

Séance de Travaux Dirigés 12

Couplage aéro-thermo-mécanique d'un échappement

Objectifs de cette séance

1. Mener une analyse couplée (CHT) aéro-thermique d'une tubulure d'échappement (acier) parcourue par un écoulement à température élevée (sortie des gaz brûlés) pour déterminer sa carte des températures,
2. Transférer le champ de température du modèle thermique vers un modèle de déformation élastique,
3. Mettre en données une analyse de déformation élastique liée au coefficient de dilatation α du matériau pour en extraire son champ de déplacement et le champ de contrainte de von Mises.

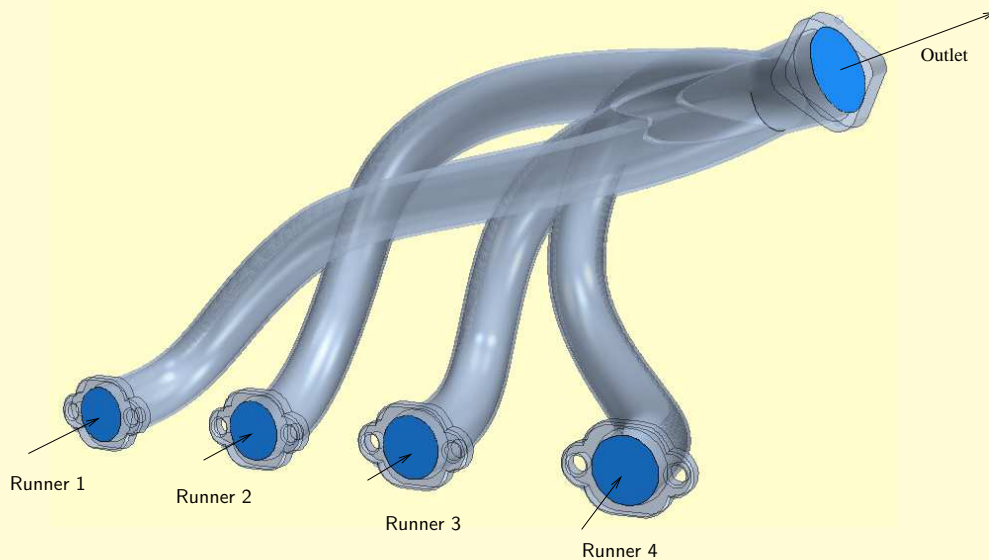


Figure 1 – Couplage aéro-thermo-mécanique d'un échappement : 4 collecteurs, un échappement

La tubulure d'échappement relie quatre chambres via les collecteurs (*Runner 1* → 4) afin de conduire les gaz brûlés vers un unique échappement (*Outlet*). Les conditions aux limites aérauliques sont pour les collecteurs :

	Débit massique [kg/s]	Température du gaz [$^{\circ}C$]	Intensité turbulente
<i>Runner 1</i>	0.05	500	10%
<i>Runner 2, 3, 4</i>	0.001	500	1%

Pour l'échappement, on retiendra une pression de 1 atm. et une température de sortie des gaz de $T_{out} = 400^{\circ}C$ (utile en cas d'écoulement retour *backflow*).

On considérera un échange convectif entre le collecteur et le milieu extérieur environnant de température $75^{\circ}C$ et de coefficient $h = 50 W/m^2/K$.

Pour l'analyse de la déformation thermo-mécanique de la structure, une condition de glissement en un point (*Vertex*) dans le plan XY est imposée sur chaque collecteur et une condition d'encastrement en un point est imposée sur la sortie.

Le solide est composé d'acier (*Carbon Steel*) de propriétés :

$$\rho = 7832 \text{ kg/m}^3, \nu = 0.285, \alpha = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}, E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Pa}.$$

La procédure complète s'appuie sur les étapes successives suivantes :

1. Création d'un maillage fluide et d'un maillage du solide pour l'analyse thermique (approche volumes finis),
2. Mise en données pour une analyse couplée fluide/thermique (CHT),
3. Analyse couplée fluide/thermique jusqu'à convergence,
4. Création d'un maillage solide pour la mécanique (approche éléments finis, éléments quadratiques Q16) distinct de celui pour l'analyse thermique,
5. Transfert du champ de température sur le maillage solide/mécanique et en fixant la structure,
6. Mise en données du problème mécanique en figeant les solveurs fluide et thermique,
7. Calcul de la déformation mécanique.

1 Analyse couplée aéro/thermique

Création des CAO

- Charger le fichier `manifold.sim`.
- Ouvrir la CAO sous 3D-CAD et noter la présence d'un seul volume *Body 1* attaché à la structure. Celle-ci est composée de quatre collecteurs alignés (nommées *Runner 1* à *Runner 4*) et d'une sortie d'échappement *Outlet*.

L'étape suivante va consister à extraire le volume fluide délimité par le volume interne à la CAO existante :

- En cliquant sur l'icône de sélection décocher toutes les entités sauf *Faces* pour faciliter la saisie des différentes surfaces.
- Faire une sélection multiple des quatre collecteurs et de la sortie :

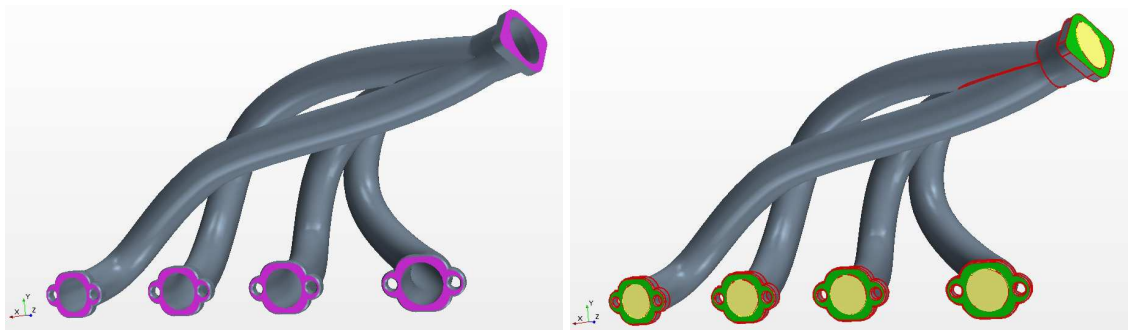


Figure 2 – Sélection multiple des quatre collecteurs et de la sortie - Extraction du volume intérieur

- Clic-droit et sélectionner *Extract Internal Volume* (Figure de droite) puis valider les choix proposés.
- Renommer *Body 1* en *Solid* et *Body 2* en *Gas*.
- Nommer les quatre collecteurs et la sortie du volume *Gas*.
- Vérifier la présence des points *Vertex* pour fixer la structure lors de la phase ultérieure de déformation thermo-mécanique.
- Quitter 3D-CAD.

Création des Parts et des Regions

- Créer les *Parts*.
- Identifiez toutes les surfaces et entités géométriques sur une *Scalar Scene*.
- Ouvrir l'onglet **Contacts** et cliquer sur l'interface. Vérifier que l'interface entre le solide et le gaz est complète (voir Figure ci-après).



▷ Si l'interface est incomplète (peut dépendre de la version de l'outil et du type de machine...) :

1. Clic-droit sur **Operations** > **New** > **Boolean** > **Imprint**
2. Sélectionner les deux entités, cocher **Perform CAD Imprint**, valider puis exécuter.

La procédure de création des **Regions** est classique et laissée à votre soin.

Génération des maillages

La première analyse s'appuie sur un couplage aérodynamique/thermique. Celle-ci requiert une interface commune entre les deux domaines/maillages fluide et solide-thermique. Une seule et unique opération de maillage peut alors être générée pour garantir une interface commune et identique aux frontières des deux domaines. L'opération de maillage (3D) est de type *Automated Mesh*.

- ▷ Clic-droit **Operations** > **New** > **Automated Mesh**
- ▷ Sélectionner **Surface Remesher** (fondamental en 3D), **Polyhedral Mesher**, **Prism Layer Mesher** et **Thin Mesher**.
- ▷ Décocher l'option *Perform Proximity Refinement* du modèle **Surface Remesher**
- ▷ Cocher les options *Customize Thickness Threshold* et *Automatic Thin/Bulk Shape Detection* du modèle **Thin Mesher**.
- ▷ Renseigner :
 - *Base Size* de 5 mm,
 - *Minimum Surface Size* de 50%, *Thin Mesher Maximum Thickness* de 100%,
 - *Prism Layer Total Thickness* de 1 mm (*Absolute Size*).
- ▷ Définir les types des conditions aux limites pour le fluide (*Mass Flow Inlet* et *Pressure Outlet*).

L'option *Prism Layers* doit être désactivée pour la paroi solide :

- ▷ Clic-droit **Custom Controls** > **New** > **Surface Control**
- ▷ Sélectionner *Solid* comme **Part Surfaces**
- ▷ Ouvrir **Controls** > **Prims Layer** et sélectionner le menu *Disable*

Il reste alors à générer les maillages :

- ▷ Cliquer sur l'icône *Surface Meshes* et visualiser le maillage de surface généré sur une *Scalar Scene* dédiée.
- ▷ Cliquer sur l'icône *Volume Mesh* et visualiser le maillage volumique avec clic-droit sur l'image puis **Apply Representation** > **Volume Mesh**

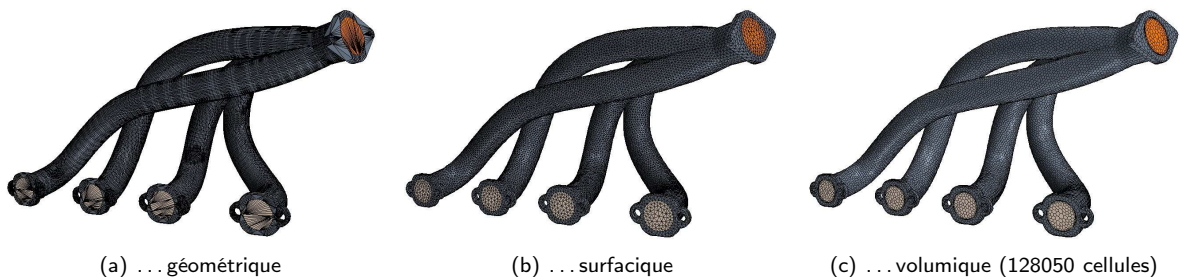


Figure 3 – Maillages...

Lancer une analyse de diagnostique du maillage :

- ▷ Menu **Mesh > Diagnostics** : sélectionner les deux entités et retenir *Report Type* en mode *Full*
- ▷ Dans le texte défilant dans la fenêtre inférieure, vérifiez que le critère de qualité de maillage *Maximum Skewness Angle* est supérieur au 85 deg. généralement préconisés pour ce type d'analyse
- ▷ En conséquence de quoi et afin de ne pas pénaliser la convergence, l'option **Cell Quality Remediation** sera alors sélectionnée lors du choix des modèles physiques.

Mise en données du problème

Sélection des modèles physiques :

- ▷ Créer deux **Physics Continuum** que vous renommerez **Air** et **Carbon Steel**
- ▷ Associer la **Region Solid** au modèle **Carbon Steel**, et vérifier que le modèle est le bon pour la région **Air**,
- ▷ Pour le modèle **Air** :
 1. sélectionner les options : *Steady, Gas, Segregated Flow, Ideal Gaz, Segregated Fluid Temperature, Turbulent, k-epsilon, Cell Quality Remediation*.
 2. conserver les propriétés physiques du fluide **Air** par défaut.
- ▷ Pour le modèle **Carbon Steel** :
 1. sélectionner les options : *3D, Steady, Solid, Segregated Solid Energy, Constant Density, Cell Quality Remediation*.
 2. remplacer le matériau **Al** par **UNSG 101000 (Carbon Steel)** et conserver les propriétés par défaut.

L'étape suivante consiste à initialiser les données :

- ▷ **Air** : *Turbulence Intensity* de 5%, *Turbulence Velocity Scale* de 30 m/s, température de 400°C,
- ▷ **Air Carbon** : température de 350°C.

Conditions aux limites :

- ▷ **Air** : les conditions de type *Mass flow* requièrent de fournir une température **totale** pour les entrées. Celle-ci est déduite de la température statique d'après l'expression (voir cours intitulé *Ecoulements compressibles*) :

$$T_{tot} = T_{sta} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \mathcal{M}^2 \right) \quad \text{avec} \quad \mathcal{M} = \frac{V}{\sqrt{\gamma R T_{sta}}}$$

soit $T_{tot} = 514.5^\circ\text{C}$ pour le *Runner 1* et $T_{tot} \approx 500^\circ\text{C}$ pour les *Runner 2, 3, 4*.

Renseigner les autres paramètres pour les cinq conditions aux limites (voir données en première page).

- ▷ **Air Carbon** : seule la paroi extérieure avec échange convectif avec le milieu ambiant doit être modifiée en conséquence (température 350 K et de coefficient $h = 50 \text{ W/m}^2/\text{K}$) :
Physics Conditions > Thermal Specification... passer en mode *Convection* et renseigner les valeurs attendues.

Mise en place des Reports et Scenes

En plus des courbes de résidus, il peut être utile de visualiser au cours des itérations, les températures moyennes des domaines fluide et solide :

- ▷ Clic-droit sur **Reports > New > Mass Averaged**
- ▷ Renommer *Averaged Gas temperature*
- ▷ Sélectionner *Temperature* comme *Scalar Field Function*
- ▷ Sélectionner *Gas* comme *Parts*
- ▷ Sélectionner les unités en degrés °C

- ▷ Suivre la même procédure pour la température moyenne du solide *Averaged Solid temperature*.
- ▷ Créer une figure commune aux deux *reports* précédemment créés.

Créer deux *Scalar Scene* supplémentaires pour visualiser :

- ▷ le champ de température sur la paroi externe du solide (à représenter en degrés °C).
- ▷ le champ Y^+ sur l'interface fluide/solide pour analyser la pertinence du maillage vis-à-vis du modèle de turbulence.

Initialisation et calculs

Deux façons pour initialiser le calcul :

1. approche classique,
2. pré-initialisation : celle-ci peut être envisagée en cas de difficulté à converger et notamment lorsque les courbes de résidus tendent à augmenter en raison d'une solution non physiques. la procédure est donnée ci-après au cas où elle serait utile :

➤ Dans le menu **Solvers > Segregated Flow** en mode *Expert*, cocher *Continuity Initialization*.

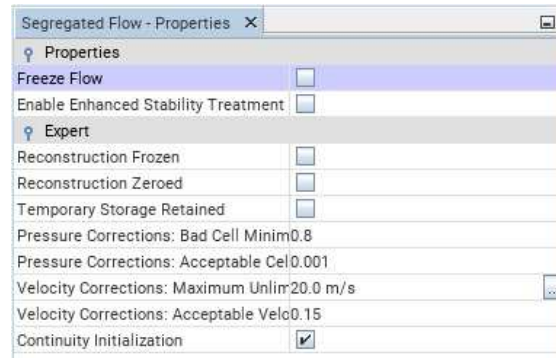


Figure 4 – Procédure d'initialisation améliorée

Cette option indique à l'outil de baser son initialisation sur un premier calcul dénué de tout effet de viscosité et permet ainsi de garantir un champ de vitesse initialement proche de celui escompté.

Tester les deux approches et observez l'évolution des courbes de résidus qui en disent long sur les difficultés de convergence de la première approche !

Lancer le calcul après avoir limité le nombre d'itérations à 500 (aussi l'occasion de la pause café...).

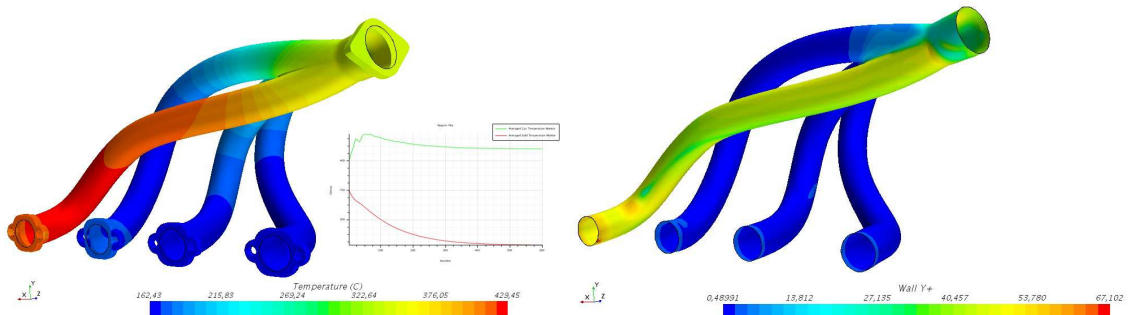


Figure 5 – Champ de température de surface

Champ Y^+

Il ressort de cette analyse que le maillage fluide gagnerait à être affiné (6 prismes) afin de mieux capter les effets de couche limite, les valeurs de y^+ observées étant trop élevées. Ce point impacte aussi le calcul précis du profil de température associé à la qualité des flux échangés entre la paroi et le fluide. Ce n'est cependant pas le propos de cette séance mais cet aspect mérite d'être toutefois noté.

Extraire la carte du coefficient d'échange thermique (HTC) à l'interface fluide/solide.

2 Analyse de la déformation thermo/mécanique

C'est la propriété liée au coefficient de dilatation volumique du matériau qui est à l'origine de la déformation mécanique résultant donc du champ volumique de température calculé lors de la précédente phase. Il importe désormais de :

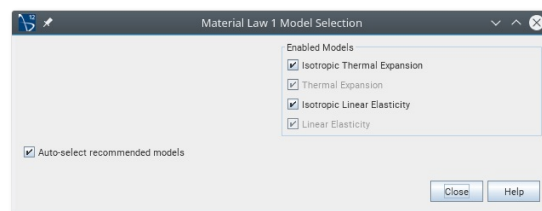
1. créer un maillage du solide spécifique à une analyse de déformation élastique,
2. de transférer le champ de température depuis le maillage associé à l'analyse thermique vers le nouveau maillage (élasticité).

Mise en données

- ▷ L'analyse mécanique requiert de dupliquer la *Part* solide : clic-droit Geometry > Solid > Duplicate
- ▷ Renommer la nouvelle *Part* **Solid (Stress)**
- ▷ Créer la région (**Assign Part to Regions**) en sélectionnant l'option **Do Not Create Interfaces From Contacts**. Cette interface ne doit surtout pas être créée car le couplage ne résulte pas d'un couplage via une interface mais résulte d'une sollicitation volumique qui provient du transfert du champ de température.

Définir les modèles physiques :

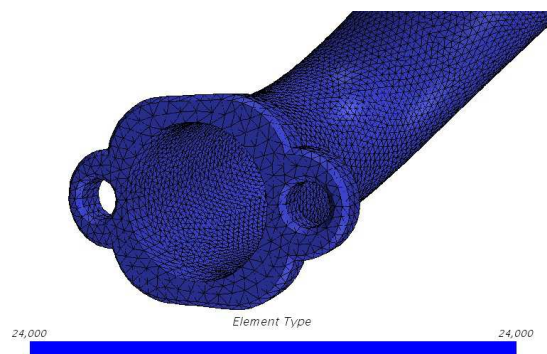
- ▷ Créer une nouvelle **Physics Continuum** à renommer **Stress Analysis**,
- ▷ Sélectionner les modèles : *3D, Steady, Solid, Solid Stress, Specified Temperature Load*,
- ▷ Modifier en conséquence **Regions > Solid (stress) > Physics Continuum** pour associer le nouveau modèle **Stress Analysis**,
- ▷ Ouvrir **Continua > Stress Analysis > Models > Material Law Models**,
- ▷ Clic-droit sur **Material Laws > New** et renommer l'onglet *Material Law 1* en *Isotropic Linear Elastic*,
- ▷ Sélectionner les modèles : *Linear Elasticity, Isotropic Linear Elasticity, Thermal Expansion, Isotropic Thermal Expansion*.



- ▷ Remplacer le matériau **Al** par **UNSG 101000 (Carbon Steel)** et conserver les propriétés par défaut,
- ▷ Ouvrir **UNSG 101000 (Carbon Steel) > Material Properties**,
- ▷ Sélectionner pour **Material Law** le type *Isotropic Linear Elastic* nouvellement créé.

Génération du maillage

- ▷ Créer un maillage de type **Automated Mesh** à renommer *Stress Analysis - Tetrahedral Mesh*.
- ▷ Sélectionner les options *Surface Remesher* et *Tetrahedral Mesher*.
- ▷ Imposer une *Base Size* de 5 mm et un *Minimum Surface Size* de 30%.
- ▷ Générer le maillage avec un clic-droit sur *Stress Analysis - Tetrahedral Mesh > Execute*.
- ▷ Améliorer/enrichir l'élément fini en ajoutant un nœud supplémentaire sur tous les segments : **Regions > Solid (Stress) > Physics Conditions > Mid-side Vertex Option** et sélectionner **Mid-side Vertex to Add - Linear Interpolation**. Cette procédure d'enrichissement du degré d'interpolation de l'élément fini sera seulement opérationnelle lors de l'initialisation des données (approche spécifique à l'outil).
- ▷ Initialiser les calculs et afficher le maillage en superposant une *Scalar Scene* pour visualiser le type d'élément (*Element Type*). Vérifier notamment que les éléments sont bien de type 24 (éléments tétraédriques d'ordre 2) sinon de type 10 pour une approximation linéaire.



Imposition des conditions aux limites pour la fixation du solide

Afin d'éviter tout mode rigide (6 en 3D) il est nécessaire de fixer *a minima* la structure. L'imposition d'un encastrement sur une frontière sollicitée thermiquement étant tout simplement incompatible avec une déformation thermique, seuls quelques nœuds (*Vertex*) seront fixés. Ceux-ci sont déjà déclarés et nommés *Vertex1*, *Vertex2*, jusqu'à *Vertex5*. Les numéros de 1 à 4 sont associés aux collecteurs, le numéro 5 étant la sortie.

Une condition d'encastrement est imposée au *Vertex5* :

- ▷ Clic-droit **Regions** > **Solid (Stress)** et sélectionner **Create Segment** > **Point Segment**,
- ▷ Ouvrir **Segments** > **Point Segment 1**, sélectionner le *Vertex5* et l'option **Constraint** (déplacement nul sur les 3 composantes) à la place de **Load**.

Une condition de glissement dans le plan *XY* est imposée aux *Vertex 1* à 4 :

- ▷ Clic-droit **Regions** > **Solid (Stress)** et sélectionner **Create Segment** > **Point Segment**,
- ▷ Ouvrir **Segments** > **Point Segment 1**, sélectionner le *Vertex1* et l'option **Constraint** à la place de **Load** ;
- ▷ Ouvrir le sous-menu **Physics Condition** > **Solid Stress Constraints** et sélectionner l'option **Displacement**,
- ▷ Dans le sous-menu **Displacement** apparu, sélectionner l'option **Composite**,
- ▷ Cliquer sur **Composite** et décocher **Constrain X** et **Constrain Y** (seul le déplacement selon **Z** est forcé à 0).
- ▷ Procéder de même pour *Vertex2*, *Vertex3* et *Vertex4*.

Transfert du champ de température

Cette procédure est rendue obligatoire en raison des maillages différents utilisées pour l'analyse thermique puis l'analyse mécanique.

- ▷ Clic-droit sur **Tools** > **Data Mappers** et sélectionner **New Data Mapper** > **Volume Data Mapper**,
- ▷ Renommer *Volume Data Mapper 1* en *Temperature Mapper*,
- ▷ Ouvrir **Data Mappers** > **Temperature Mapper**,
- ▷ Spécifier le maillage source en renseignant *Solid* pour *Source Volumes* et *Cell* pour *Source Stencil*,
- ▷ Sélectionner *Temperature* comme *Scalar Field Functions* à transférer,
- ▷ Renommer *Mapped Names* en *CHT - Thermal Load*,
- ▷ Sélectionner le maillage cible en renseignant *Stress Analysis* comme *Target Volumes*,
- ▷ Procéder au transfert avec clic-droit sur **Temperature Mapper** > **Map Data**,
- ▷ Visualiser le champ *CHT - Thermal Load* sur le nouveau maillage.

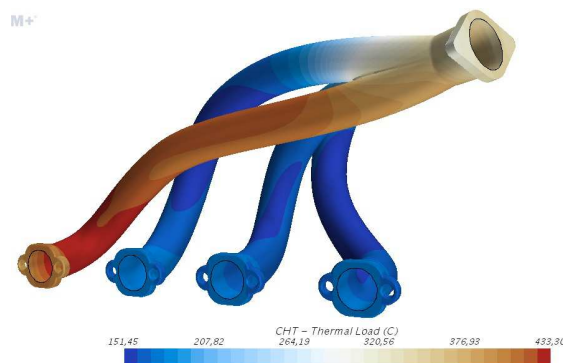


Figure 6 – Champ de température transféré sur la maillage pour le calcul de déformation mécanique

- ▷ Spécifier ce champ à la région *Solid (stress)* comme sollicitation :
 1. Sélectionner l'option *Specified* dans **Regions** > **Solid (Stress)** > **Physics Conditions** > **Specified Temperature Option**
 2. Renseigner *CHT - Thermal Load* comme *Field Function* dans **Regions** > **Solid (Stress)** > **Physics Values** > *Specified Temperature*
- ▷ Visualiser le champ de température pour vous assurer qu'il a bien été pris en compte par l'initialisation.

Préparation des champs à visualiser et calcul

- ▷ Créer une *Scalar Scene* à renommer *Displacement*
- ▷ Clic-droit sur **Derived Parts** et sélectionner **New Part > Warp > Vector Warp...** puis renseigner :
 - **Input Parts : Parts > Solid (Stress)**
 - **Vector : Displacement**
 - **Scale Factor : 30**
 - **Display : Existing Displayer > Scalar 1**
- ▷ Editer la *Scalar Scene Displacement* > **Displayers** puis renseigner :
 - **Outline 1 > Parts : Derived Parts > Vector Warp**
 - **Scalar 1 > Opacity : 0.3**
 - **Scalar 1 > Parts : Derived Parts > Vector Warp**
 - **Scalar 1 > Scalar Field : Displacement > Magnitude** et changer les unités pour des mm.
 - **Scalar 1 > Color Bar : blue-red balanced**
- ▷ Ajouter la géométrie de départ pour faciliter la visualisation de la déformée avec clic-droit **Displacement** > **Displayers** et sélectionner **New Displayer > Geometry** puis renseigner :
 - **Geometry 1 > Outline : deactivated**
 - **Geometry 1 > Surface : Activated**
 - **Geometry 1 > Parts : Solid (stress)**

Préparer enfin une *Scalar Scene* pour visualiser la contrainte de von Mises ;

- ▷ Créer une *Scalar Scene* à renommer *von Mises Stress*
- ▷ Editer **von Mises Stress** > **Displayers** et renseigner
 - **Outline 1 > Parts : Parts > Solid (Stress)**
 - **Scalar 1 > Parts : Parts > Solid (Stress)**
 - **Scalar 1 > Scalar Field > Function : Stress Von Mises** et modifier les unités en MPa.

Pour exécuter le calcul :

- ▷ Figer les solveurs liés au fluide et à la thermique en les sélectionnant dans **Solvers** et en cochant *Freeze Solver*, l'objectif étant de ne mener que l'analyse de déformation élastique,
- ▷ Augmenter de 2 le nombre de pas de calcul *Maximum Steps*,
- ▷ Lancer le calcul.

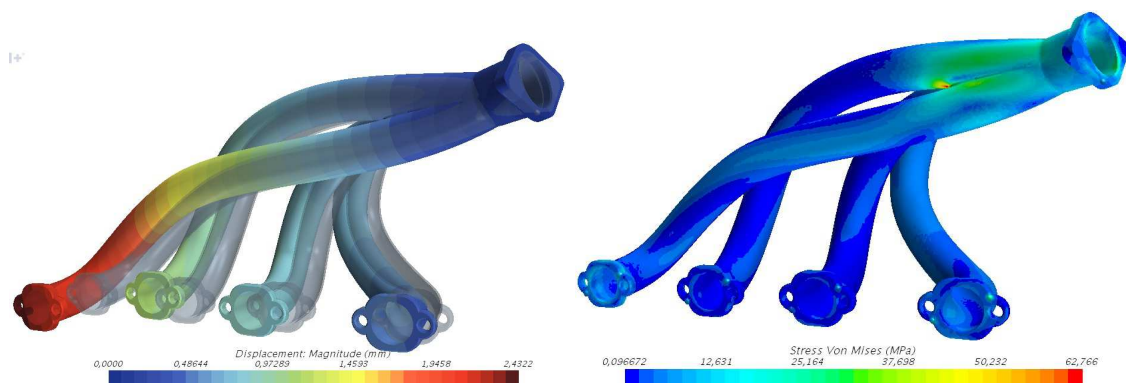


Figure 7 – Déformation

Contraintes de von Mises