

# ESSAI EXPLORATOIRE DE COMPRESSION DYNAMIQUE BIAXIALE SUR BARRES DE HOPKINSON

**BASTIEN DURAND, AHMED ZOUARI, HAN ZHAO**

*LMT-Cachan, Secteur Mécanique & Matériaux, UTR Dynamique*

# Sommaire :

- **Contexte industriel**
- **Conception d'un système de barres**
- **Résultats expérimentaux**
- **Conclusions et perspectives**

Les sollicitations dynamiques multiaxiales sont rencontrées dans de nombreuses applications industrielles.

Exemples de cas :

## - Impact automobile



écrasement d'une « crash-box » (élément absorbant l'énergie d'un choc)

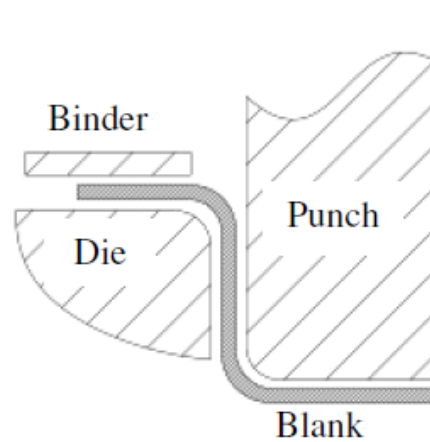
sollicitations localement complexes

[Durrenberger 2007]

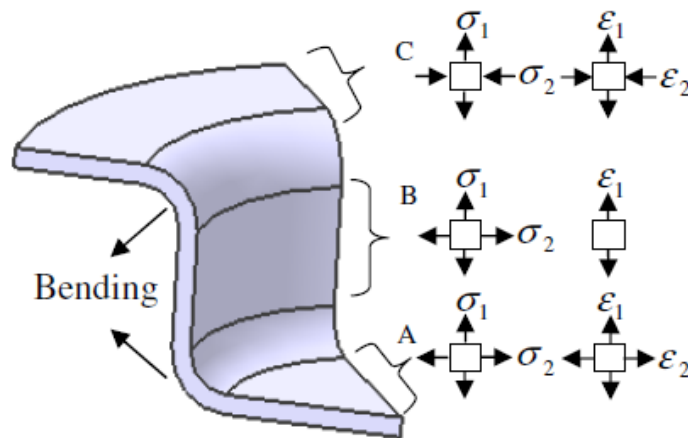
Les sollicitations dynamiques multiaxiales sont rencontrées dans de nombreuses applications industrielles.

Exemples de cas :

## - Mise en forme à grande vitesse



Drawing of cylinder part



Stress and strain state of cylinder part

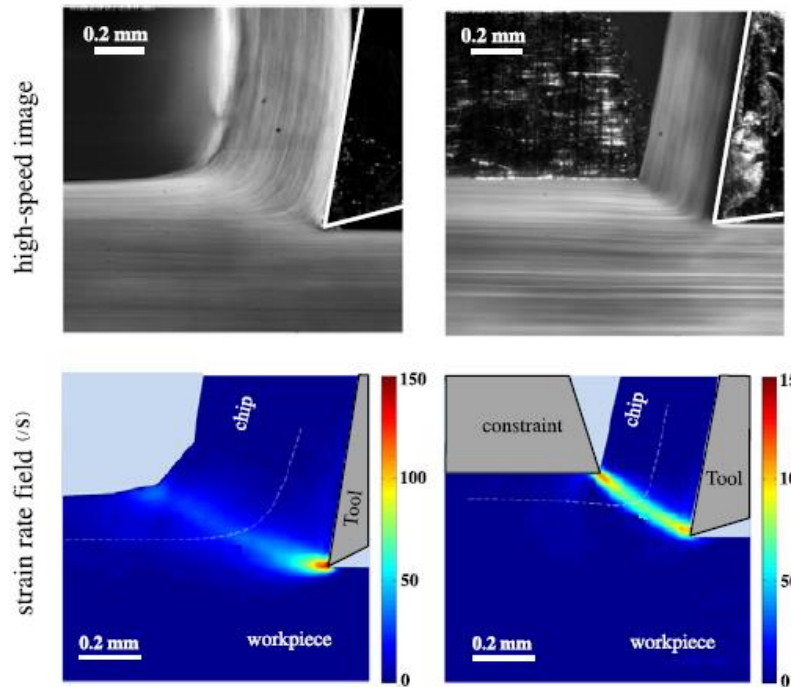
[Liu 2015]

emboutissage d'une tôle avec des contraintes et des déformations biaxiales

Les sollicitations dynamiques multiaxiales sont rencontrées dans de nombreuses applications industrielles.

Exemples de cas :

## - Usinage à grande vitesse



vitesse de déformation  
localement élevées

sollicitations localement  
complexes

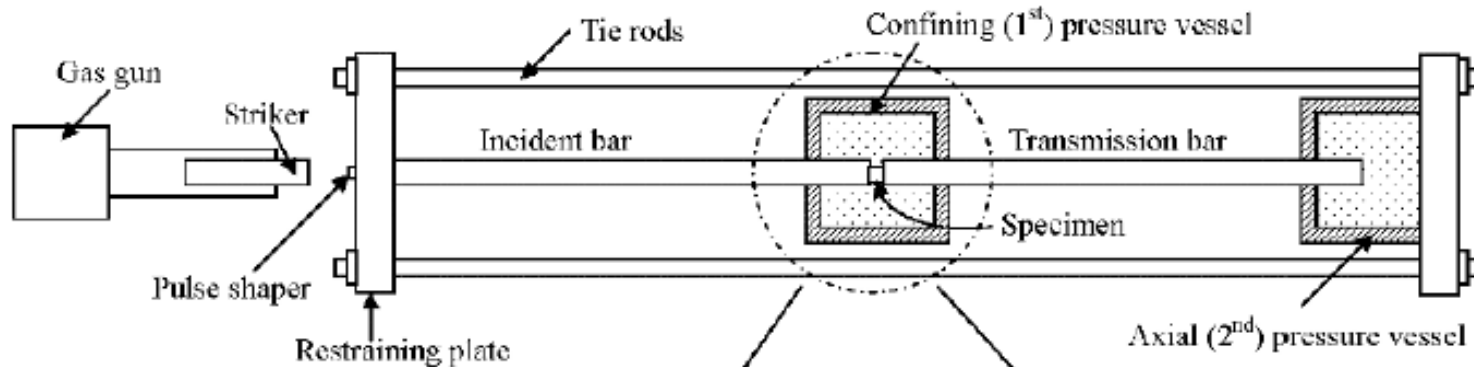
[Guo 2012]

## Moyens dynamiques de caractérisation expérimentale :

- barres de Hopkinson largement utilisées
- problème : impact du projectile uniaxial

## Moyens de caractérisation expérimentale en dynamique multiaxiale :

### - Confinement actif :

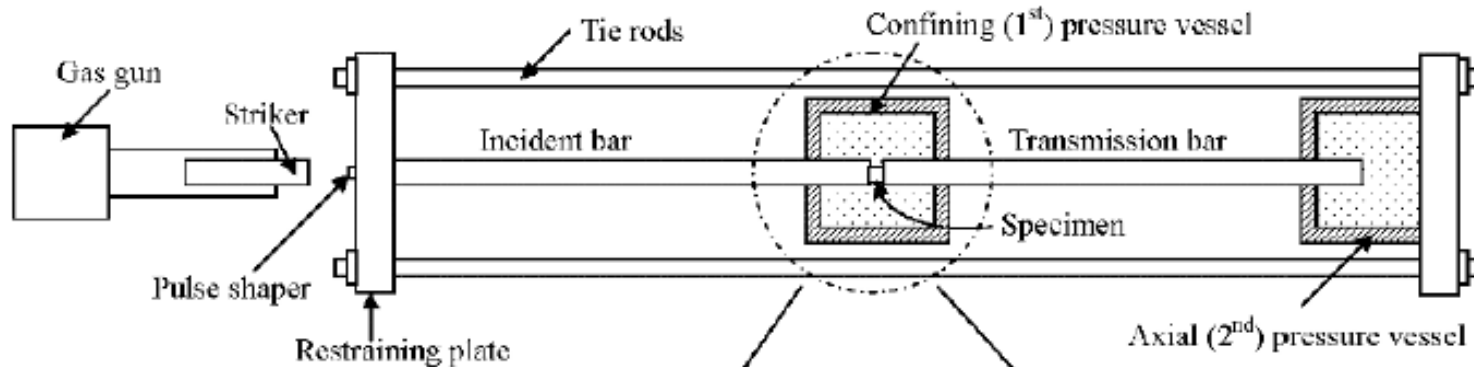


[Chen 2011]

enceinte sous pression  
⇒ chargement radial

## Moyens de caractérisation expérimentale en dynamique multiaxiale :

### - Confinement actif :



[Chen 2011]

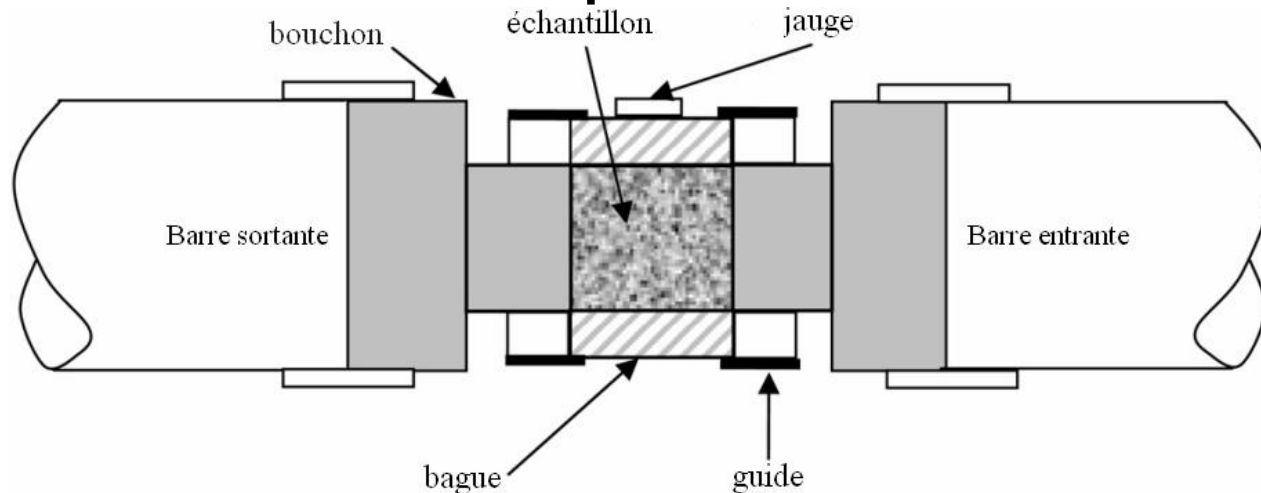
enceinte sous pression  
⇒ chargement radial

Inconvénient : chargement radial statique et non dynamique



## Moyens de caractérisation expérimentale en dynamique multiaxiale :

### - Confinement passif :

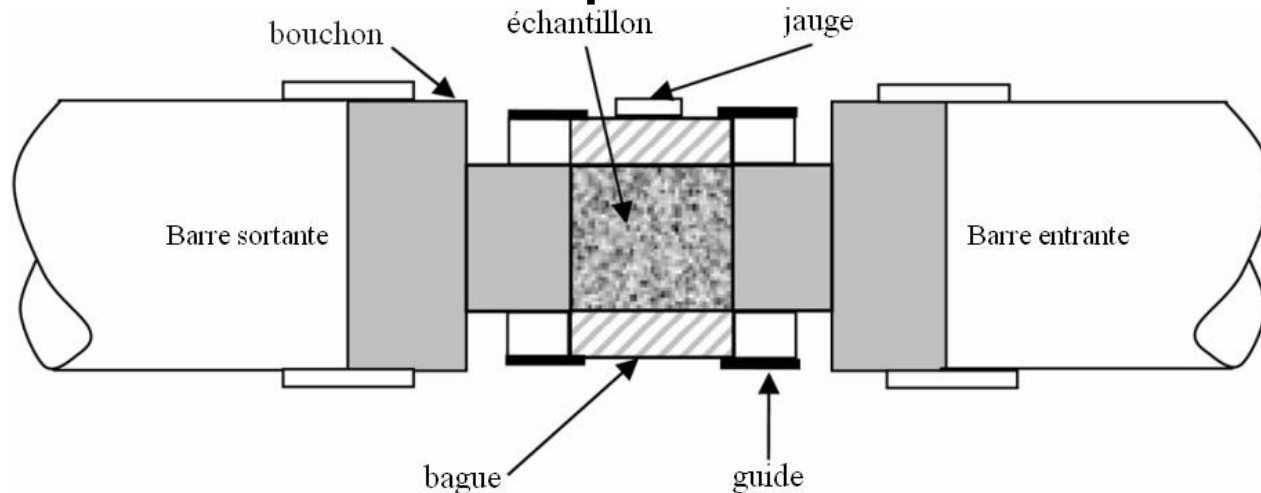


[Bailly 2011]

tube rigide  $\Rightarrow$  chargement œdométrique  
tube plastique parfait  $\Rightarrow$  pression radiale constante imposée

## Moyens de caractérisation expérimentale en dynamique multiaxiale :

### - Confinement passif :



[Bailly 2011]

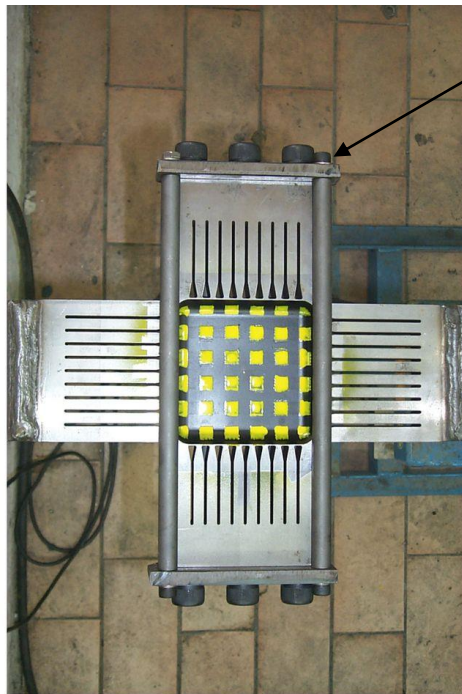
tube rigide  $\Rightarrow$  chargement œdométrique

tube plastique parfait  $\Rightarrow$  pression radiale constante imposée

Inconvénient : rapport des contraintes imposé par le matériau testé ou pression radiale unique

## Moyens de caractérisation expérimentale en dynamique multiaxiale :

### - Confinement « mixte » :

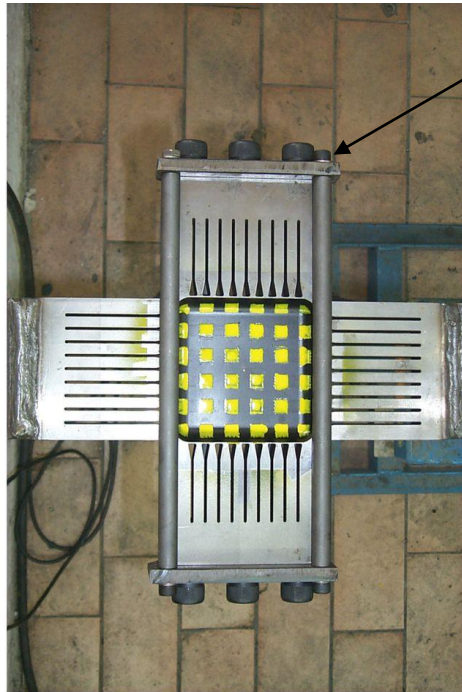


système de pré-serrage

[Albertini 2014]

## Moyens de caractérisation expérimentale en dynamique multiaxiale :

### - Confinement « mixte » :



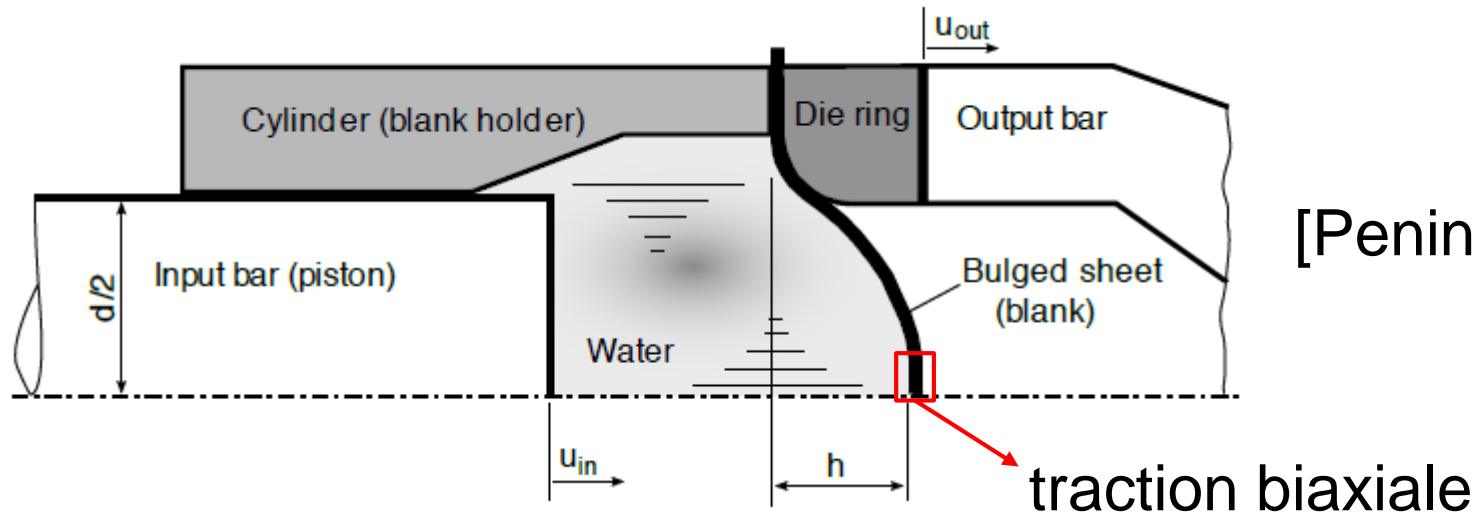
système de pré-serrage

[Albertini 2014]

mêmes inconvénients

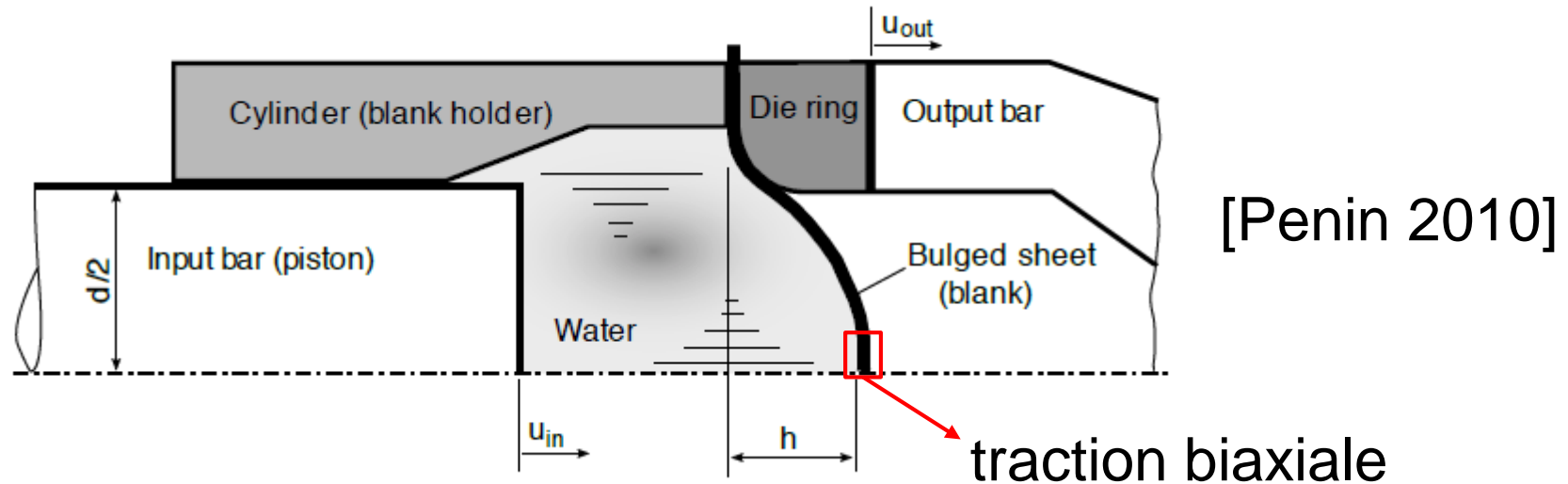
## Moyens de caractérisation expérimentale en dynamique multiaxiale :

### - Essai Jovignot (ou bulge-test) :



## Moyens de caractérisation expérimentale en dynamique multiaxiale :

### - Essai Jovignot (ou bulge-test) :



- Inconvénients :
- mesure des déplacements difficile
  - nécessité d'avoir un échantillon en plaque

## Moyens de caractérisation expérimentale en dynamique multiaxiale :

### - Systèmes de barres perpendiculaires :



[Hummeltenberg 2012]

## Moyens de caractérisation expérimentale en dynamique multiaxiale :

### - Systèmes de barres perpendiculaires :



[Hummeltenberg 2012]

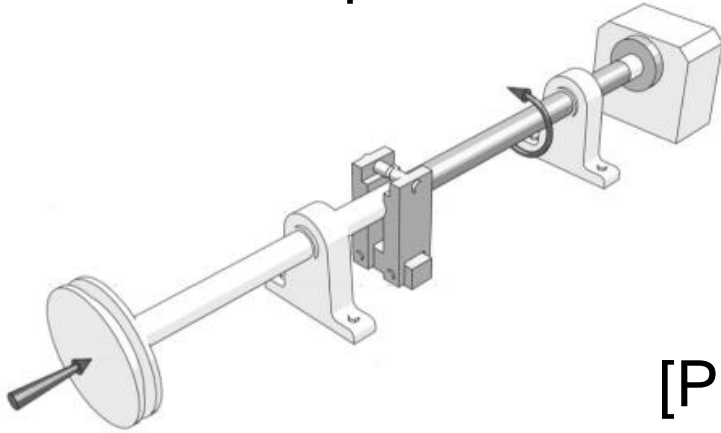
- Inconvénients :
- mise en place
  - problème de synchronisation des impacts



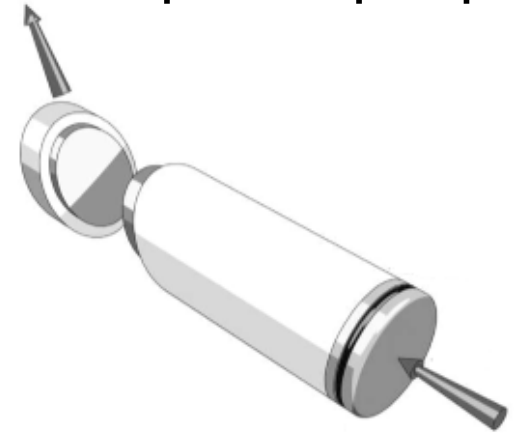
## Moyens de caractérisation expérimentale en dynamique multiaxiale :

### - Traction/compression + cisaillement :

barres de compression/torsion :



impact oblique de plaques :

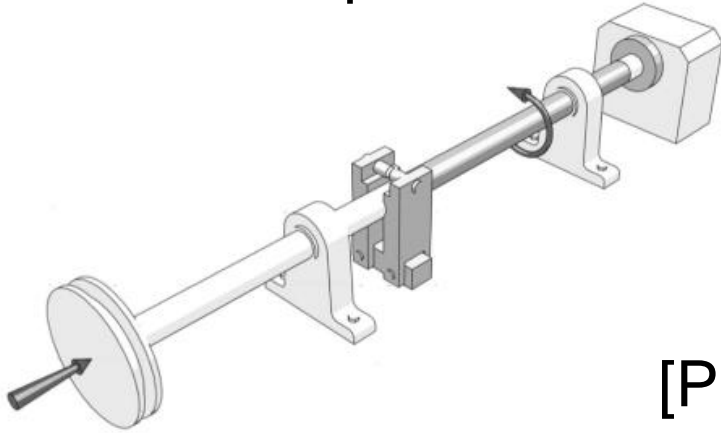


[Philippon 2011]

## Moyens de caractérisation expérimentale en dynamique multiaxiale :

### - Traction/compression + cisaillement :

barres de compression/torsion :



impact oblique de plaques :



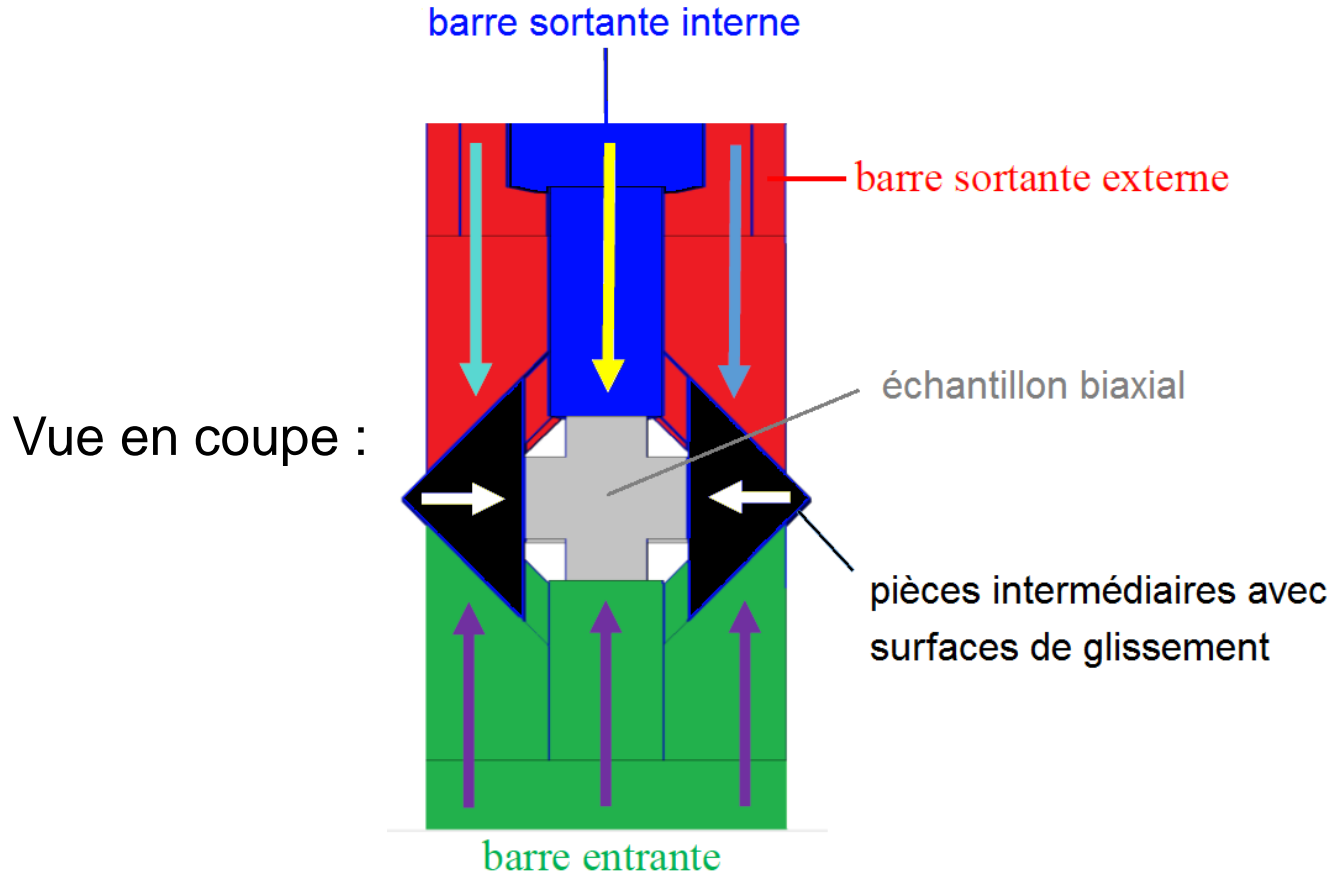
[Philippon 2011]

Onde de traction/compression plus rapide que celle de cisaillement  
Appliqué principalement à l'étude du frottement

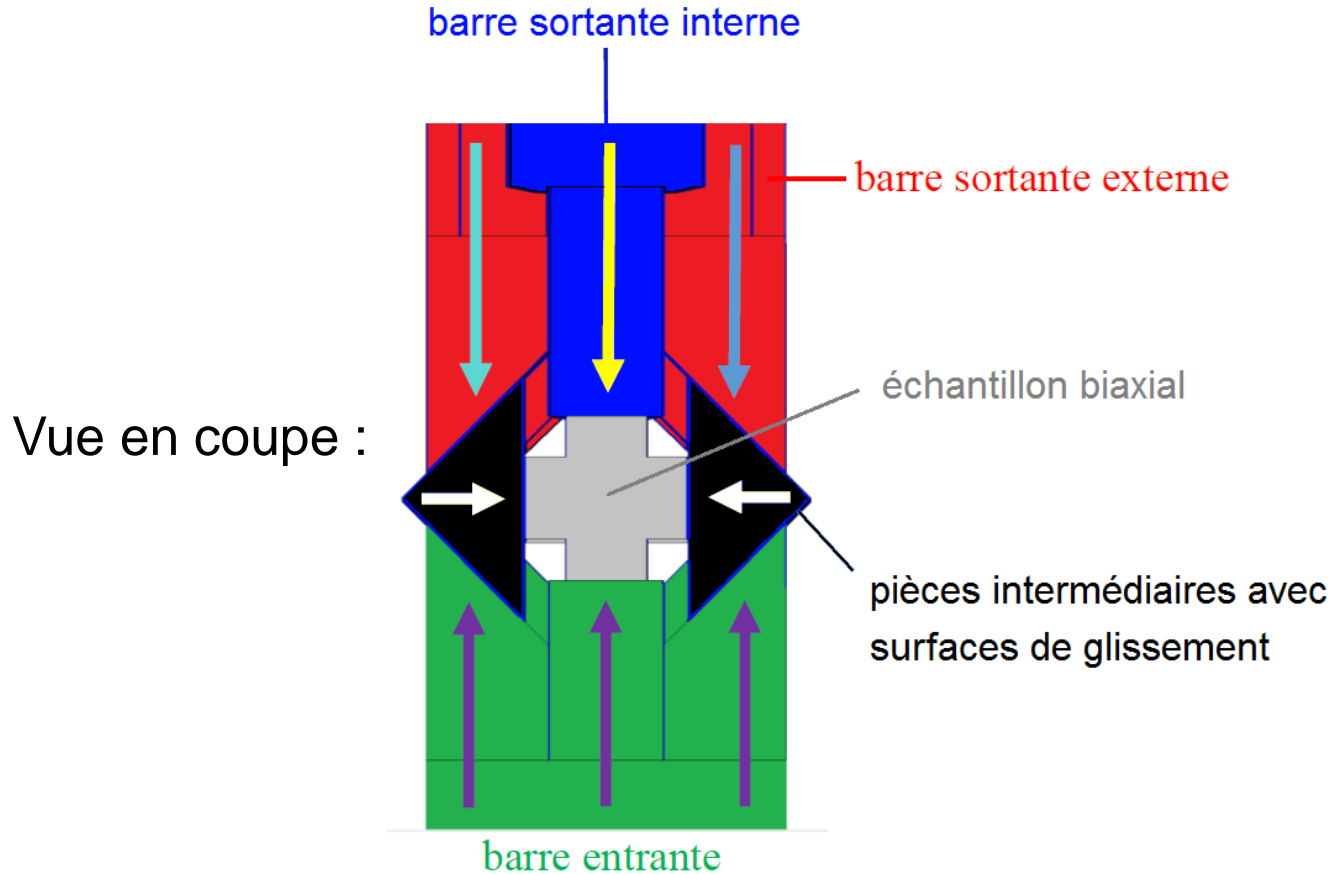
# Sommaire :

- **Contexte industriel**
- **Conception d'un système de barres**
- **Résultats expérimentaux**
- **Conclusions et perspectives**

Idée pour un essai de compression biaxiale : utilisation d'un unique projectile (pas de problème de synchronisation des impacts) et de deux barres sortantes coaxiales (une par axe).



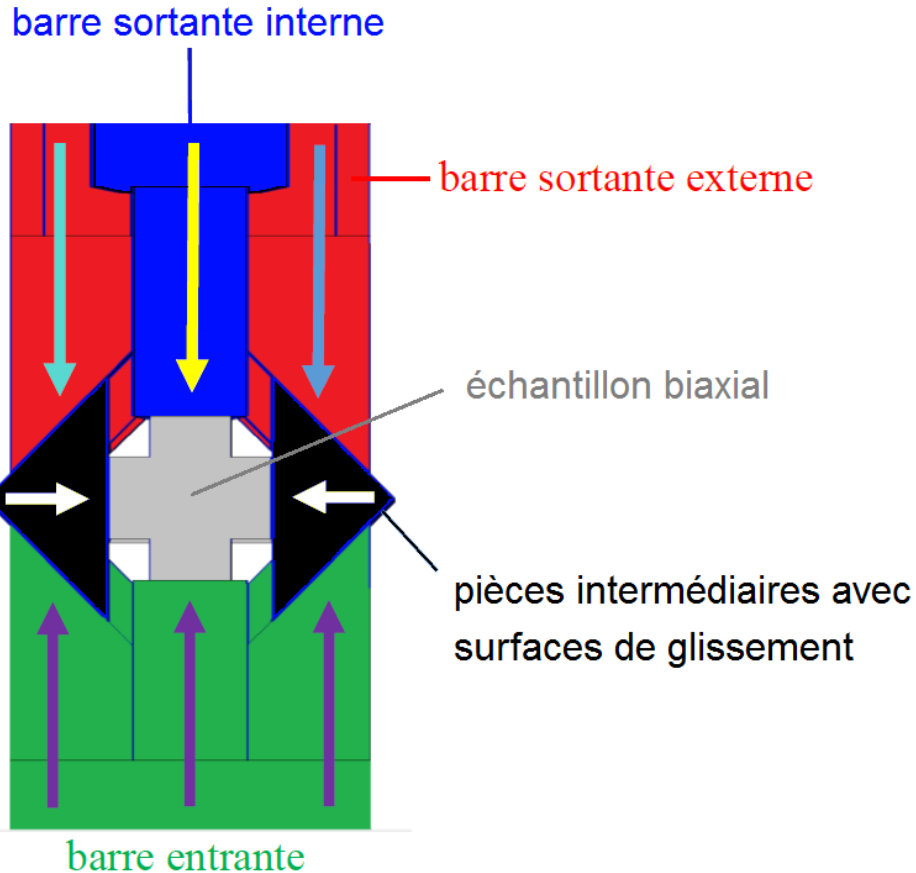
Idée pour un essai de compression biaxiale : utilisation d'un unique projectile (pas de problème de synchronisation des impacts) et de deux barres sortantes coaxiales (une par axe).



Rapport des sollicitations imposé par le rapport des impédances des barres sortantes et par les angles des rampes (et non par le comportement de l'échantillon).

## Aspects pratiques :

Vue en coupe :



Diamètres extérieurs de 22 mm

⇒ Utilisation du banc existant au LMT  
(projectile + barre entrante)

Diamètre intérieur de 18 mm pour la barre  
externe

Diamètre de 12 mm pour la barre interne

⇒ Utilisation de profilés d'acier du  
commerce

Pièces aisément usinables (à l'échelle)

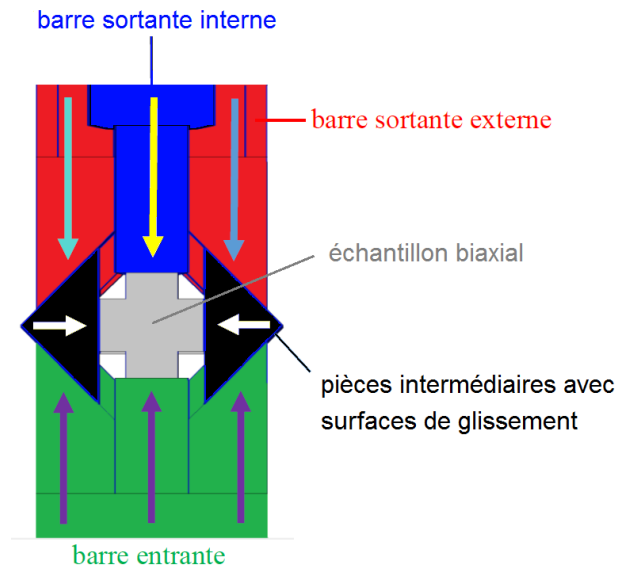
# Vérification de la faisabilité de l'essai à l'aide de simulations numériques :

Echantillon avec masse volumique de  $2800 \text{ kg/m}^3$ , module d'Young de  $70 \text{ GPa}$ , coefficient de Poisson de  $0,3$  et critère de plasticité de Von Mises à  $150 \text{ MPa}$  sans écrouissage (aluminium)

Autres pièces avec masse volumique de  $8050 \text{ kg/m}^3$ , module d'Young de  $170 \text{ GPa}$ , coefficient de Poisson de  $0,3$  (acier des barres)

Vitesse initiale du projectile :  $6 \text{ m/s}$

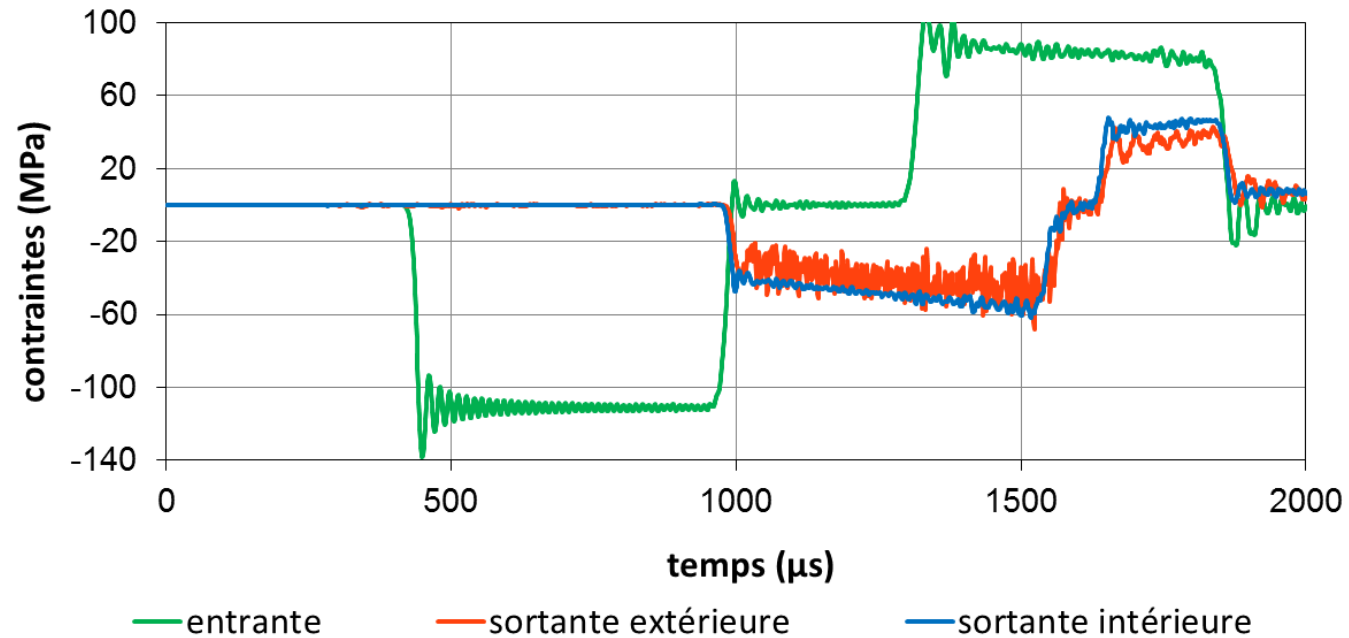
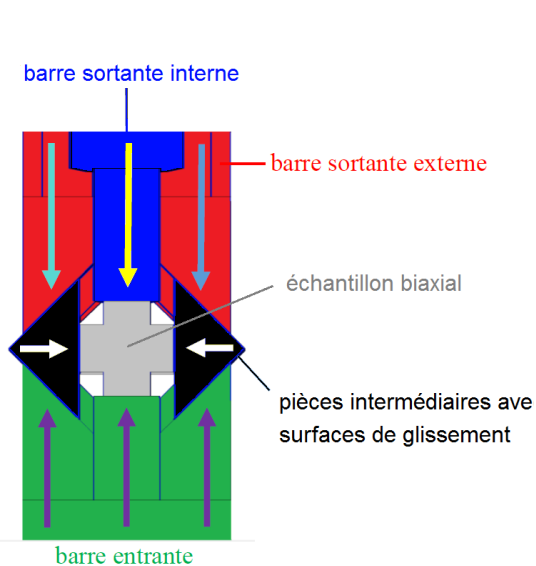
Coefficient de frottement :  $0,05$



## Dépouillement virtuel :

Déformations longitudinales mesurées par des jauges :

- Au milieu de la barre entrante (de 4 m, et projectile de 1.25 m)
- Sur les barres sortantes (de 2 m), à 0.5 m des interfaces

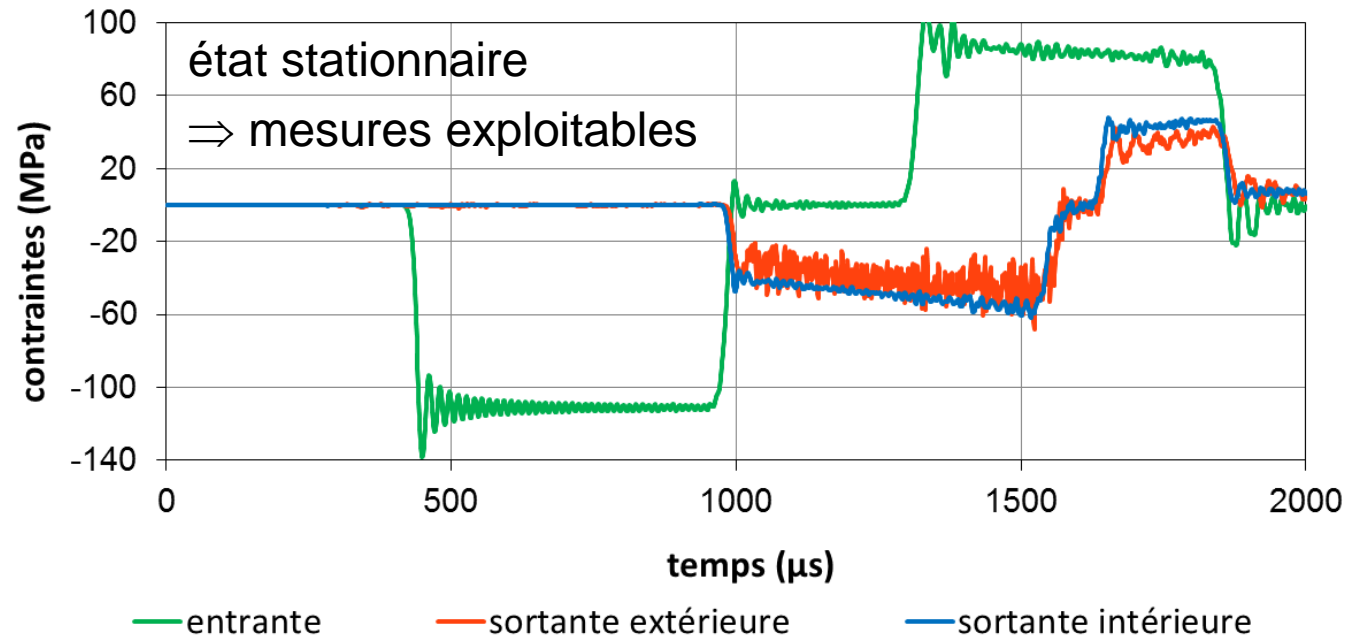
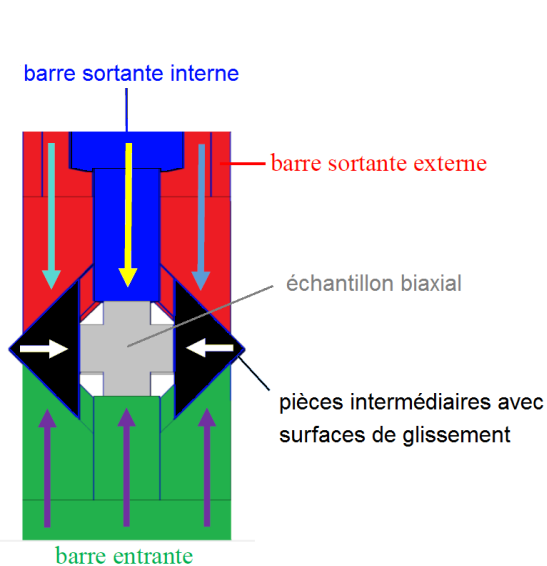




## Dépouillement virtuel :

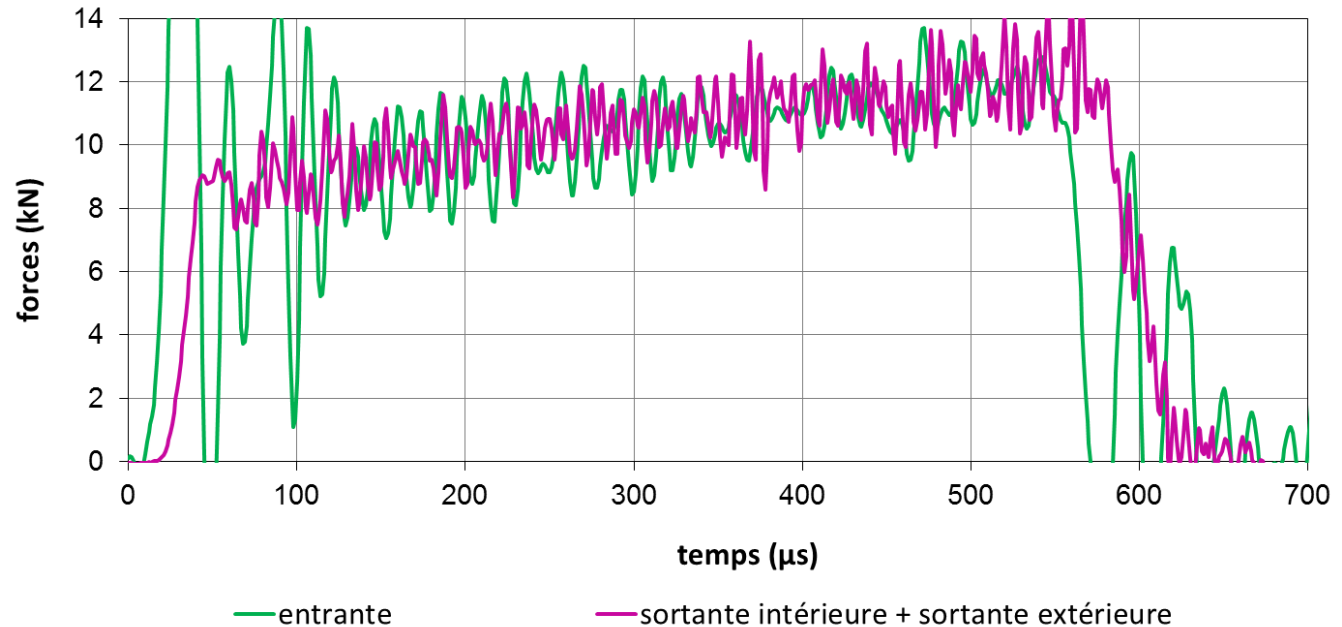
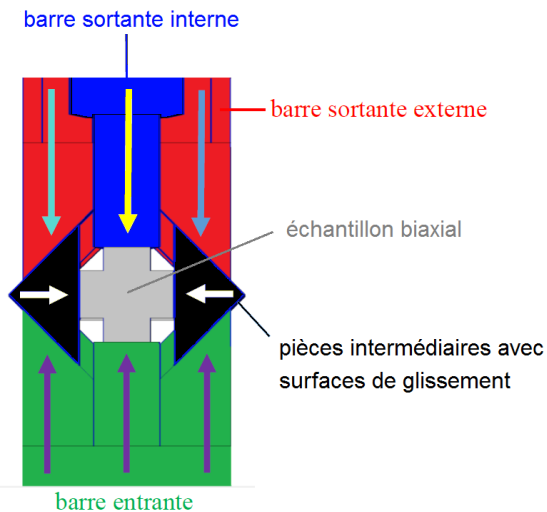
Déformations longitudinales mesurées par des jauges :

- Au milieu de la barre entrante (de 4 m, et projectile de 1.25 m)
- Sur les barres sortantes (de 2 m), à 0.5 m des interfaces



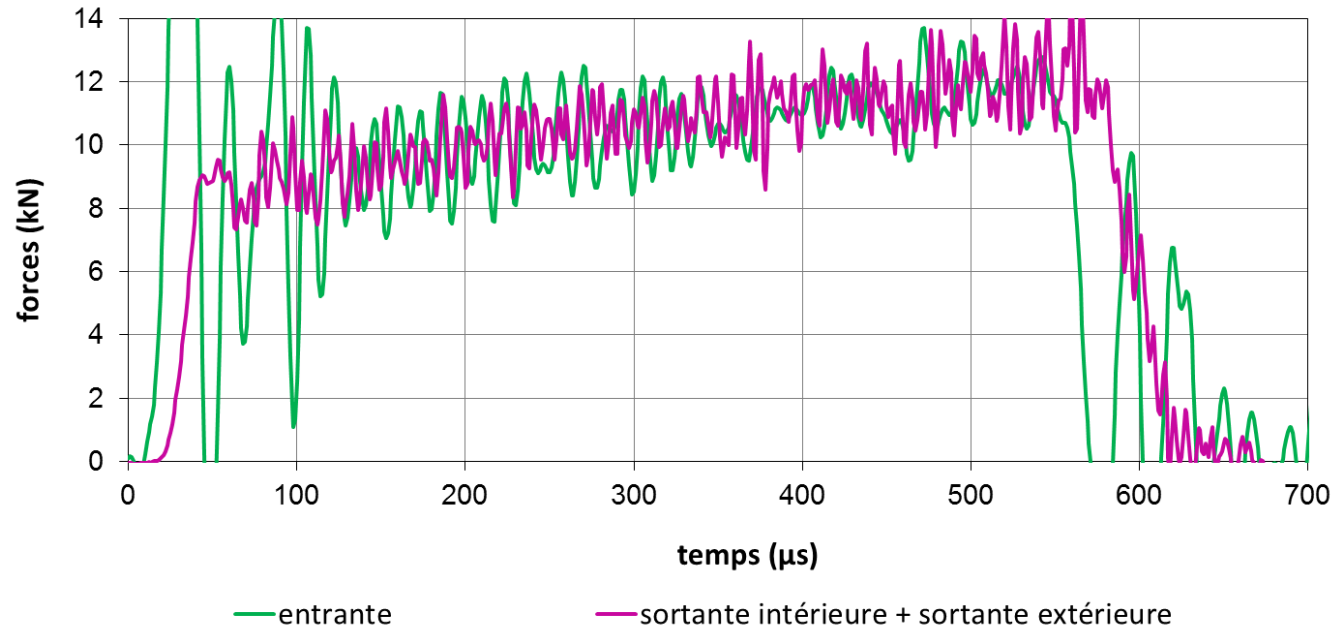
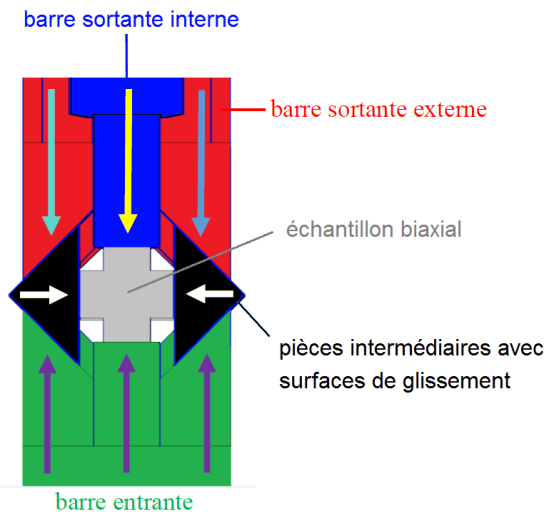
# Dépouillement virtuel :

Application des formules de Hopkinson :



# Dépouillement virtuel :

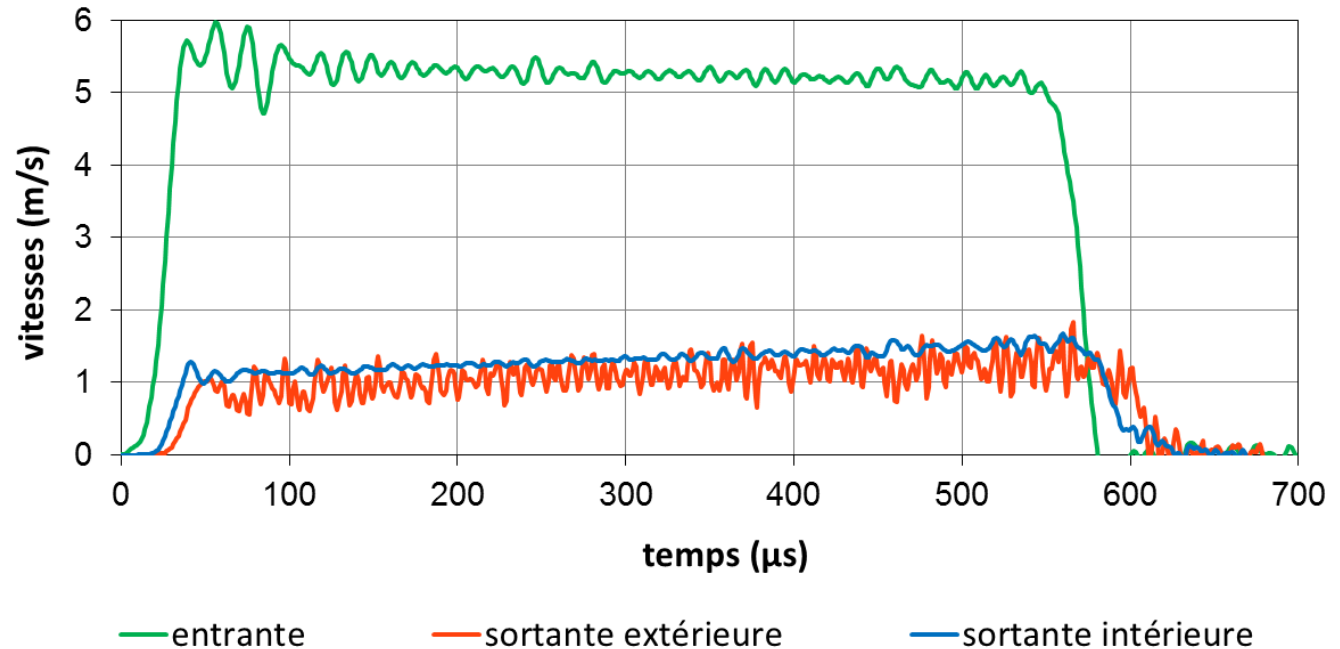
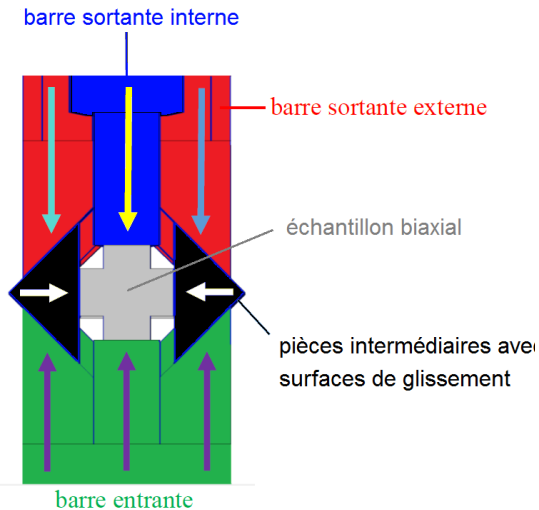
Application des formules de Hopkinson :



⇒ équilibre

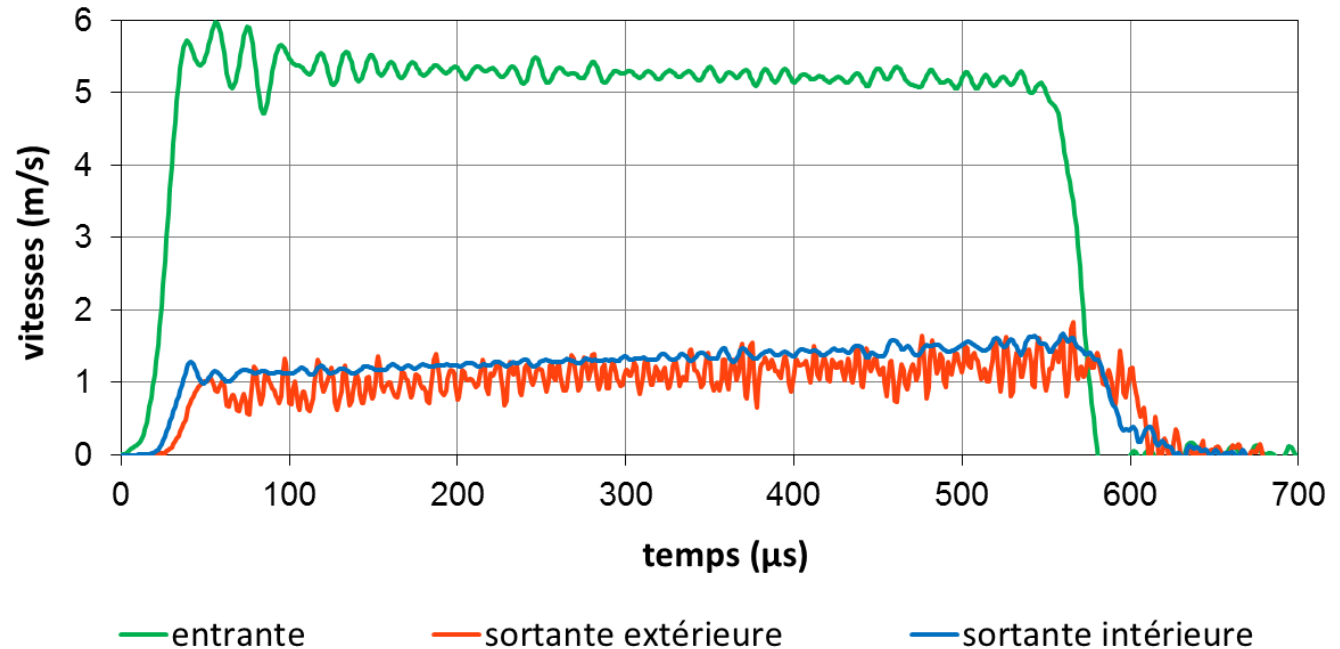
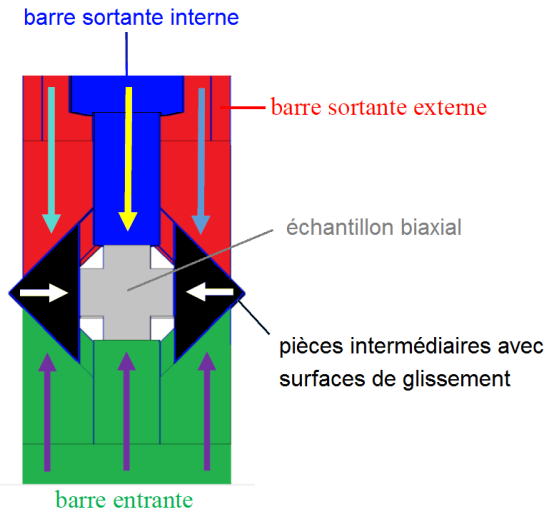
# Dépouillement virtuel :

Application des formules de Hopkinson :



# Dépouillement virtuel :

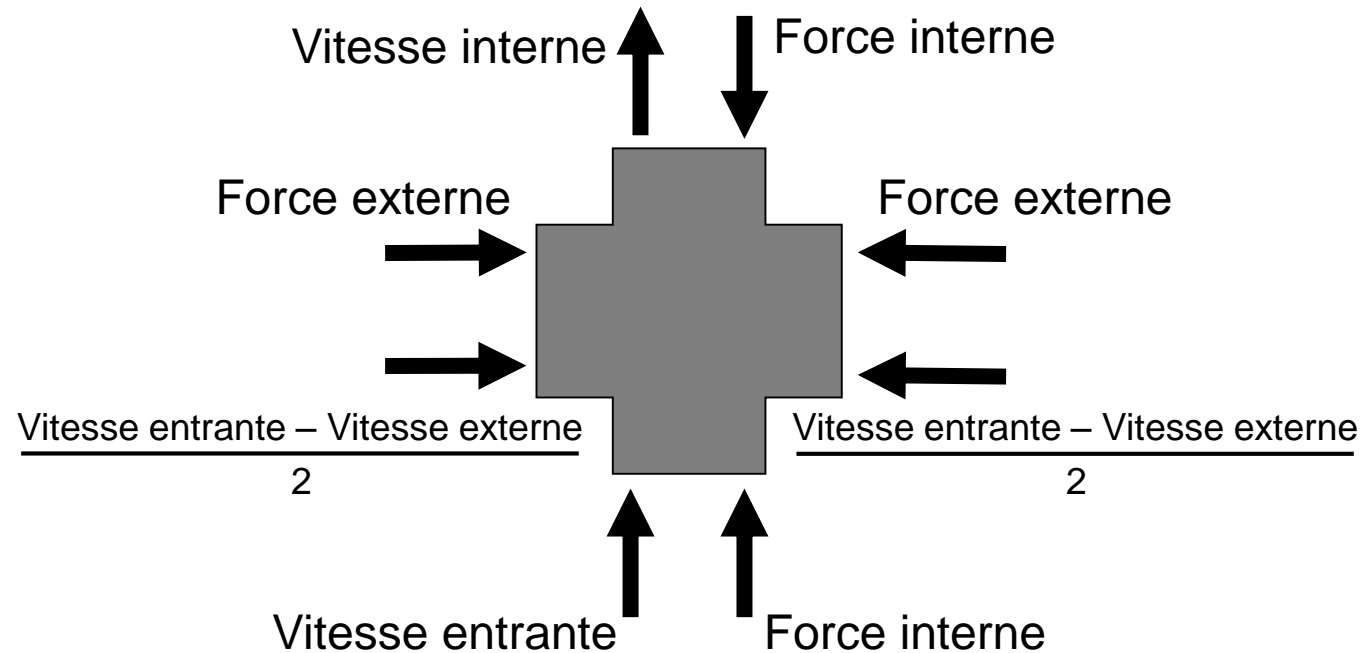
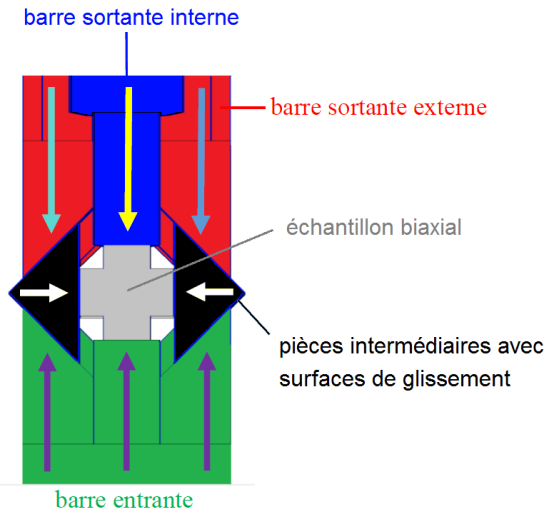
Application des formules de Hopkinson :



⇒ vitesses de déformation stationnaires

# Forces et vitesses sur l'échantillon :

Frottements, jeux et déformations des pièces intermédiaires négligés :



# Sommaire :

- **Contexte industriel**
- **Conception d'un système de barres**
- **Résultats expérimentaux**
- **Conclusions et perspectives**

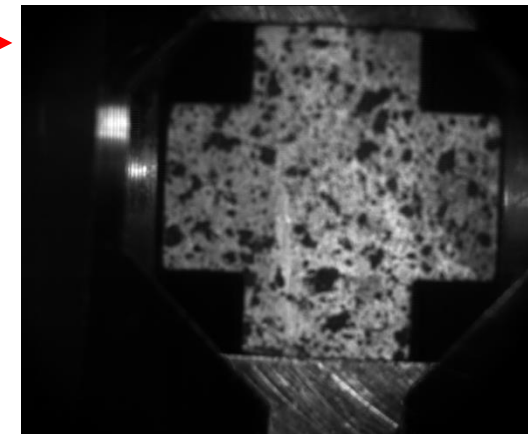
## Instrumentation de l'essai :



Jauges de déformation sur les trois barres :  
Fréquence d'acquisition de 500 kHz



Observation de l'échantillon (caméra rapide) :  
Fréquence d'acquisition de 15 kHz  
Résolution de 768 pixels  $\times$  648 pixels





## Dépouillement des mesures des jauges :



mesures de déformation + formules de Hopkinson

⇒ forces et vitesses aux interfaces barres-montage

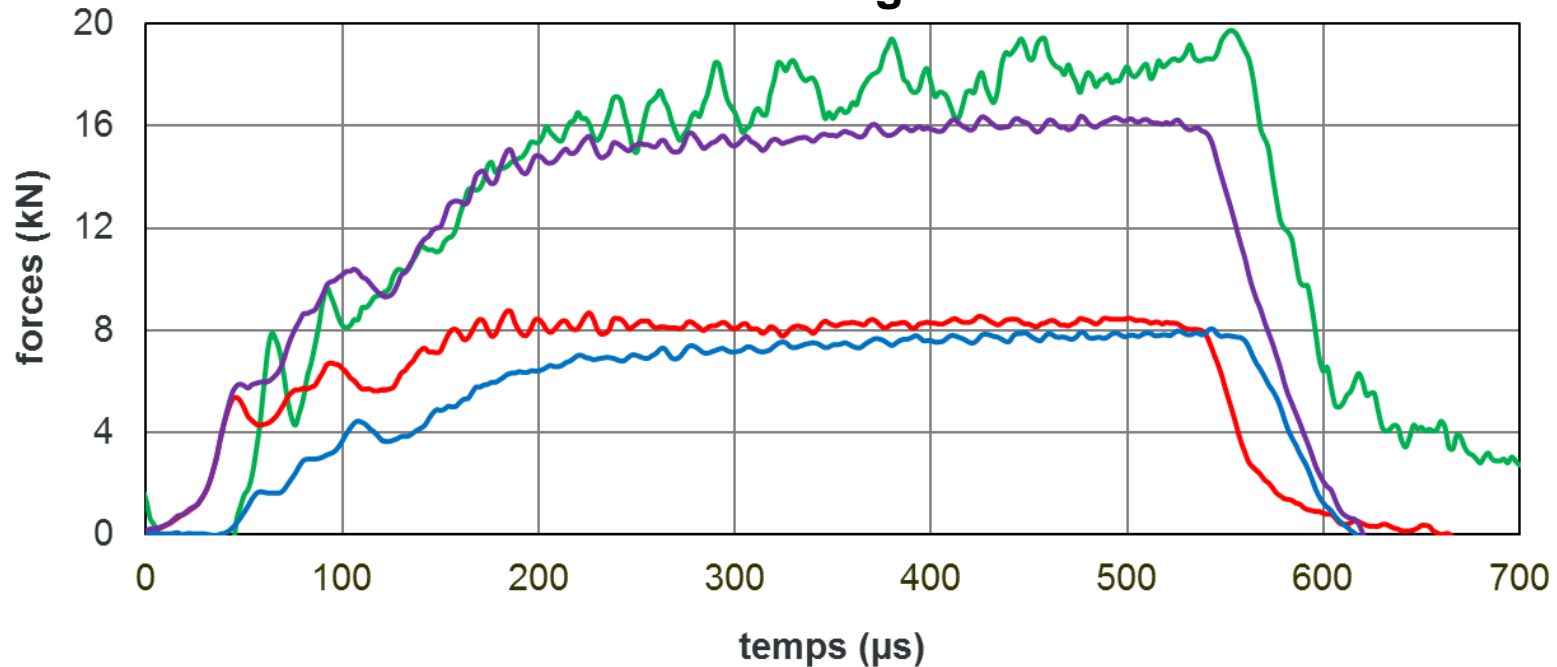
vitesses aux interfaces barres-montage + intégration numérique

⇒ déplacements aux interfaces barres-montage

## Dépouillement des mesures des jauges :



montage

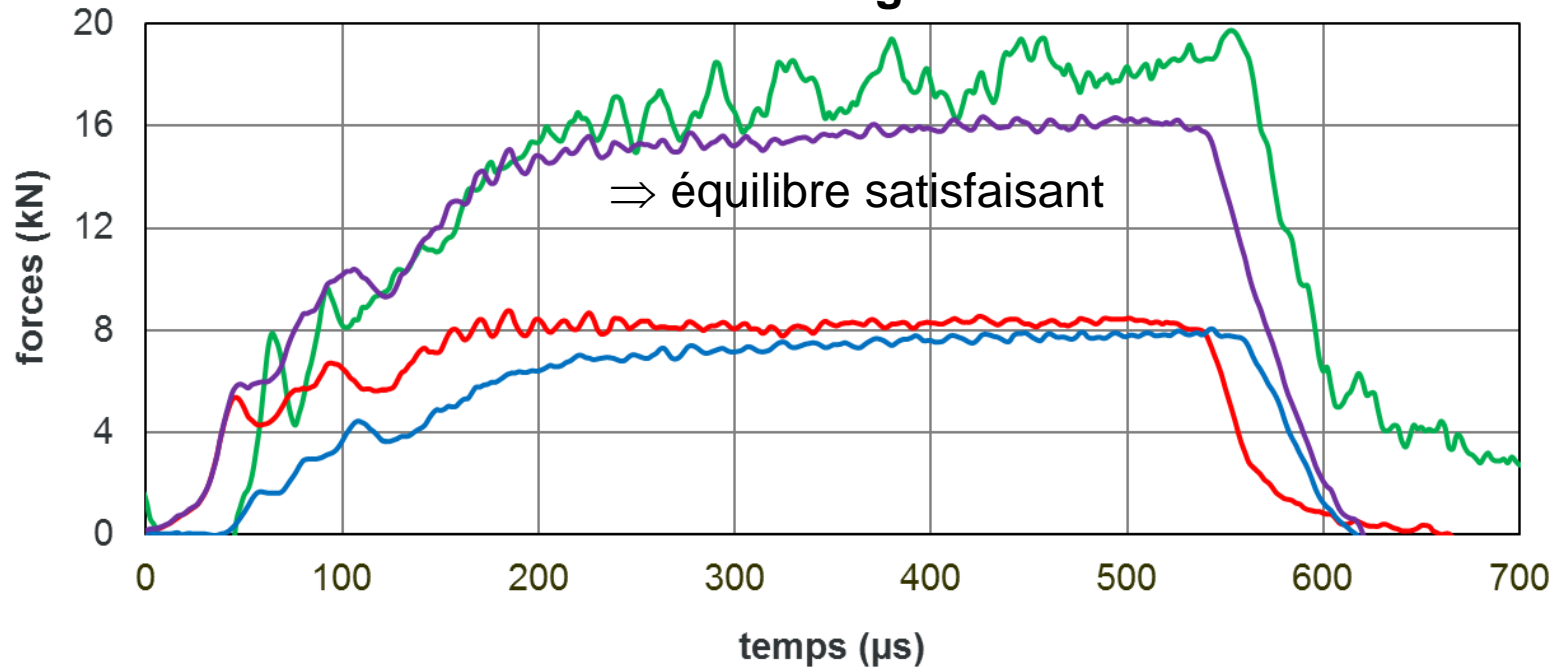


— entrante — sortante externe — sortante interne — sortante interne + sortante externe

## Dépouillement des mesures des jauges :

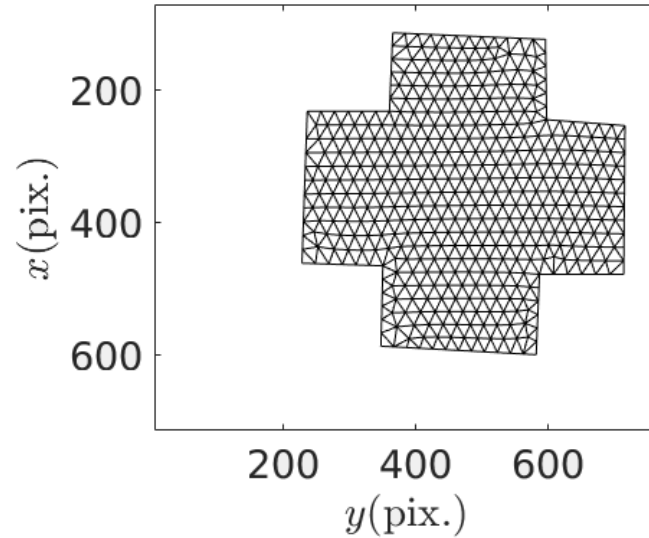
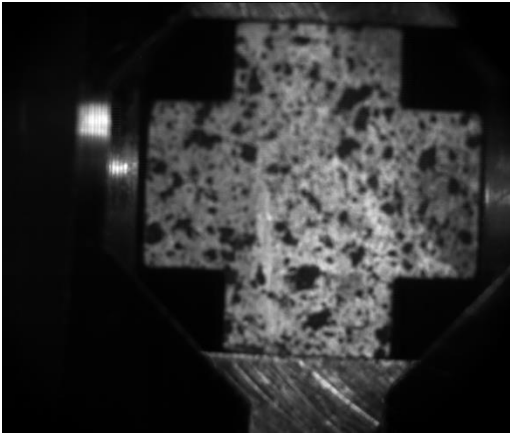


montage



— entrante — sortante externe — sortante interne — sortante interne + sortante externe

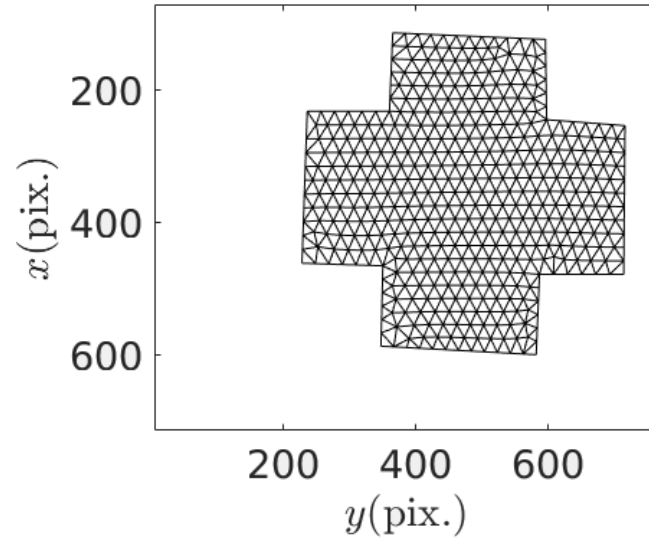
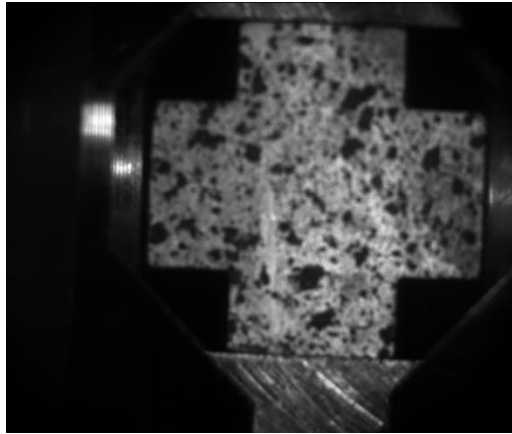
## Exploitation des images à l'aide de Correli RT3 :



Maillage :

- éléments triangulaires à 3 nœuds
- taille des éléments : 20 pixels

## Exploitation des images à l'aide de Correli RT3 :



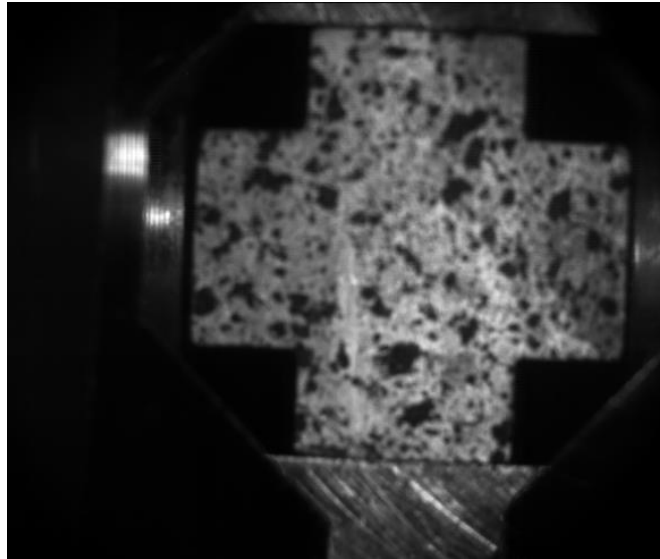
Maillage :

- éléments triangulaires à 3 nœuds
- taille des éléments : 20 pixels

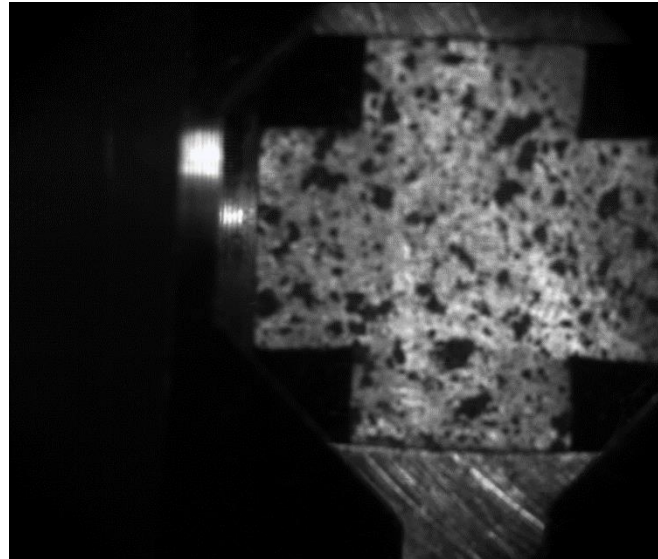
Longueur de régularisation élastique (pour filtrer le bruit) :

- déplacements bruités à 20 pixels
  - Dépendance des déplacements à la longueur, puis convergence vers 100 pixels
- ⇒ choix d'une longueur de 100 pixels

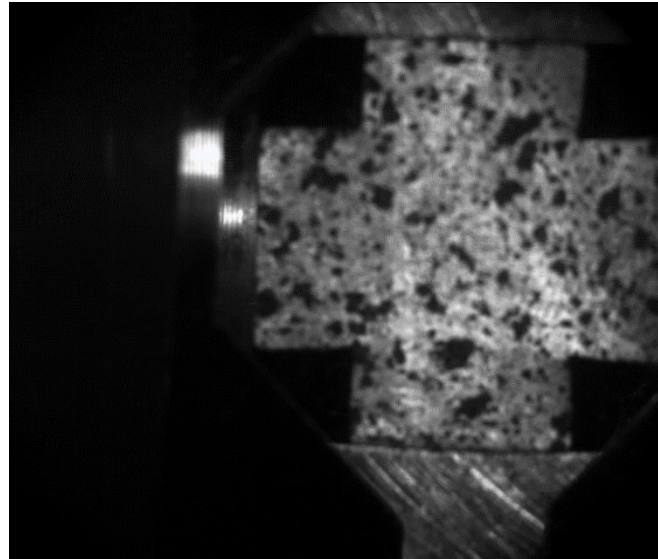
## Exploitation des images à l'aide de Correli RT3 :



## Exploitation des images à l'aide de Correli RT3 :



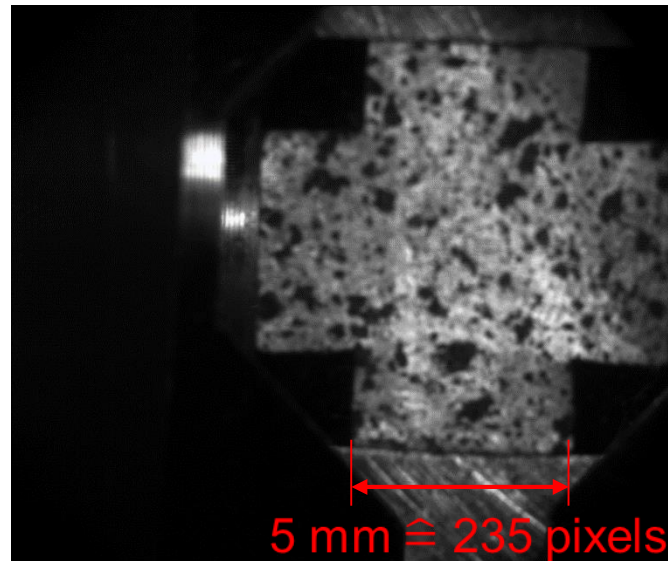
## Exploitation des images à l'aide de Correli RT3 :



⇒ Calcul du champ de déplacement  $u$  en pixels

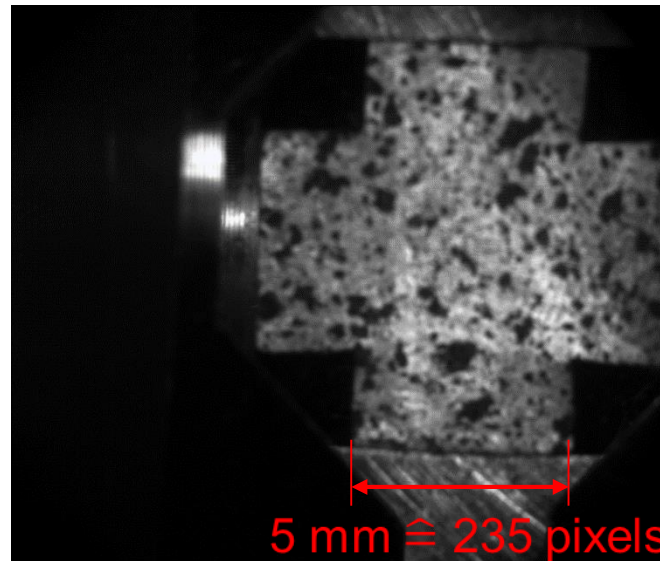


## Exploitation des images à l'aide de Correli RT3 :



⇒ Calcul du champ de déplacement  $u$  en pixels

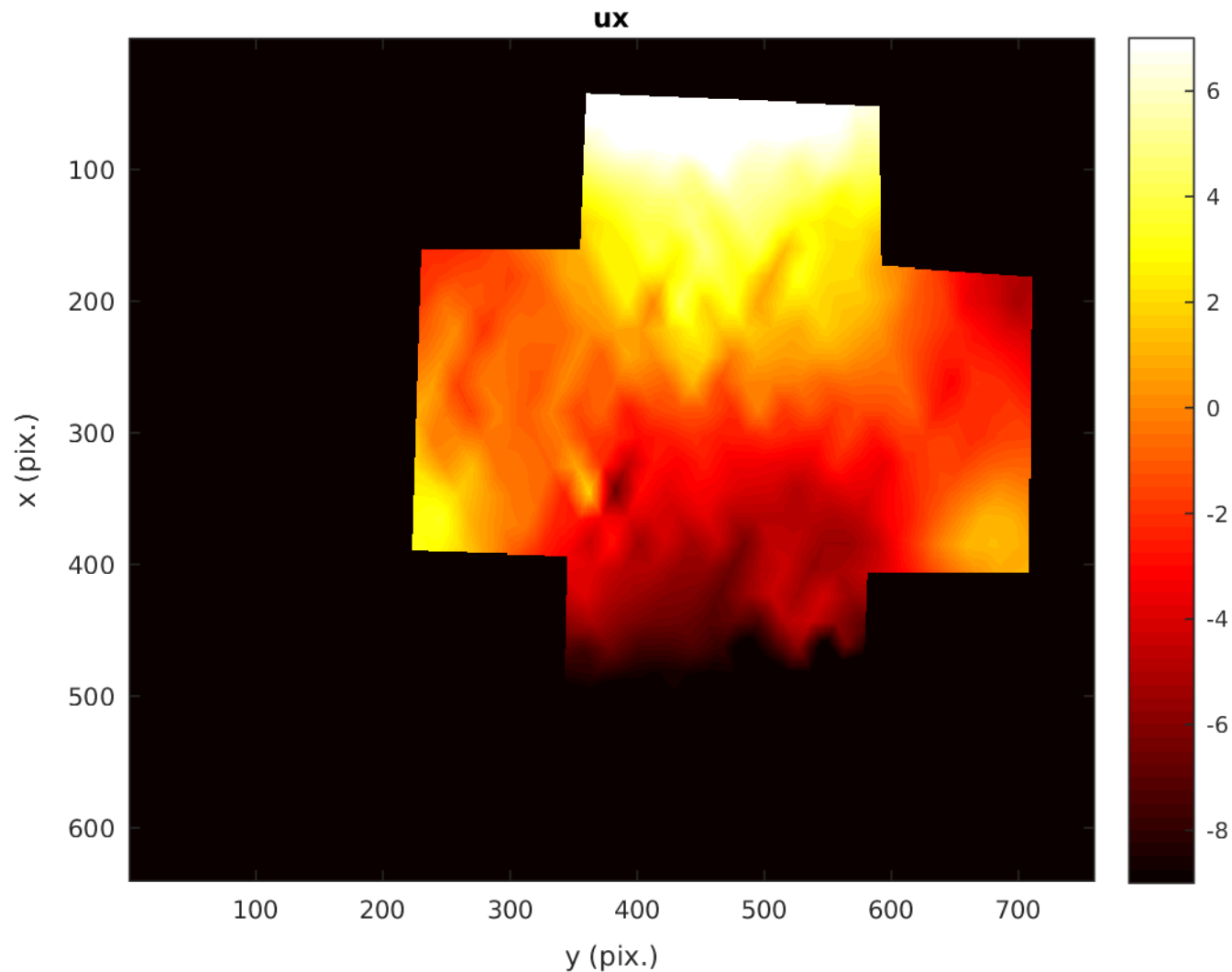
## Exploitation des images à l'aide de Correli RT3 :



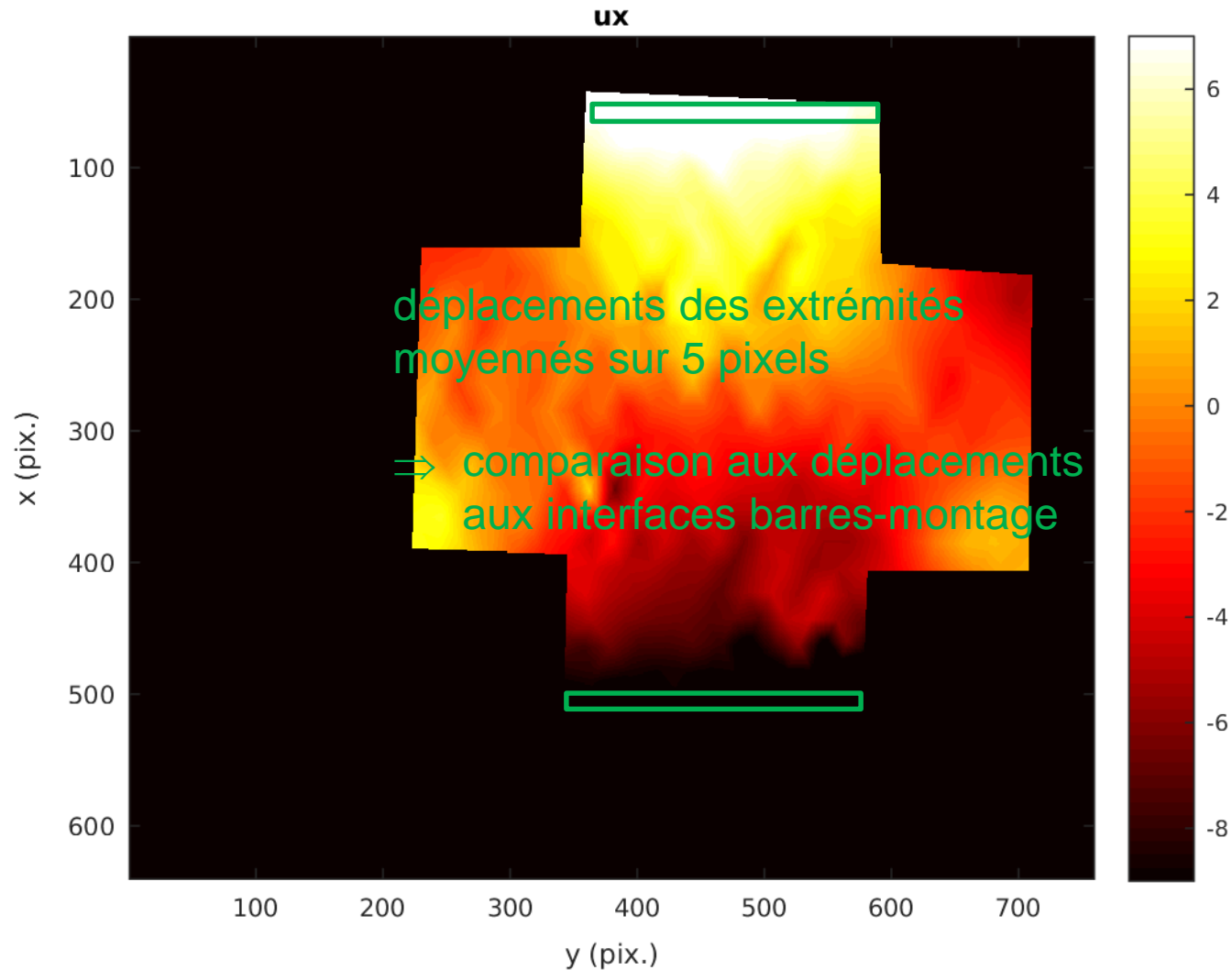
⇒ Calcul du champ de déplacement  $u$  en pixels

⇒ Calcul du champ de déplacement  $u$  en mm

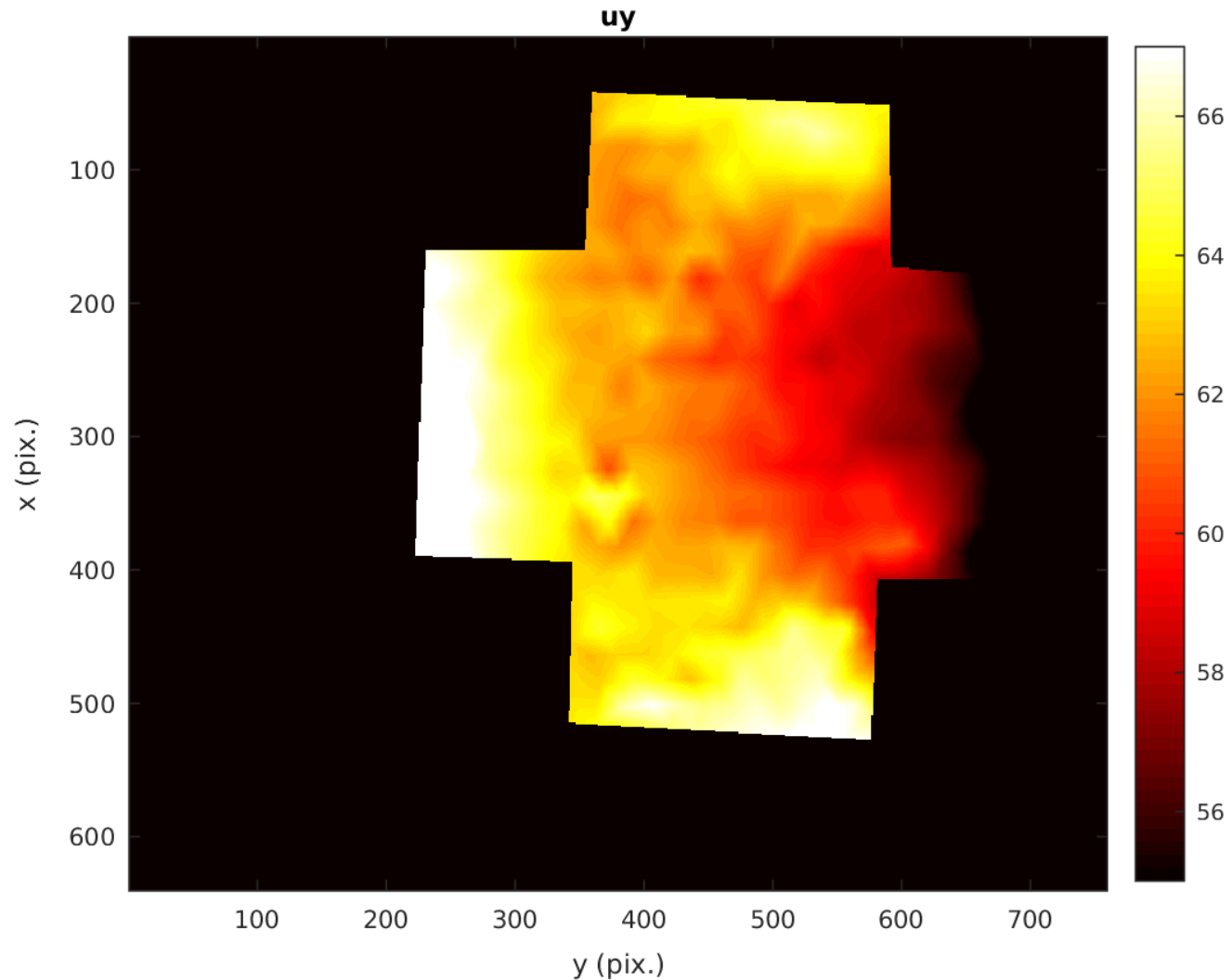
# Exploitation des images à l'aide de Correli RT3 :



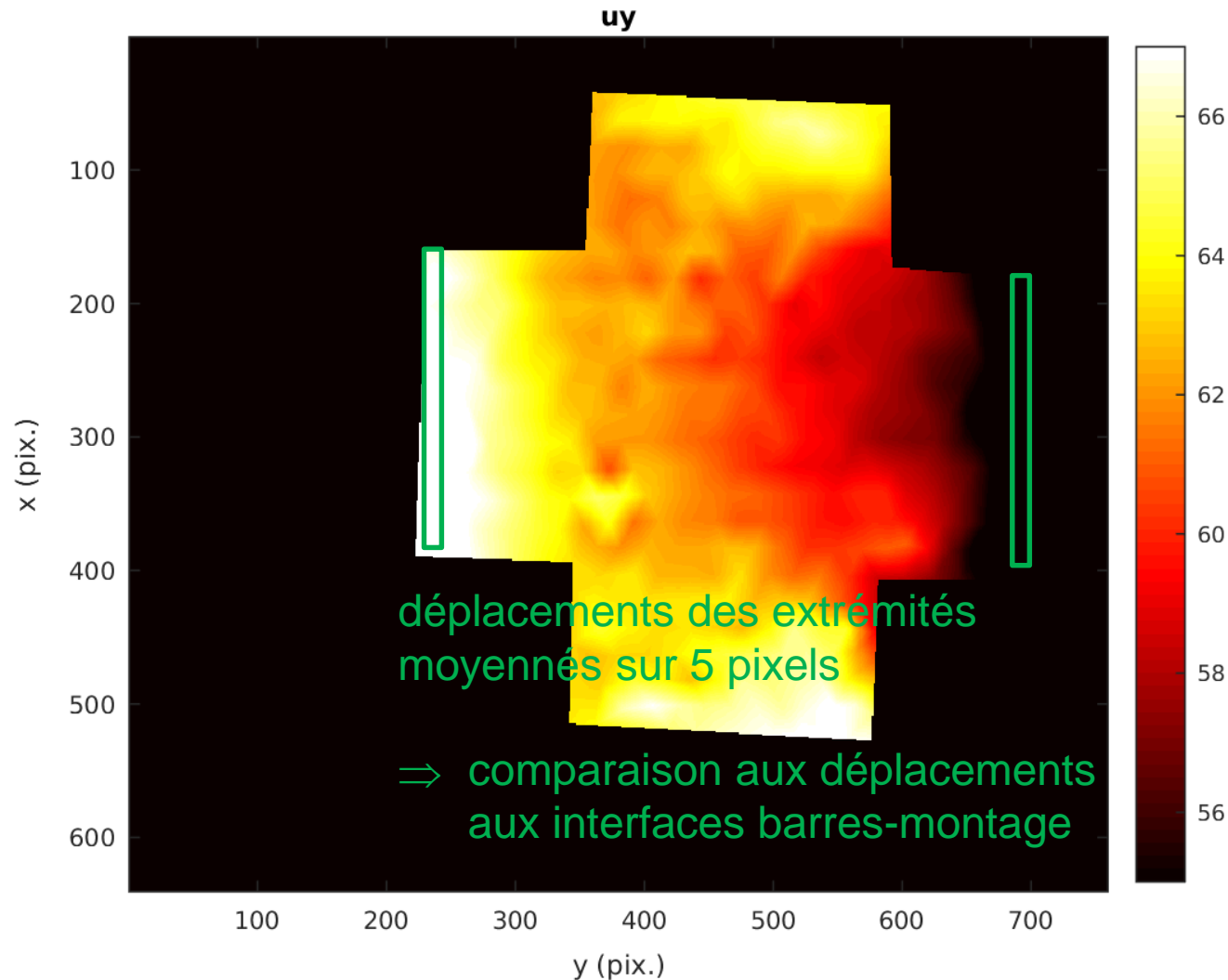
# Exploitation des images à l'aide de Correli RT3 :



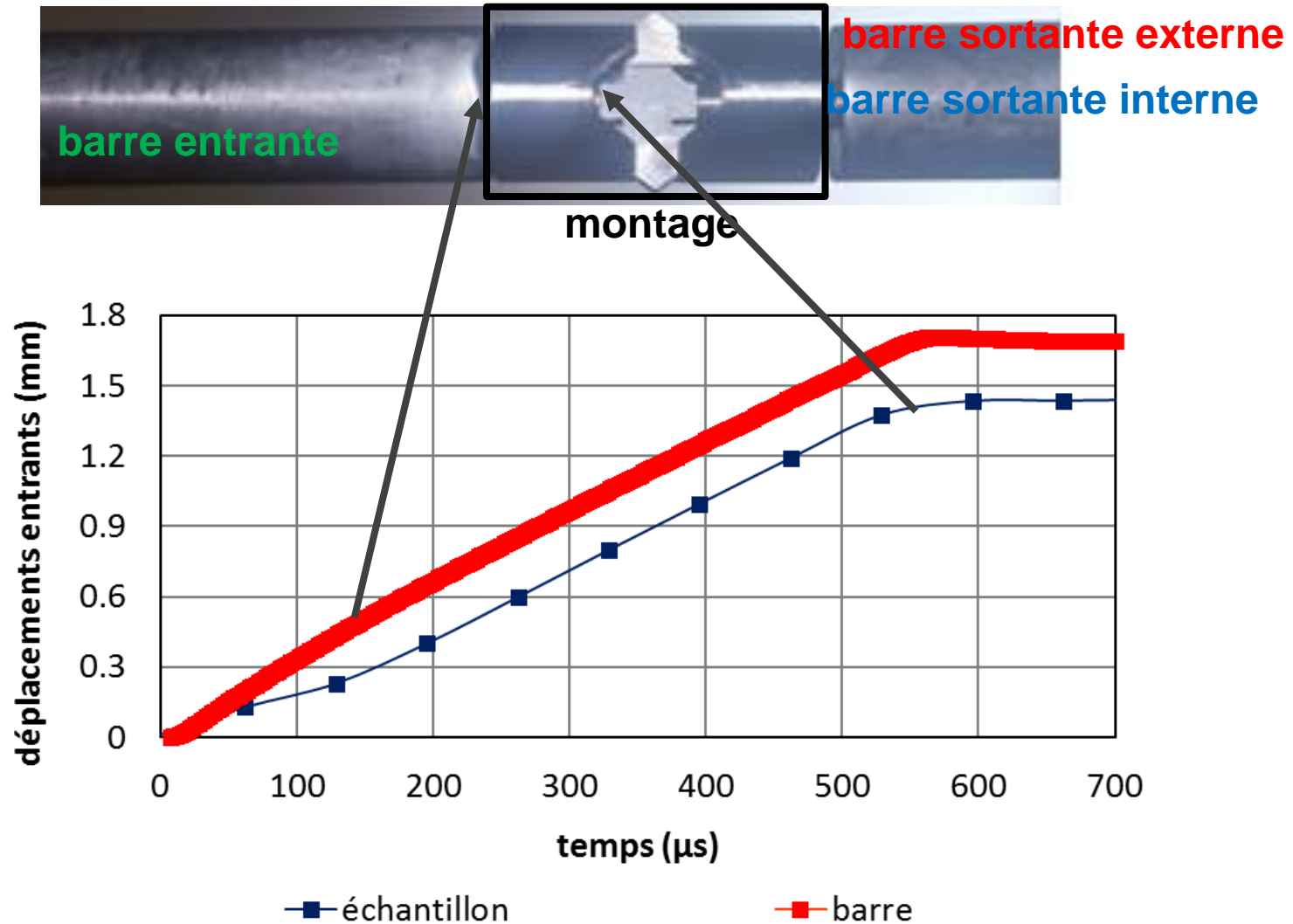
# Exploitation des images à l'aide de Correli RT3 :



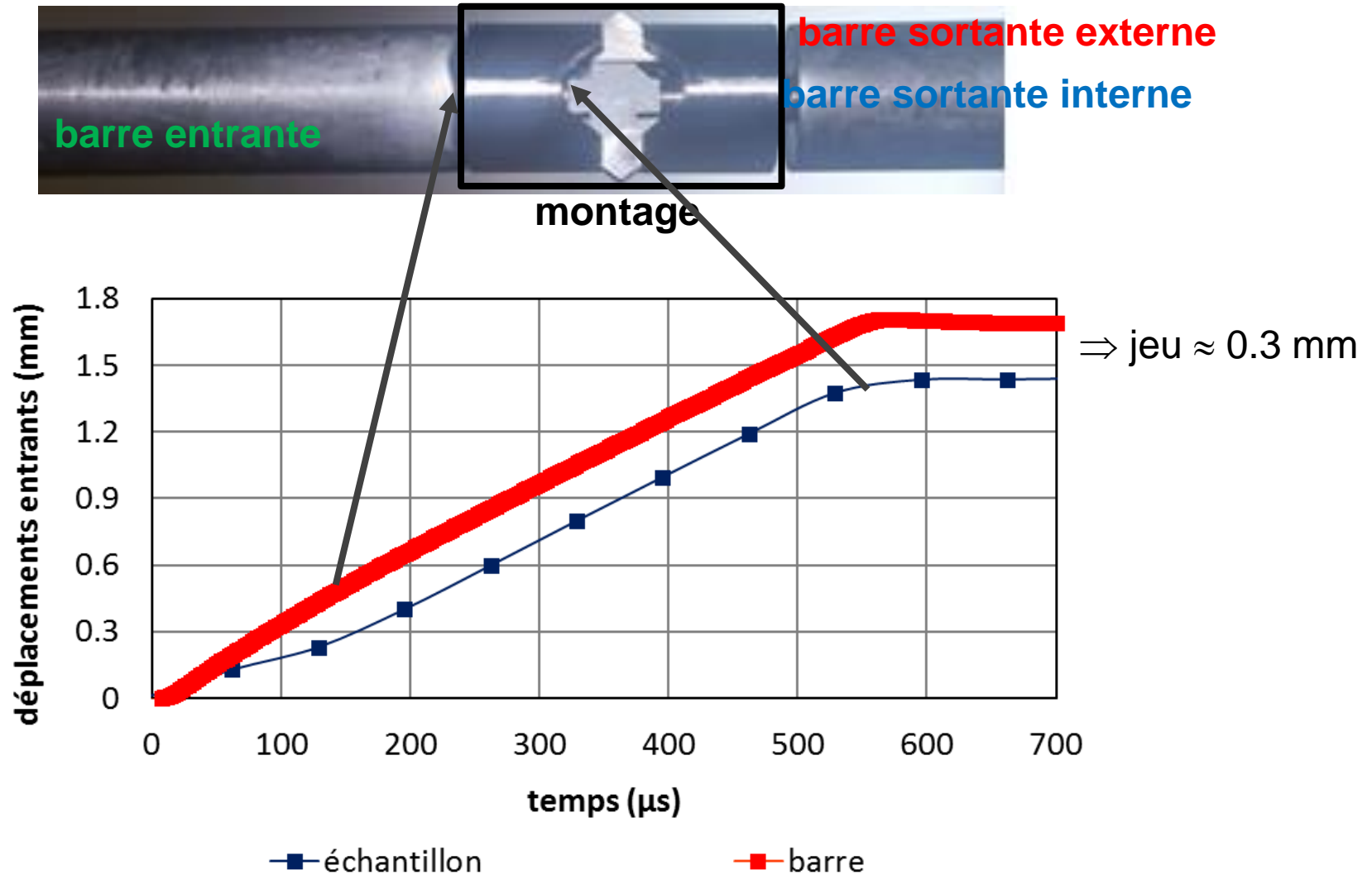
# Exploitation des images à l'aide de Correli RT3 :



## Comparaison des déplacements mesurés sur les barres et dans l'échantillon :

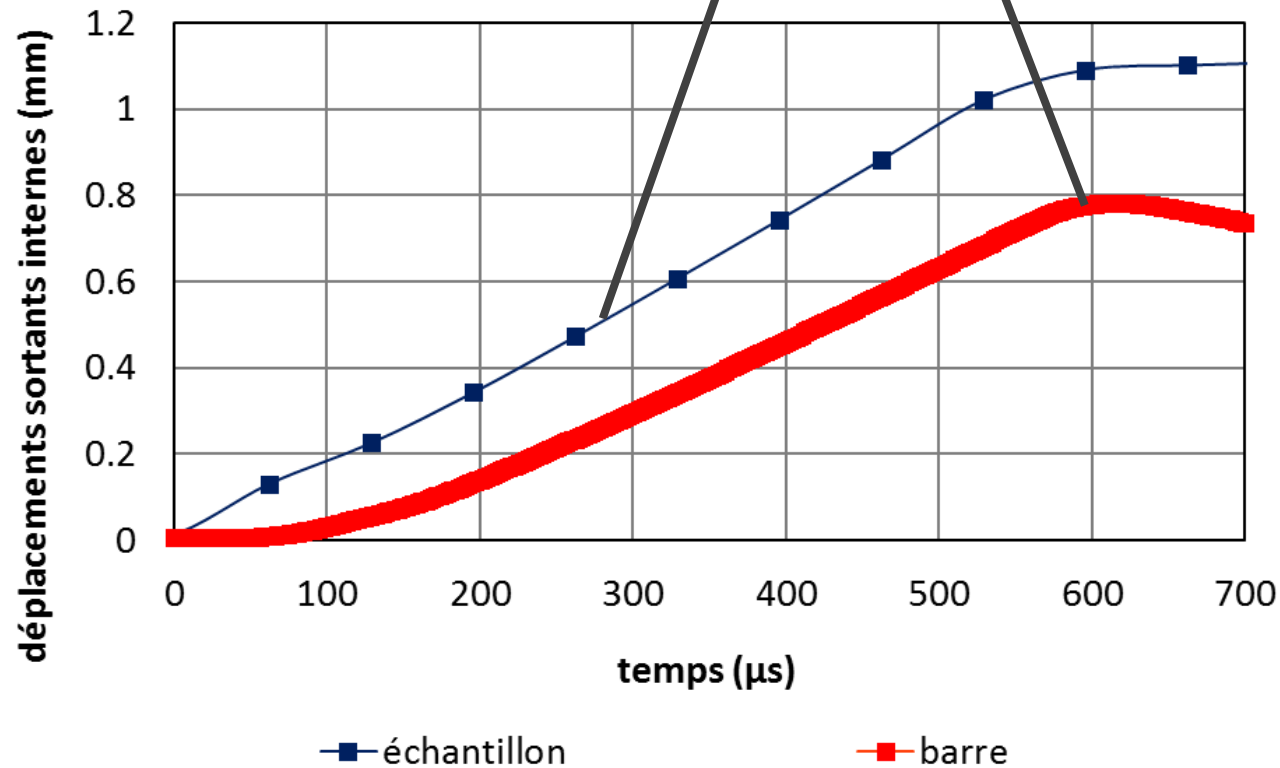


## Comparaison des déplacements mesurés sur les barres et dans l'échantillon :

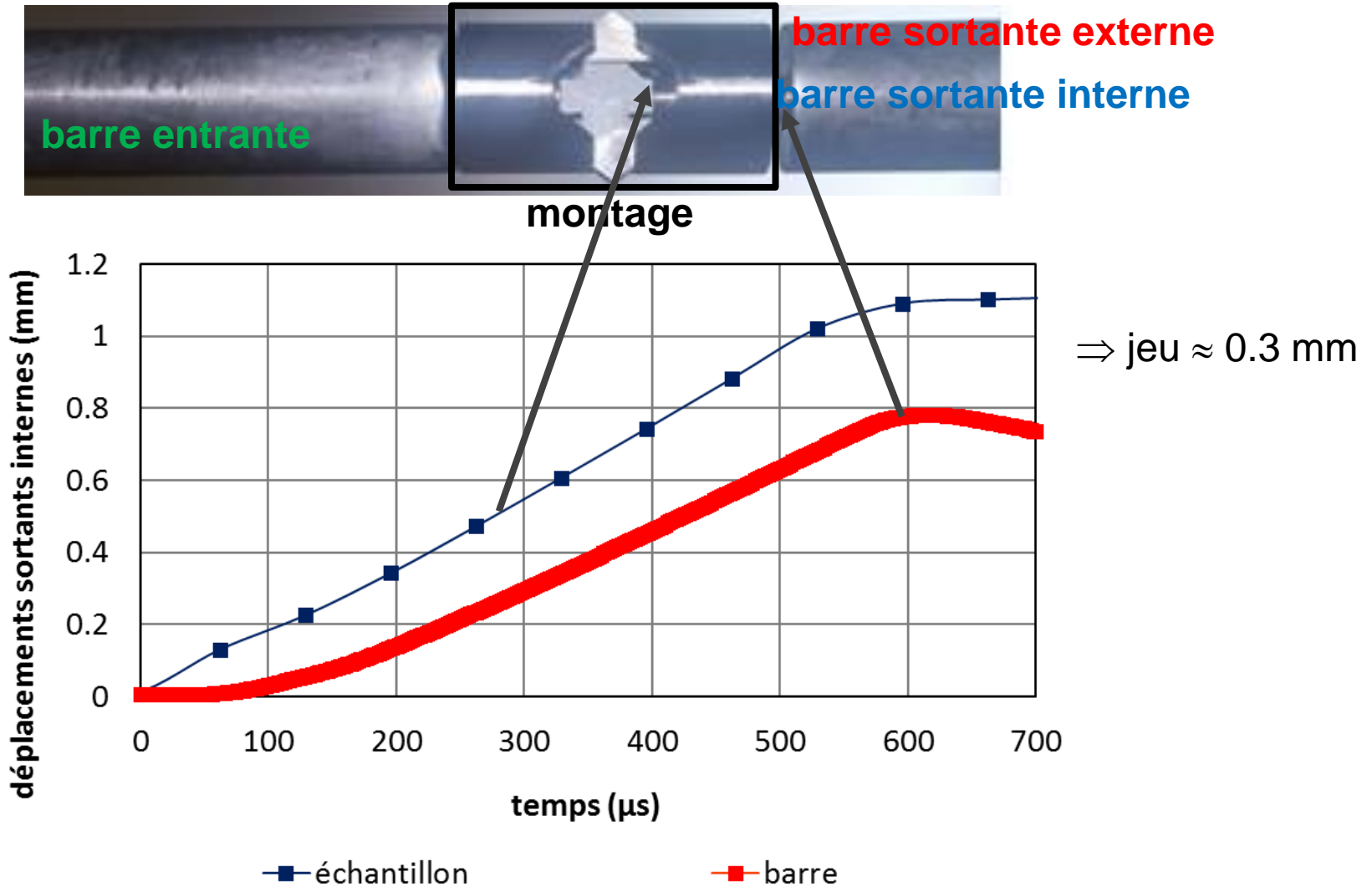




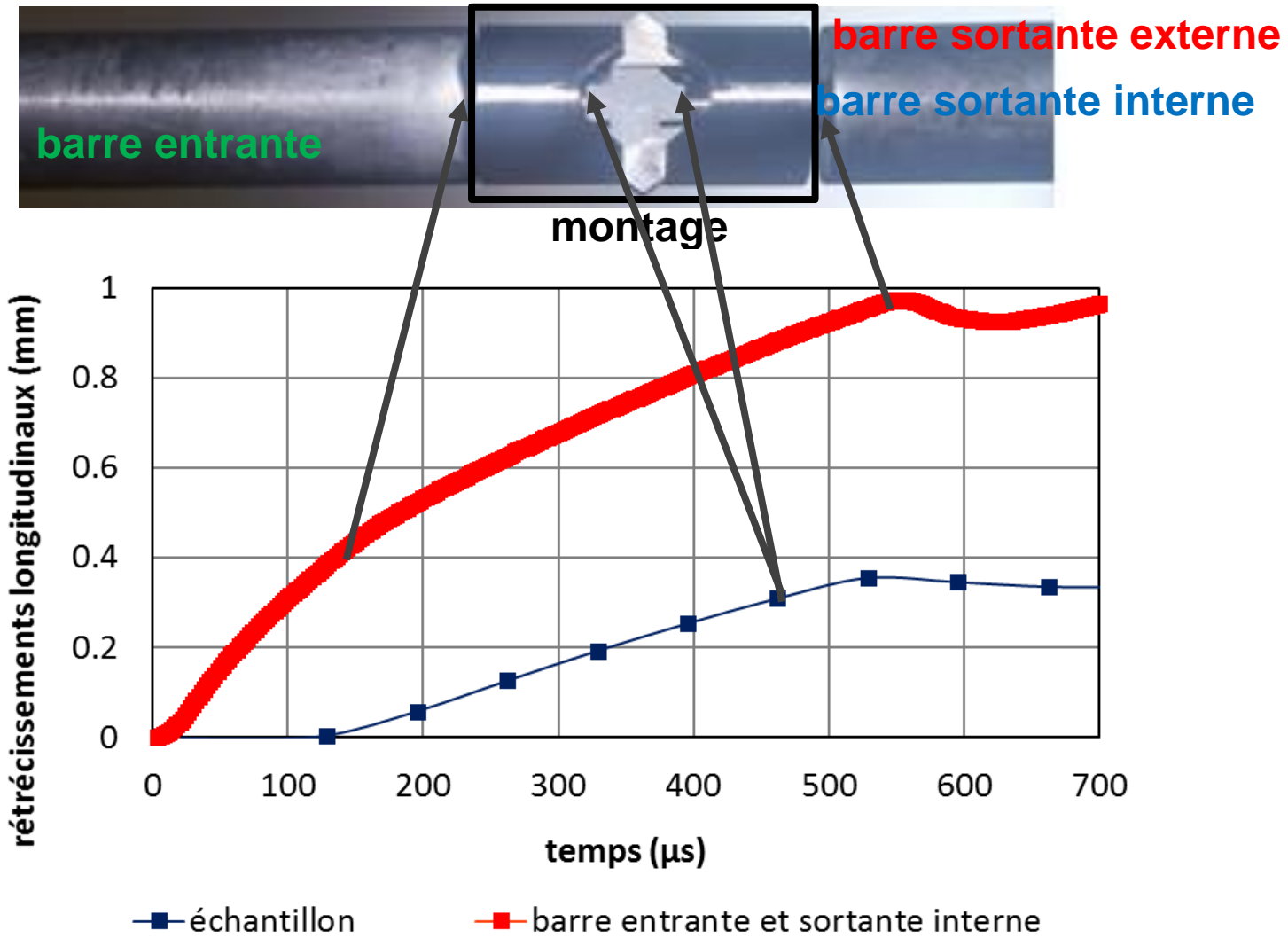
## Comparaison des déplacements mesurés sur les barres et dans l'échantillon :



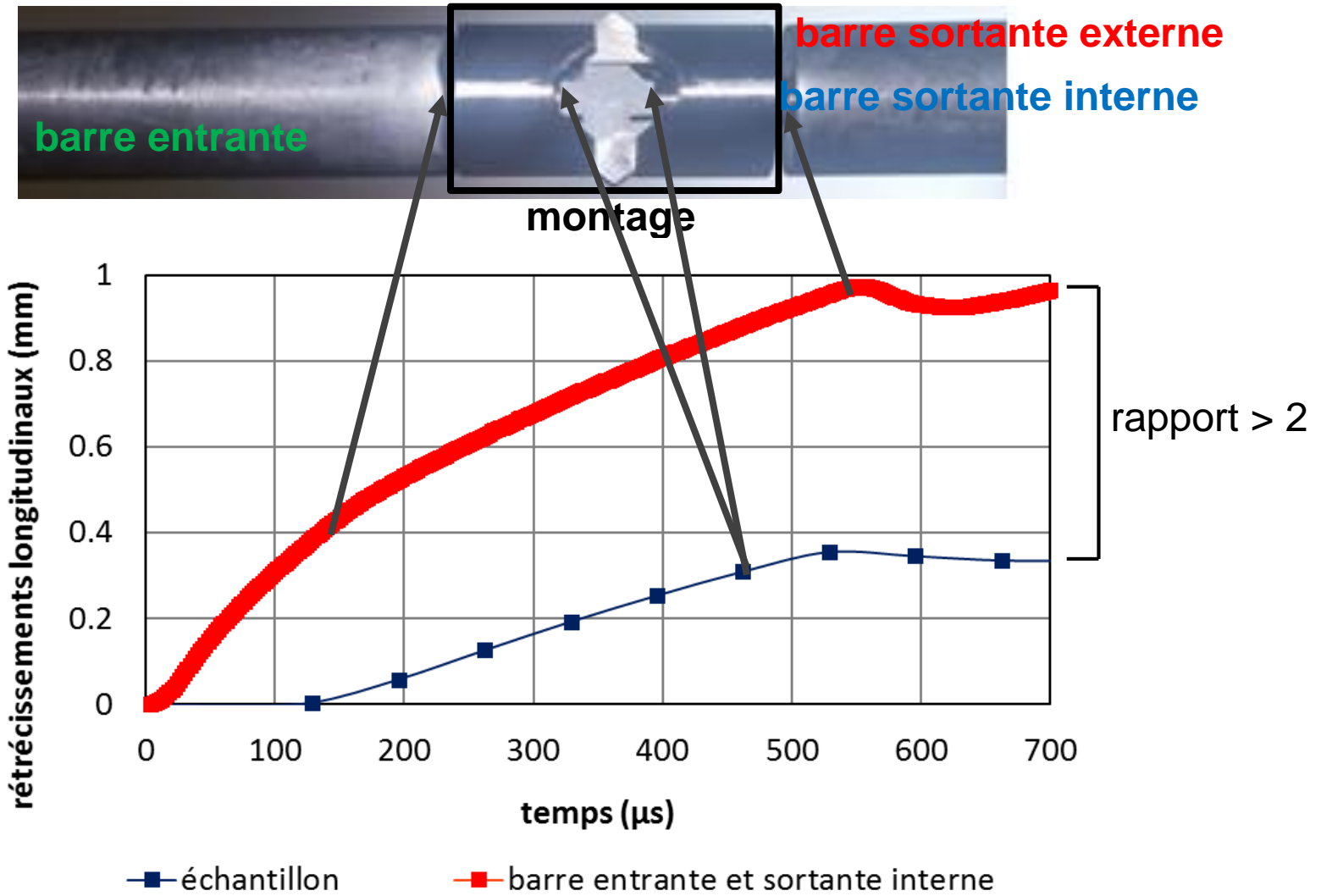
## Comparaison des déplacements mesurés sur les barres et dans l'échantillon :



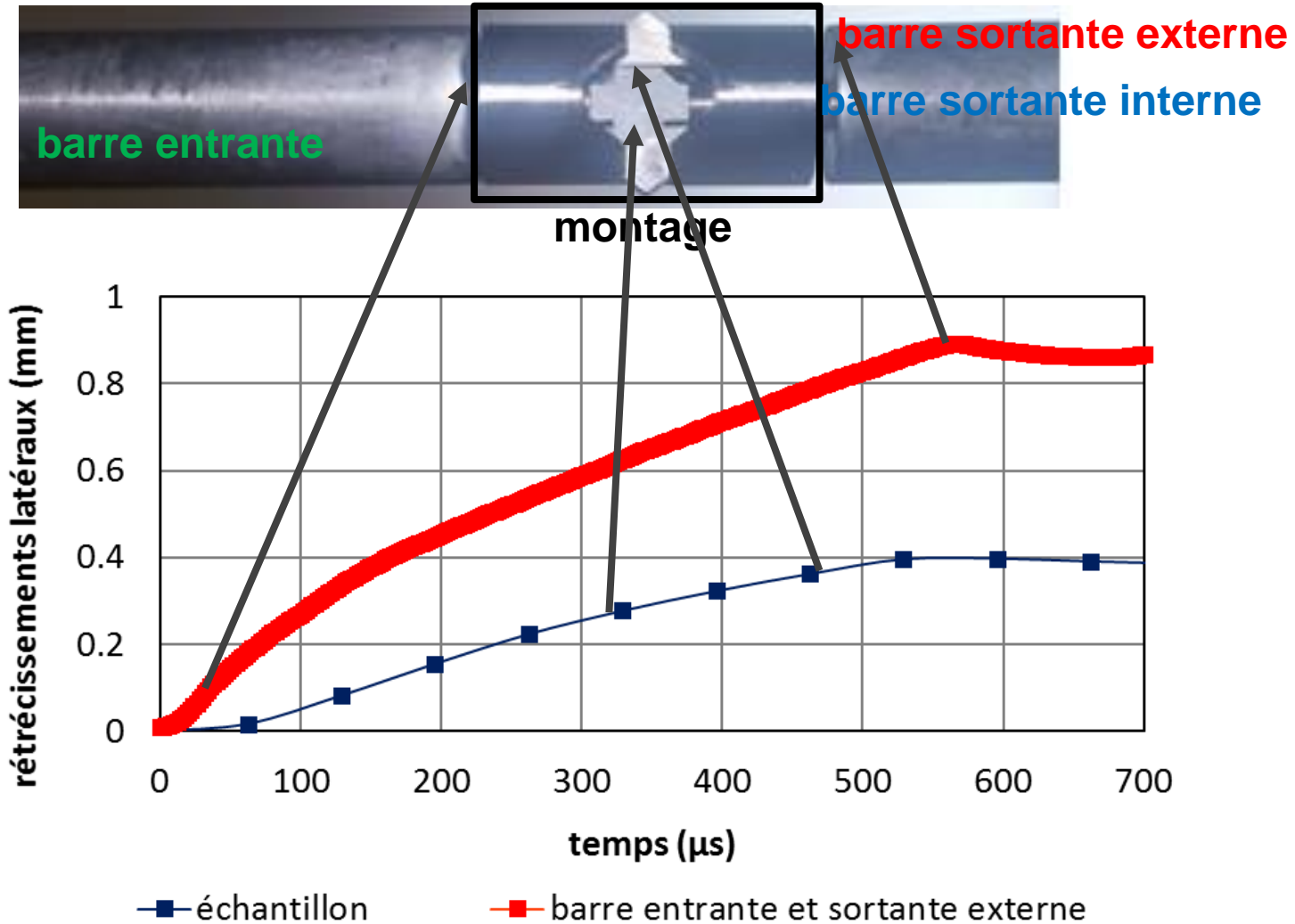
## Comparaison des déplacements mesurés sur les barres et dans l'échantillon :



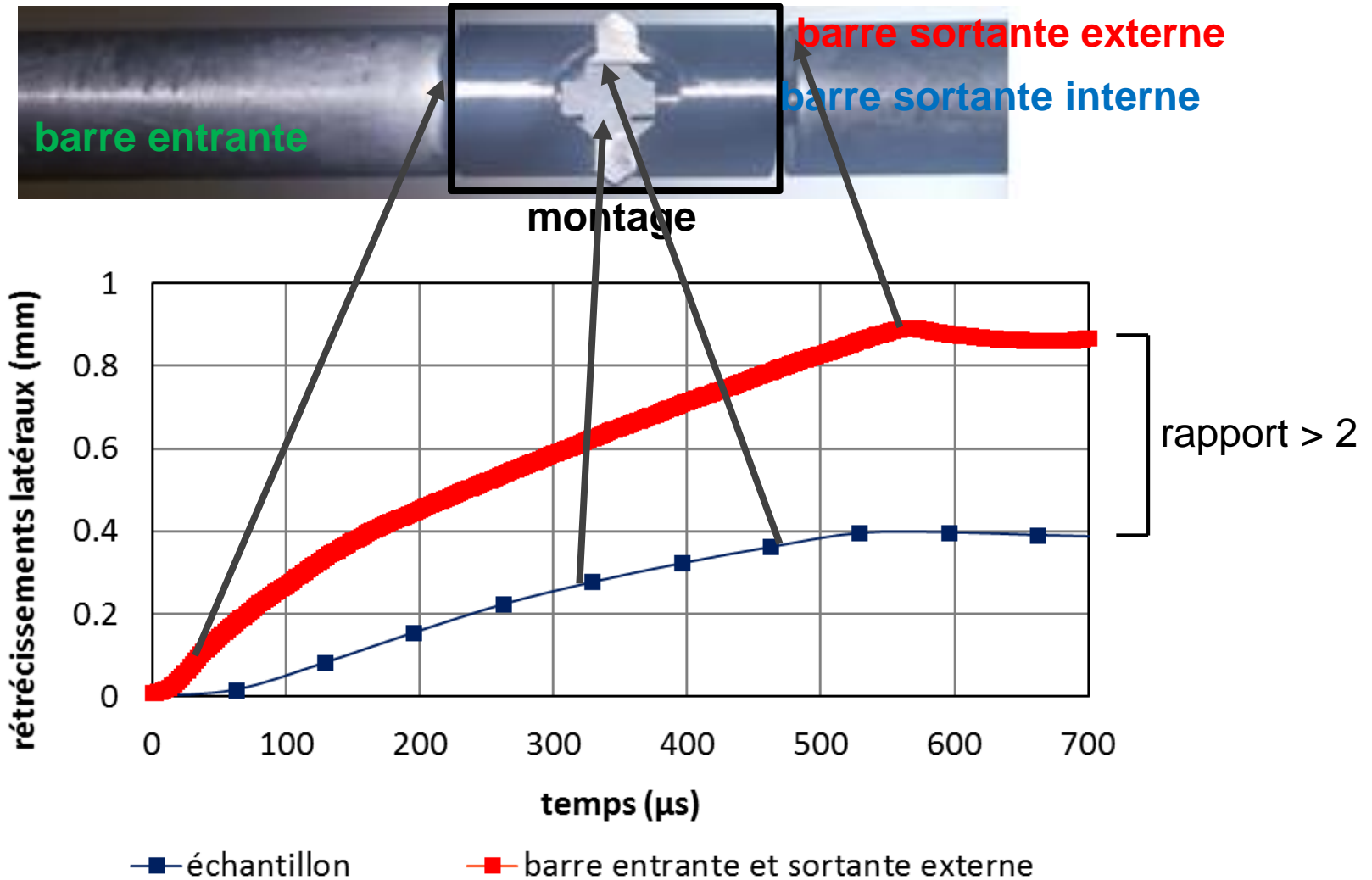
Comparaison des déplacements mesurés sur les barres et dans l'échantillon :



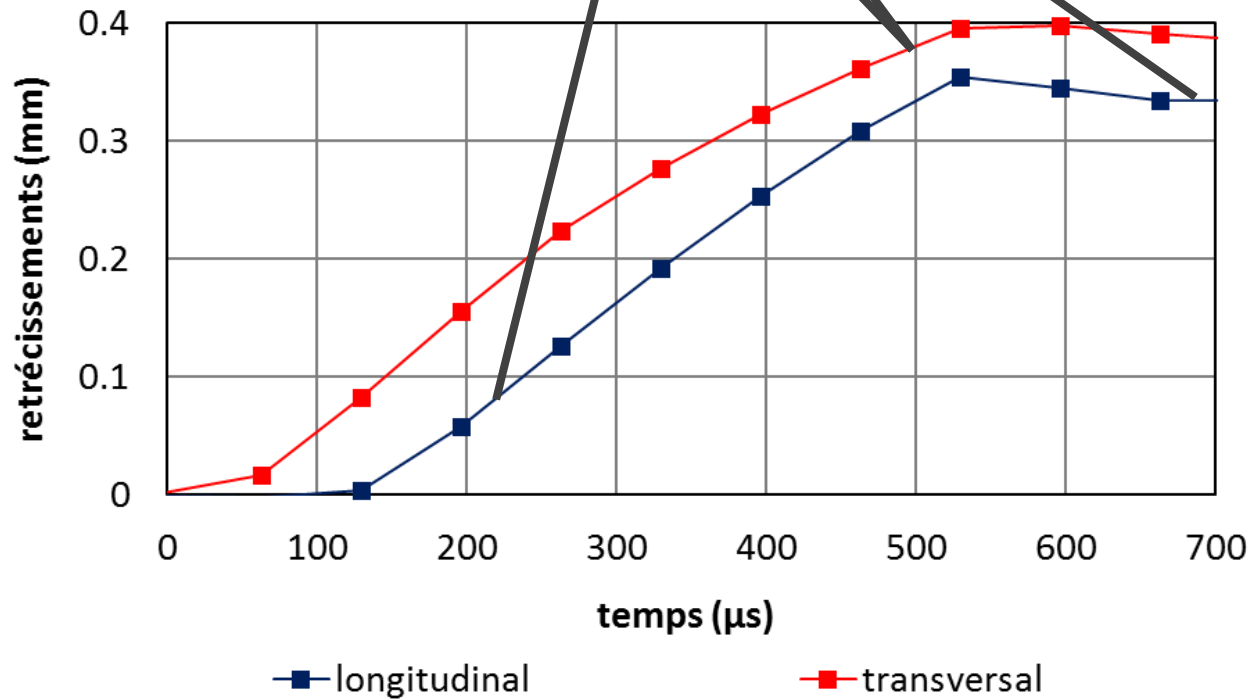
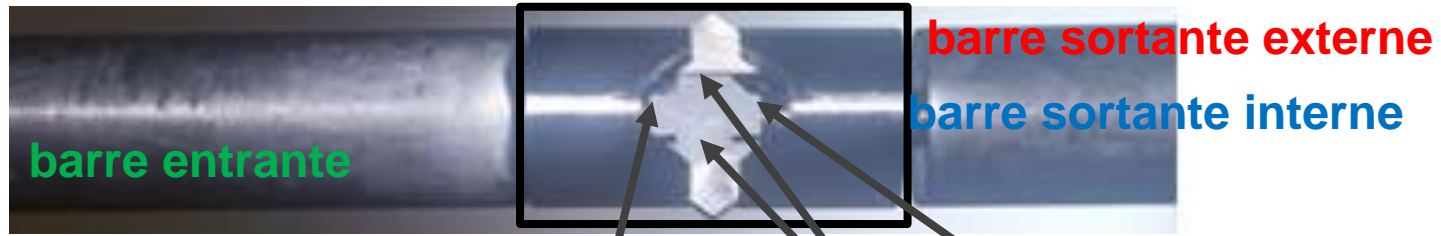
Comparaison des déplacements mesurés sur les barres et dans l'échantillon :



Comparaison des déplacements mesurés sur les barres et dans l'échantillon :



## Comparaison des déplacements mesurés sur les barres et dans l'échantillon :



Exploitation des déplacements mesurés sur les barres et dans l'échantillon :



force à l'interface barre sortante externe - montage

⇒ contrainte transversale (section  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ )

force à l'interface barre sortante interne - montage

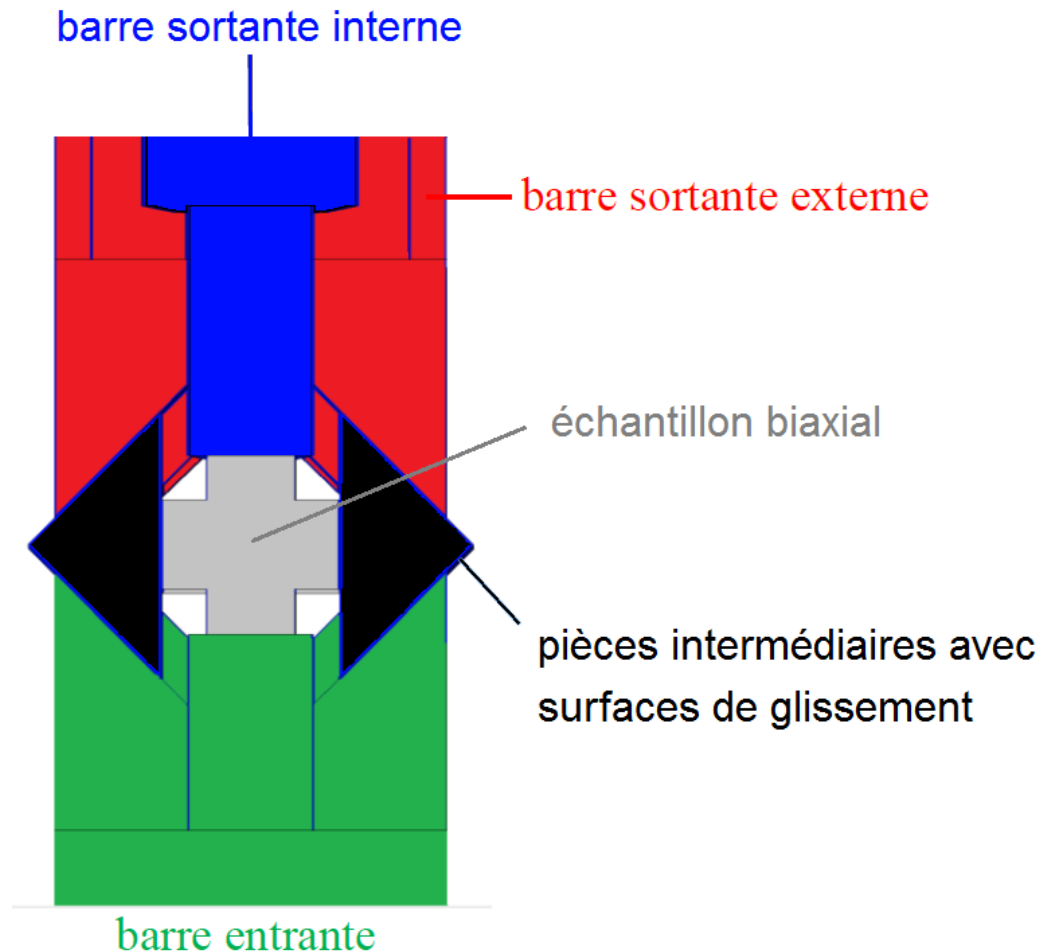
⇒ contrainte longitudinale (section  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ )

rétrécissements globaux (longitudinal et transversal) + dimensions

⇒ déformations moyennes (longitudinale et transversale)

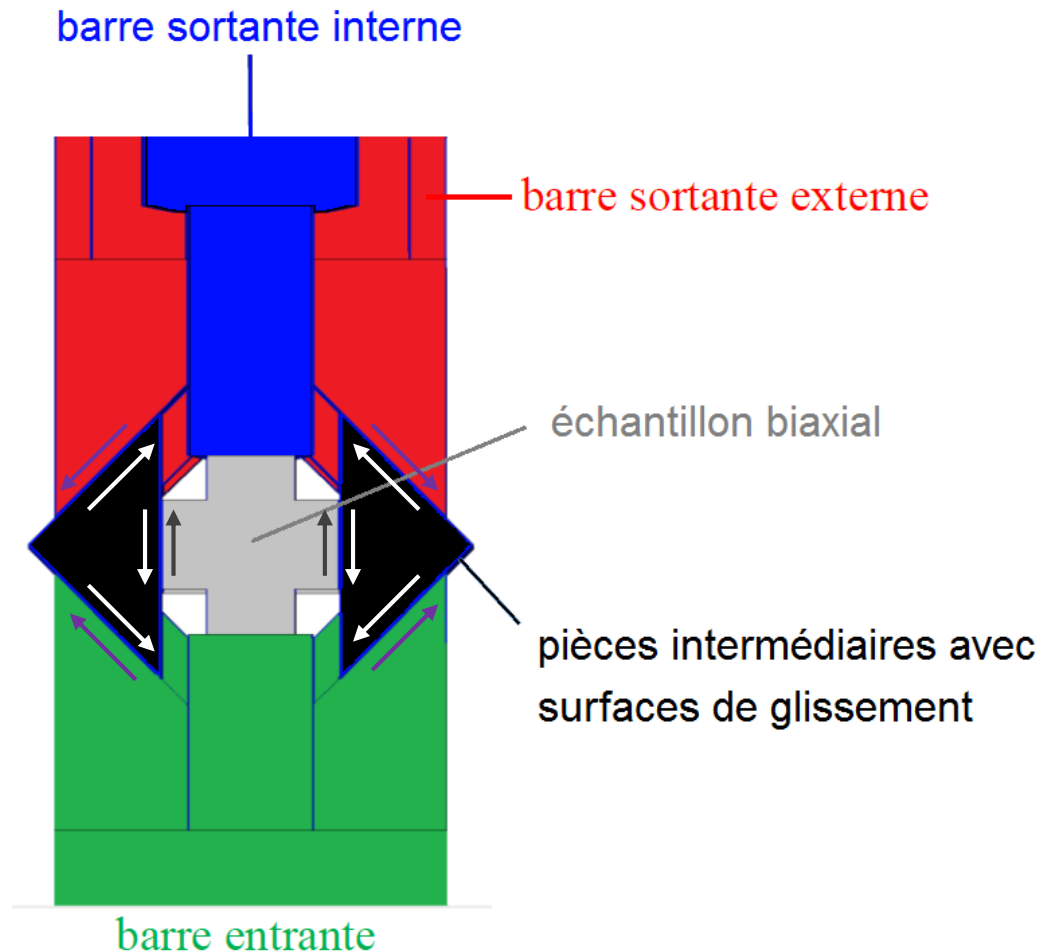


## Inconvénient :



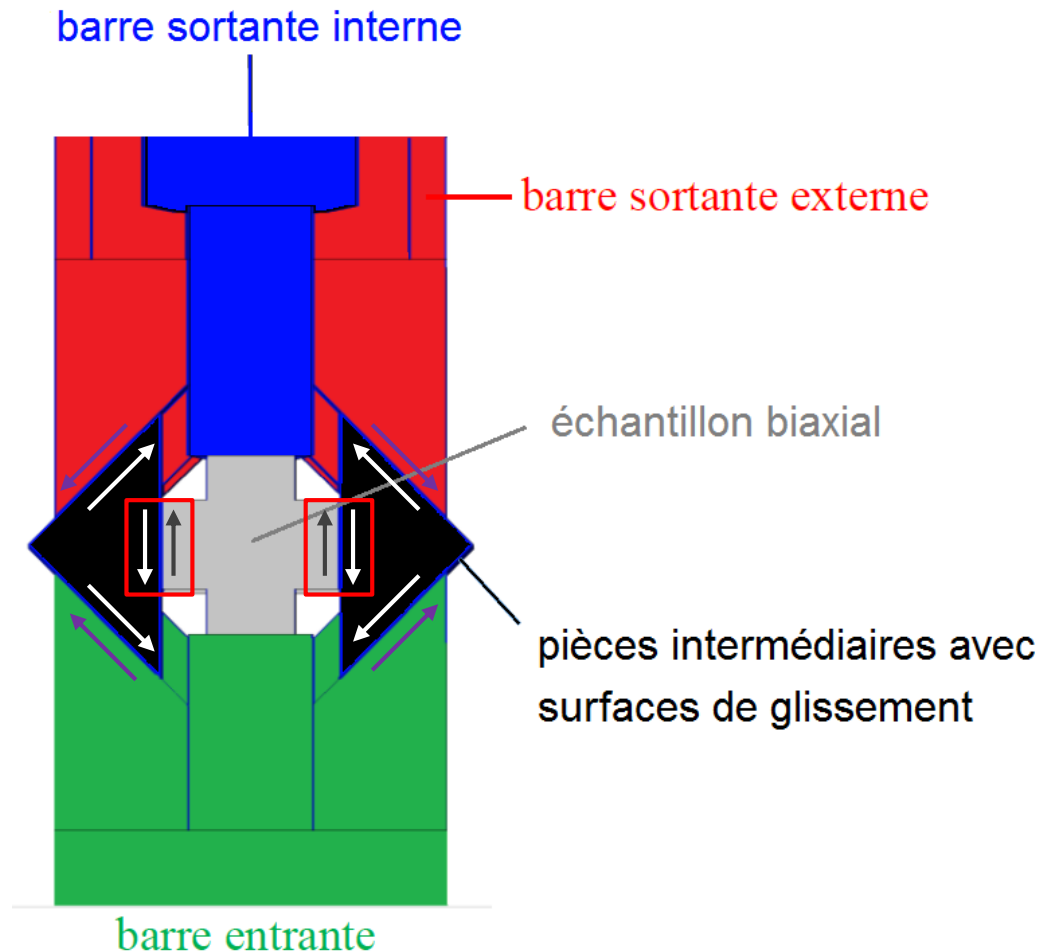
Influence du frottement sur la répartition des forces non prise en compte

## Inconvénients :



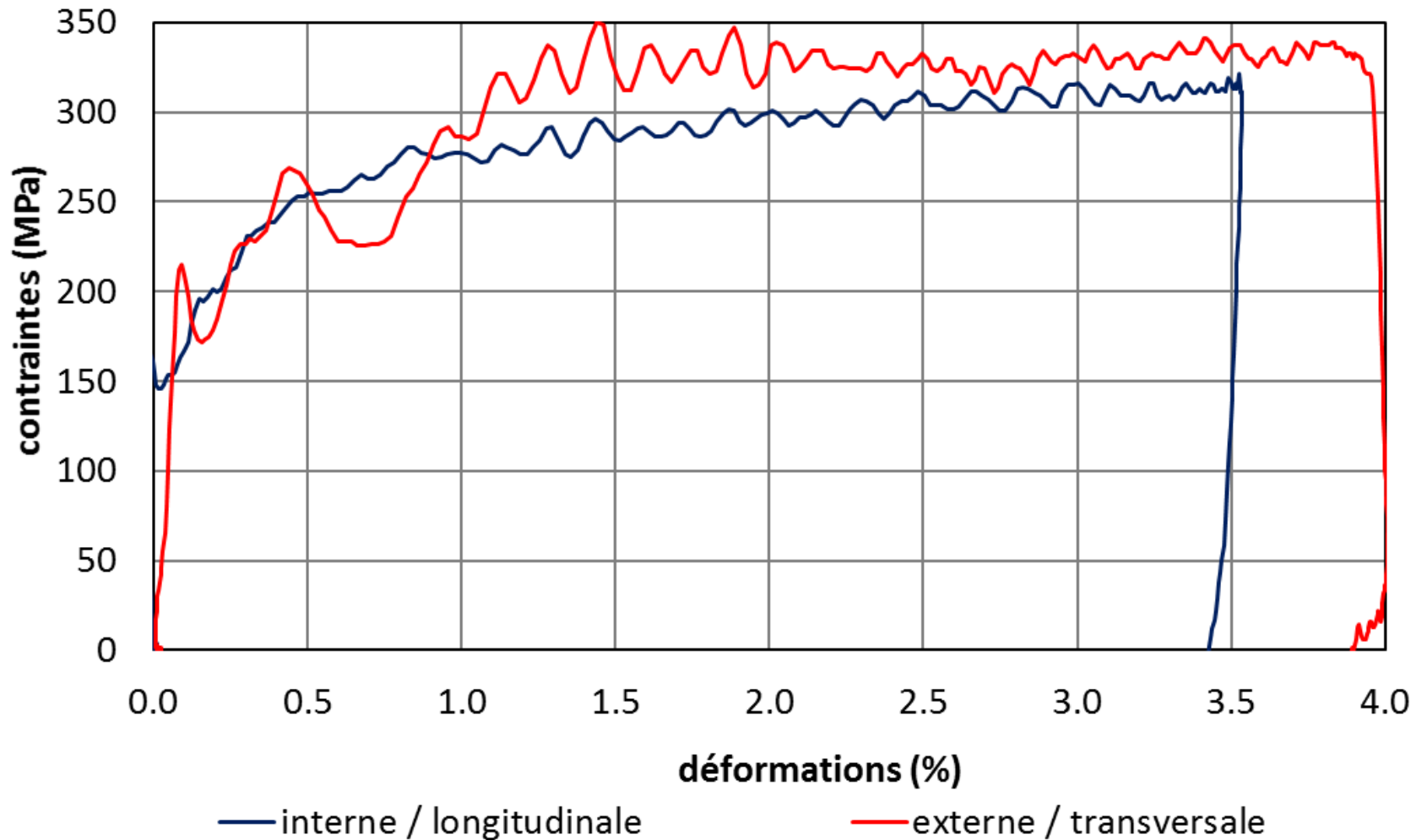
Augmentation de la force dans la barre sortante externe (effet non mesuré).

## Inconvénients :

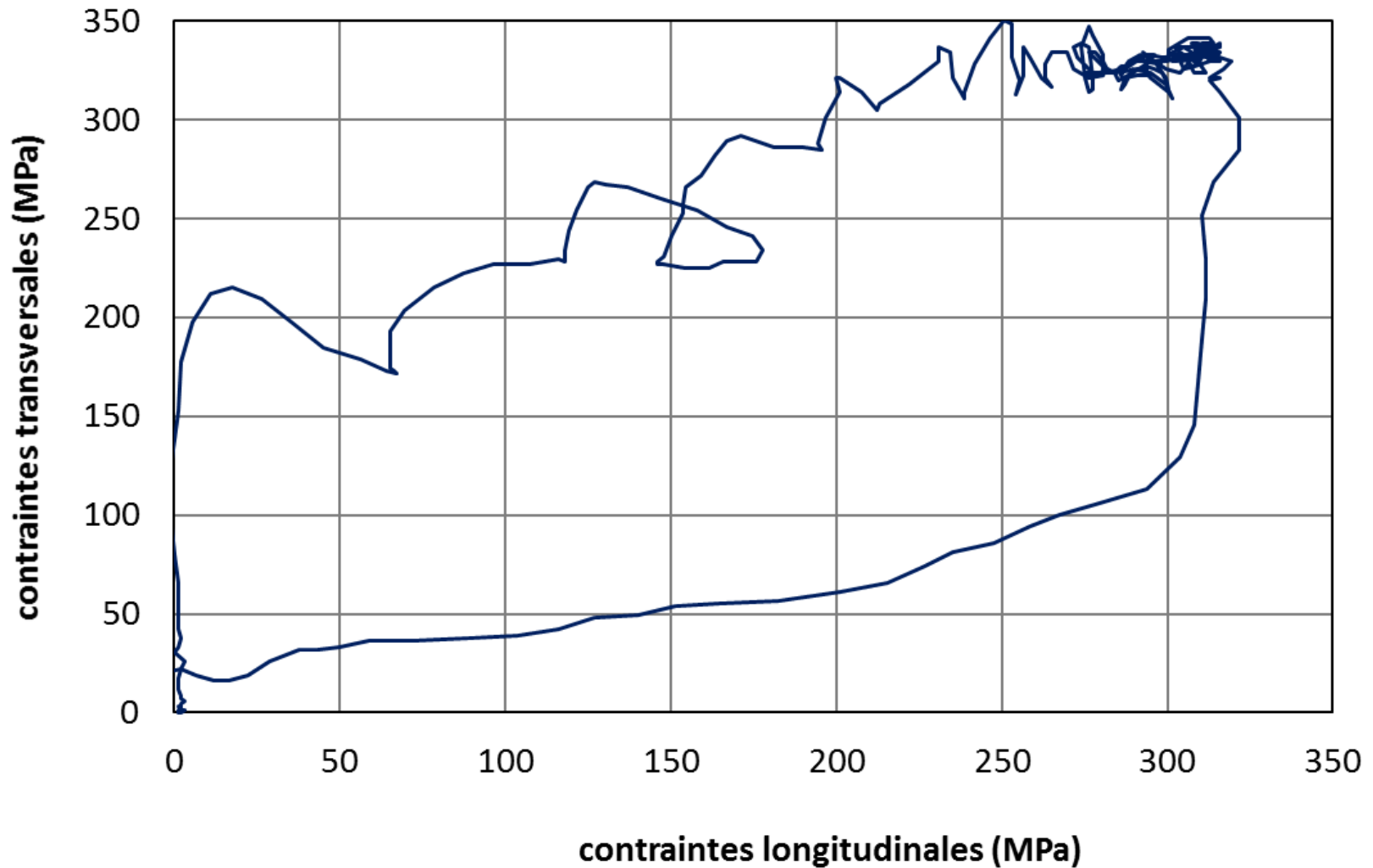


Cisaillement et donc dissymétrie dans l'échantillon (effet non mesuré).

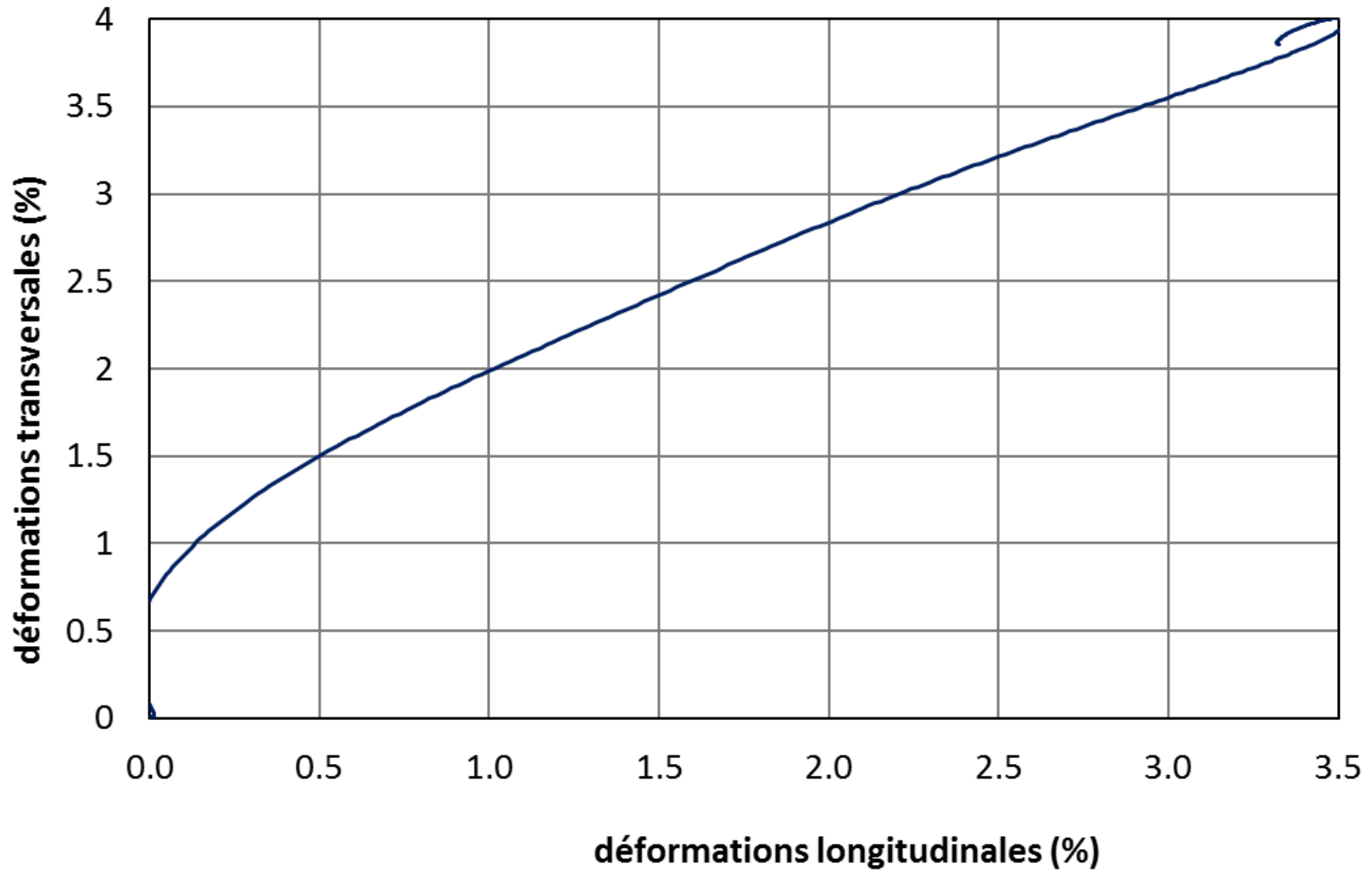
Courbes de comportement (à vitesse de déformation de l'ordre de 100 /s) :



### Trajet de chargement pour les contraintes :



### Trajet de chargement pour les déformations :



# Sommaire :

- **Contexte industriel**
- **Conception d'un système de barres**
- **Résultats expérimentaux**
- **Conclusions et perspectives**

## Conclusions :

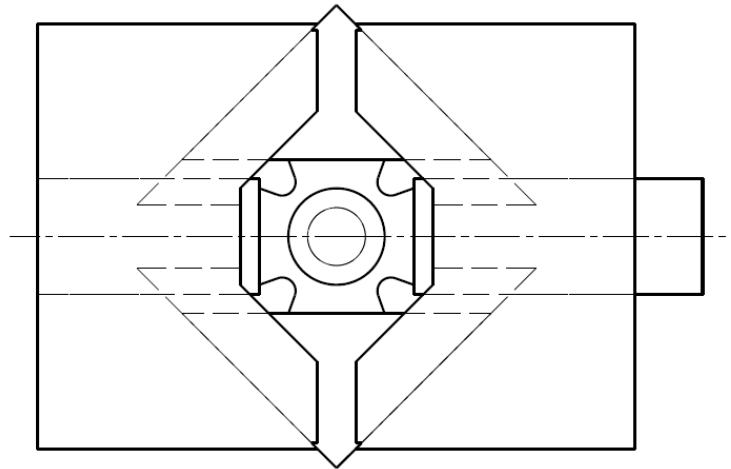
- conception d'un essai dynamique de compression biaxiale fonctionnel
- fiabilité du dépouillement comparable à celle des essais uniaxiaux
- part du frottement dans la force sortante externe non prise en compte
- cisaillement lié à la dissymétrie de l'essai non pris en compte



## Perspectives :

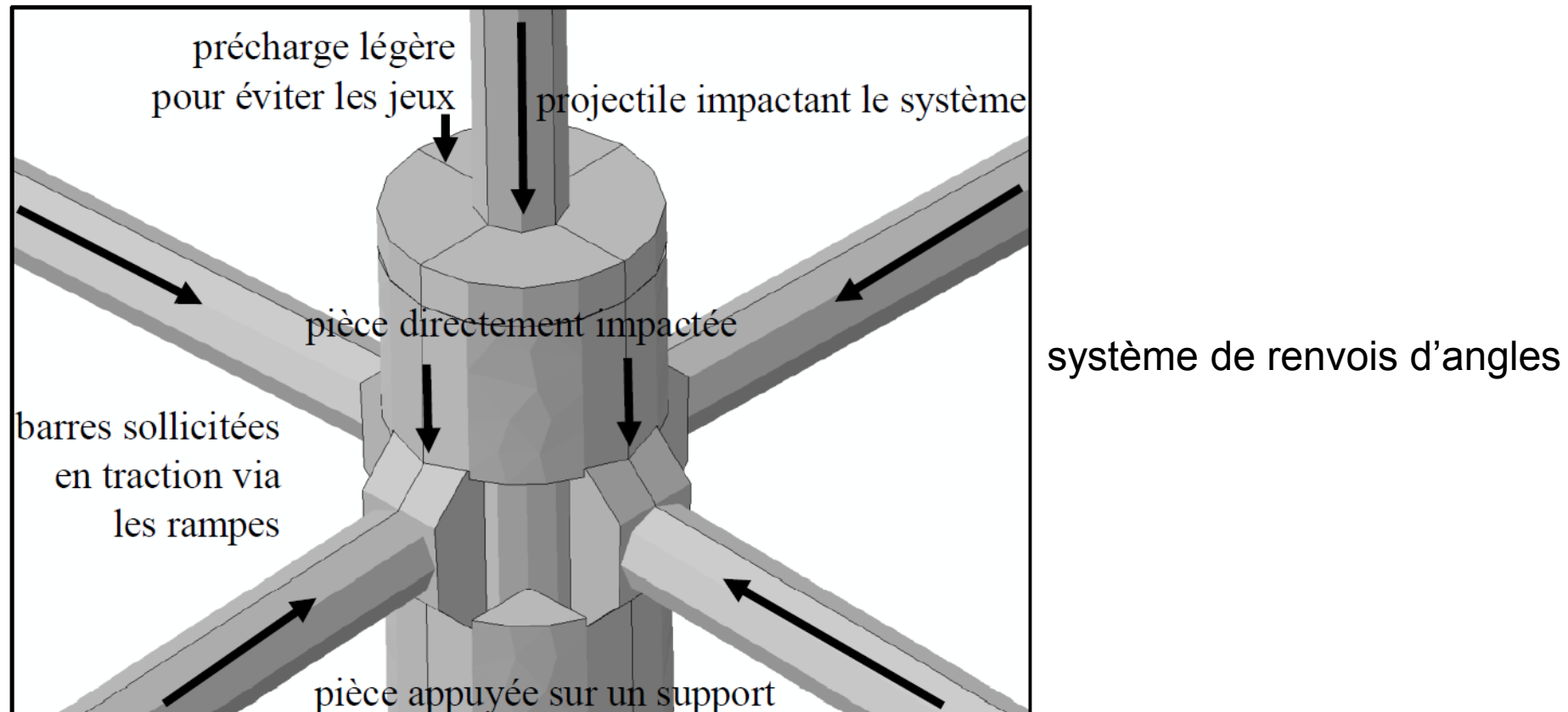
- à court terme : essais sur un alliage à mémoire de forme en nickel-titane pour valider un modèle multi-échelle (PFE en cours, puis poursuite du travail en thèse)

Conception d'une  
éprouvette adaptée :

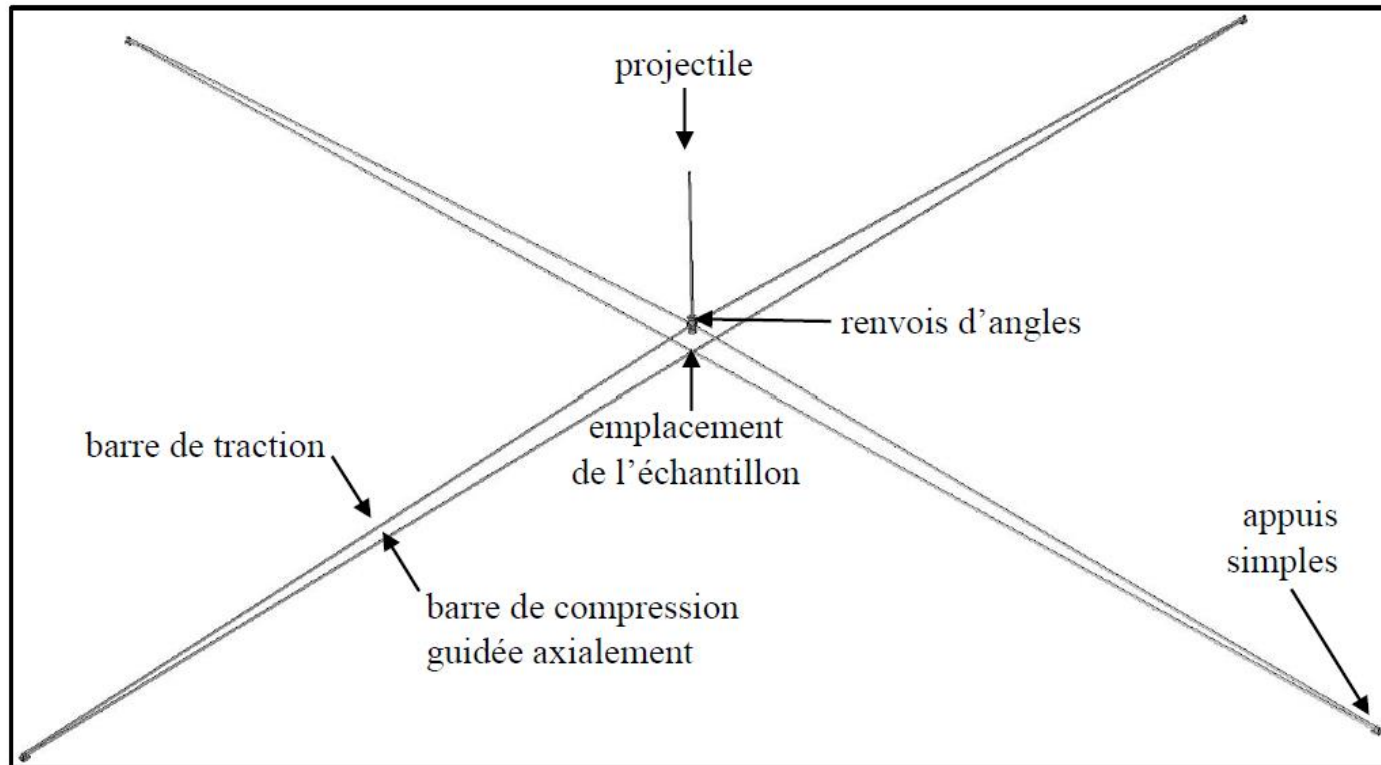


- à long terme : conception d'un système de barres de Hopkinson de compression biaxiale symétrique et non perturbé par le frottement

## Conception d'un système de barres de Hopkinson de compression biaxiale symétrique et non perturbé par le frottement :



## Conception d'un système de barres de Hopkinson de compression biaxiale symétrique et non perturbé par le frottement :



vue d'ensemble

équivalent à un système à 4 barres entrantes :

- dépouillement habituel
- onde de déformation incidente perturbée par le frottement, **mais mesurée**

Merci pour votre attention.

Des questions ?