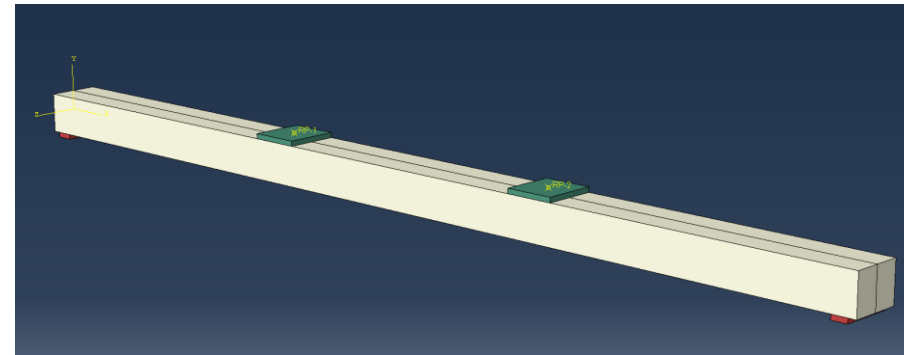


4. Configurations étudiées :

Assemblage par boulons
(configuration réelle)



Liaison parfaitement collée
(configuration simplifiée)



2. Matériau : Bois

- Propriétés mécaniques : valeurs moyennes des deux poutres.

3. Conditions aux limites :

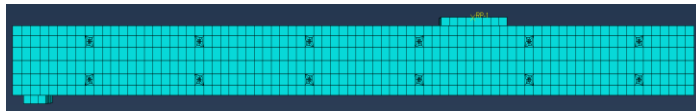
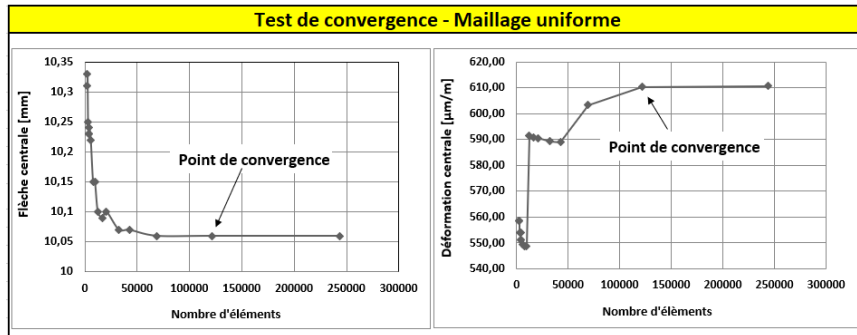
- Double symétries.

Simulations numériques

3) Poutre en Bois jumelle :

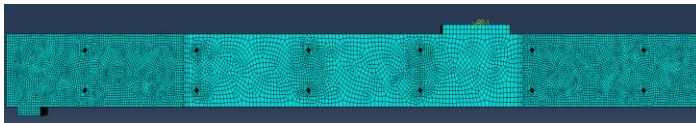
b. Optimisation et Validation :

Assemblage par boulons (configuration réelle)

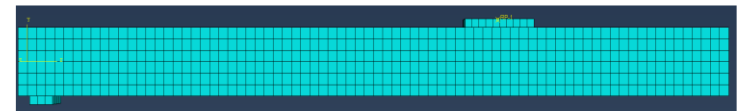
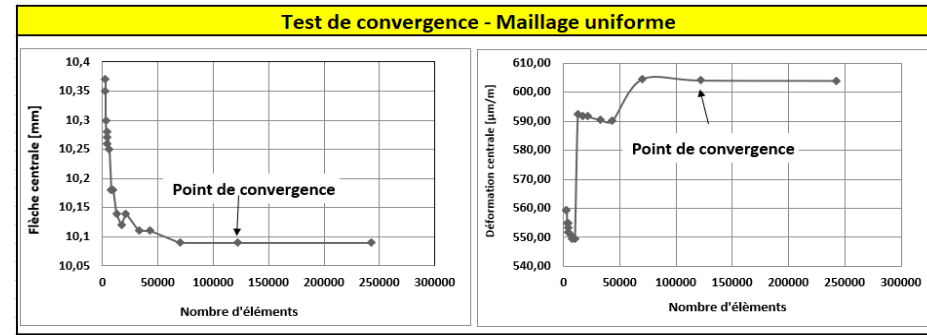


Test de convergence - Maillage variable

Taille de maillage (mm)	Nbr d'éléments	Flèche centrale (mm)	Déformation centrale (µm/m)
4 (40cm) - 8 (75cm) - 4 (40cm)	232510	10,0	611
5 (40cm) - 10 (75cm) - 5 (40cm)	143200	10,0	607

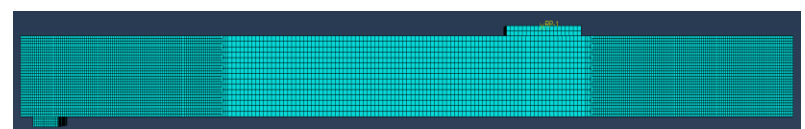


Liaison parfaitement collée (configuration simplifiée)



Test de convergence - Maillage variable

Taille de maillage (mm)	Nbr d'éléments	Flèche centrale (mm)	Déformation centrale (µm/m)
4 (40cm) - 8 (75cm) - 4 (40cm)	165000	10,1	612
5 (40cm) - 10 (75cm) - 5 (40cm)	68640	10,1	607



Simulations numériques

3) Poutre en Bois jumelle :

c. Résultats et comparaisons :

Assemblage par boulons (configuration réelle)

Flèche centrale (mm)		
Poutre	Numérique	Expérimentale
2-5	9,0	10,8
3-4	10,0	11,2

Poutre	Ecart NUM - EXP (%)
2-5	17
3-4	11

Déformation centrale ($\mu\text{m}/\text{m}$)		
Poutre	Partie inférieure	
	Numérique	Expérimentale
2-5	544	585

Poutre	Ecart NUM - EXP (%)
2-5	17

Liaison parfaitement collée (configuration simplifiée)

Flèche centrale (mm)			
Poutre	Numérique	Expérimentale	Analytique
2-5	9,0	10,8	10,6
3-4	10,1	11,2	11,6

Poutre	Ecart NUM - EXP (%)	Ecart NUM - ANALYTIQUE (%)
2-5	16	15
3-4	10	13

Déformation centrale ($\mu\text{m}/\text{m}$)			
Poutre	Partie inférieure		
	Numérique	Expérimentale	Analytique
2-5	544	585	586

Poutre	Ecart NUM - EXP (%)	Ecart NUM - ANALYTIQUE (%)
2-5	7	7

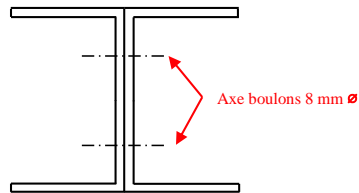
4) Poutre double U :

a. Modèle numérique :

Hypothèses de calcul :

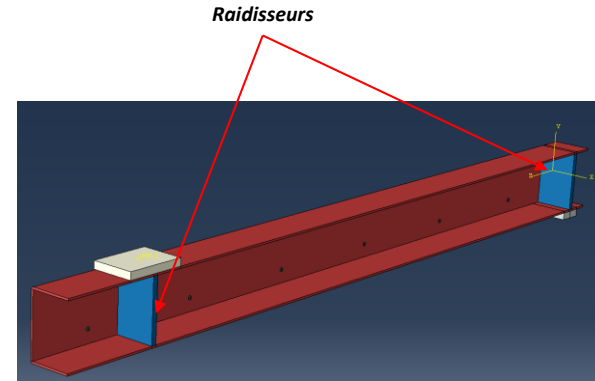
1. Géométrie :

- Double sections en U.
- Assemblage par des boulons.

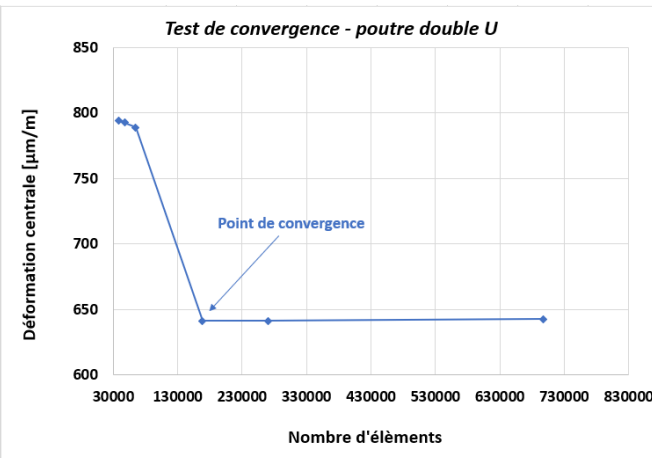
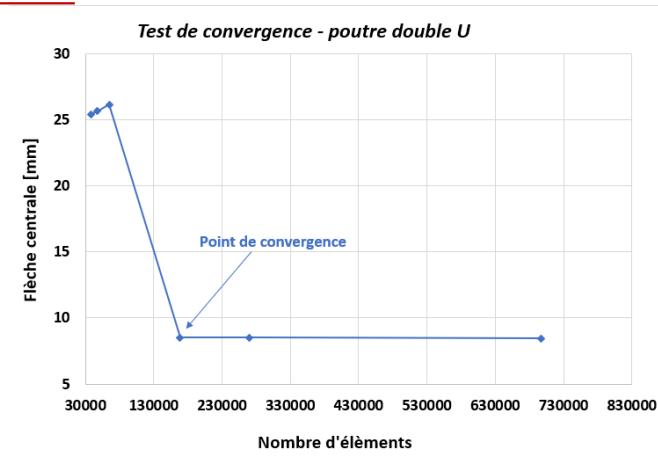


2. Matériau : Acier

3. Conditions aux limites :



Validation:



Simulations numériques

4) Poutre double U :

b. Résultats et comparaisons :

<i>Poutre double U</i>			
E = 210 GPa			
	Force Appliquée (KN)	Au milieu de la poutre	
		Flèche (mm)	Déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$)
Expérimentale	20,47	9,5	773
Numérique		8,0	603
Théorique		9,2	662
<i>Ecart NUM -EXP (%)</i>		<i>16</i>	<i>22</i>

Simulations numériques

4) Poutre double U :

b. Résultats et comparaisons :

<i>Poutre double U</i>					
	Force Appliquée (KN)	Au milieu de la poutre			
		E = 210 Gpa		E = 200 Gpa	
		Flèche (mm)	Déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Flèche (mm)	Déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$)
			INFERIEURE		INFERIEURE
Expérimentale	20,47	9,5	773	9,5	773
Numérique		8,0	603	8,4	633
Théorique		9,2	662	9,2	662
<i>Ecart NUM -EXP (%)</i>		16	22	12	18

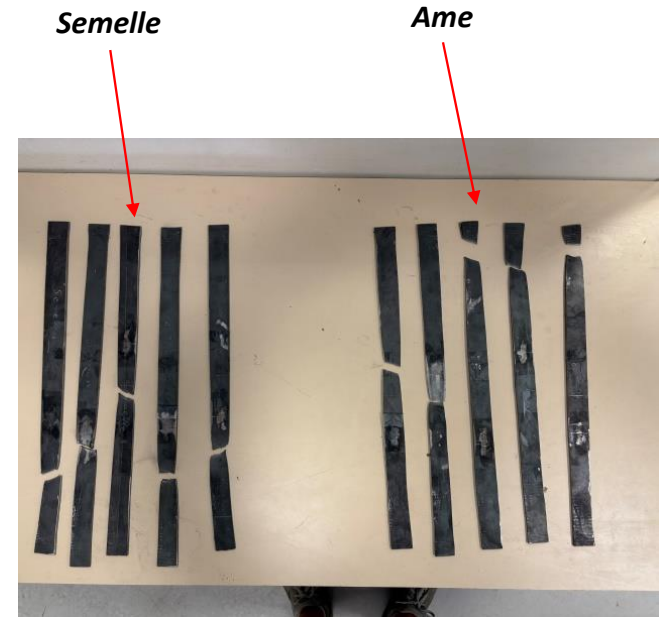
Simulations numériques

6) Essai de traction :

a. Essai :



Montage expérimental de traction

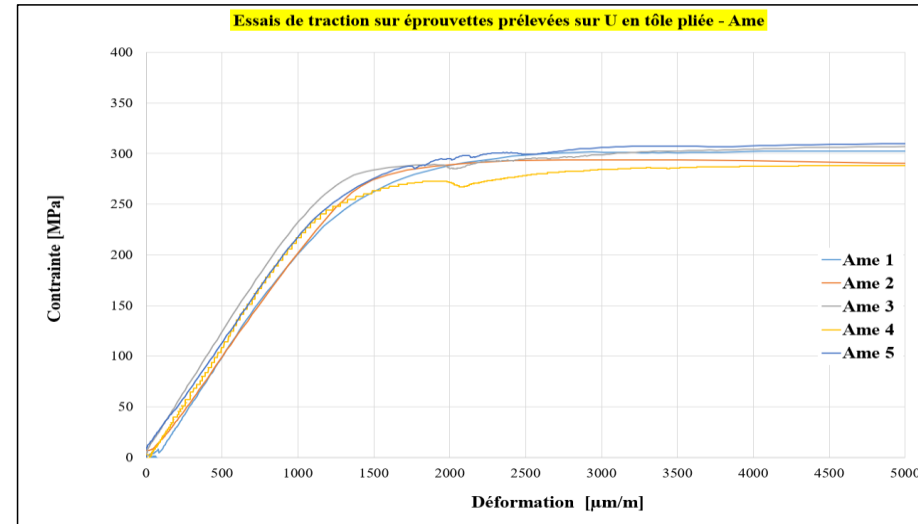
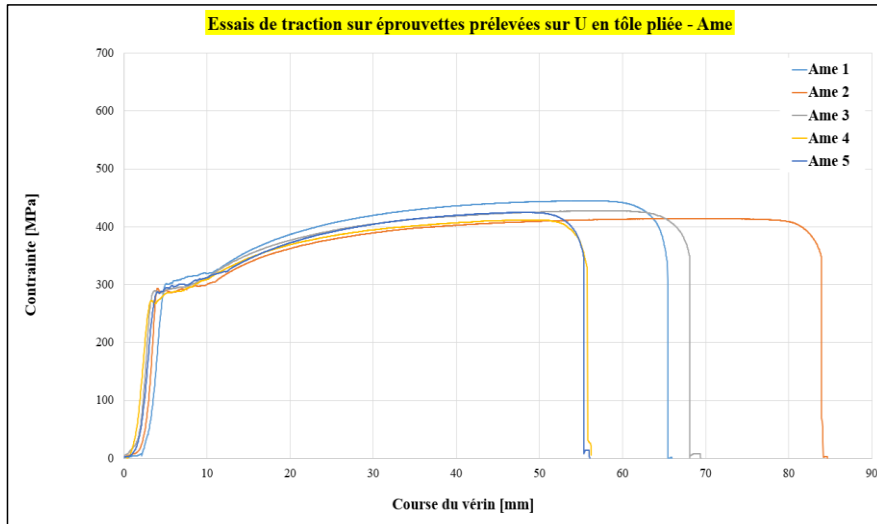


Eprouvettes après essai

Simulations numériques

6) Essai de traction :

b. Loi de comportement :



SUITE DE TRAVAIL

- **Modélisation plastique.**
- **Étude des instabilités géométriques.**
- **Modélisation de la poutre hybride (plastique, instabilité).**
- **Validation du modèle.**

Merci de votre attention