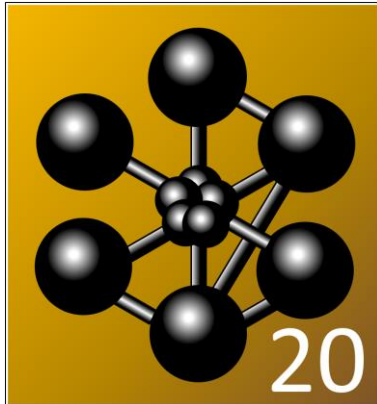


**SIMULATION DES EFFETS COUPLÉS
THERMO-MÉCANO-MÉTALLURGIQUE
INDUITS PAR LE PROCÉDÉ WAAM**

Clément BERTHINIER

CEA DEN/DANS/DM2S/SEMT/LM2S



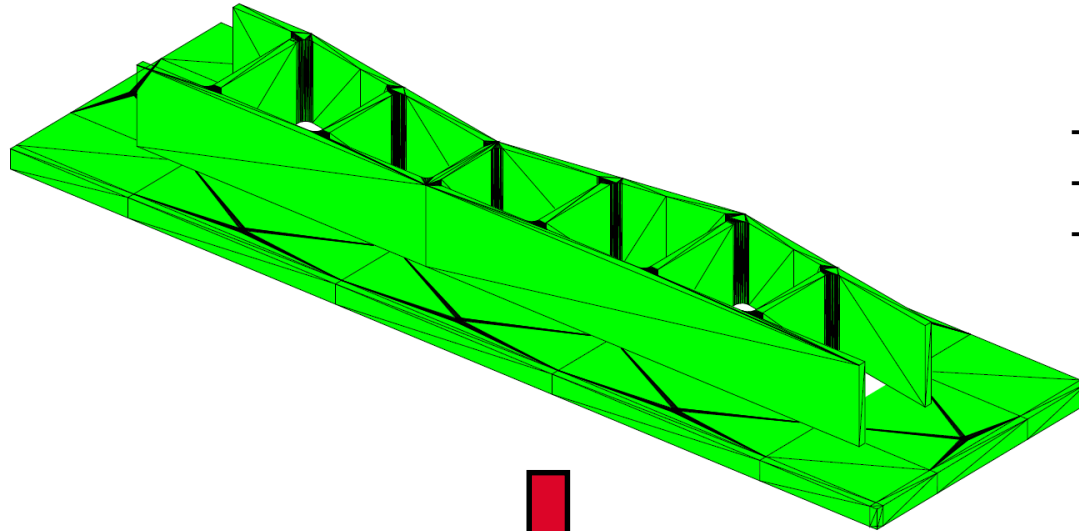
Cast3M

SOMMAIRE

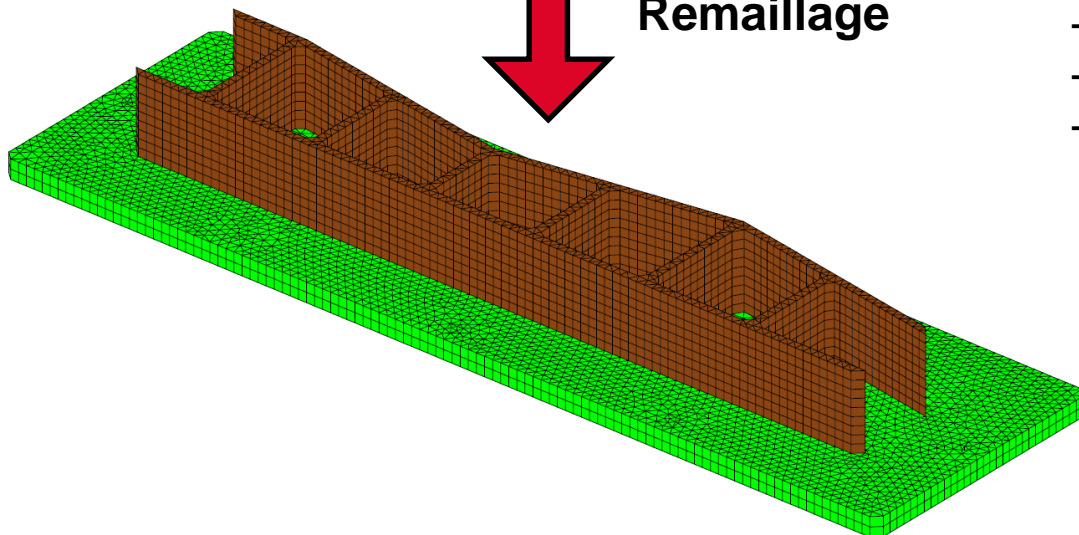
- GEOMETRIE & MAILLAGE
- MODÈLES & MATÉRIAUX
- BLOCAGES & CONDITIONS AUX LIMITES
- CHARGEMENT & ENRICHISSEMENT
- METHODE DES ÉLÉMENTS ACTIVABLES
- RÉSULTATS
- CONCLUSIONS & PERSPECTIVES



Maillage STL après l'import...



Remaillage



Difficultés immédiates

- 2 pièces séparées dans le fichier STL
- Large gamme de taille de triangles
- **Calcul EF impossible !**

Développements

- Remaillage basé sur la détection d'arêtes
- Régénération des surfaces et volumes
- **Calcul EF du procédé WAAM possible !**

21232 éléments 'PRI 6'

17298 nœuds → **69 192 DDL**



7 transformations possibles

- Chauffage

- IM → Austénite (LEBL)
- Martensite → Austénite (LEBL)
- Bainite → Austénite (LEBL)
- Ferrite → Austénite (LEBL)

- Refroidissement

- Austenite → Martensite (KOIS)
- Austenite → Bainite (LEBL)
- Austenite → Ferrite (LEBL)

Koistinen Marburger

$$\frac{dp_{austénite}}{dt} = MASQ_1 \cdot KM \cdot \dot{T} \cdot p_{austénite}$$

$$MASQ_1 = \begin{cases} 1 & \text{si } T \leq M_s \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Leblond Devaux

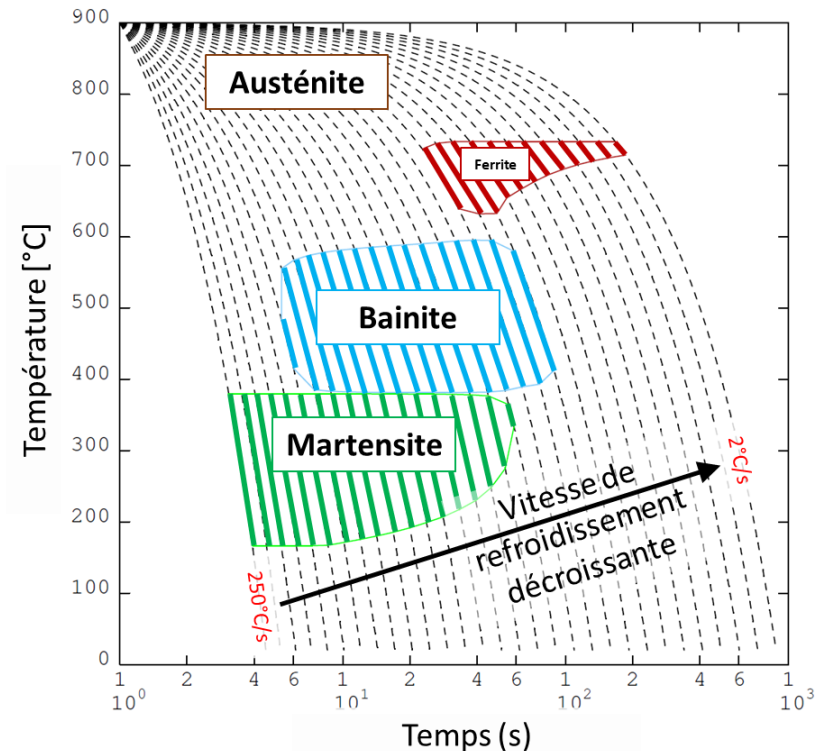
$$\frac{dp_i}{dt} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (A_{ij})$$

$$A_{ij} = \left(\frac{p_{j_{eq}}(T)}{\tau_{ij}(T)} \cdot p_i - \frac{1 - p_{j_{eq}}(T)}{\tau_{ij}(T)} \cdot p_j \right) \cdot F_{ij}(\dot{T})$$

Modèle à 5 phases

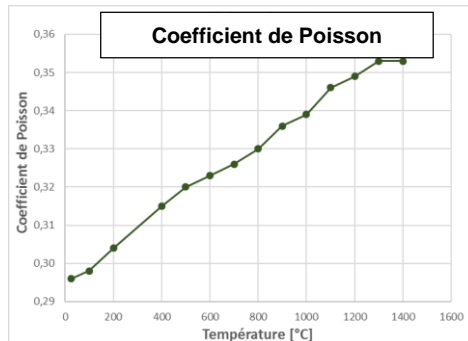
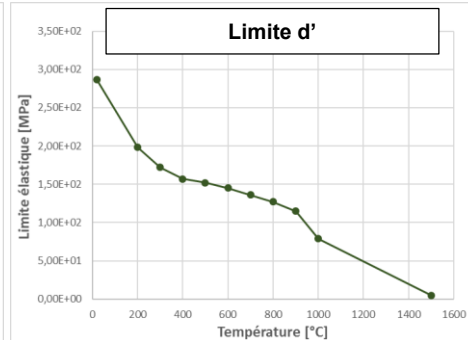
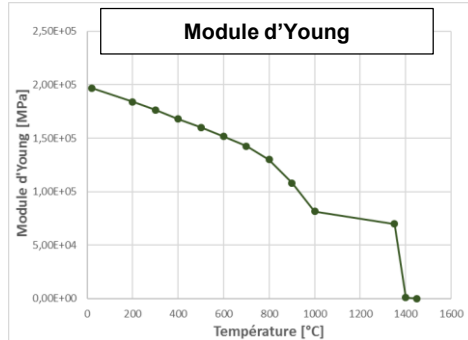
- MB (Composition du fil « fabriquant »)
- Austénite
- Martensite
- Bainite
- Ferrite

Métallurgie (diagramme TRC)

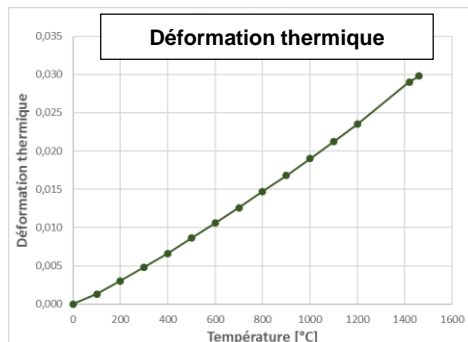




Modèle mécanique élastoplastique parfait



Propriétés mécaniques : moyenne



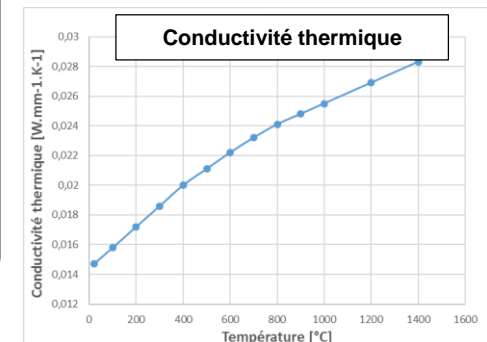
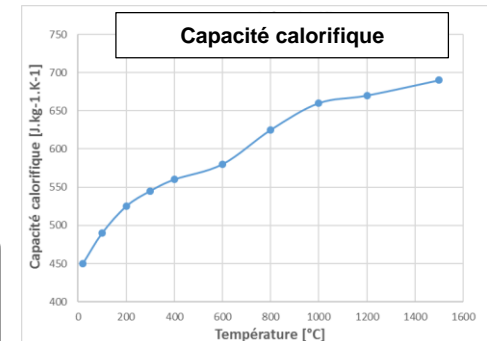
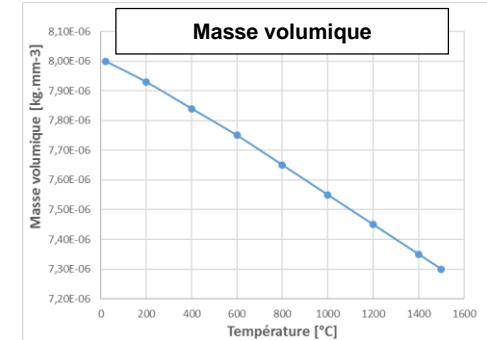
Propriétés thermiques : loi de mélange

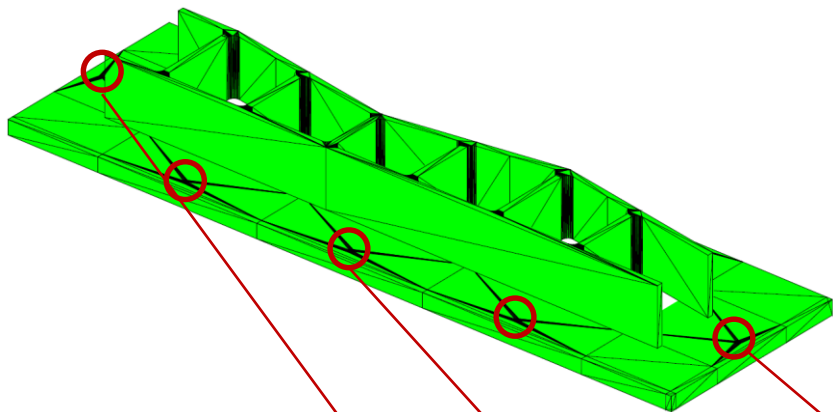
$$\rho_{eq} = \sum_{i=1}^n (\rho_i \cdot p_i)$$

$$C_{p_{eq}} = \sum_{i=1}^n (C_{p_i} \cdot p_i)$$

$$\lambda_{eq} = \sum_{i=1}^n (\lambda_i \cdot p_i)$$

Austenite thermal properties



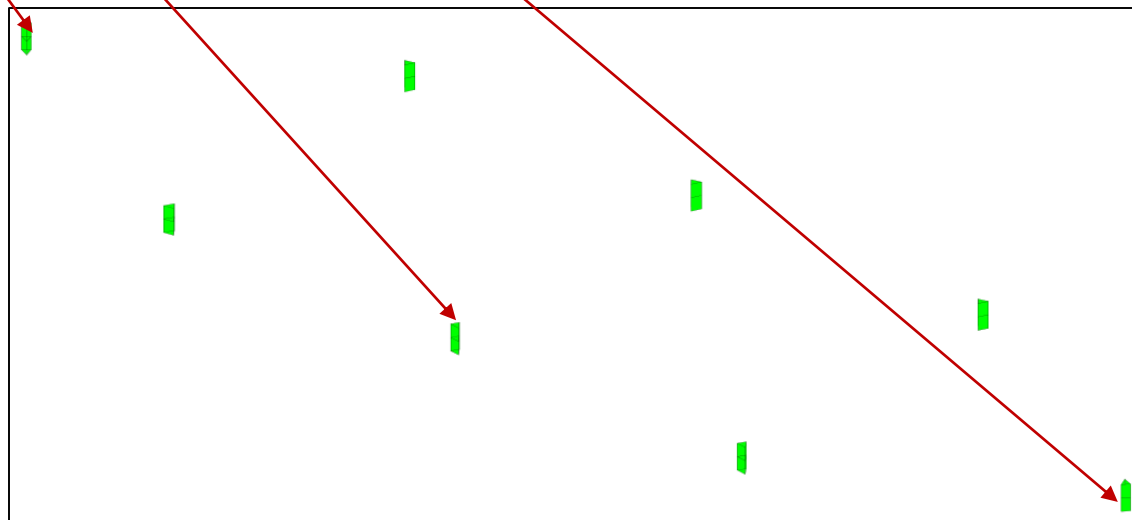


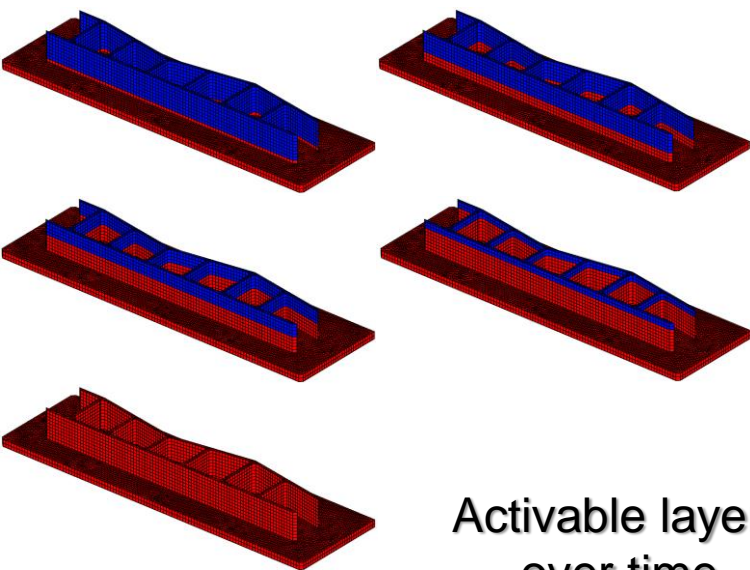
Thermique

- Température imposée sur le plateau inférieur
- Convection avec ∞ ($h=10 \text{ W.m}^2.\text{K}^{-1}$)
- Rayonnement avec ∞ ($\varepsilon=0,1$)

Mécanique

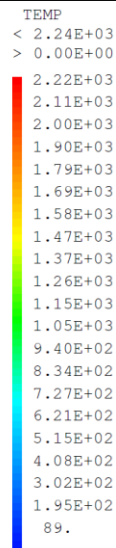
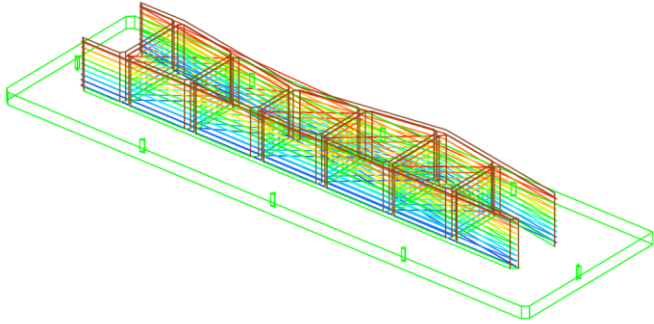
- 8 perçages bloqués en déplacement (U_X, U_Y, U_Z)





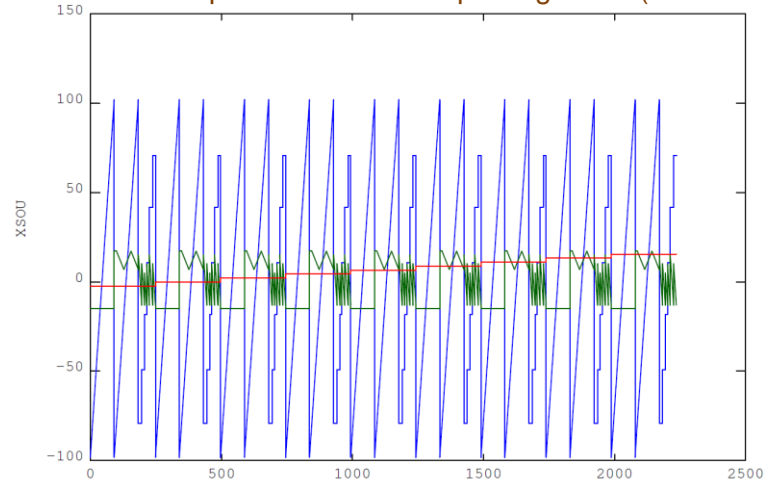
Activable layers over time

Champ de l'instant de passage du repère de soudage sur la trajectoire



Thermique

- Tranchage de la partie imprimée
- Définition de la trajectoire du repère de soudage
 - MAILLAGE de segments ('SEG2')
 - Vitesse imposée fixe sur chaque segments ('MCHAML')

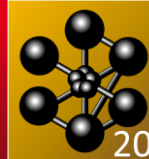


Position {X,Y,Z} du repère de soudage en fonction du temps

Mécanique (pilotes par la thermique)

- MASQUE_LIQUIDES : Eléments liquides courants
 - Remise à zéro des variables internes (Historique plastique supprimé)
- MASQUE_ACTIFS : Eléments ayant fondus (au moins 1x)
- MASQUE_INACTIFS: Propriétés dégradées : éléments fantômes

Méthode qualifiée en Soudage (Benchmarks)



1- Thermo-Métallurgie

Matériau & Chargement

- Puissance de la source
 - o $1900^{\circ}\text{C} < T_{\text{max}} < 2200^{\circ}\text{C}$
- Mise à jour matériau
 - o Température courante
 - o Proportions de phases courantes

Résolution

- Température
- Comportement (Métallurgie)

Boucle d'itération

2- Mécanique

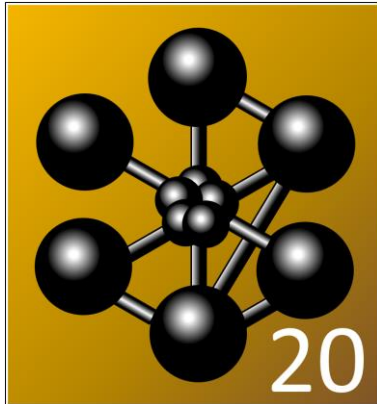
Elastoplasique parfait

- Contraintes
- Déplacements
- Variables internes

Mise à jour des masques et des propriétés mécaniques

- MASQUE_LIQUIDES → Remise à zéro de l'histoire
- MASQUE_ACTIFS → Acier 16MND5 nominal
- MASQUE_INACTIFS → Propriétés dégradées

Convergence



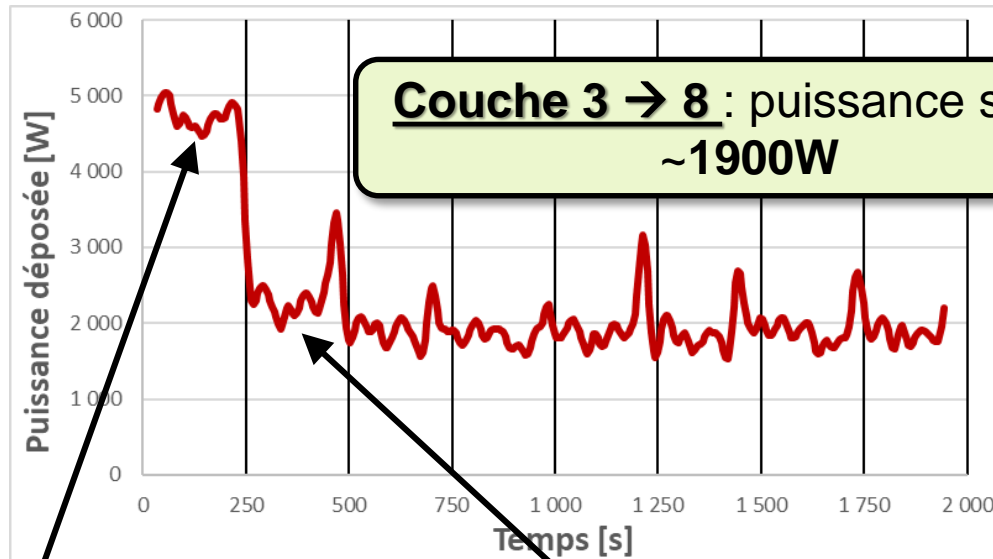
Cast3M

RÉSULTATS NUMÉRIQUES

- **2000** PAS DE CALCULS
- **400** PAS SAUVÉS (ANIMATIONS GIF)
- **4 CŒURS** PC PORTABLE (16GO RAM)
- **15H15** DURÉE DE CALCUL



Asservissement Puissance : $1900^{\circ}\text{C} < T_{\text{max}} < 2200^{\circ}\text{C}$



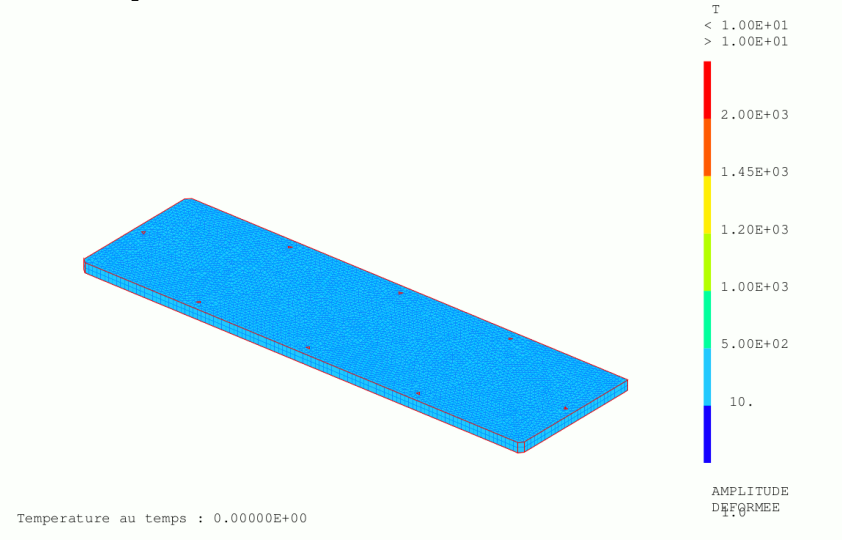
Couche 3 → 8 : puissance stable
~1900W

Layer 1 : forte puissance
~4750W

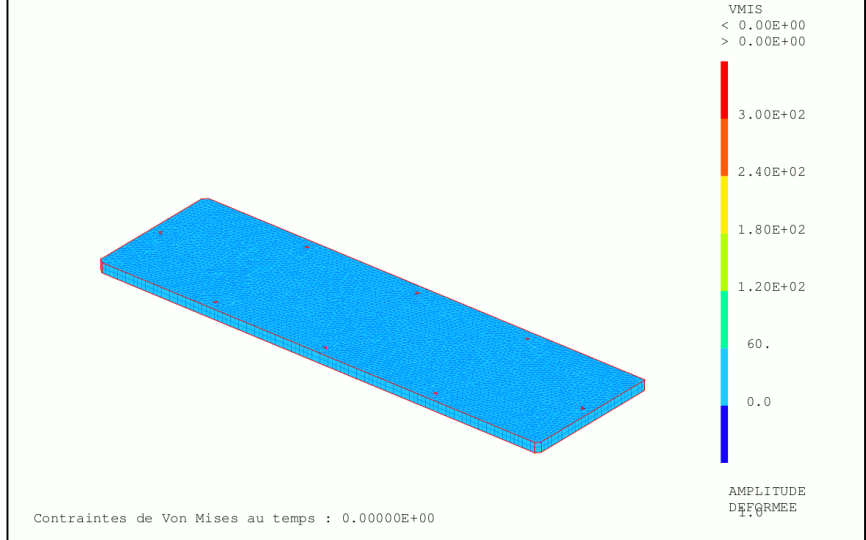
Layer 2 : puissance intermédiaire
~2370W



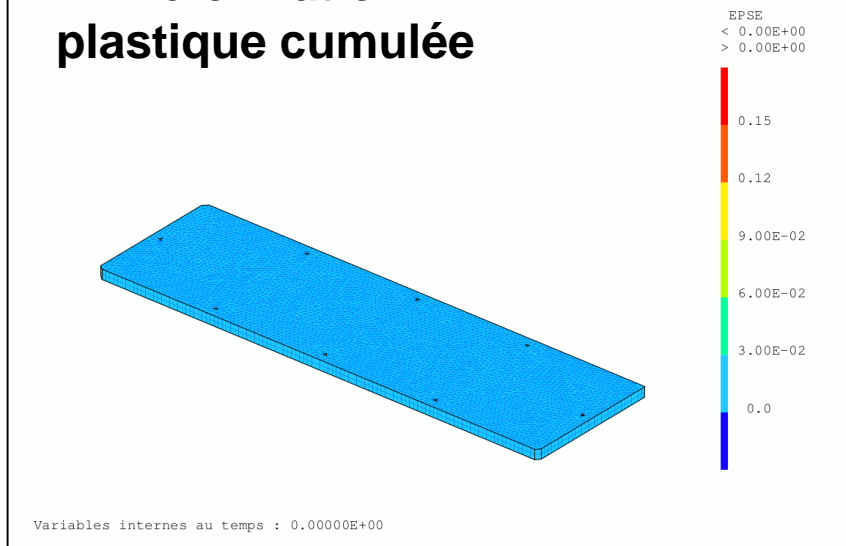
Température



Von Mises

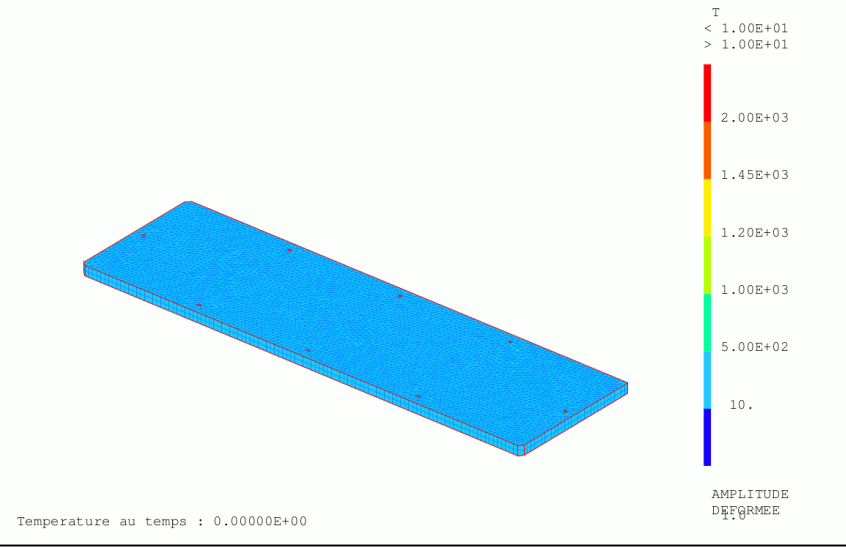


Déformation plastique cumulée

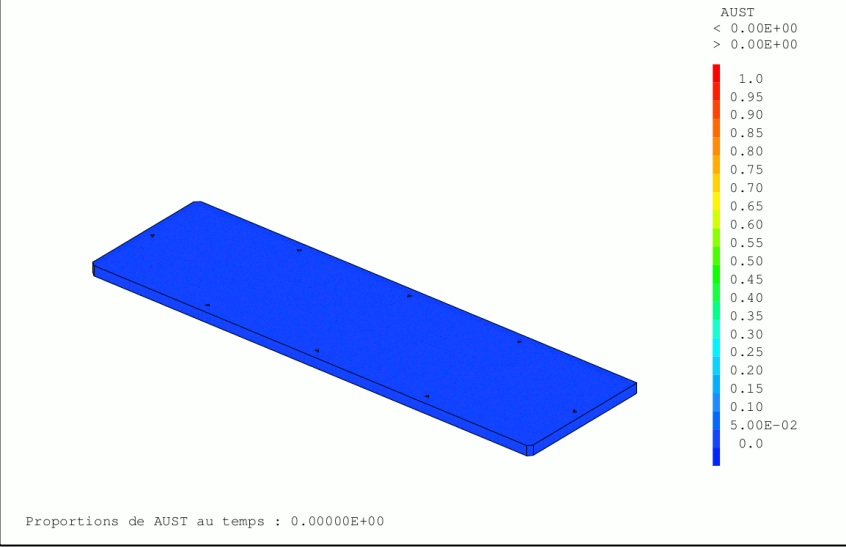




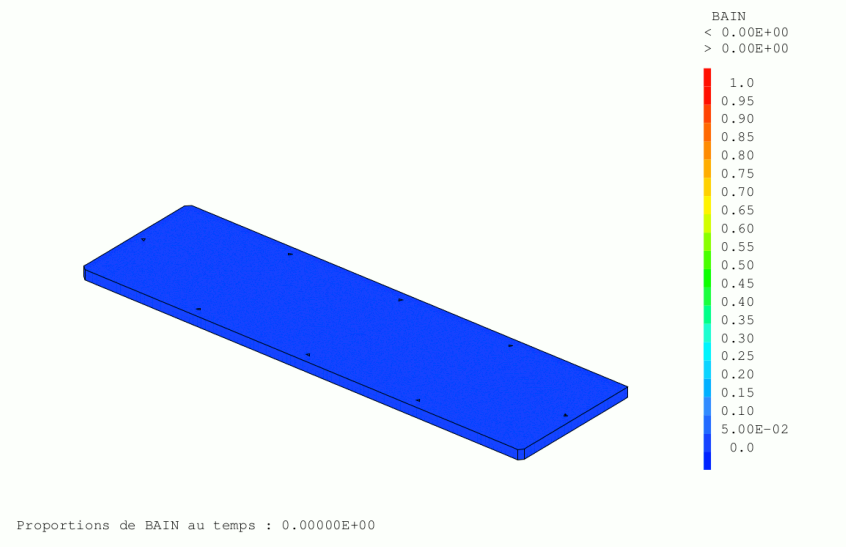
Champ de température



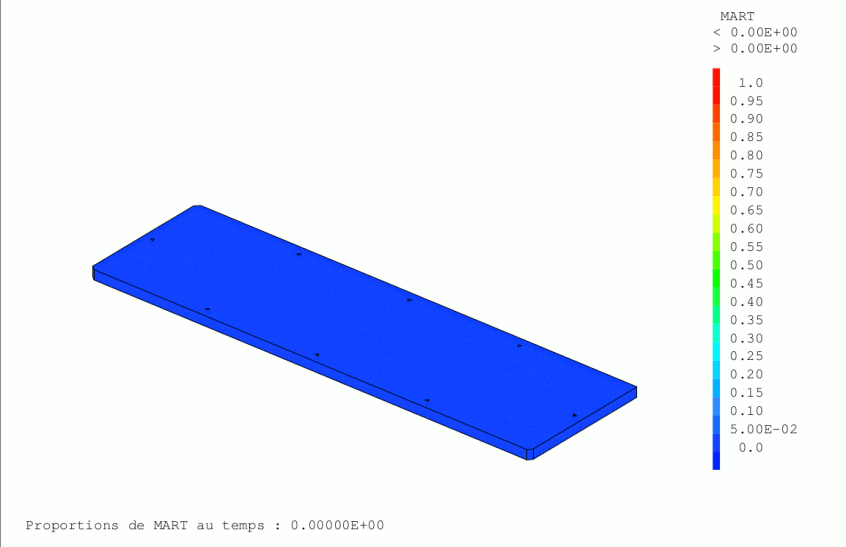
Proportion d'austénite

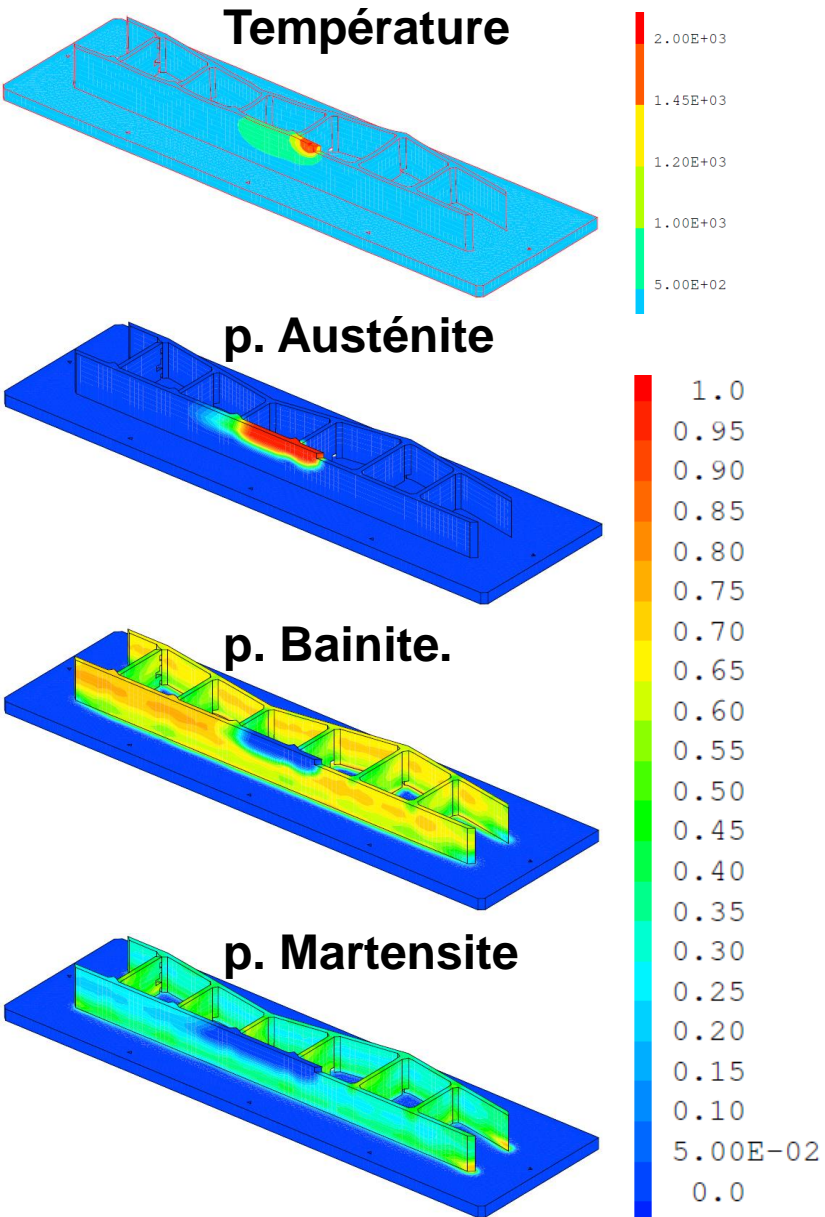


Proportion de Bainite

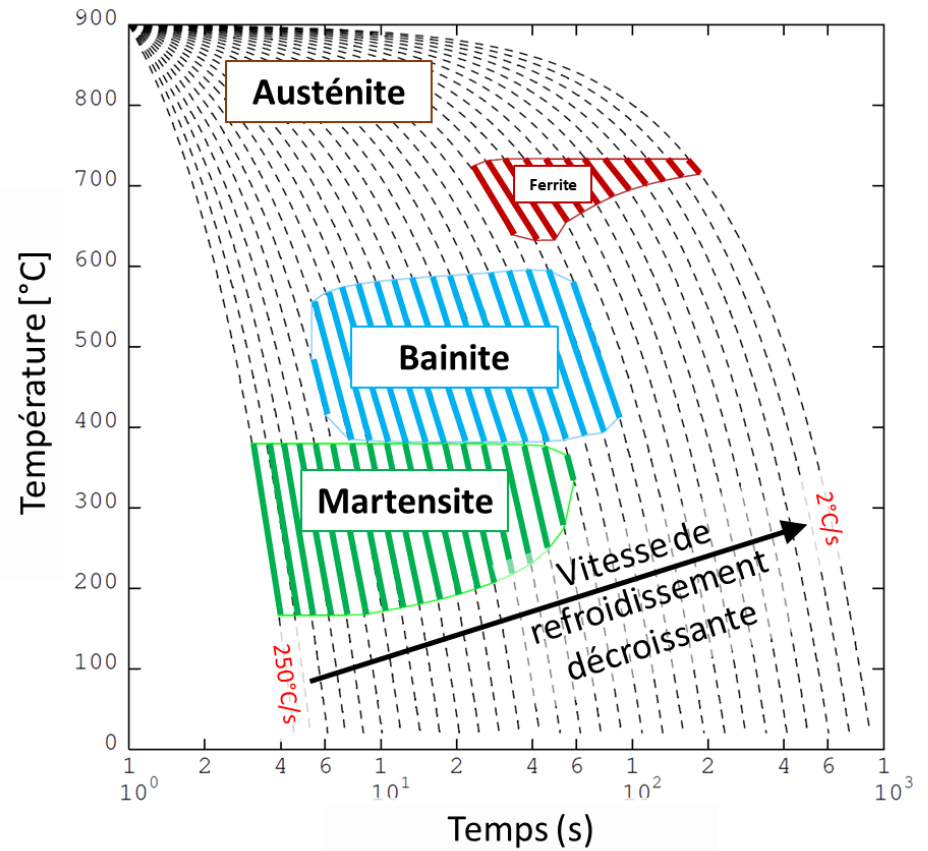


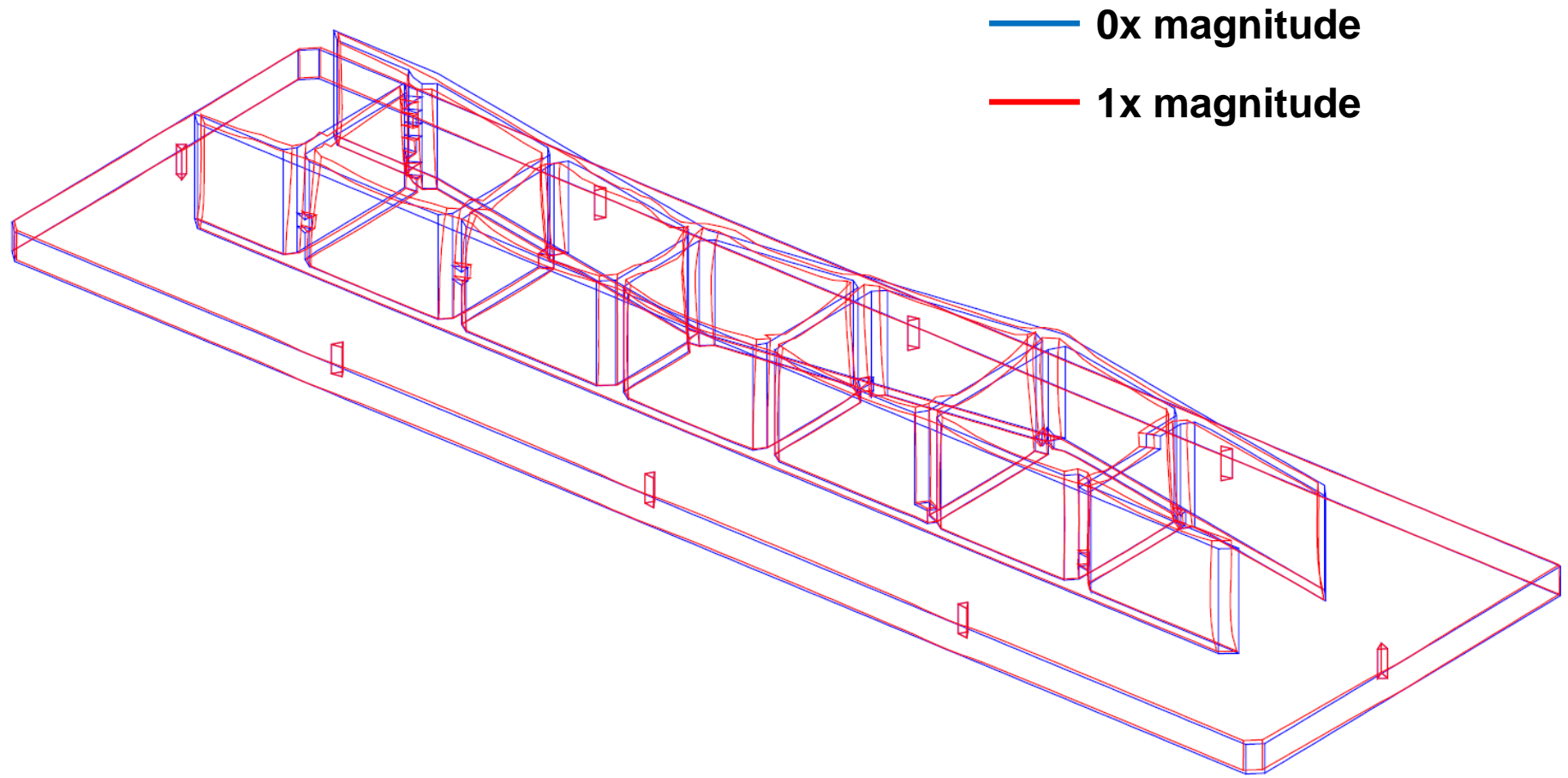
Proportion de Martensite

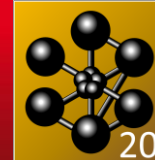




Métallurgie (diagramme TRC)







Capacité à lire & exploiter le format 'STL' dans Cast3M

- Procédure de remaillage basée sur la détection d'arêtes

Méthodologie provenant de la SNS appliquée au procédé WAAM

- Mise au point des paramètres thermiques
 - Description 3D de la trajectoire ('MCHAML' de vitesse sur des 'SEG2')
 - Description 3D de la source de chaleur (Gaussienne, etc.)
 - Asservissement « en direct » de la puissance déposée
- Enrichissement (en GIBIANE) d'un modèle mécanique standard avec 2 variables internes
 - MASQUE_ACTIFS (Acier 16MND5 « **Nominal** »)
 - MASQUES_LIQUIDES (Oubli de l'historique plastique)

Résolution temporelle d'un couplage fort thermo-métallo-mécanique

- Description de l'état final de la pièce imprimée
 - Contraintes résiduelles, variables internes, déformée, etc.
 - Composition métallurgique dans un acier réaliste à 5 phases et 7 transformations

• Validation expérimentale

- Qualification de la méthode sur l'impression 3D WAAM d'un cylindre en 145 passes
- Instrumentation

• Parametric study

- **MESH size & TIME step** convergence
- **Power & Speed & Shape** of the heat source
- **Layer height**