



SAFRAN



26/08/2021

Etude de modes géométriques pour des jumeaux numériques d'éprouvettes en superalliage monocristallin

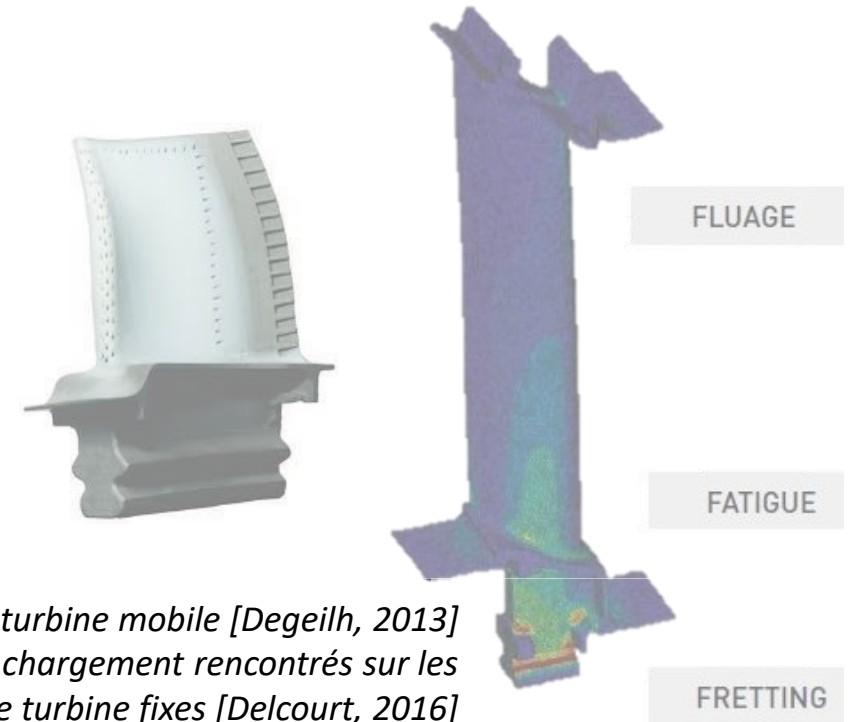
Suivi expérimental et numérique d'essais de fluage sur éprouvettes en superalliage monocristallin

MESBAH Daria

Tuteurs industriels: REMACHA Clément, CARIOU Romain

Tuteurs académiques: AUBLET Axel, RYCKELYNCK David, KERFRIDEN Pierre

- Contexte industriel
- Algorithme de « Mesh Morphing »
- Etude d'influence des modes géométriques
- Prochaines étapes



(Gauche) Aube de turbine mobile [Degeilh, 2013]
(Droite) Modes de chargement rencontrés sur les aubes de turbine fixes [Delcourt, 2016]

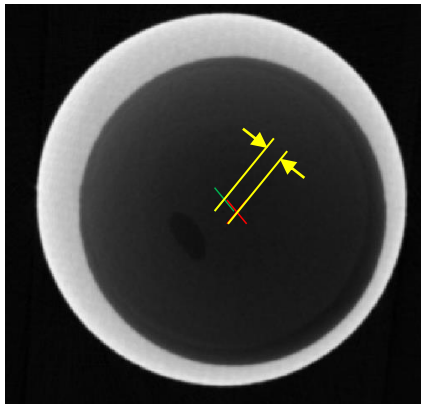
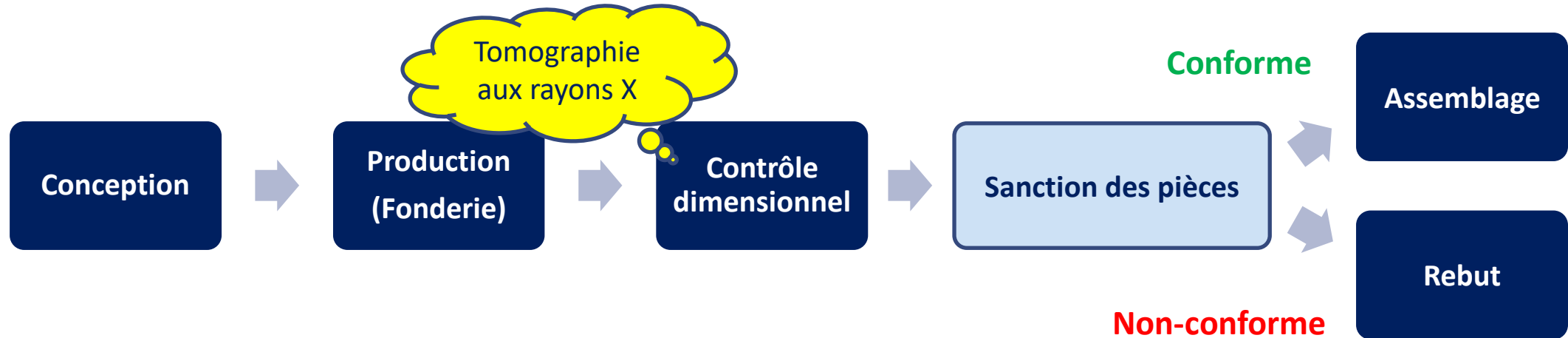
- 🌀 *Contexte industriel*
- 🌀 *Algorithme de « Mesh Morphing »*
- 🌀 *Etude d'influence des modes géométriques*
- 🌀 *Prochaines étapes*

Grappe multi-empreintes en cire fonderie cire perdue. [Soro, 2018]

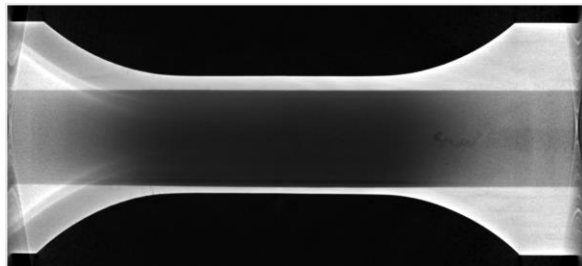


Safran PFX (Projet de Fonderie eXpérimentale)

➤ Plateforme de recherche sur les **aubes de turbine** avancées des moteurs Safran Aircraft Engines et Helicopter Engines



Contrôle des pièces par tomographie aux rayons X illustrant un **défaut géométrique** (désaxage du noyau)



Observation:

- Fixation imparfaite du noyau céramique interne
- ➔ Mouvement lors de la coulée
- ➔ Désaxage + Rotation de l'alésage

Automatisation de la sanction des pièces de fonderie en superalliage monocristallin

Bloc 1

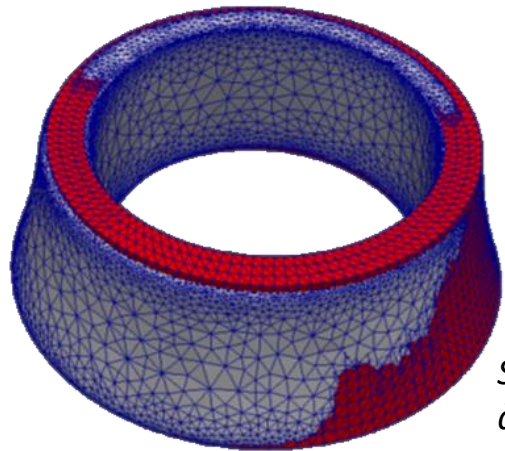
Contrôle de la pièce produite par tomographie

Bloc 2 - Projet DMS

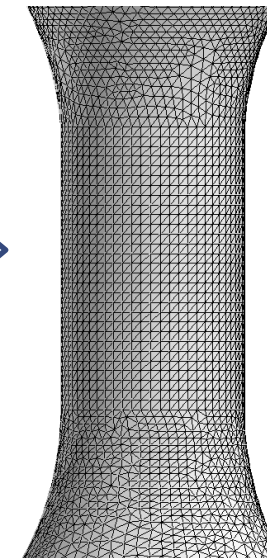
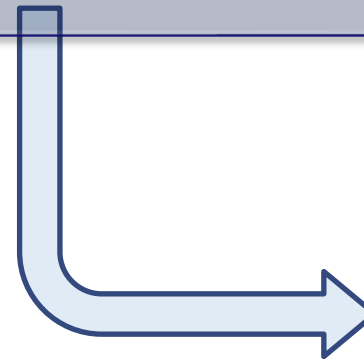
Opération de **mesh morphing** pour adapter la géométrie de la **CAO** à la pièce réelle (**filtrée**)

Bloc 3

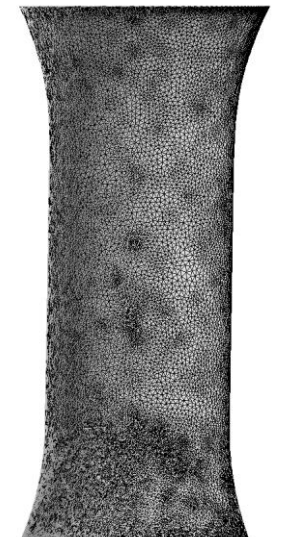
Calcul de **DDV** sur CAO déformée



Superposition des maillages générés à partir de la tomographie aux rayons X (bleu) et de la CAO (rouge)

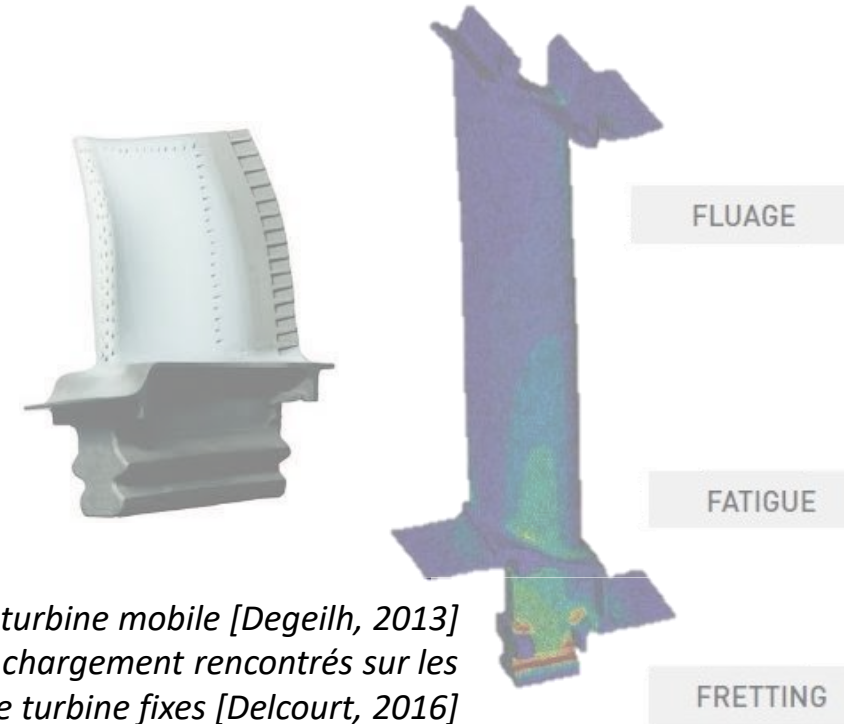


Maillage CAO



Maillage Tomo

- Contexte industriel
- Algorithme de « Mesh Morphing »
- Etude d'influence des modes géométriques
- Prochaines étapes

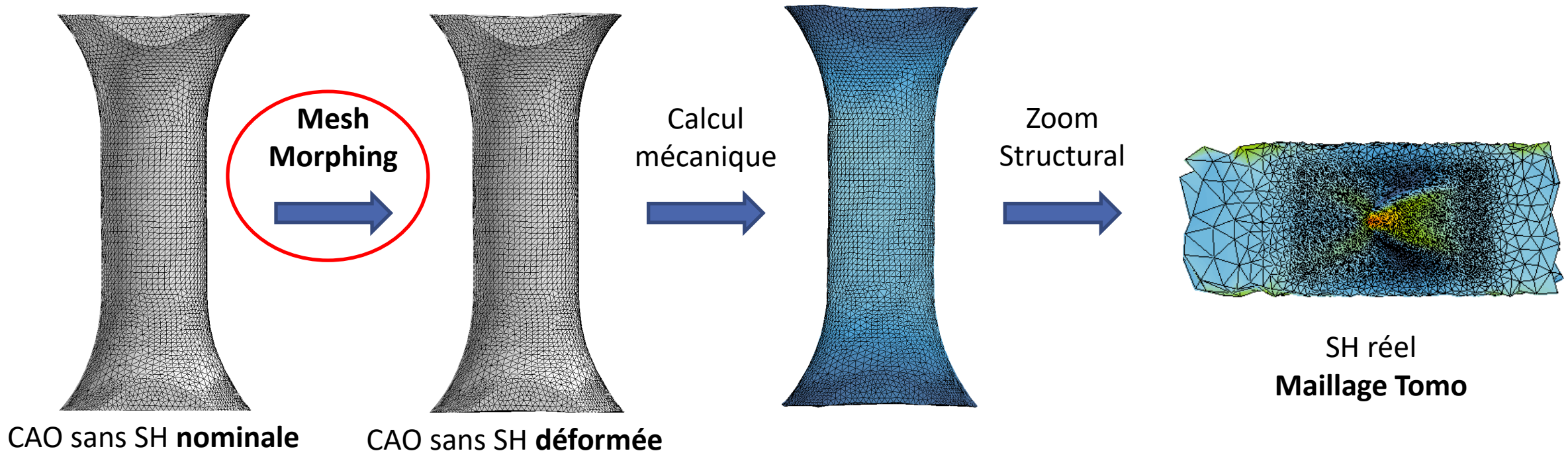


(Gauche) Aube de turbine mobile [Degeilh, 2013]
(Droite) Modes de chargement rencontrés sur les aubes de turbine fixes [Delcourt, 2016]

Algorithme de « mesh morphing »

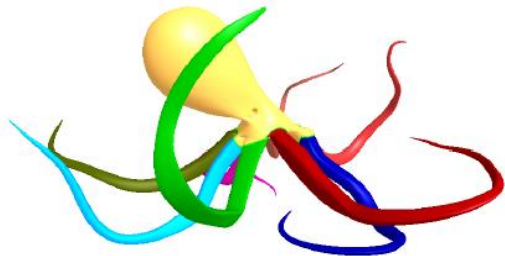
- Explications du cas d'application

- (thèse d'Axel Aublet) Eprovettes tubulaires avec *shaped hole* (SH)
- « Mesh morphing » : Capturer les variations géométriques globales **loin** du SH = utilisation d'une **CAO sans SH**
- « Zoom Structural » sur SH (Tomo) avec CL paramétrées par les variations géométriques (issues du morphing)

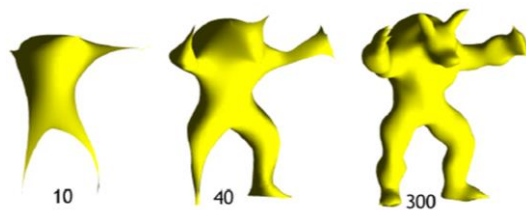


Algorithme de « mesh morphing »

- Algorithme basé sur l'analyse spectrale de formes (*Spectral Shape Analysis*)
 - Comparaison de géométries à l'aide de **descripteurs de formes** (shape fingerprints) **locaux** ou **globaux**



Utilisation de modes pour segmenter une géométrie [Reuter, 2013]

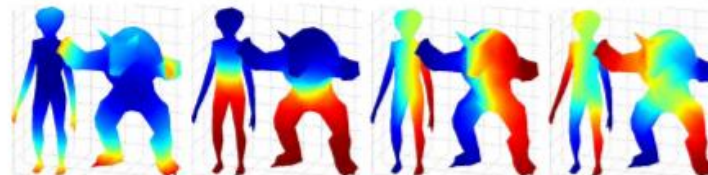


Reconstruction de géométrie par considération d'un nombre croissant de modes [Levy, 2006]

Calculés en chaque point du modèle
= membres de décomposition

Calculés pour chaque modèle
= signatures de géométrie

Reconnaissance de formes par projection de modes (Eigenmaps) [Zhang et al., 2010]



Spectre de l'opérateur « graph Laplacien » (Laplacien du graphe)

Algorithme de « mesh morphing »

- Spectre de l'opérateur « *graph Laplacian* » (Laplacien du graphe)
 - Approximation du spectre de l'opérateur de Laplace-Beltrami (variétés riemanniennes - surfaces continues)
 - Représentation matricielle du maillage – Lien avec la théorie des graphes

Matrice d'adjacence

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Matrice laplacienne

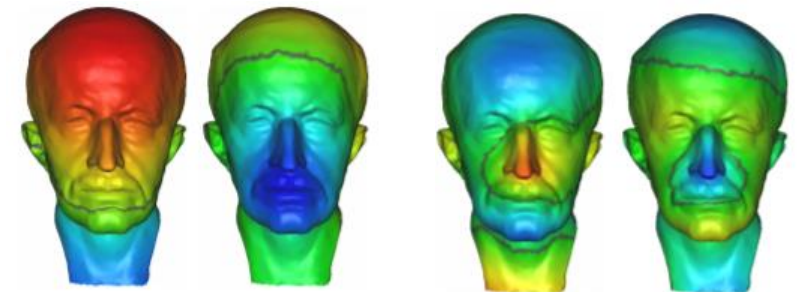
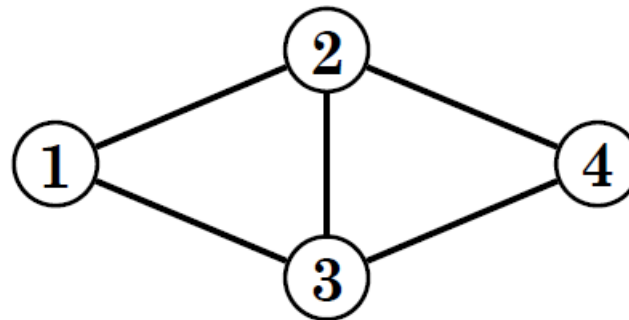
$$L = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 3 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 3 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

Problème aux valeurs propres
 $\tilde{L}\phi = \lambda\phi$

Vecteurs propres (modes)
= Laplacian Eigenmaps
 $(\phi_i)_{i=1 \rightarrow 4}$

Matrice de degré

$$D = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$



Modes 1 et 2 Modes 11 et 12
Projection de modes sur le maillage (*Eigenmaps*)
[Zhang et al., 2010]

[Sawada, 2016]

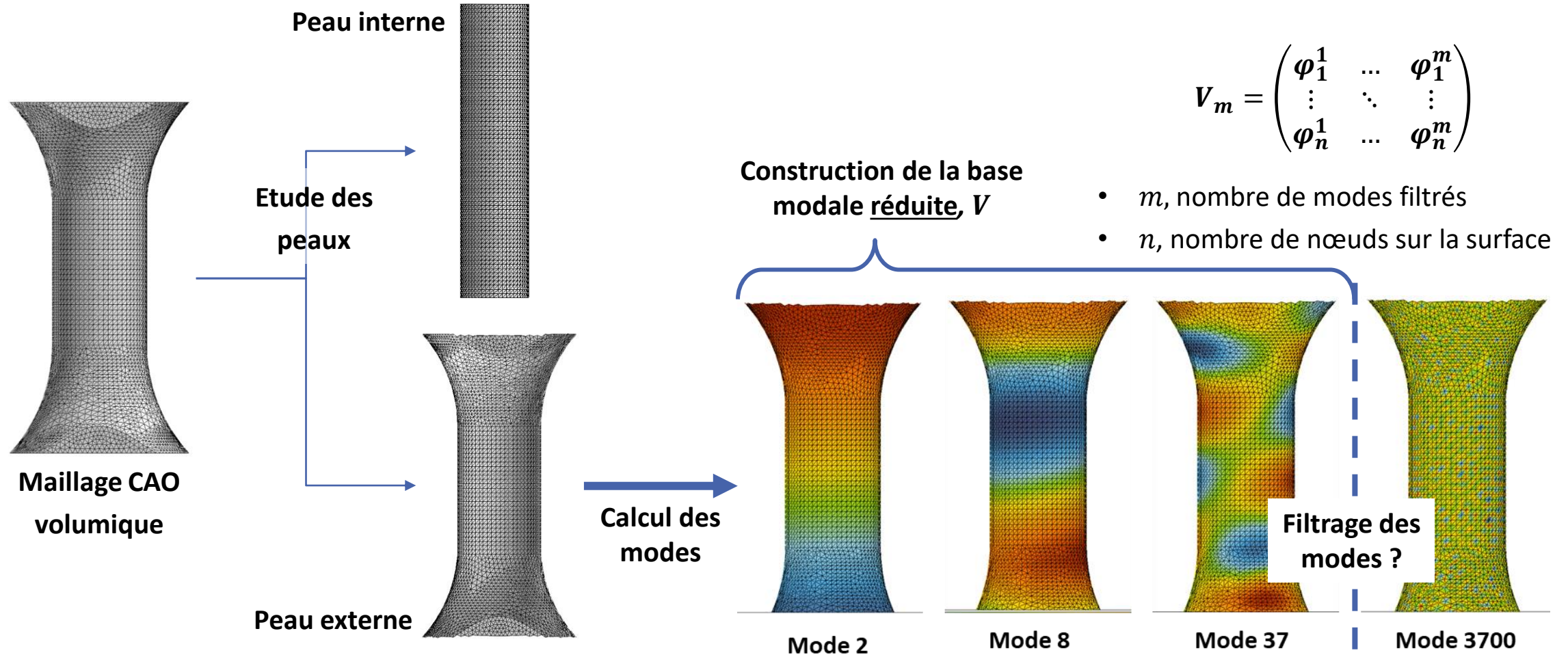
Algorithme de « mesh morphing »

Géométrie
CAO sans SH

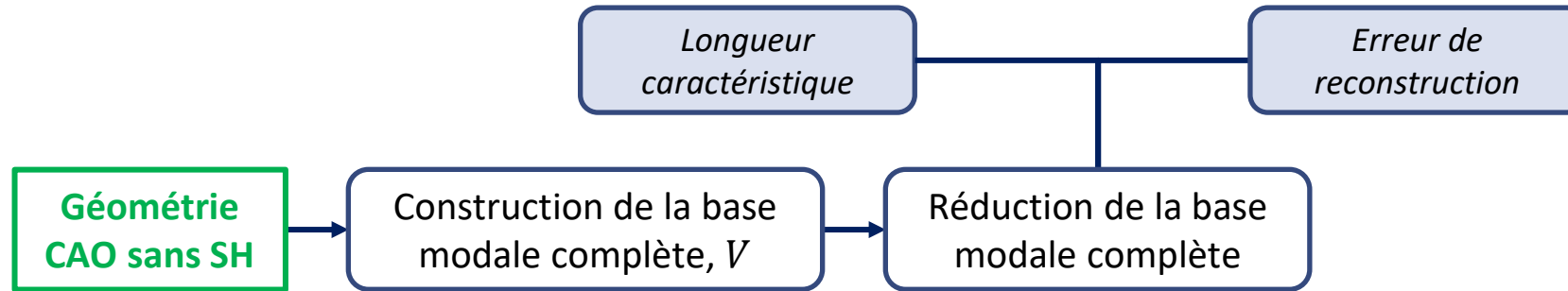
Construction de la base
modale complète, V

Algorithme de « mesh morphing »

Construction de la base modale complète, V

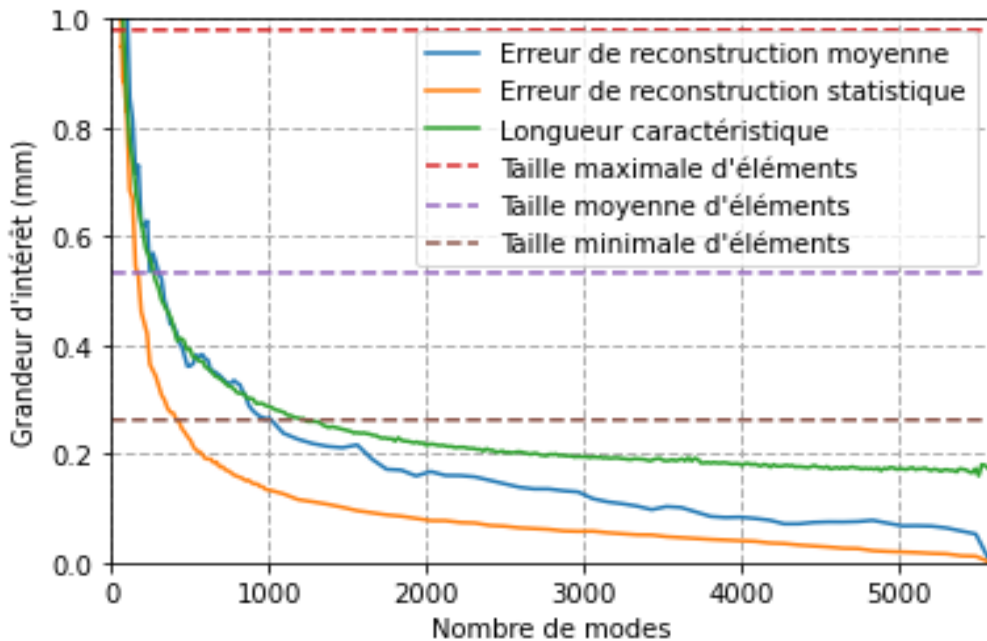


Algorithme de « mesh morphing »

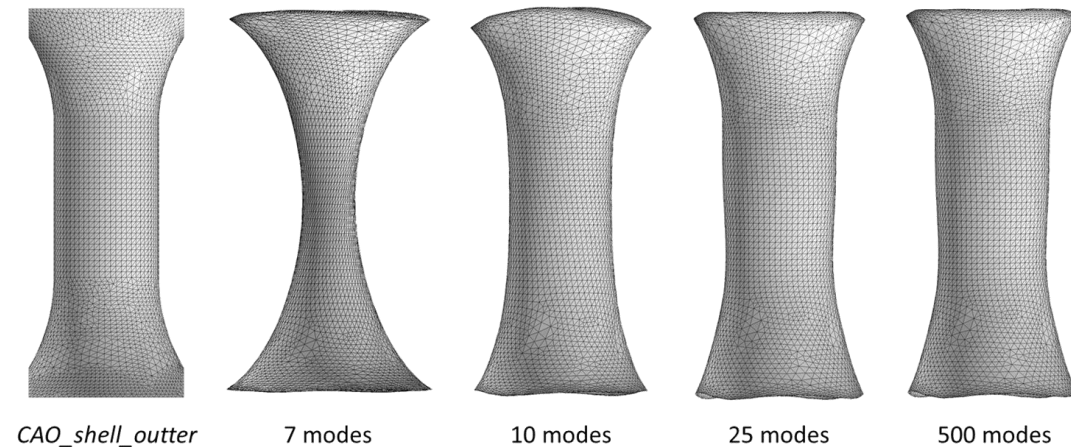
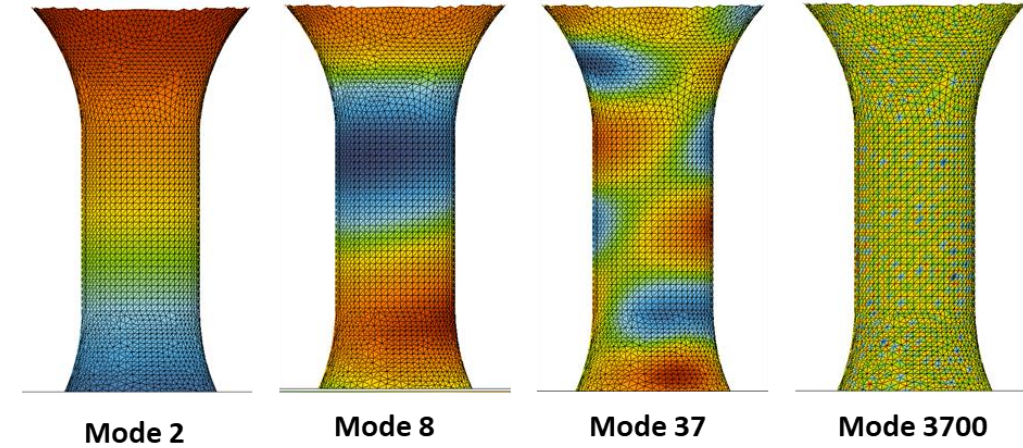


Algorithme de « mesh morphing »

- Réduction de la base modale (1/2) :
 - Longueur caractéristique des modes
 - Erreur de reconstruction « moyenne »
 - Erreur de reconstruction « statistique » (99% des nœuds)



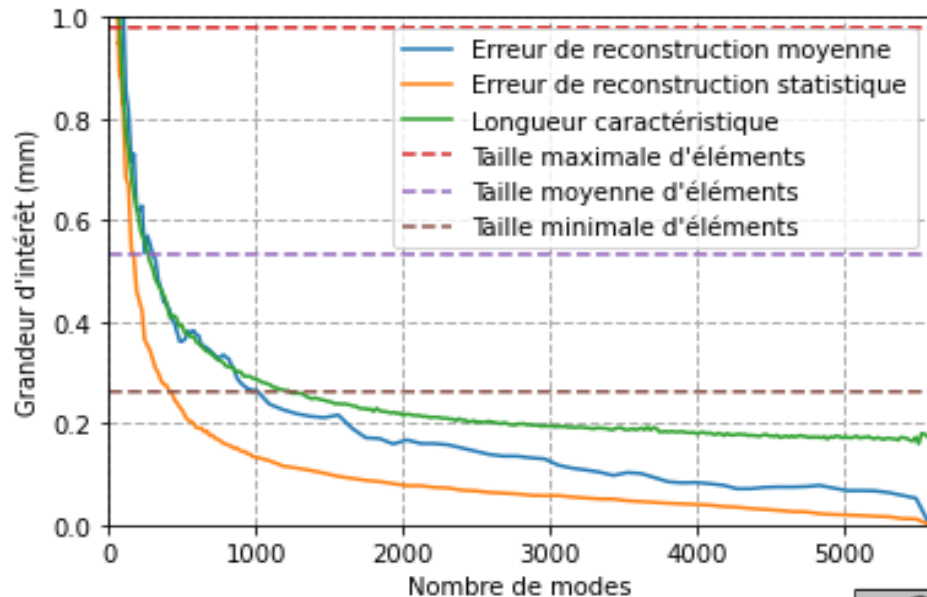
Evolution de la longueur caractéristique des modes et de l'erreur de reconstruction par troncature de la base modale



Erreur moyenne augmente sous l'effet de l'approximation de reconstruction de **1%** des nœuds

Algorithme de « mesh morphing »

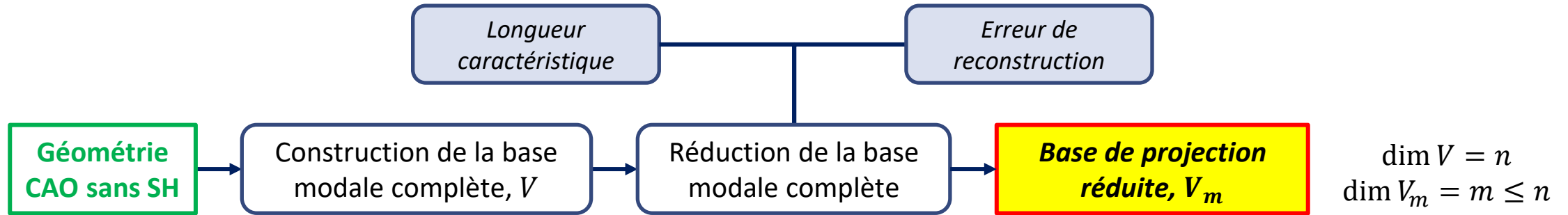
- Réduction de la base modale (2/2) :



Evolution de la longueur caractéristique des modes et de l'erreur de reconstruction par troncature de la base modale

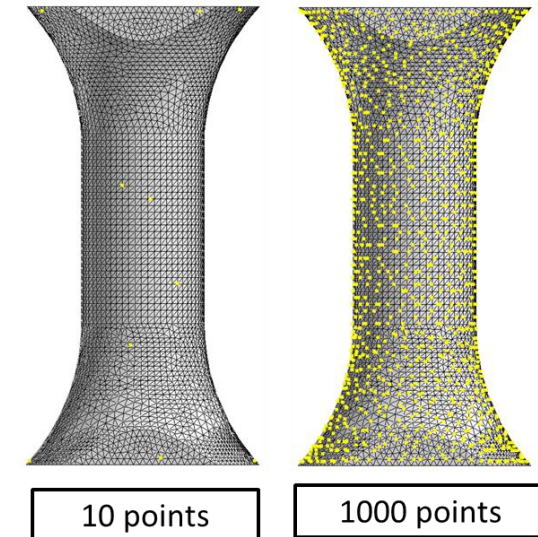
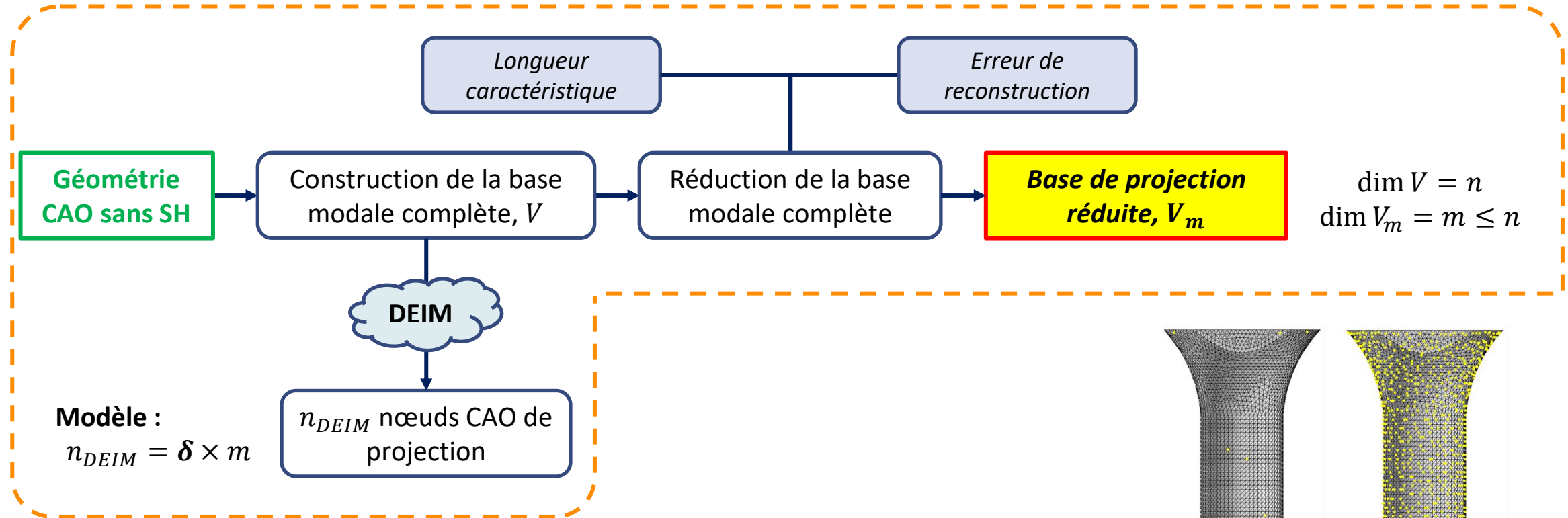
Critère	Longueur caractéristique	Erreur de reconstruction	Dimension de la base réduite
<i>CAO_shell_inner</i>			
crit_min	133	56	133
crit_mean	196	80	196
crit_max	246	155	246
<i>CAO_shell_outter</i>			
crit_min	101	155	155
crit_mean	289	338	338
crit_max	1246	1186	1246

Algorithme de « mesh morphing »



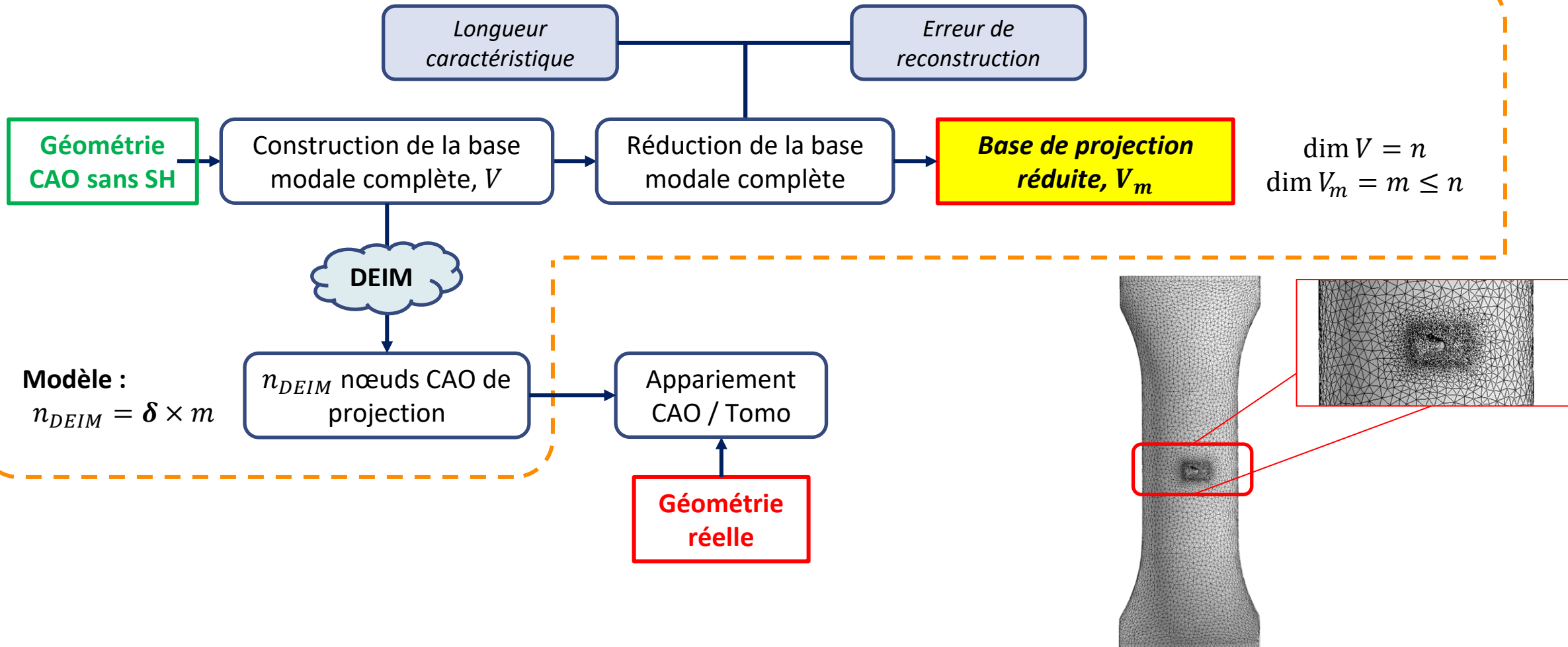
Algorithme de « mesh morphing »

Partie 1 : Etapes spécifiques à la CAO



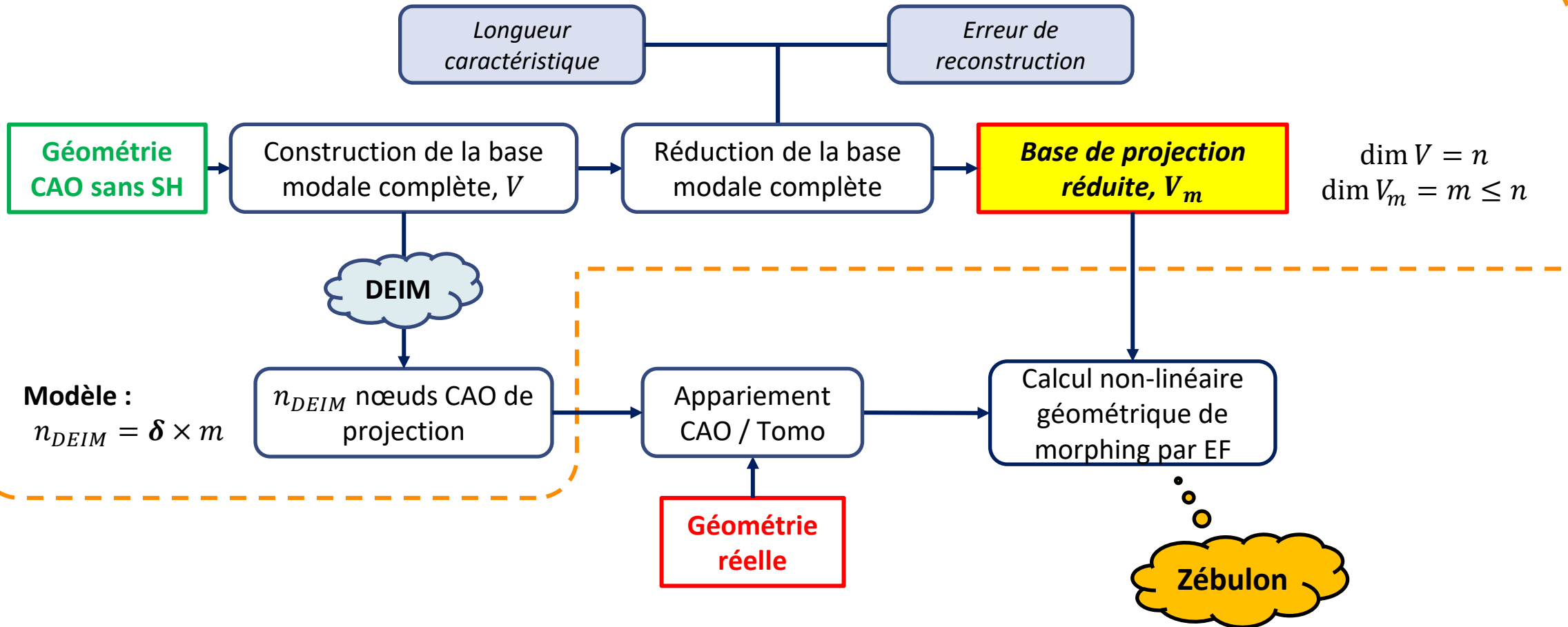
Algorithme de « mesh morphing »

Partie 1 : Etapes spécifiques à la CAO



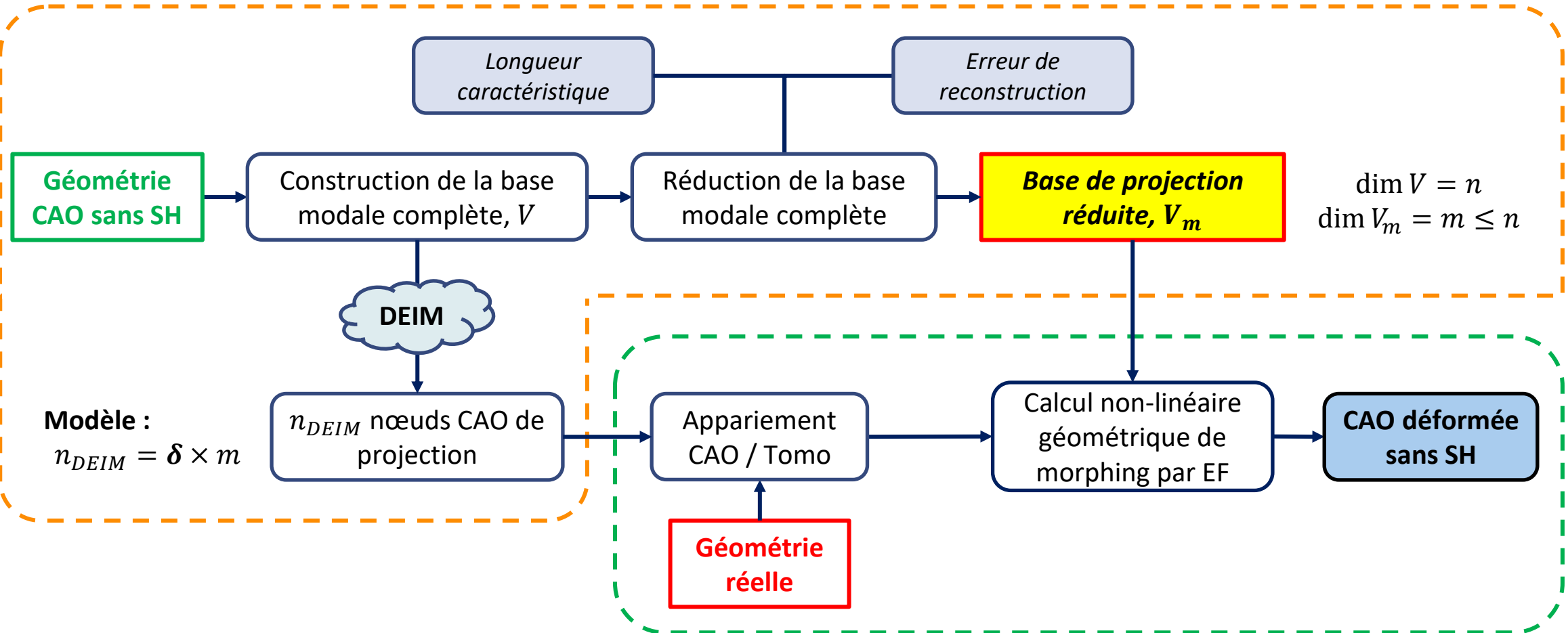
Algorithme de « mesh morphing »

Partie 1 : Etapes spécifiques à la CAO



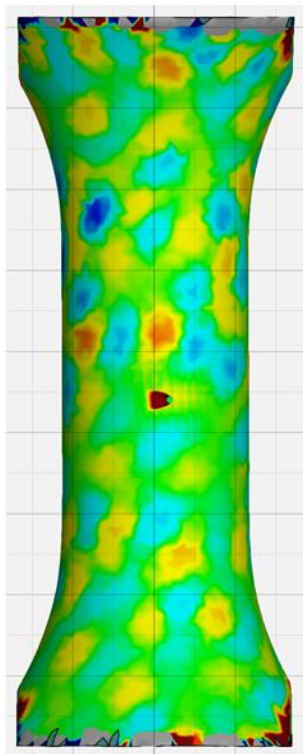
Algorithme de « mesh morphing »

Partie 1 : Etapes spécifiques à la CAO

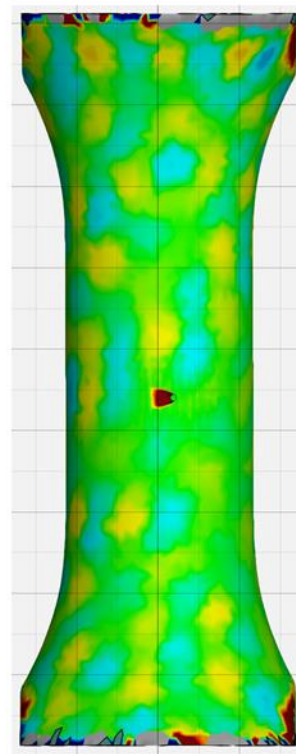


Algorithme de « mesh morphing »

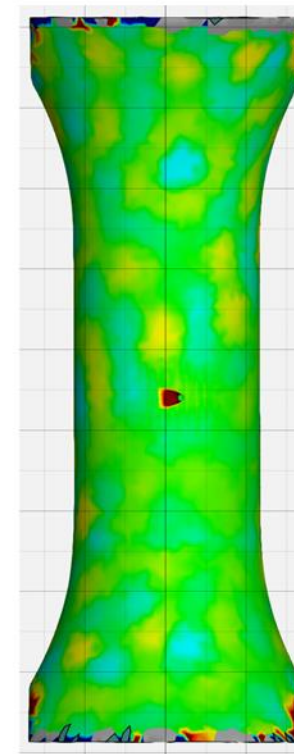
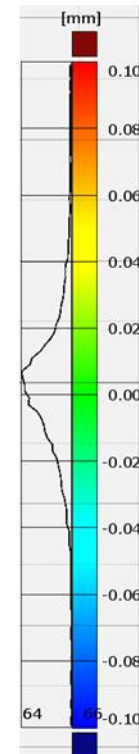
- Etude du résidu géométrique : écart CAO déformé / Tomo projeté sur le maillage Tomo
 - Amélioration de la qualité du « morphing » : augmentation du nombre de nœuds CAO de projection



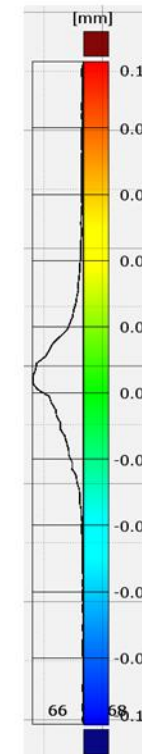
Facteur 2
 $t = 341 s = 6 min$



Facteur 4
 $t = 747 s = 12 min$

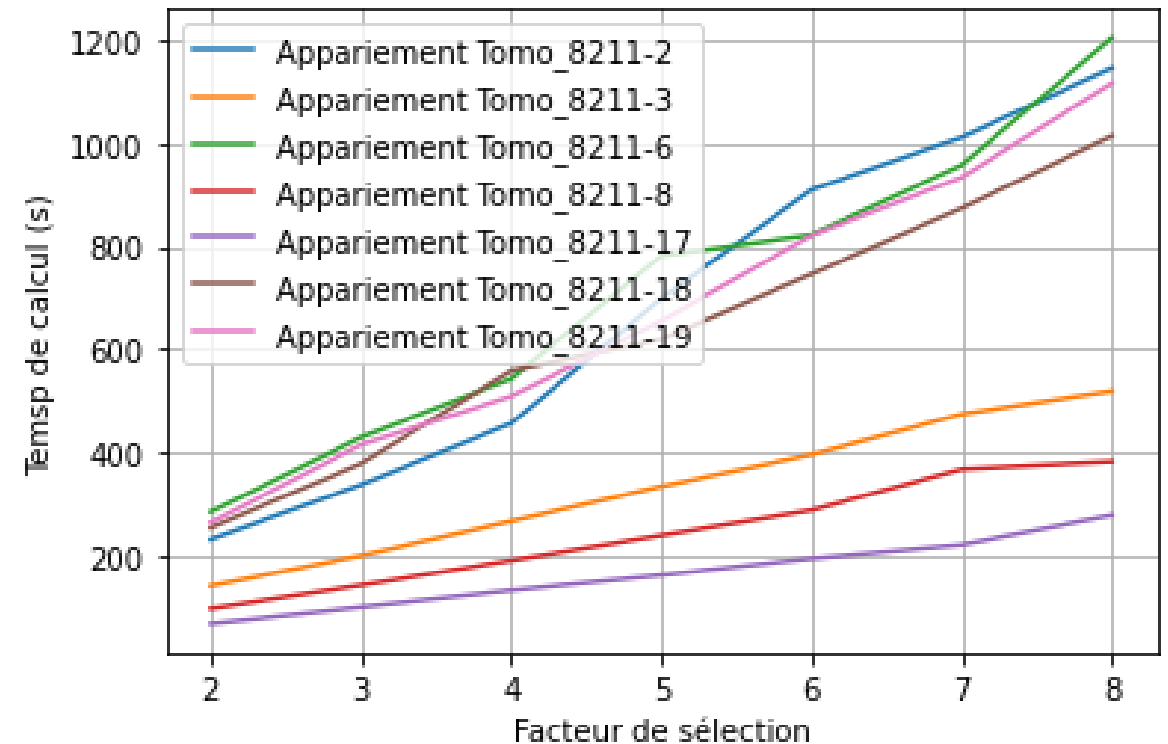
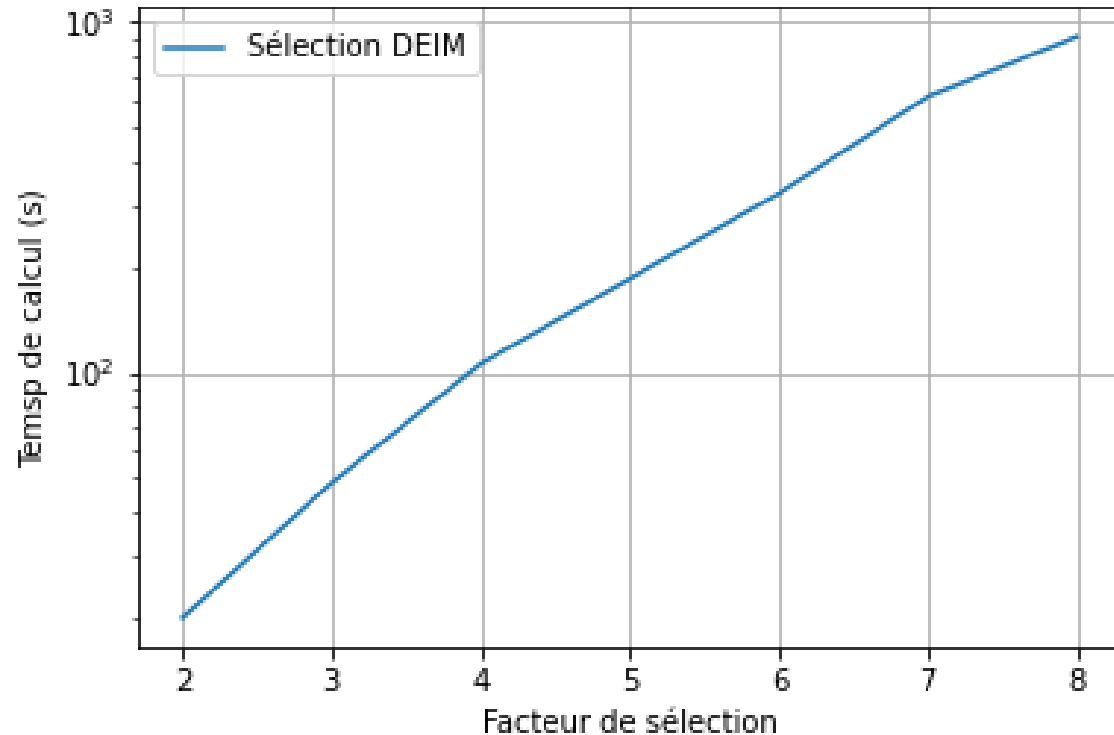


Facteur 6
 $t = 1149 s = 20 min$

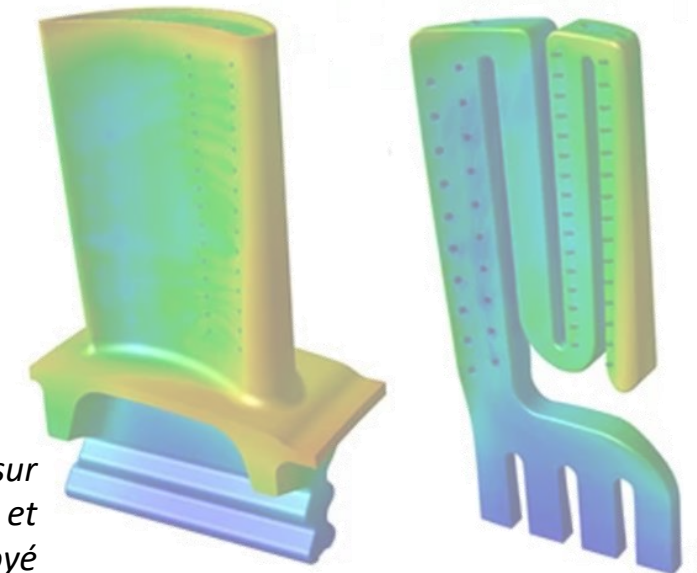


Algorithme de « mesh morphing »

- Etude du temps de calcul:
 - Etape de sélection de nœuds – algorithme DEIM
 - Etape d'appariement des nœuds CAO / Tomo



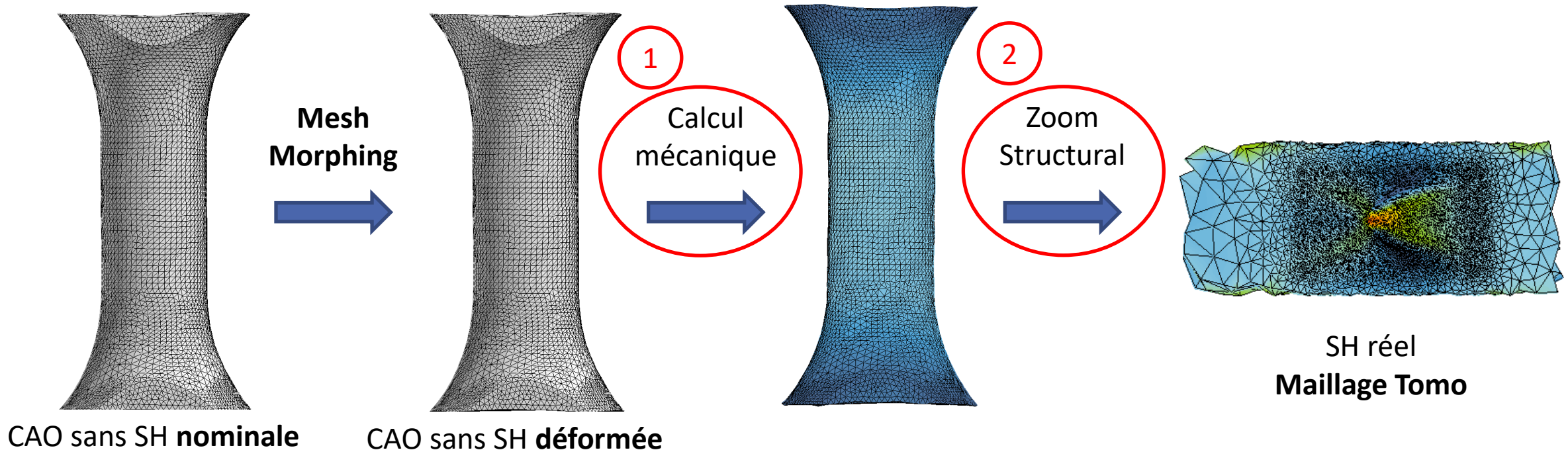
- Contexte industriel
- Algorithme de « Mesh Morphing »
- Etude d'influence des modes géométriques
- Prochaines étapes



Cartographie de températures sur
(Gauche) une aube de turbine mobile et
(Droite) un noyau céramique employé
dans la fonderie des aubes [Ansys, 2021]

- **Rappel du cas d'application**

- **(thèse d'Axel Aublet)** Eprovettes tubulaires avec *shaped hole* (SH)
- « Mesh morphing » : Capturer les variations géométriques globales **loin** du SH = utilisation d'une **CAO sans SH**
- « Zoom Structural » sur SH (Tomo) avec CL paramétrées par les variations géométriques (issues du morphing)



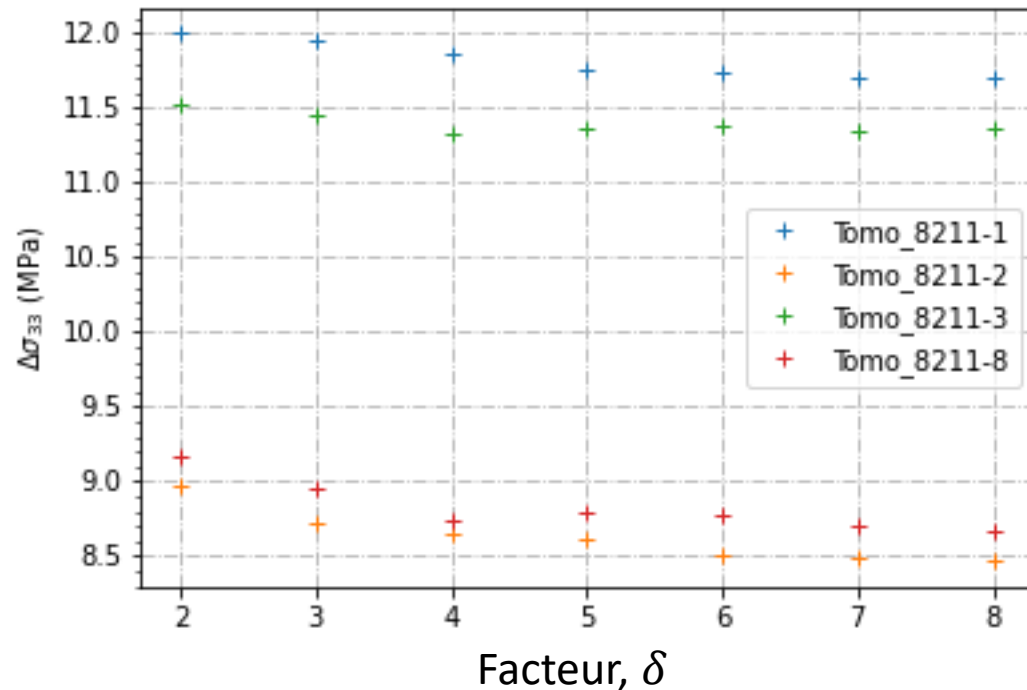
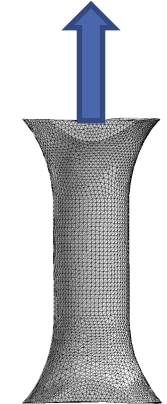
Etude d'influence des modes géométriques

- **Calcul élastique** de traction uniaxiale, à déplacement imposé

- Sur le maillage CAO de référence : (σ_{33}^{CAO})
- Sur les maillages CAO déformés : $(\sigma_{33}^{CAO\ déf})$

Avantage : mêmes points de Gauss

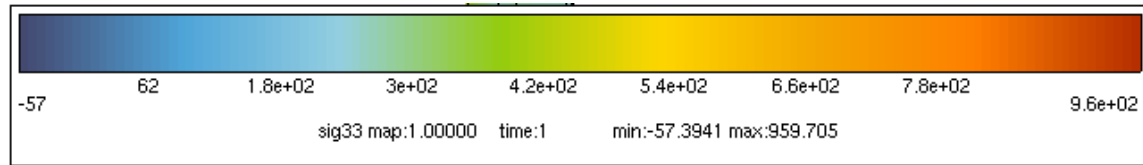
Moyenne de l'écart de contraintes axiales, $\overline{\Delta\sigma_{33}} = \overline{\sigma_{33}^{CAO\ déf} - \sigma_{33}^{CAO}}$:



- $\overline{\Delta\sigma_{33}} \neq 0$: Variations géométriques captées par le morphing impactent l'état de contraintes des éprouvettes
- $\overline{\Delta\sigma_{33}}$ tend vers $\overline{\Delta\sigma_{33_0}}$ quand le nombre de nœuds CAO de projection augmente:

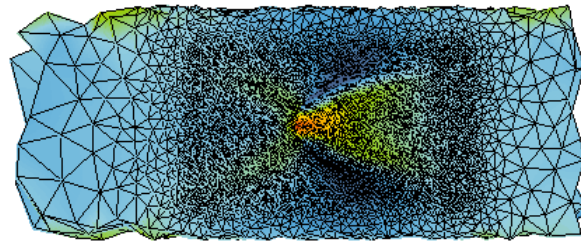
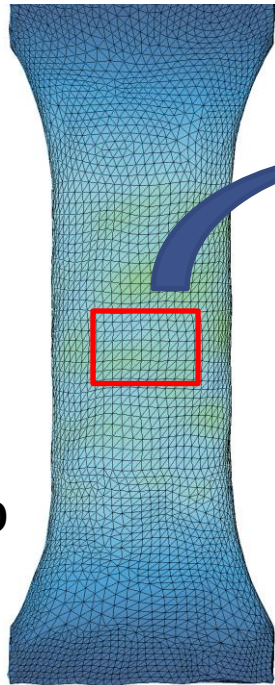
$$n_{DEIM} = \delta \times m$$

- **Calcul élastique** de traction uniaxiale, à déplacement imposé
 - Transfert vers la **zone brute** (boîte autour du Shaped Hole, sur le maillage Tomo) par **Zoom Structural**
 - Même calcul élastique **sur maillage Tomo complet** :



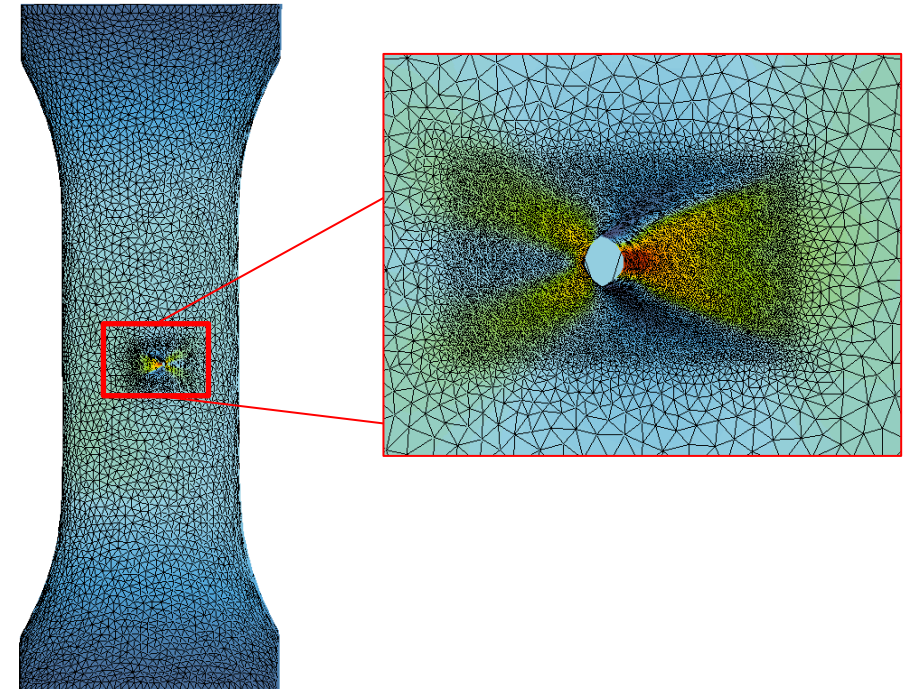
Zoom Structural

Maillage CAO déformé



SH réel
Maillage Tomo

Calcul élastique sur maillage Tomo complet



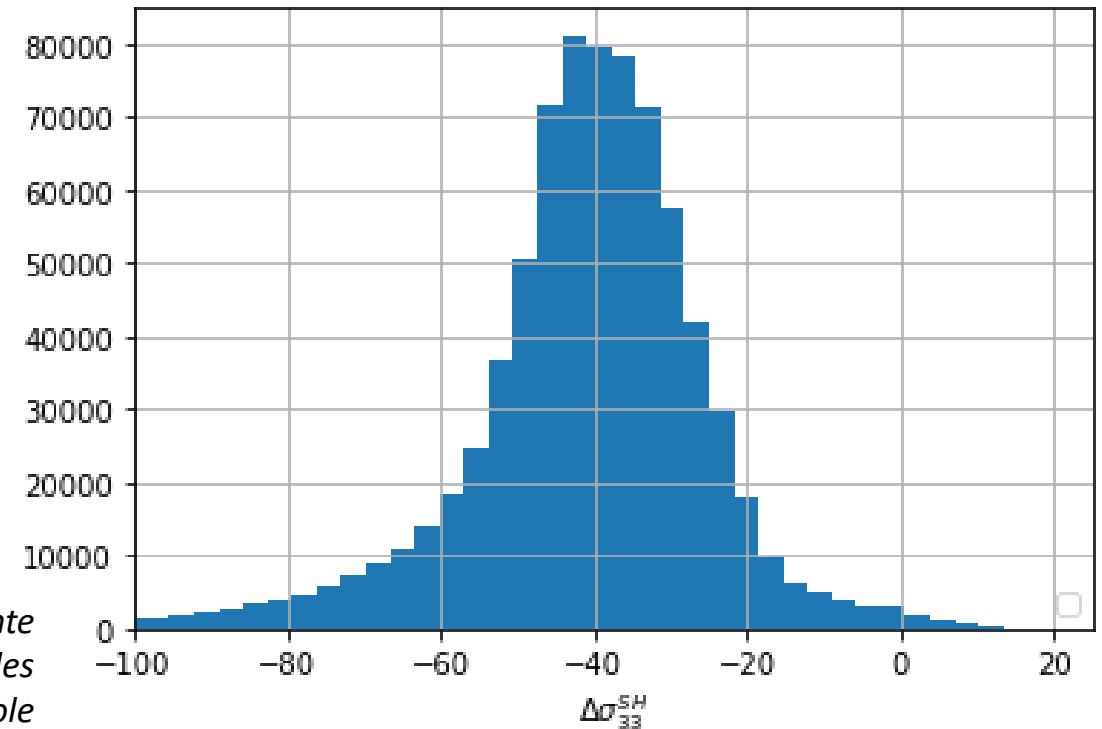
- **Calcul élastique** de traction uniaxiale, à déplacement imposé
 - Transfert vers la **zone brute** (boîte autour du Shaped Hole, sur le maillage Tomo) par **Zoom Structural**
 - Même calcul élastique **sur maillage Tomo complet** :
 - Comparaison avec les niveaux de contraintes obtenus dans la zone autour du SH

$$\overline{\Delta\sigma_{33}^{SH}} = \overline{\sigma_{33}^{Zoom}} - \overline{\sigma_{33}^{Tomo,SH}}$$

Perspectives :

- Localisation des écarts – effets de bord
- Augmentation du nombre de nœuds CAO de projection
- Vérification des CL appliquées sur le maillage Tomo complet

Distribution des écarts de contrainte axiale pour tous les points de Gauss des éléments « proches » du Shaped Hole



- 🌀 *Contexte industriel*
- 🌀 *Algorithme de « Mesh Morphing »*
- 🌀 *Etude d'influence des modes géométriques*
- 🌀 *Prochaines étapes*

- **Améliorer l'étape d'appariement : ajouter de l'intelligence pour réduire le temps de calcul**
- **Etude statistique sur les coordonnées réduites :**
 - Etudier la **dispersion des coordonnées réduites** pour distinguer la contribution de chacun des modes
- Poursuivre l'étude du Zoom Structural, sur un calcul élastique

- [Soro, 2018] *Le procédé de fonderie cire perdue*, MetalBlog CTIF, <https://metalblog.ctif.com/2018/02/05/le-procede-de-fonderie-cire-perdue/>
- [Degeilh, 2013] *Développement expérimental et modélisation d'un essai de fatigue avec gradient thermique de paroi pour application aube de turbine monocristalline*. ENS Cachan, R. Degeilh, 2013
- [Delcourt, 2016] *Matériaux & Procédés pour équipements aéronautiques*, O. Delcourt, SafranTech, 2016
- [Ansys, 2021] *Design and Maintain Turbomachinery Using Ansys Simulation Solutions* <https://www.ansys.com/fr-fr/blog/design-and-maintain-turbomachinery>
- [Zhang et al., 2010] *Spectral Mesh Processing*, 2010, H. Zhang, O. Van Kaick, R. Dyer
- [Reuter, 2013] *Spectral Shape Analysis with Applications in Medical Imaging*. SIAM Annual Meeting 2013, San Diego.
- [Levy, 2006] *Laplace-Beltrami Eigenfunctions Towards an Algorithm That « Understands » Geometry*. IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications 2006