

framatome

Instrumentations sur laminoirs à pas de pèlerins industriels

Enjeux, revue des techniques et leurs évolutions

Florian. LYONNET; Jean-Luc DOUDOUX

CT Laminage de la SF2M 16/03/2022



Sommaire

Introduction

- 1 . Le laminage à pas de pèlerin des tubes en Zr
- 2 . Instrumentations des mouvements du laminoir
- 3 . Instrumentations des outillages
- 4 . Mesures locales sur les produits laminés

Conclusion

Introduction

Framatome, le combustible nucléaire et le zirconium

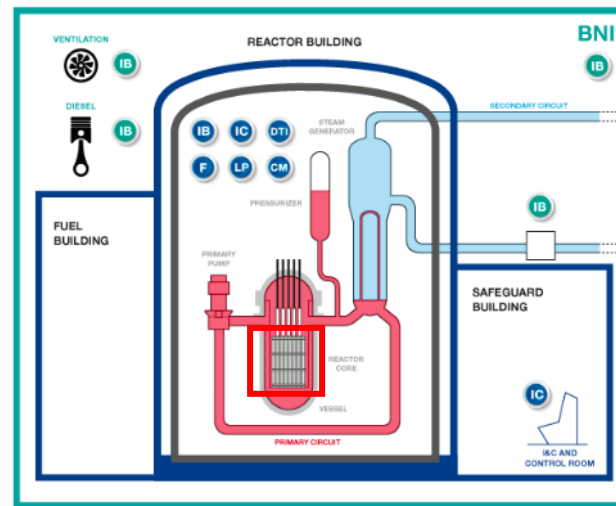
Concepteur et fournisseur de chaudières et d'équipement nucléaires, de services associés et de combustible pour des niveaux de sûreté et de performance élevés

- 14,000 employés dans le monde
- Framatome est détenu par le groupe EDF (75.5%), Mitsubishi Heavy Industries (MHI – 19.5%) et Assystem (5%)



<http://www.framatome.com>

NUCLEAR ISLAND



Framatome, le combustible nucléaire et le zirconium

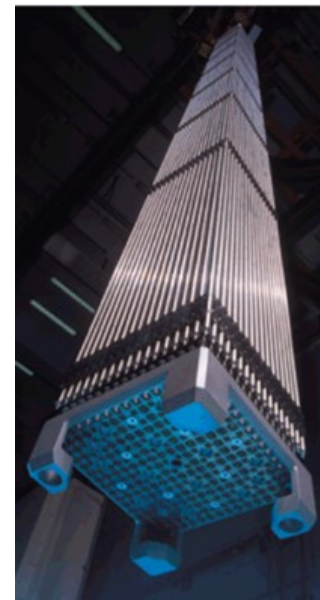
Framatome Fuel : développement, conception, licensing et fabrication d'**assemblages de combustible** et de composants pour les réacteurs REP, REB et les réacteurs de recherche

Développement de produits en zirconium

- Tubes de gainage (pour pastilles de combustible)
- Tubes guides (pour barres de contrôle et instrumentation)
- Feuillards (pour grilles)
- Tôles (pour boîtiers REB)
- Barres (pour bouchons de gainage)

Pourquoi les alliages de zirconium ?

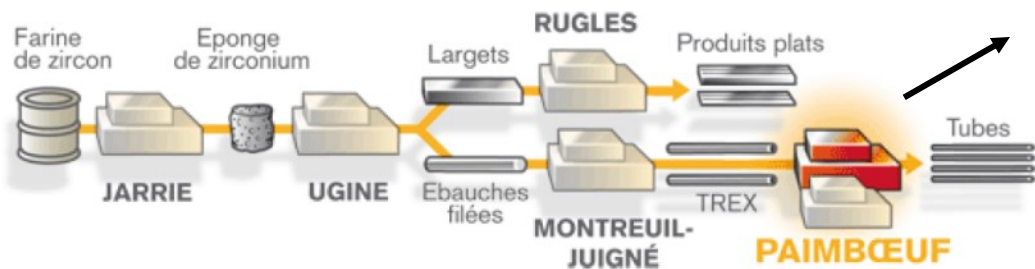
- Faible section de capture neutronique → Efficacité de la réaction nucléaire
- Bonne résistance à la corrosion, au fluage et à l'irradiation
→ Résistance mécanique de l'assemblage et intégrité du gainage du combustible



Assemblage de combustible REP

Etapas de fabrication des tubes en Zr

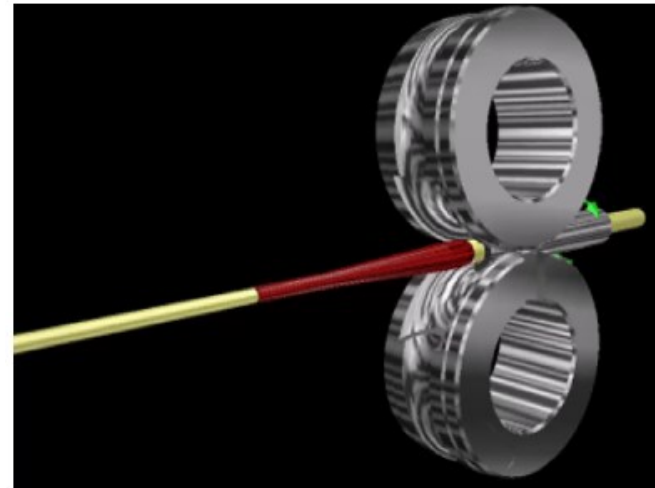
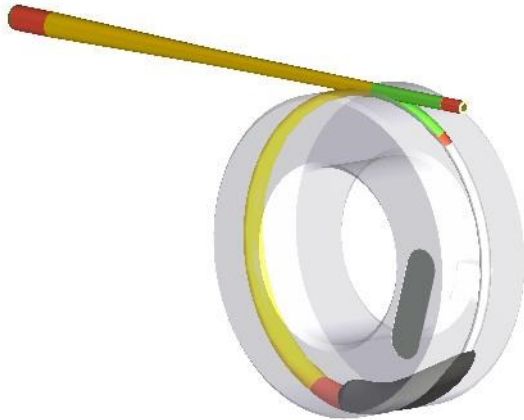
Processus de fabrication intégré des composants en Zr



2. Le laminage à pas de pèlerin des tubes en Zr

Le procédé de laminage à pas de pèlerin

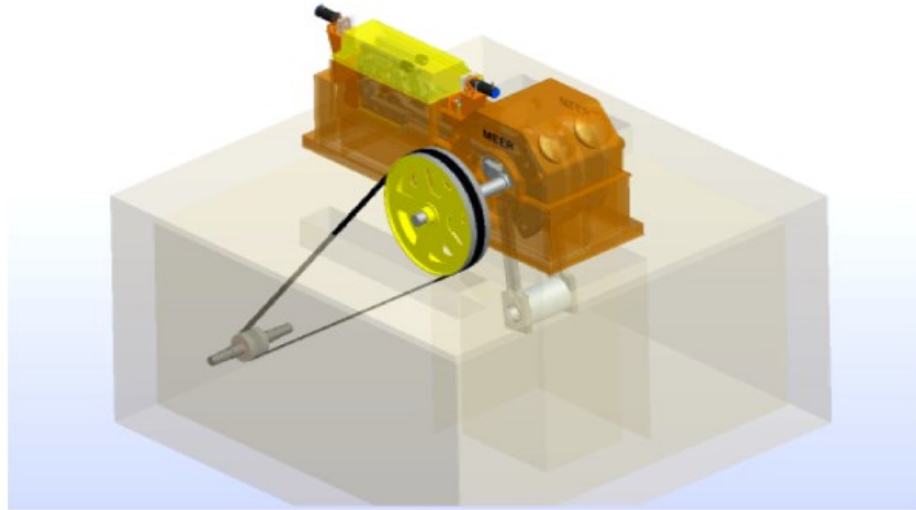
- **Réduction simultanée du diamètre externe et de l'épaisseur** par compression radiale entre deux **matrices** à gorges roulant sur le tube et un **mandrin** axisymétrique fixe
- Après chaque aller-retour des matrices, **le tube est avancé et tourné** pour l'incrément suivant
- **Environ 100 incréments (coups de cage)** sont nécessaires pour déformer une section de tube



Cinématique du laminage

Le procédé de laminage à pas de pèlerin

- Mise en mouvement de la cage par le système de vilebrequin et de bielles



Le procédé de laminage à pas de pèlerin

Mise en mouvement de la cage et environnement du laminoir :

Encombrement et contraintes des îlots laminoir : table de chargement en entrée, chariot, système de lubrification, maintien de la tringle...

Intérêt des instrumentations

- Vérifier la **synchronisation** du laminoir, le bon fonctionnement
- Mener des études ponctuelles en **réponse à des problématiques qualité** : par exemple comparer l'efficacité entre plusieurs lubrifiants en mesurant les efforts ou les déplacements sur les outils (Matrice / mandrin).
- Mieux connaître les **conditions de fonctionnement de nos lubrifiants** (en particulier la température maximale lors de la déformation).
- Disposer de suffisamment de données pour **critiquer et faire progresser la simulation numérique** du laminage à pas de pèlerin (comportement du matériau, influence de la température, déplacements/déformations des outillages...).

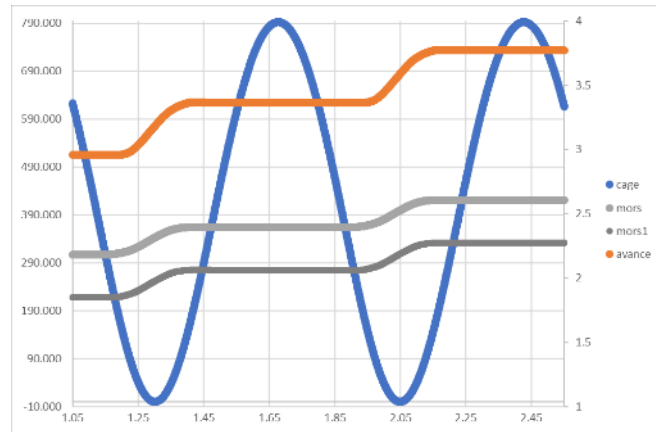
Difficultés

- Accéder à des informations dans une **enceinte fermée** (cage de laminage) avec **un débit de lubrifiant** de l'ordre de 20m³/h.
- Instrumenter des **éléments mobiles et en rotation** à des cadences de l'ordre de 5 Hz.
- Mesures sur le mandrin, être en capacité de passer les fils dans une tringle de 10mm de diamètre et de 10 m de long.

2. Instrumentation des mouvements du laminoir

Instrumentation sur laminoir à vide

- Vérification de la synchronisation de la cage (position des matrices) avec les mors (rotation de l'ébauche) et l'avance du chariot

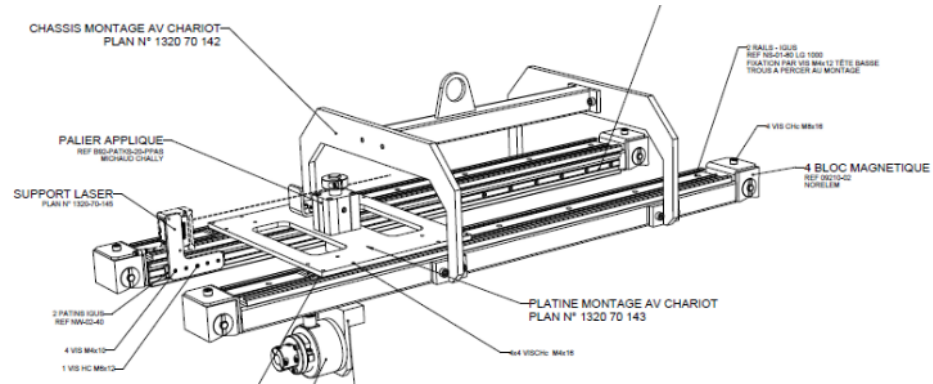


➤ Ces mesures ne tiennent pas compte des efforts **horizontaux sur l'ébauche** (avalement et refoulement) lors du laminage.

Tentative d'instrumentation sur laminoir en charge

Tentative par chariot instrumenté sur l'ébauche (~2000)

- **Principe** : codeur (1) sur l'ébauche laminée reliée à une platine sur glissière (2)
- **Intérêt** : mouvements du système avec son inertie et sa rigidité réelles
- **Difficulté** : **rupture** du maintien entre codeur et platine lors de l'essai à cause des mouvements de l'ébauche



Possibilité d'acquisition par caméra ultra-rapide (2021)

- **Principe** : film de l'ébauche (quadrillé ou avec mouchetis) reconstruction des déplacements
- **Intérêt** : pas de perturbation du mouvement de l'ébauche
- **Difficulté** : **coût**, externalisation, 2 caméras nécessaires pour acquérir les 6 degrés de libertés

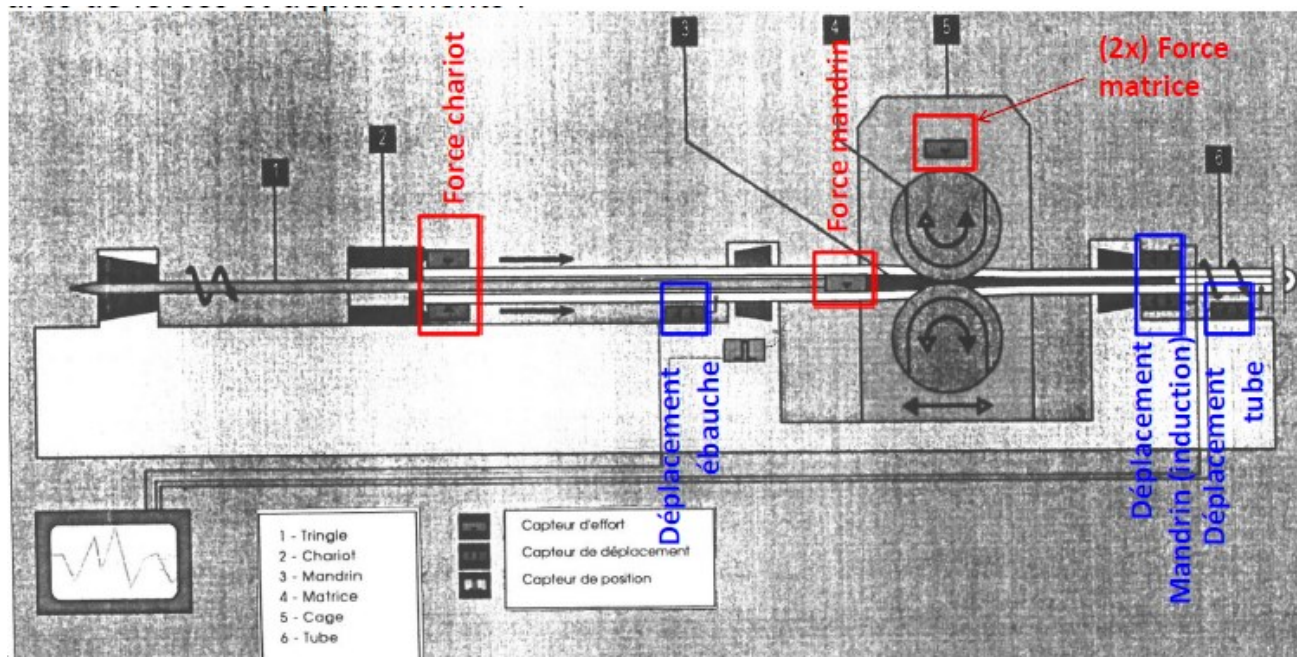


3. Instrumentation des outillages

Instrumentation des laminoirs : point de vue global

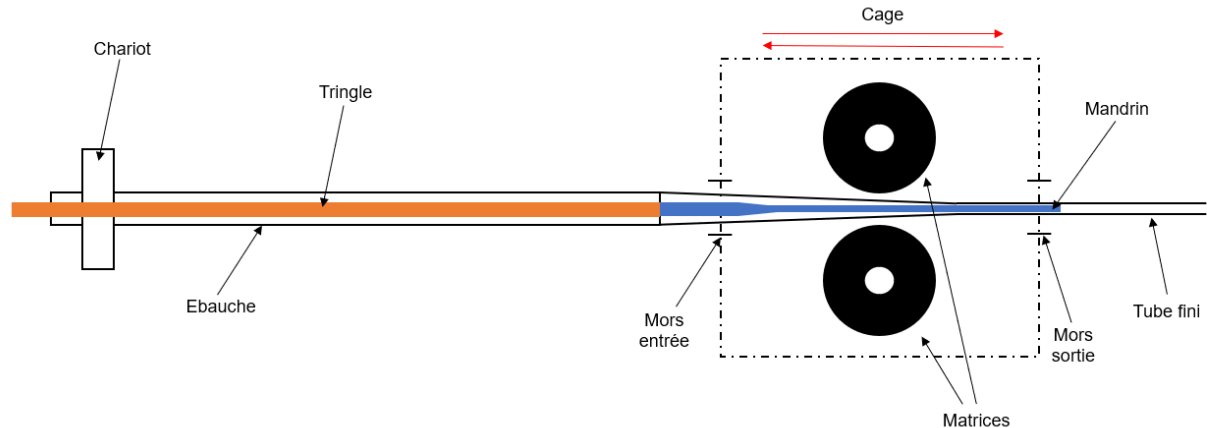
Problématique :

Comment sont distribués les efforts entre les outils, le laminoir et le produit laminé ?



Instrumentation des mandrins

- **Enjeu** : les défauts de qualité interne des tubes (par ex. rugosité ou micro-arrachements) peuvent causer des rebuts de lots.
- **Objectifs** des instrumentation :
 - Estimation de la **température** du mandrin (et du lubrifiant) au niveau de la zone de réduction
 - Mesures des **efforts** et/ou des **déplacements** horizontaux pour apporter des informations sur des problématiques ponctuelle ou pour la validation et l'amélioration des simulations
- **Difficulté** : mandrin confiné (transition, cage et capot du laminoir), de petit diamètre (~ 14 mm à 8 mm de diamètre), maintenu par une tringle de 10 m.



Instrumentation des mandrins : effort axial

- Travaux de Didier Farrugia (1990)

Capteur d'effort entre tringle creuse et mandrin relié à un collecteur tournant

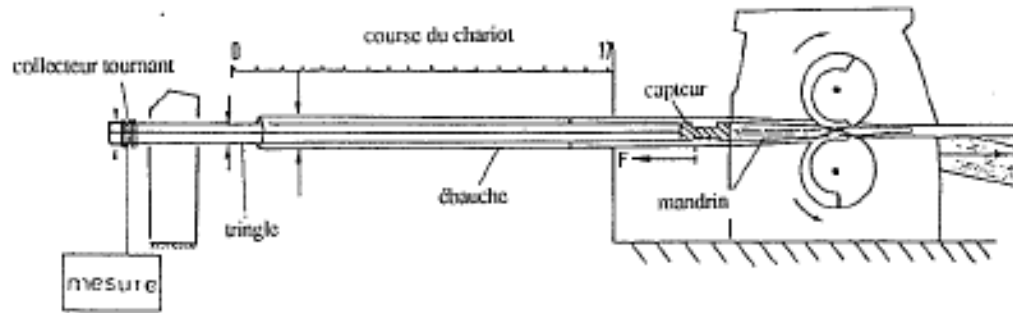
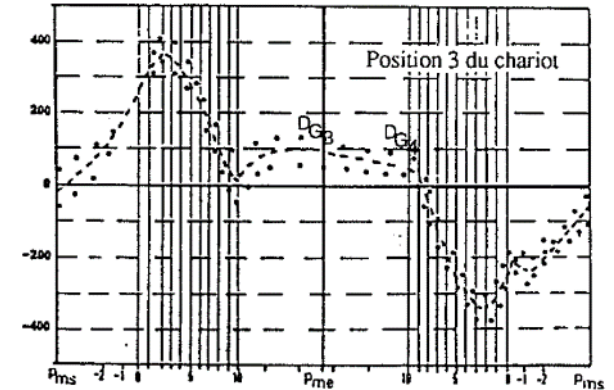


Figure V.3 : Capteur de traction-compression sur mandrin

Effort axial sur mandrin [kg]

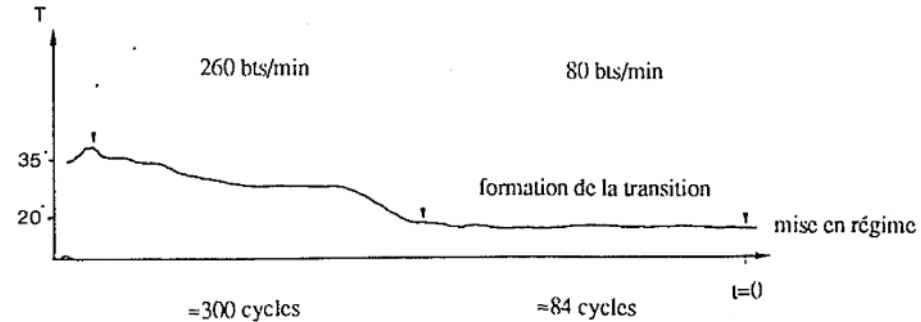
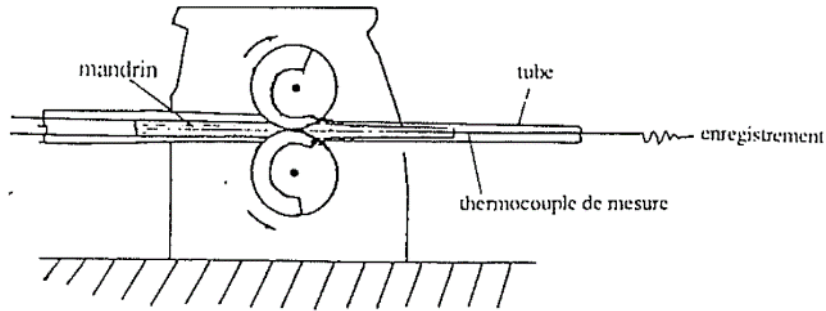


- Difficulté : sensibilité aux parasites (longueur du câble et collecteur tournant ?)
- Sur l'outil de référence on constate une **compression du mandrin en passe aller**, et une traction lors de la passe retour.
- Cet essai est un bon indicateur du régime de lubrification, **en particulier du collage entre l'ébauche et le mandrin.**

Instrumentation des mandrins : température

Travaux de Didier Farrugia (1990)

Mandrin percé par l'aval et équipé d'un thermocouple.



- Température maximale acquise : $\sim 35^{\circ}\text{C}$
- Rupture du mandrin après environ 300 cycles.

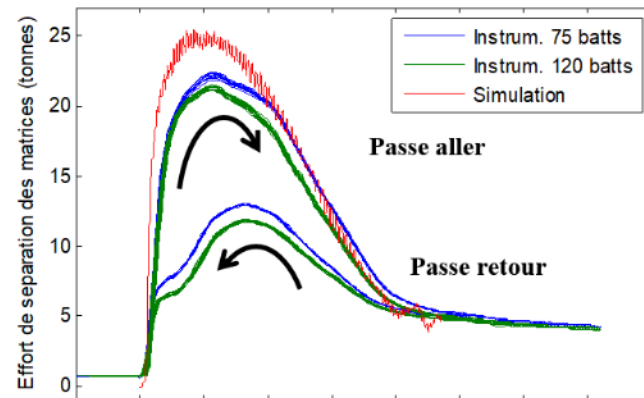
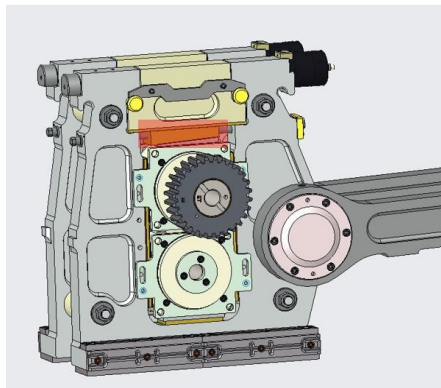
Travaux 2021 – 2022 :

Essai de mesure de température maximale par languette thermosensible

Nouveau développement d'un mandrin instrumenté par thermocouple

Instrumentation des efforts sur les matrices

- **Enjeu** : fournir des données de validation/calage pour les modèles numériques
- **Principe** : instrumentation de la cage du laminoir par un capteur de compression avec électronique embarquée sur la cage
- **Difficulté** : perte des signaux après environ 10 min de mesure (fouettement des câbles d'acquisition)



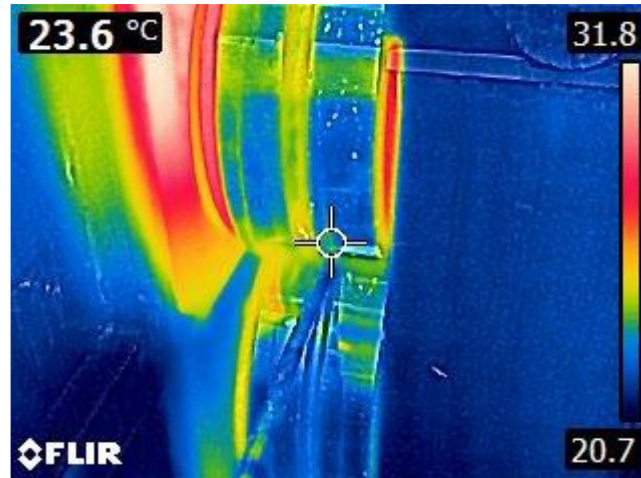
Amélioration 2021 – 2022 :

Système d'acquisition par télémétrie et compatible avec le laminoir à haute cadence.

4. Mesures locales sur les produits laminés

Tentative de mesure de température du produit laminé

- **Principe** : arrêt du laminoir, ouverture du capot et mesure par caméra thermique
- **Difficulté** : arrosage constant par le lubrifiant à 20°C



Essai de mesure après arrêt : refroidissement rapide du tube par le coolant

Mesures de déformation locales

- Les déformations incrémentales du laminage à pas de pèlerin induisent un **cisaillement** entre les face externe et interne.
- Principe de l'essai de **déformation d'un insert** :



1) Perçage et insertion d'un fil d'alliage AuCuAg



2) Laminage à pas de pèlerin



θ : Angle de cisaillement longitudinal

$$\varepsilon_{rz} = \theta/2 : \text{déformation}$$

3) Analyse de la géométrie du fil laminé

- Difficulté : tenue de l'insert pendant l'essai

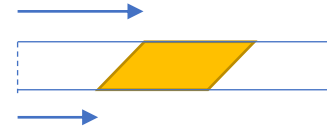


Mesures de déformation locales

Techniques de dépouillement

Mesures des positions en face interne et face externe

-> Méthode rapide, pas d'information dans l'épaisseur



Usinages progressifs et photographies

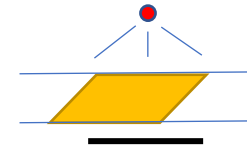
-> Méthode très lente

-> Equipement à reconfigurer et immobiliser



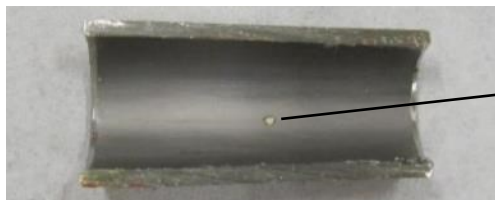
Nouveau moyen d'analyse mis en oeuvre: tomographie par rayons X

-> Mesures lentes mais complètes et précises

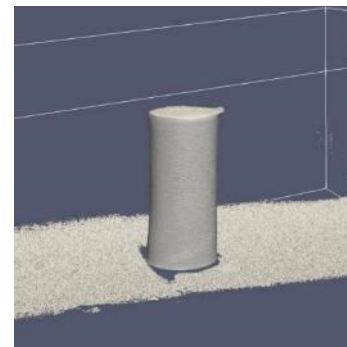
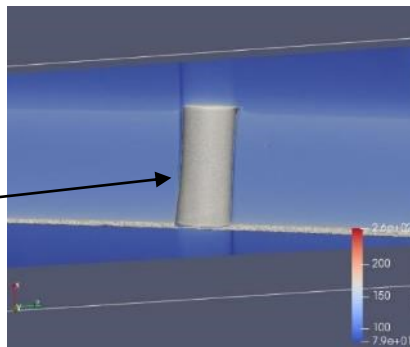


Mesures de déformation locales

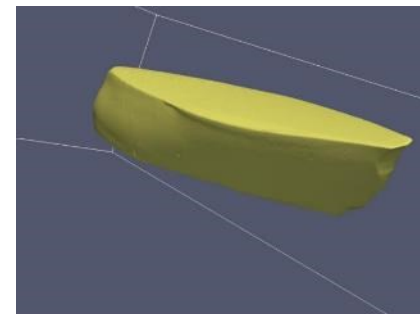
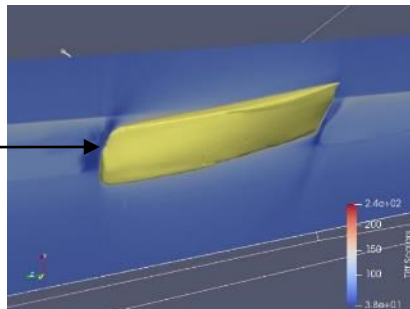
Résultats de tomographie X



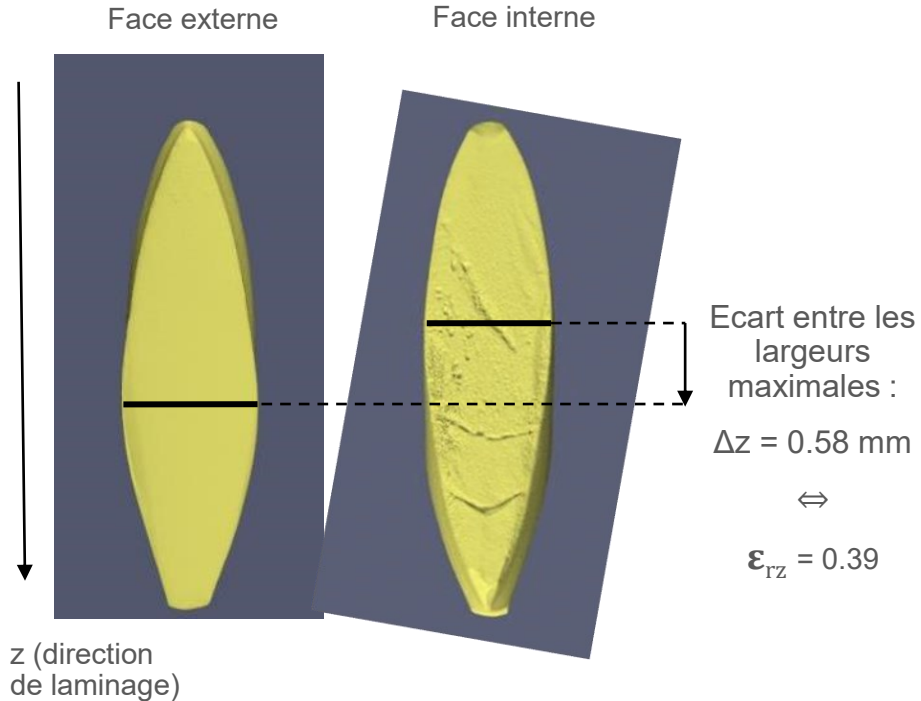
Ebauche



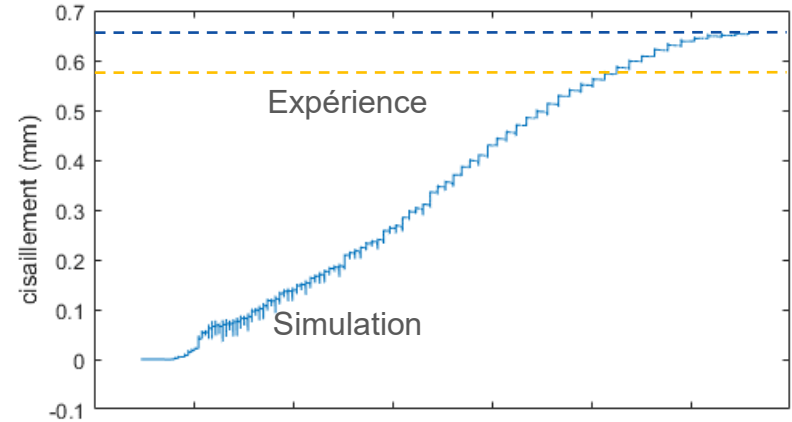
Tube laminé



Mesures de déformation locales



Comparaison avec les résultats de simulation :



Simulation $\Delta z = 0.66 \text{ mm} \Leftrightarrow \epsilon_{rZ} = 0.42$

Conclusion

- Les techniques d'instrumentations des laminoirs à pas de pèlerin n'ont pas fondamentalement changé depuis les travaux des années 1990
- La modélisation numérique du procédé apporte des éléments de compréhension mais aussi des nouveaux besoins de validations expérimentales
- Le renouvellement des moyens de mesure bénéficie des expériences passées ainsi que la démocratisation et la miniaturisation de l'électronique (systèmes embarqués, transmission sans fil)
- Certaines mesures, telle que la température en face interne, restent complexes à mettre en œuvre

Perspectives : mise en service des nouveaux équipements, essais en support à la maîtrise des lubrifiants

framatome

**Merci pour
votre attention**

