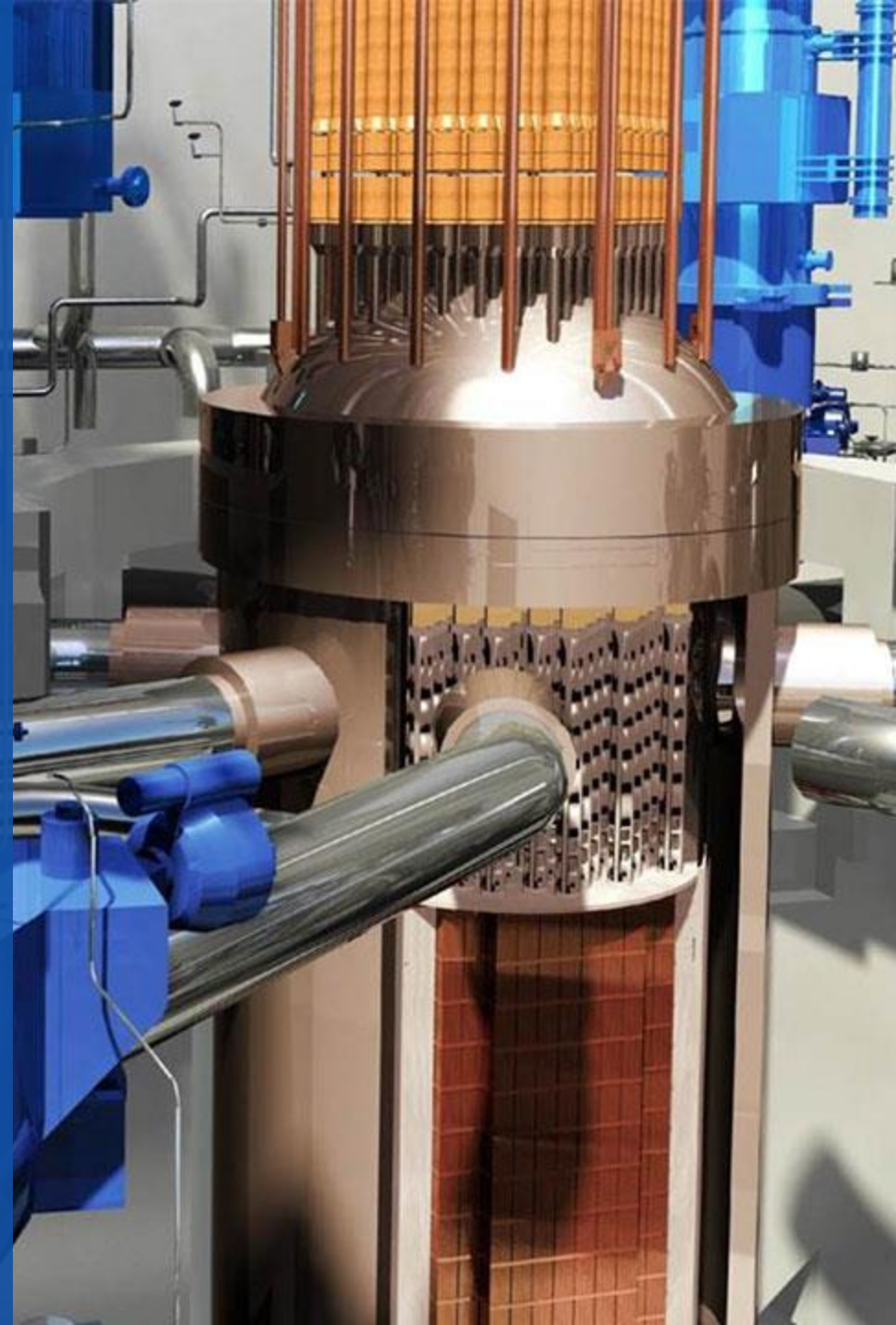


framatome

**Simulation numérique du
laminage à pas de pèlerin,
outil d'optimisation des
gammes et outillages**

**Alexis Gaillac – Florian Lyonnet
Framatome / BU Combustible / DOC / CRC**

Cemef, Sophia Antipolis, 07/11/2018



SOMMAIRE

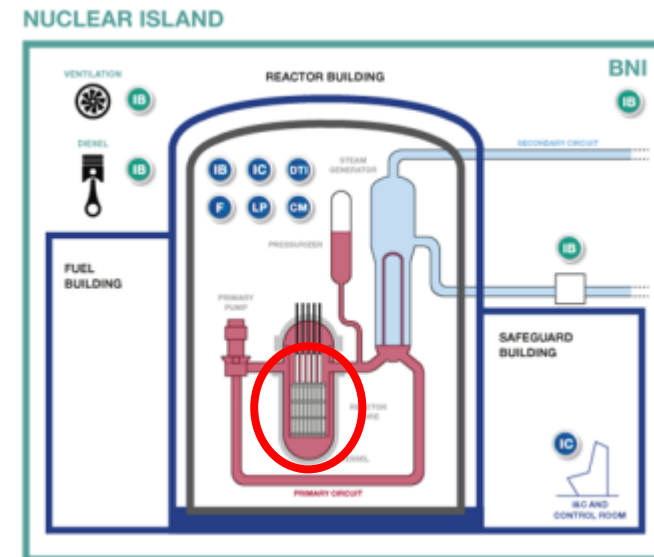
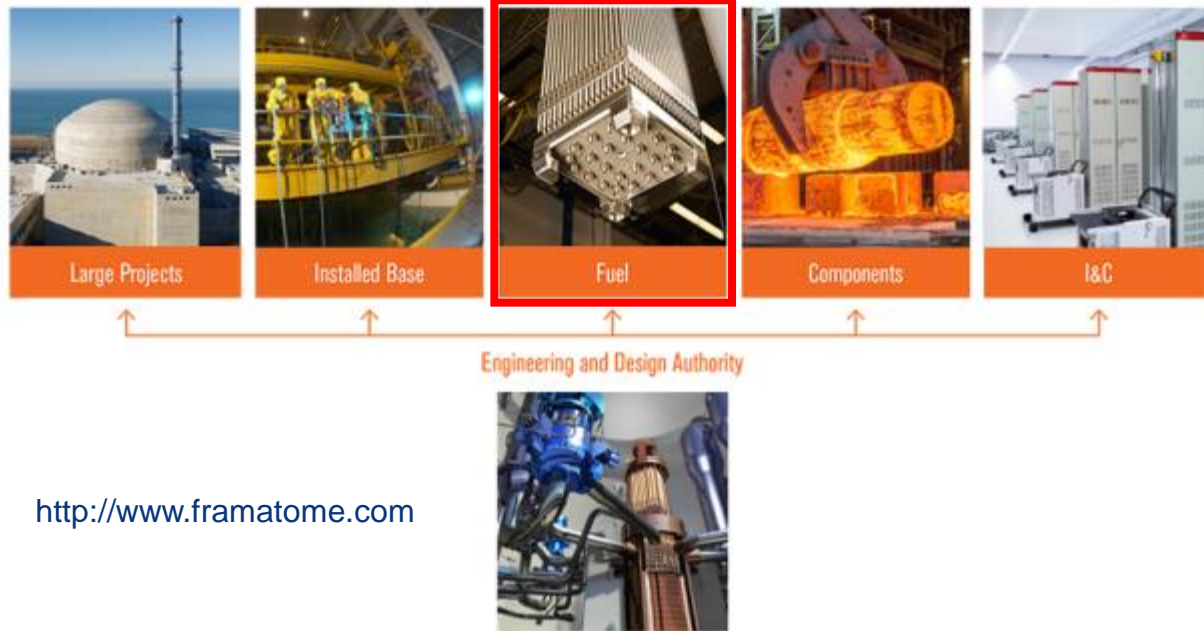
1. Introduction
2. Simulation du laminage à pas de pèlerin
3. Modélisation de l'endommagement ductile
4. Optimisation des paramètres de LPP
5. Conclusion, limitations et perspectives

1. 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%)



Framatome, le combustible nucléaire et le zirconium

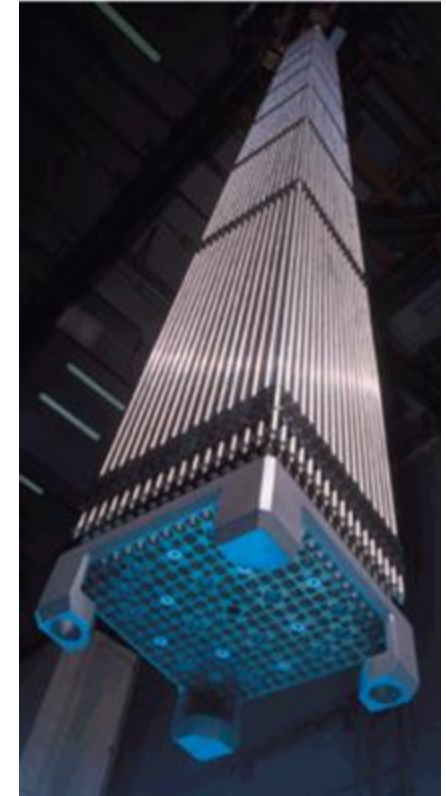
Développement, conception, licensing et fabrication d'assemblages de combustible et de composants pour les réacteurs REP, REB et les réacteurs de recherche

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

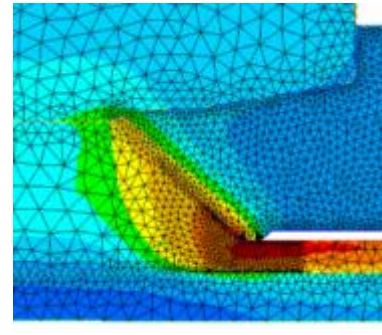


Assemblage de combustible REP

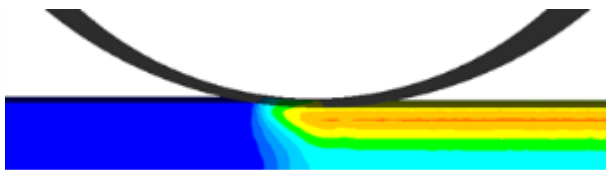
Fabrication des produits Zr et simulation des procédés

Depuis les années 90, Framatome utilise la simulation numérique pour l'optimisation de l'ensemble de la gamme de fabrication des composants Zr, en complément aux expertises métallurgiques et aux essais expérimentaux

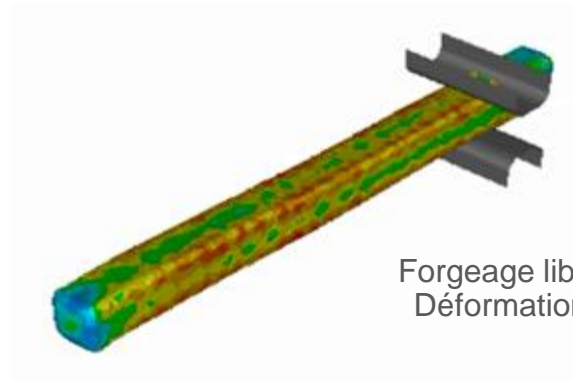
- Métallurgie extractive (du minerai ZrO_2 au Zr métal pur)
- Fusion et refusions des lingots (procédé VAR)
- Procédés de déformation
 - Forgeage libre à chaud
 - Filage à chaud
 - Laminage à chaud et à froid
- Chauffage par induction, traitements thermiques, trempe
- Contrôles Ultrasons



Filage d'un tube
Température



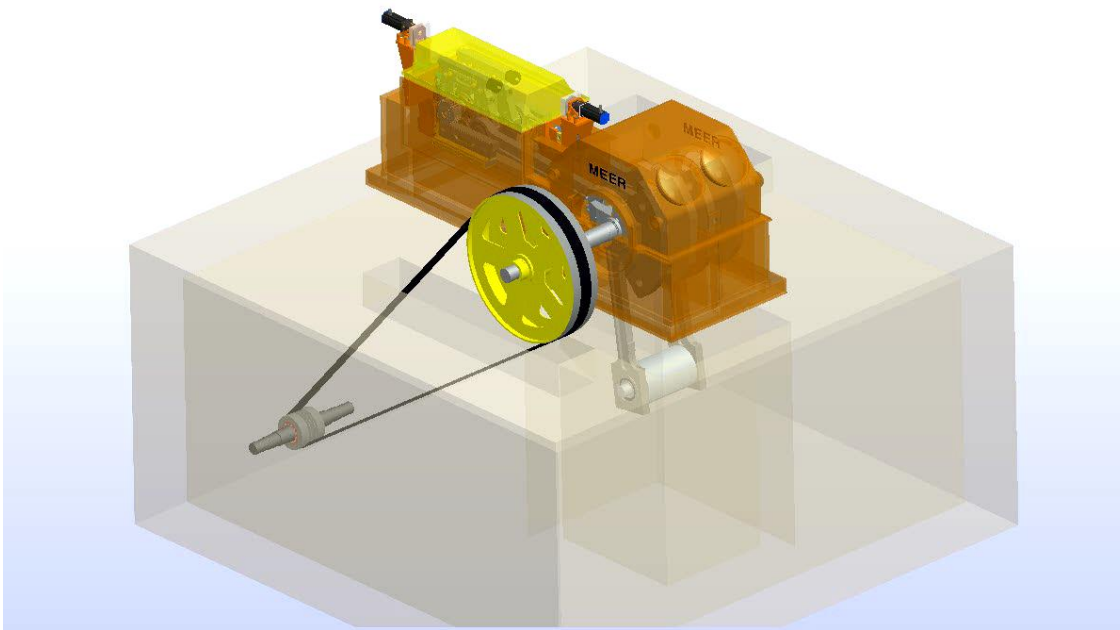
Laminage d'un plat
Déformation



Forgeage libre
Déformation

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 la passe suivante
- Environ 100 passes sont nécessaires pour déformer une section de tube



Principaux paramètres procédé:

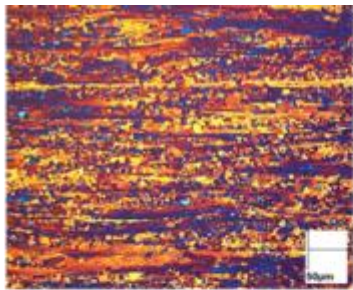
- Rotation et translation du tube avant chaque passe
- Géométrie des outils

Ces paramètres donnent l'amplitude et la répartition des déformation à chaque passe, ainsi que l'état de contrainte durant la déformation

Problématique de l'endommagement lors du LPP

Les défauts se développant lors du LPP sont la raison principale des reprises ou rebuts de tubes lors de leur contrôle à 100%, 3 causes principales:

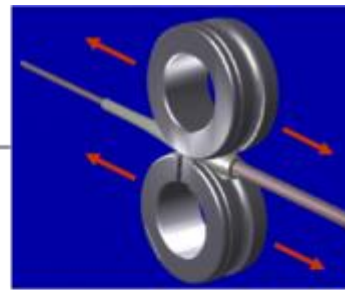
- Hétérogénéités de microstructure des tubes filés qui réduisent la ductilité lors du laminage (a)
- Défauts de surface des tubes filés, replis (d) ou rayures (e)
- Laminage trop sollicitant par rapport à la ductilité de l'alliage (c)



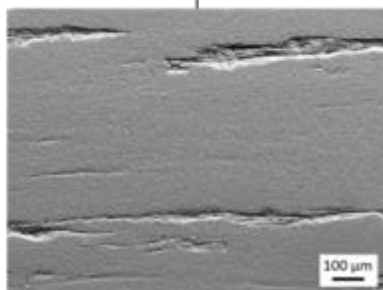
(a)



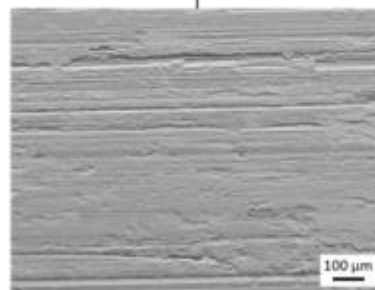
(b)



(c)



(d)



(e)



Besoin de traiter ces 3 problématiques

Cette présentation se focalise sur les paramètres de laminage

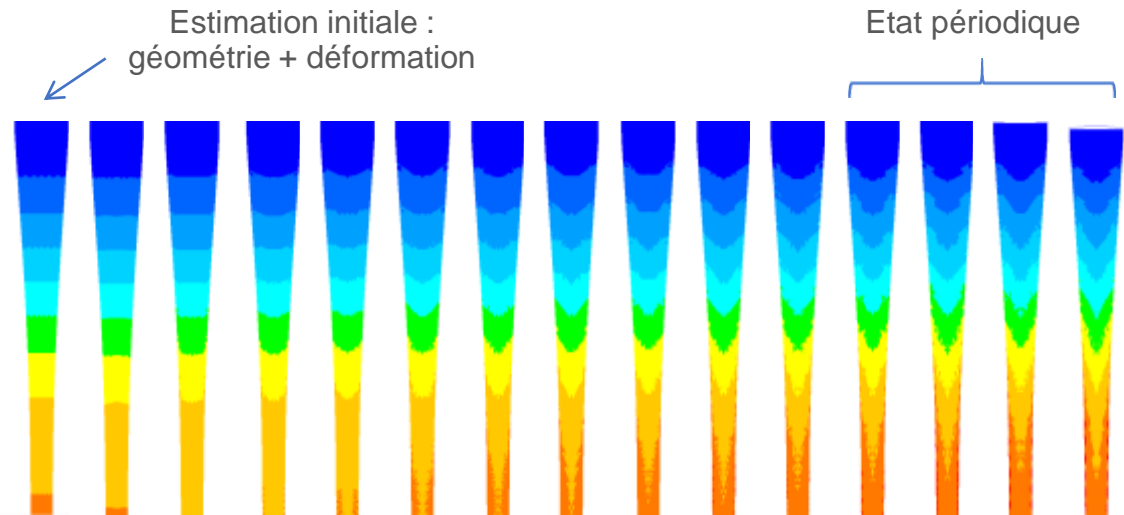
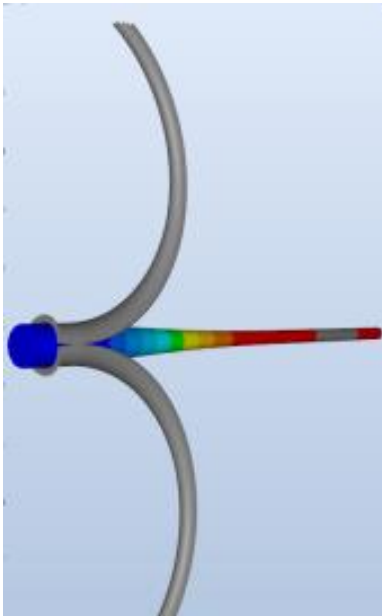
2. Simulation du laminage à pas de pèlerin

Simulation du laminage à pas de pèlerin

Mise en donnée

Hors laminage des extrémités, on peut considérer l'écoulement de matière comme pseudopériodique (pseudopériode = 1 passe)

- Stratégie de simulation : réaliser le nombre de passes suffisantes pour atteindre l'état périodique.
- Pour accélérer la convergence, on choisit un état initial basé sur une estimation de l'état périodique.



Déformation équivalente d'une barre en fonction du nombre de passes

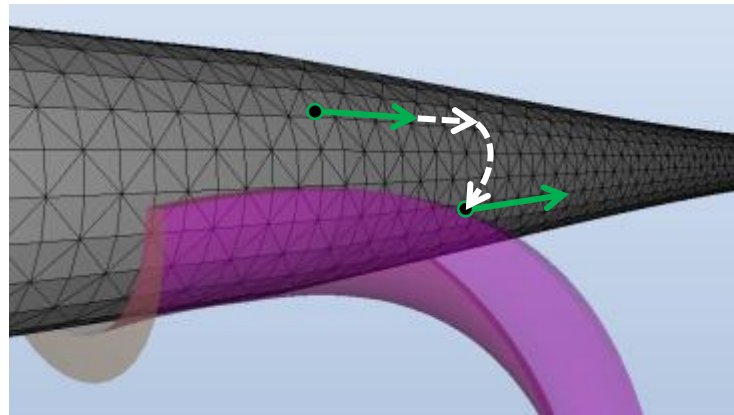
Simulation du laminage à pas de pèlerin

Post-processing

Seulement une dizaine de passes sont simulées : pour reconstruire l'histoire complète d'une particule on utilise les données de plusieurs capteurs sur une période.

Principe du post-processing :

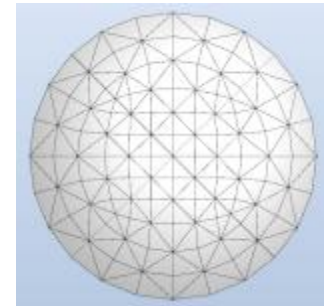
- 1) Suivi d'un capteur sur une passe
- 2) Avance et rotation de la position finale
- 3) Assimilation à un nouveau capteur



L'outil de post-processing se base sur un maillage structuré :

Premier maillage en hexaèdres puis découpages en tétraèdres

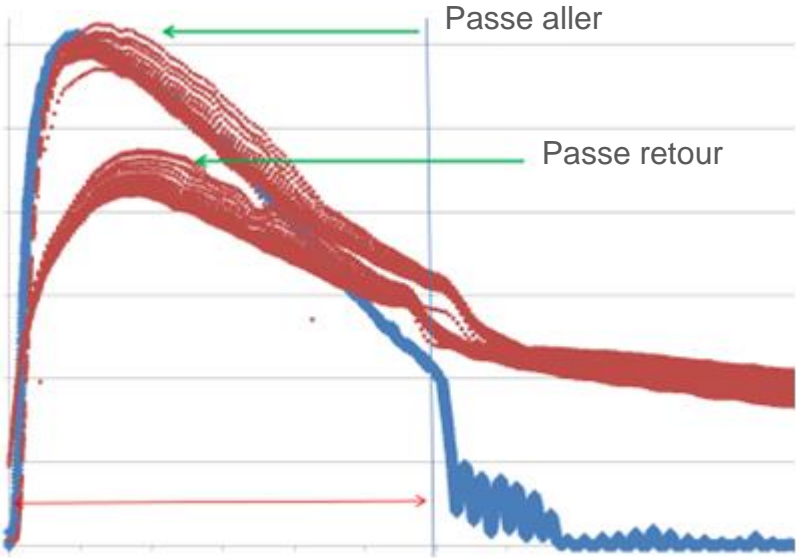
Pas de remaillage possible au cours de la simulation



Simulation du laminage à pas de pèlerin

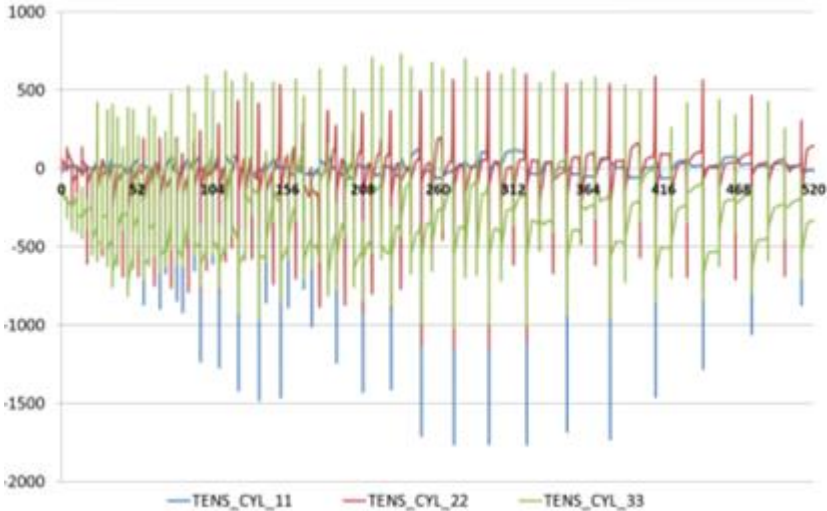
Exemple de résultats

Laminage de barre : effort de séparation des matrices



- Instrumentation sur laminoir
- Simulation (passe aller)

Laminage de tube : histoire des contraintes d'une particule

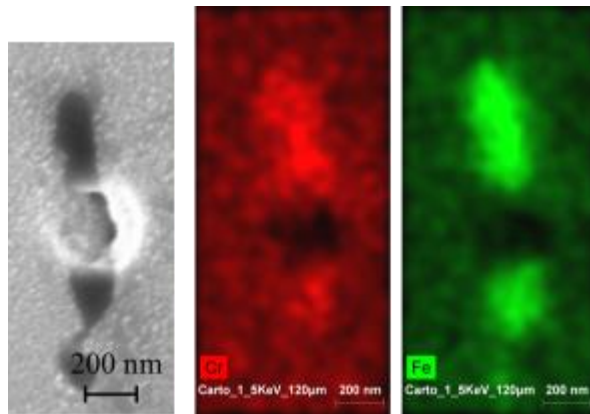


3. Modélisation de l'endommagement ductile

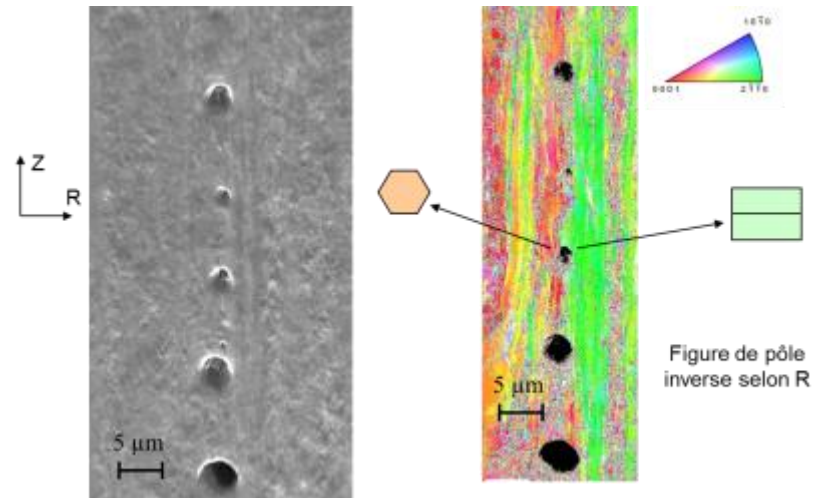
Modélisation de l'endommagement ductile

Mécanismes d'endommagement ductile des alliages de Zr

- Germination de porosités sur les particules de seconde phase et/ou aux joints de grains



Germination de porosités sur un précipité de Fe et Cr

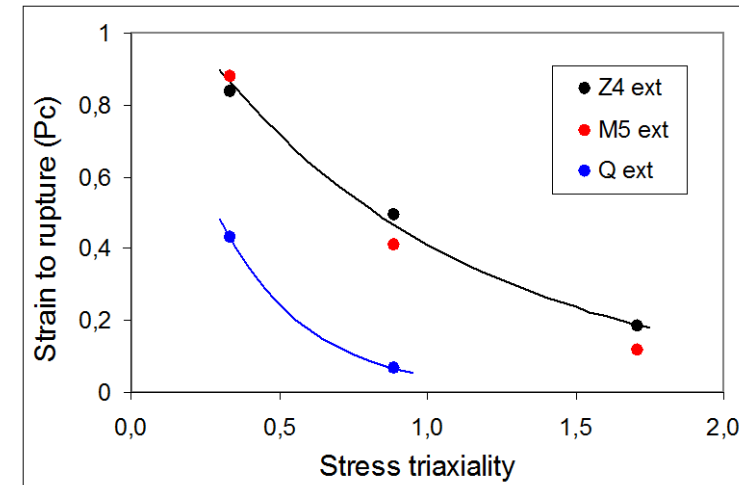
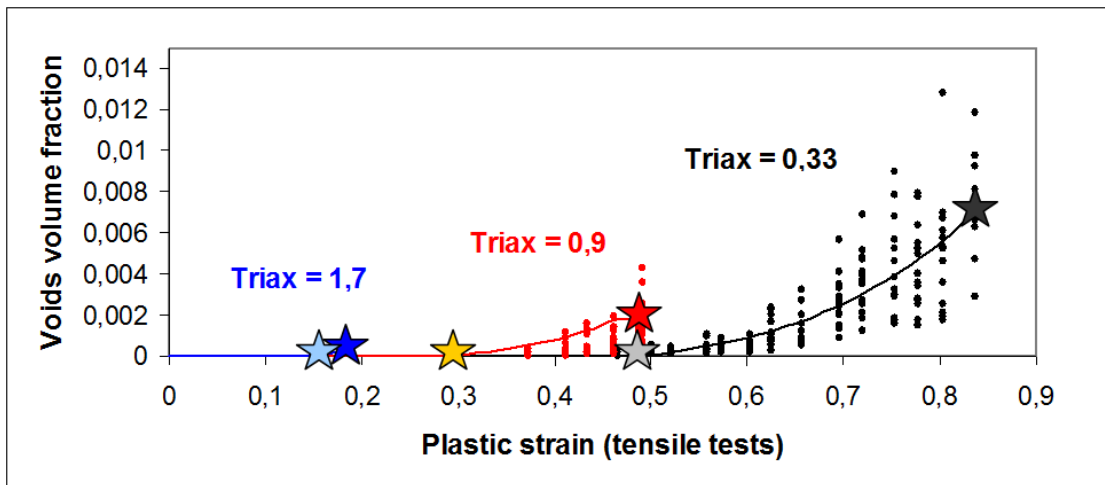


Germination d'un alignement de porosités sur un joint de grain

Modélisation de l'endommagement ductile

Mécanismes d'endommagement ductile des alliages de Zr

- Germination de porosités sur les particules de seconde phase et/ou aux joints de grains
- Croissance des porosités
- Coalescence dès 1 à 2% de taux de porosités
- Ces trois étapes sont fonction de la triaxialité des contraintes



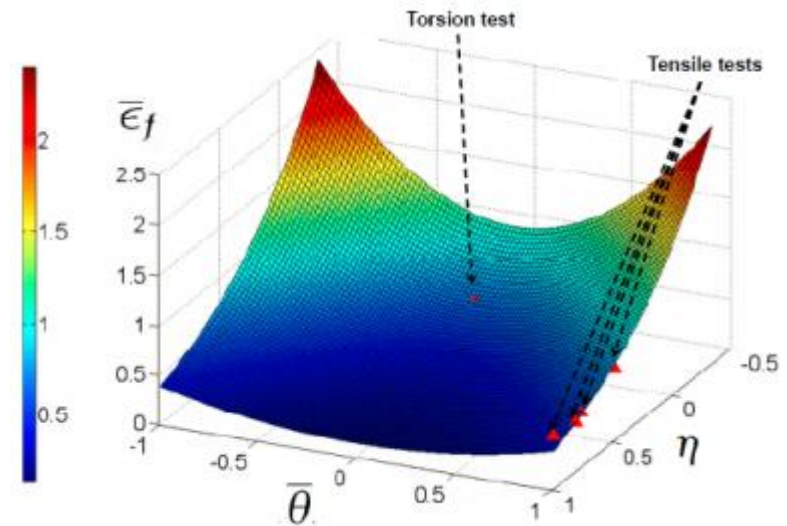
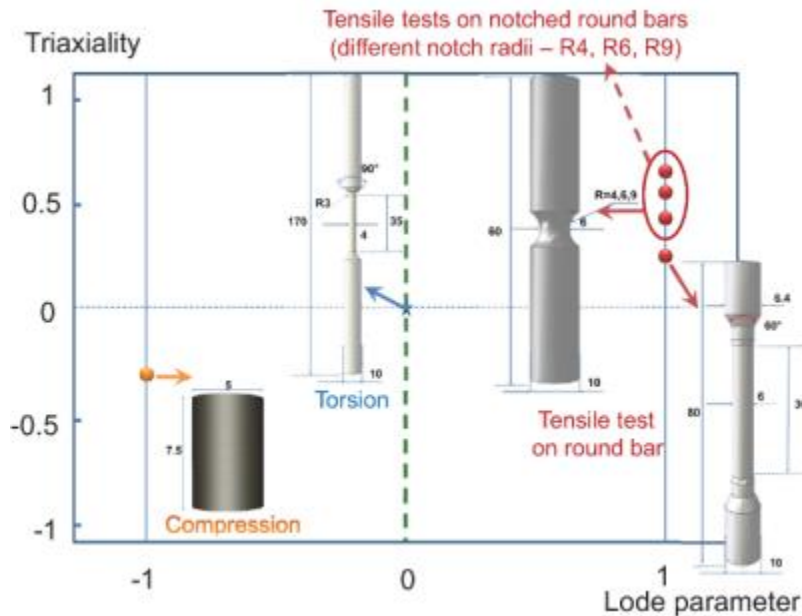
Modélisation de l'endommagement ductile

Identification de modèles d'endommagement ductile

- Modèle de Rice Tracey: Déformation à rupture fonction de la triaxialité
- Modèle de Bai Wierzbicki: Déformation à rupture fonction de la triaxialité et du paramètre de Lode
- Identification des paramètres par analyse inverse d'essais mécaniques

$$\bar{\epsilon}_f(\eta, \bar{\theta}) = \left[\frac{1}{2} (D_1 e^{-D_2 \eta} + D_5 e^{-D_6 \eta}) - D_3 e^{-D_4 \eta} \right] \bar{\theta}^2 + \frac{1}{2} (D_1 e^{-D_2 \eta} - D_5 e^{-D_6 \eta}) \bar{\theta} + \boxed{D_3 e^{-D_4 \eta}}$$

Rice Tracey

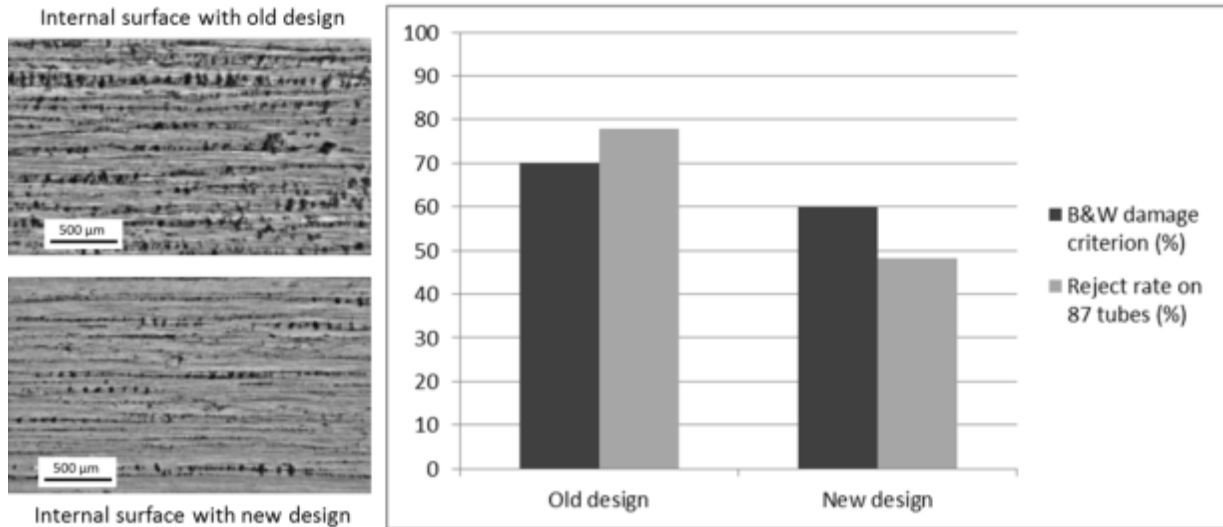


4. Optimisation des paramètres de LPP

Optimisation des paramètres de LPP

Réduction des défauts en surface interne des tubes

- Les simulations + calcul à posteriori de l'endommagement cumulé pour 2 design de matrices
- Avec le nouveau design (état de contraintes plus compressif), l'endommagement calculé est plus faible
- Ce résultat a été confirmé par des essais industriels montrant un taux de rejet inférieur avec le nouveau design



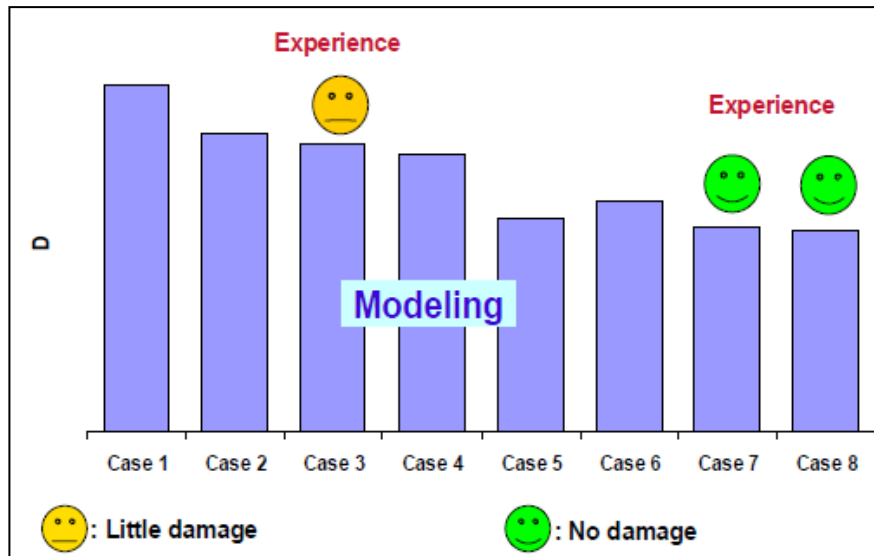
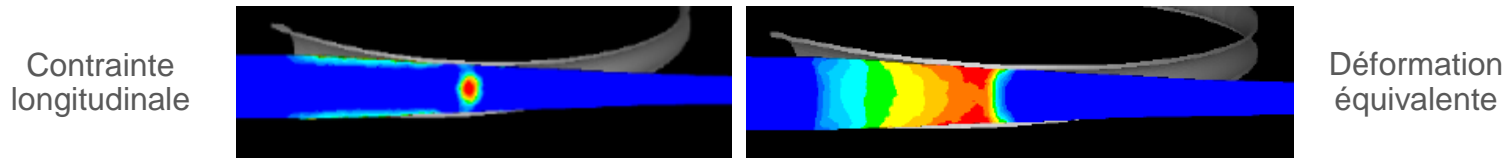
Le taux de rejet standard est inférieur à 5%, cet essai a été réalisé avec des tubes non-standard présentant de fortes hétérogénéités de microstructure et des défauts e surface préexistants issus du filage à chaud, dans le but de maximiser l'effet des matrices de laminage

Comparaison de 2 design de matrices, critère d'endommagement de B&W sur la surface interne et taux de rejet mesuré lors des essais industriels

Optimisation des paramètres de LPP

Réduction des porosités au cœur des barres

- Dans le cas de barres laminées par LPP, des porosités peuvent apparaître au cœur
- Un plan d'expérience numérique a permis de dégager les paramètres de laminage influents
- Les résultats ont été confirmés par des essais industriels et les paramètres ont été optimisés

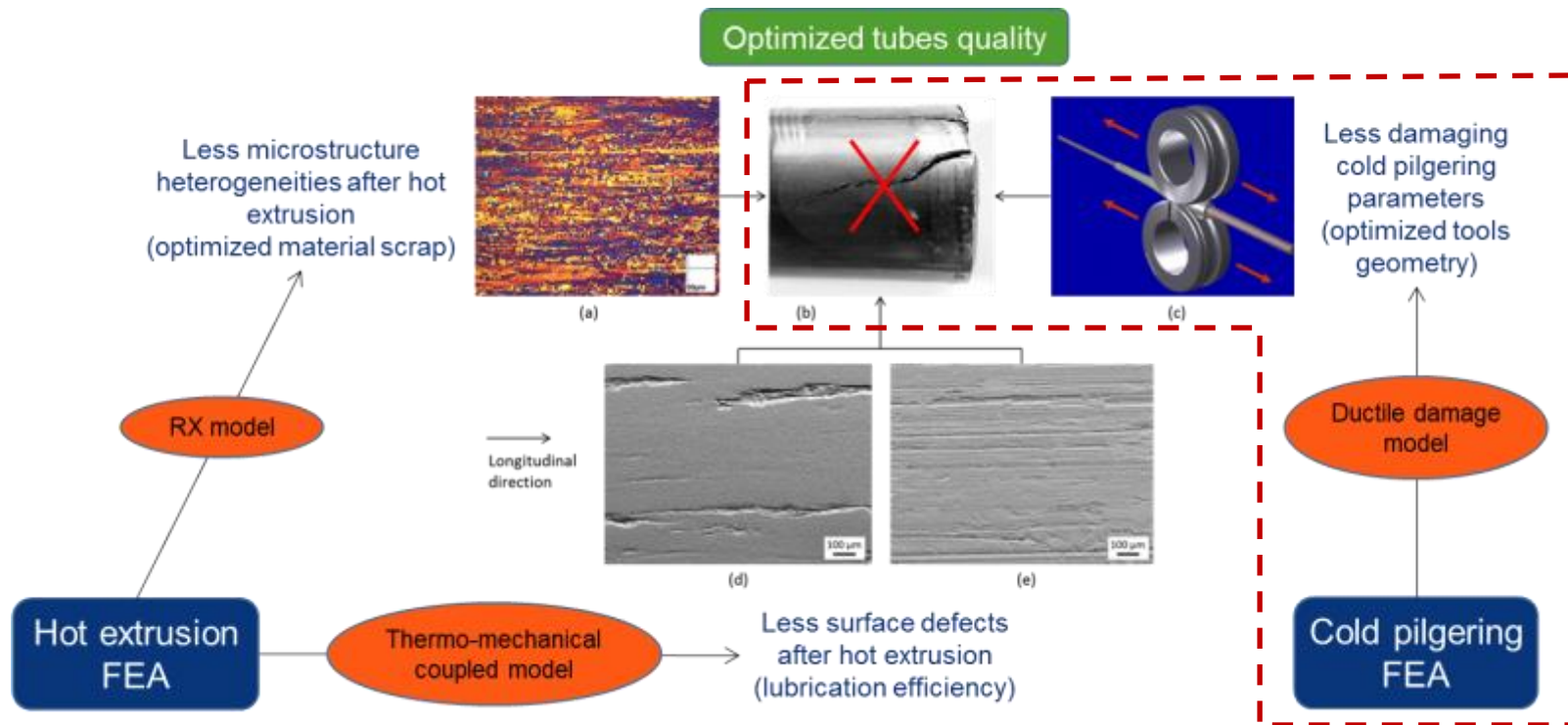


Cas	Dépouille de la matrice	Longueur zone de réduction	Avance
1	+	-	+
2	-	-	+
3	+	-	-
4	-	-	-
5	+	+	+
6	-	+	+
7	+	+	-
8	-	+	-

5. Conclusions et perspectives

Conclusions

Optimisation de la fabrication des tubes de gainage par simulation des procédés de filage et de laminage à pas de pèlerin



Limitations et Perspectives

Le modèle actuel de LPP permet d'optimiser le procédé vis-à-vis de l'endommagement mais reste qualitatif

Problématique numériques

- Le temps de calcul limite la finesse du maillage et la précision des gradients dans l'épaisseur du tube
→ Nouvelles méthodes numériques à développer ?

Problématiques matériaux

- L'état de surface initial impacte directement la fissuration lors du LPP mais n'est pas pris en compte dans la modélisation de l'endommagement
- Les gradients de microstructure (bord / cœur, début / fin de filage, tête / pied de coulée) sont difficiles à prendre en compte
- Forte texture cristallographique: comportement anisotrope du matériau (comportement mécanique et endommagement). Non pris en compte actuellement.

Problématique des modèles d'endommagement

- Trajet de chargement complexe (cyclique et multidirectionnel traction / compression / cisaillement): Validité des modèles et de l'hypothèse de cumul de l'endommagement ?

Limitations et Perspectives

Autres perspectives industrielles pour la simulation du LPP

Evolution de la microstructure

- Modèles de recristallisation (déformation à froid puis TTh)
 - Modèles d'évolution de texture cristallographique
 - Prise en compte de la microstructure initiale plus ou moins homogène
- Variable matériau locale dans les modèles d'endommagement ?

Efforts de laminage

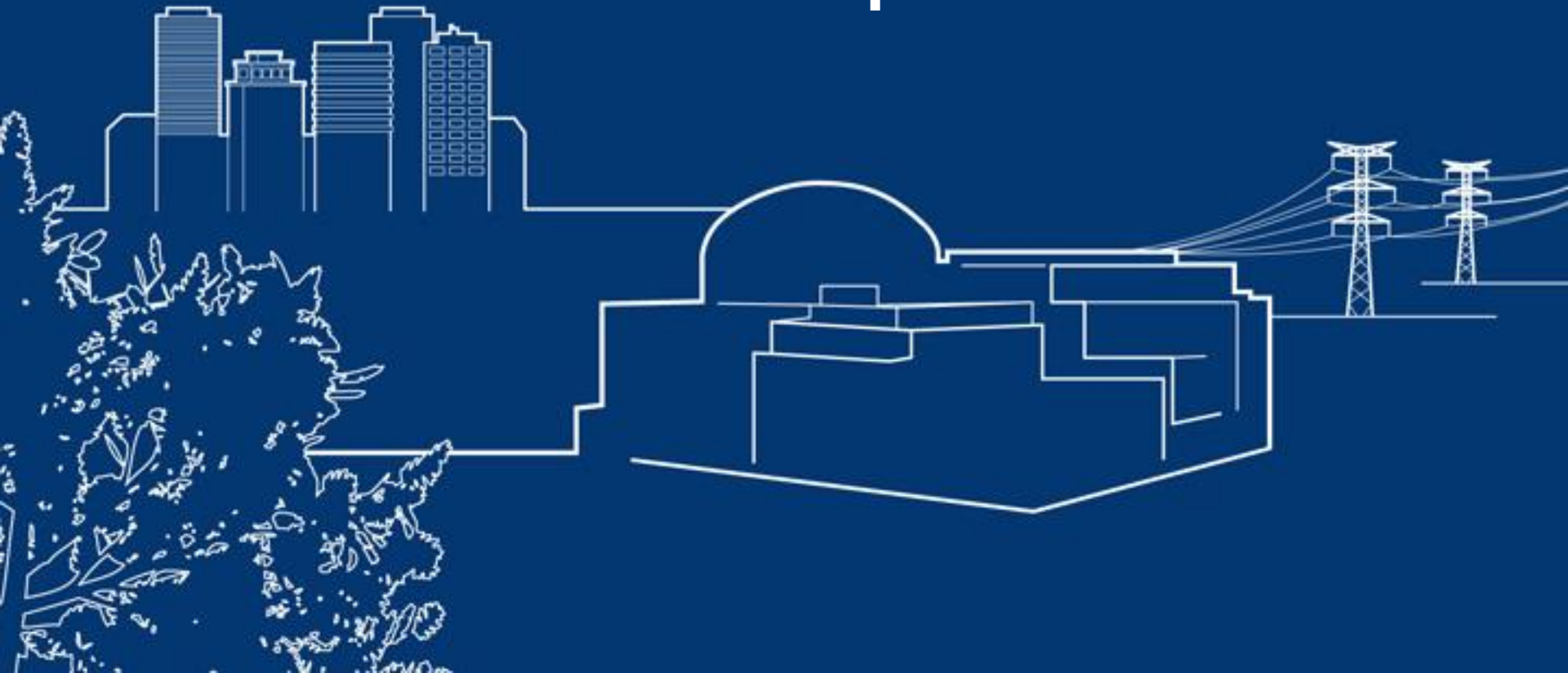
- La prise en compte de l'anisotropie et des fortes vitesses de déformation serait nécessaire pour une plus grande précision

Géométrie des produits laminés

- La prise en compte de la déformation des matrices / du mandrin / des cages serait nécessaire pour une plus grande précision (+ impact sur l'endommagement calculé localement): calcul avec outils déformables actuellement inaccessible à cause du temps de calcul

framatome

**Merci pour votre attention
Des questions ?**



Toute reproduction, modification, transmission à tout tiers ou publication totale ou partielle du document et/ou de son contenu est interdite sans l'accord préalable et écrit de Framatome.

Ce document et toute information qu'il contient ne doivent en aucun cas être utilisés à d'autres fins que celles pour lesquelles ils ont été communiqués. Tout acte de contrefaçon ou tout manquement aux obligations ci-dessus est passible de poursuites judiciaires.