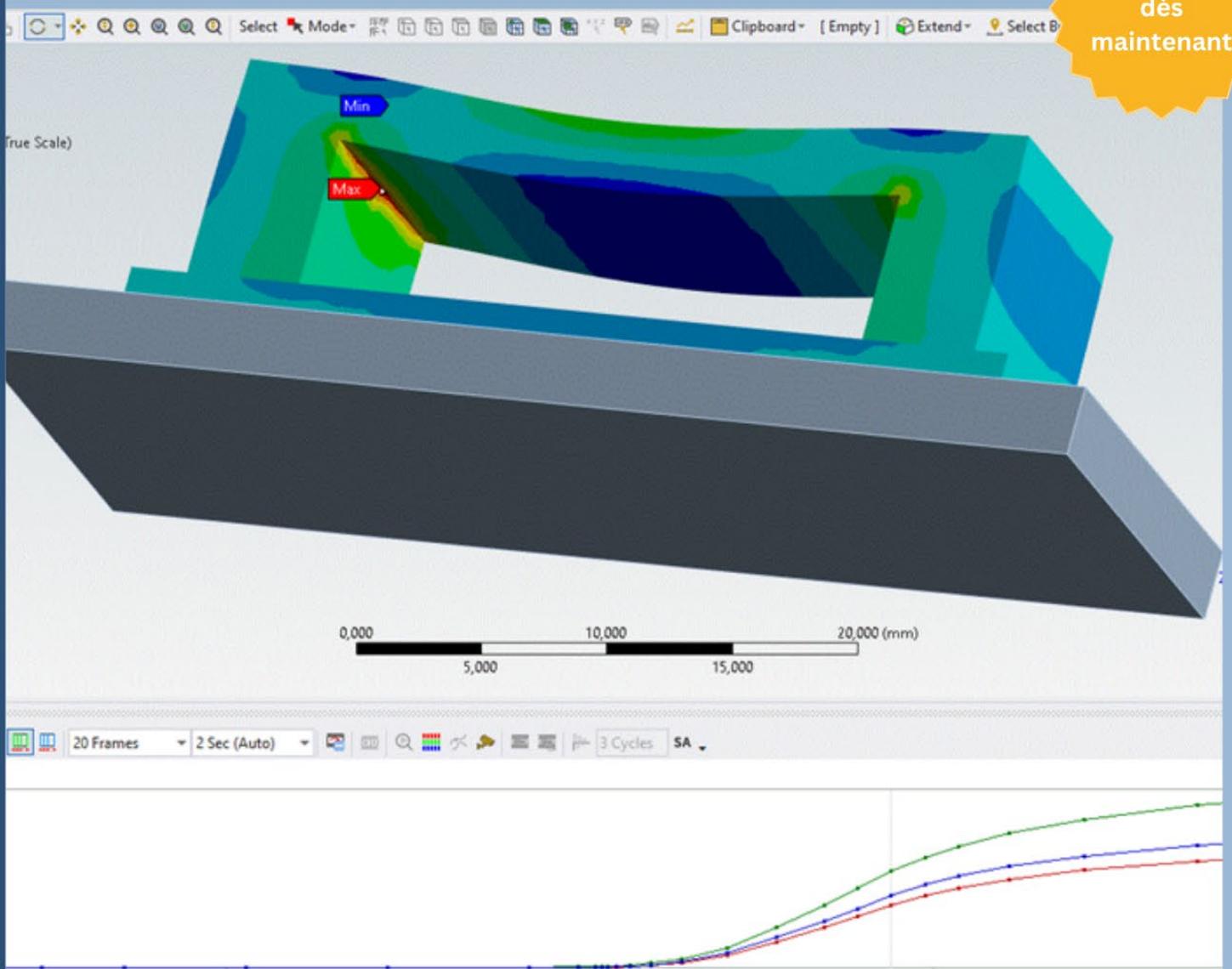


# LE FRITTAGE AVEC **Ansys** MECHANICAL

MARWA DHAHRI

Disponible  
dès  
maintenant



*L'instant* **ADDL**

## Table des matières

I.	Comment fonctionnent les procédés PBF et DED ? .....	3
II.	Nouvelles Approches .....	3
III.	Simulation et Prédiction .....	4
IV.	Simulations du Processus de Frittage en Ansys Mechanical : .....	4
1.	Utilisation du Sintering Process Wizard : .....	7
2.	Conclusion : .....	9
3.	Exemple d'application : .....	9
V.	Références : .....	28

Dans les méthodes de fabrication additive ou d'impression 3D comme la fusion sur lit de poudre (PBF) et le dépôt d'énergie dirigée (DED), un matériau en poudre est fusionné pour former une pièce en utilisant une source de chaleur localisée. Cela fonctionne un peu comme dessiner avec un crayon, où chaque trait ajoute progressivement à l'image globale, permettant de créer des formes complexes.

## I. Comment fonctionnent les procédés PBF et DED ?

Le processus d'impression 3D débute par la création d'un modèle 3D de l'objet à imprimer à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO). Un logiciel de découpe ("slicer") transforme ensuite ce modèle en couches numériques. Prenons le procédé de fusion laser sur lit de poudre : la chambre d'impression est chauffée avec un gaz inerte pour atteindre la température idéale. Une fine couche de poudre métallique est appliquée sur le plateau, chauffé à environ 300-400°C. Un laser fond sélectivement les particules de métal pour les solidifier. Une fois chaque couche terminée, le plateau descend pour permettre l'ajout d'une nouvelle couche de poudre. Ce processus se répète jusqu'à ce que la pièce soit terminée. Après impression, la pièce doit refroidir, puis la poudre métallique restante et les supports d'impression, nécessaires pour maintenir la géométrie de la pièce, sont enlevés. Pour le dépôt d'énergie dirigée (DED), qui utilise le laser, le faisceau d'électrons ou le plasma, le matériau en poudre ou en fil métallique est fondu par une source d'énergie focalisée et déposé couche par couche. La tête d'impression dépose le matériau sur une base ou un composant à réparer, jusqu'à atteindre la forme du modèle 3D conçu avec le logiciel de CAO.

Dans la fabrication additive (impression 3D), il est courant de rencontrer des problèmes liés au *chauffage localisé* des matériaux pendant le processus de construction. Ce chauffage localisé peut entraîner des déformations, des contraintes résiduelles et des variations de propriétés mécaniques dans les pièces finies. Les méthodes génèrent des températures très élevées et des gradients thermiques importants, ce qui provoque des déformations localisées, rendant la pièce susceptible de se tordre ou de se déformer. Les contraintes résiduelles accumulent des tensions internes, compliquant le retrait de la pièce de la plaque de base. De plus, les cycles rapides de chauffage et de refroidissement modifient la microstructure interne du matériau, affectant ses propriétés mécaniques telles que la résistance et la dureté.

## II. Nouvelles Approches

Pour résoudre les problèmes liés au chauffage localisé des matériaux pendant la fabrication additive, de nouvelles méthodes ont été développées. Une de ces méthodes consiste à former une "*pièce verte*", où les particules de poudre sont initialement liées faiblement à l'aide d'un *liant ou d'une colle* pour créer une structure de base. Cette pièce verte subit ensuite un cycle thermique en deux phases : *le déliantage*, où le liant est éliminé, et *le frittage*, où les particules de poudre sont chauffées pour se lier fermement entre elles, formant ainsi une pièce solide. Des exemples de ces méthodes incluent *le jet de liant* (Binder Jetting), où une imprimante dépose un liant sur une couche de poudre pour former la pièce verte, suivie d'un frittage, et le dépôt de matière fondue multi-matériaux (Multi-Material Fused Deposition Modeling), qui utilise différents matériaux pour former la pièce verte, ensuite frittée pour obtenir la pièce finale. Ces méthodes permettent d'éviter les problèmes de déformation, de contraintes résiduelles et de variations des propriétés mécaniques causés par le chauffage localisé intense, en utilisant des processus plus contrôlés de formation et de traitement thermique.

Avec l'adoption de ces nouvelles méthodes, le défi principal n'est plus le chauffage localisé pendant la construction, mais plutôt *le chauffage global* pendant le frittage. Lors de la conception des pièces utilisant ces approches innovantes, il est essentiel de prendre en considération plusieurs aspects critiques. Tout d'abord, le phénomène de retrait est inévitable : pendant le frittage, la pièce subit *une légère contraction* (rétrécissement), ce qui nécessite une conception prévoyant ce changement dimensionnel pour assurer la précision finale. De plus, *la déformation due à la gravité* constitue un autre facteur majeur : sous l'effet combiné de la chaleur et de la gravité, la pièce peut se courber ou se déformer. Afin de garantir que la pièce finale respecte les dimensions et la forme requises, il est donc crucial **de simuler** ces effets pendant la conception et la planification du processus de fabrication additive.

### III. Simulation et Prédiction

La simulation joue un rôle crucial dans la prédiction et la gestion des défis rencontrés pendant le frittage en fabrication additive. Les utilisateurs de simulations cherchent à anticiper deux aspects critiques : **le retrait et la déformation gravitationnelle**. Le retrait, où la pièce subit une légère contraction pendant le frittage, nécessite une prévision précise pour maintenir les dimensions finales correctes. De même, la déformation gravitationnelle, causée par l'effet combiné de la gravité et de la chaleur, peut altérer la forme de la pièce, impactant ainsi les tolérances dimensionnelles spécifiées.

Pour résoudre ces défis, la simulation de la rétraction et de la déformation gravitationnelle offre plusieurs avantages significatifs. Elle permet tout d'abord de réduire les essais-erreurs en prévoyant le comportement des pièces et en identifiant les zones critiques avant la fabrication, diminuant ainsi le besoin de prototypes physiques et économisant du temps et des ressources.

Ensuite, elle élargit l'espace d'exploration de conception en facilitant l'expérimentation avec différents designs et matériaux, favorisant ainsi l'innovation et l'optimisation des pièces. De plus, une calibration précise des matériaux permet l'application d'algorithmes de compensation qui ajustent la conception initiale pour compenser les effets de rétraction et de déformation, garantissant que la pièce finale respecte les spécifications dimensionnelles requises.

Enfin, grâce à des simulations précises, il est possible de prédire avec exactitude comment une pièce se rétractera et se déformera pendant le frittage. Les algorithmes de compensation adaptent la forme de la pièce conçue pour que, après rétraction et déformation, elle atteigne précisément les dimensions finales spécifiées, permettant ainsi une production efficace avec des tolérances très précises dès le premier essai.

### IV. Simulations du Processus de Frittage en Ansys Mechanical :

Les simulations du processus de frittage avec Ansys Mechanical sont grandement simplifiées grâce à l'utilisation de l'extension Sintering Process. Cette extension est spécifiquement conçue pour faciliter la configuration des modèles de matériau destinés au frittage. Elle permet aux utilisateurs de définir rapidement et efficacement les propriétés des matériaux ainsi que les conditions de frittage, rendant ainsi le processus de simulation plus accessible et efficace. Cependant, l'utilisation de l'extension Sintering Process nécessite une licence Additive suite,

qui offre les outils et fonctionnalités spécifiques indispensables pour réaliser des simulations avancées de fabrication additive, y compris celles liées au frittage.

**Figure 1 : Onglet et ruban add-ons**



**Figure 2 : Onglet et ruban Processus de frittage**



Pour simuler efficacement le processus de frittage avec Mechanical Ansys, plusieurs étapes et considérations clés doivent être prises en compte. Tout d'abord, la création du système d'analyse se concentre sur le traitement post-construction du frittage, utilisant uniquement **un système Static Structural** sans besoin initial de **formation par jet de liant**. Ensuite, il est essentiel de définir **les données d'ingénierie**, telles que le modèle élastique isotrope du matériau avec des paramètres comme le module de Young et le coefficient de Poisson.

L'étape suivante consiste à attacher la géométrie, incluant **la pièce et une plaque de base** pour empêcher les mouvements de corps rigides, et à lancer **Mechanical**. Aucune exigence spéciale n'est nécessaire au-delà des paramètres d'unité standards lors du paramétrage des unités. En chargeant **l'add-on Sintering Process** via l'onglet **Add-ons** (Figure 1), la configuration spécifique au processus de frittage est simplifiée, permettant l'attribution des matériaux à l'aide d'un objet **Matériau de Frittage** préconfiguré (Figure 3). *Pour intégrer l'objet Matériau Fritté et choisir un modèle de matériau prédéfini, plusieurs étapes sont nécessaires. Tout d'abord, sélectionnez le modèle de matériau approprié parmi les options disponibles, en tenant compte de ses implications sur les propriétés mécaniques et thermiques du matériau final. Définissez ensuite la densité relative initiale du matériau, qui indique le niveau de densification atteint par rapport à sa densité théorique maximale après frittage. Spécifiez également le diamètre moyen des particules de poudre utilisées dans le processus de frittage, un paramètre crucial influençant la cinétique de frittage et les propriétés finales du matériau. N'oubliez pas de préciser la température d'activation du frittage, seuil à partir duquel le matériau commence à se densifier. Enfin, incluez tous les autres paramètres sous-jacents nécessaires au modèle de matériau choisi, tels que la conductivité thermique, la capacité thermique spécifique et la cinétique de croissance des grains, pour assurer une simulation précise et efficace du processus de frittage.*

Les contrôles de maillage et les connexions sont ensuite appliqués sans exigences particulières uniques, tandis que les paramètres de contact entre la pièce et la plaque de base sont configurés pour minimiser le potentiel de glissement. *La détection automatique des contacts repère généralement la présence d'une plaque de base dans la simulation, où la surface de contact se situe au bas de la pièce et la surface cible se trouve sur le dessus de la plaque de base. Pendant le frittage, un glissement entre la pièce et la plaque de base survient fréquemment. Pour modéliser ce glissement avec précision, il est conseillé de désactiver l'option de petits glissements et de configurer la mise à jour de la raideur à chaque itération en mode agressif.*

Ces ajustements permettent de garantir une meilleure simulation des interactions entre la pièce et la plaque de base au cours du processus de frittage.

L'objet **Programme de Frittage** est conçu pour spécifier comment la température appliquée à une pièce varie au fil du temps pendant le processus de frittage. Il se comporte de manière similaire à l'objet de charge de Condition Thermique du module Mechanical, qui est utilisé pour appliquer une température uniforme à une pièce. Cependant, le Programme de Frittage offre des fonctionnalités supplémentaires avantageuses (Figure 4) :

1. **Définition du Cycle de Température** : Avec le Programme de Frittage, vous pouvez définir la variation de la température en utilisant des termes de montée et de maintien. Cela signifie que vous pouvez spécifier des périodes où la température augmente progressivement (montée) et des périodes où la température est maintenue constante (maintien).
2. **Mise à Jour Automatique des Paramètres d'Analyse** : Lors de l'utilisation du Programme de Frittage, les étapes de charge (les moments où la charge appliquée change) et les temps de fin (les moments où la simulation doit s'arrêter) dans les Paramètres d'Analyse sont mis à jour automatiquement. Cela simplifie grandement la configuration de la simulation et réduit le risque d'erreurs.

Les **paramètres recommandés** pour l'analyse structurale comprennent la considération des grandes déformations, l'emploi de **solutions quasi-statiques** pour des charges stables, et l'**ajustement automatique** des pas de temps. Les conditions aux limites structurales incluent des fixations rigides et l'application de la gravité standard terrestre. Alors pour la résolution, une licence Additive Suite est requise pour réaliser l'analyse structurale statique.

Enfin, les résultats de l'**add-on Sintering Process**, intégrés comme des objets de résultat standard dans Mechanical, permettent la visualisation des variations de champ au fil du temps, incluant des quantités telles que la **Densité Relative**, la **Viscosité Uniaxiale**, les **Contraintes de Frittage** et la **Taille des Grains**, si un modèle de croissance de grain est activé (voir figure 2).

Détails de "Sinter Material"	
<b>Geometry</b>	
Méthode de champ d'application	Sélection de géométrie
<b>Sintering Model</b>	
<b>Material</b>	
<b>Initial State Data</b>	
<input type="checkbox"/> Green Density	0,55
<input checked="" type="checkbox"/> Mean Powder Diameter	
<b>Sintering Stress</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Activation Temperature	
Model	Olevsky
Input by	Single Stage
<input checked="" type="checkbox"/> Pre-Factor	
<input type="checkbox"/> Exponent	2
<b>Uniaxial Viscosity</b>	
Model	Arrhenius
Input by	Single Stage
<input checked="" type="checkbox"/> Pre-Factor	
<input checked="" type="checkbox"/> Activation Energy	
<input type="checkbox"/> Temperature Exponent	0
<input type="checkbox"/> Grain Size Exponent	0
<b>Viscous Moduli</b>	
Model	Riedel
Shear Moduli density Coefficient	1
Shear Moduli density Exponent	2
Bulk Moduli density Coefficient	1
Bulk Moduli density Exponent	2
Viscous Poissons coefficient	0,5
<b>Anisotropy</b>	
Anisotropic Factors	Tabular Data

Détails de "Sinter Schedule"	
<b>Définition</b>	
Heating Mode	Isothermal
<input type="checkbox"/> Environment Temperature	22 °C
<input type="checkbox"/> Start Time	1 s
Temperature Cycle	Tabular Data
<b>Geometry</b>	
Méthode de champ d'application	Sélection de géométrie
<b>Thermal Schedule</b>	
Number of Set Points	1
-- Set Point :	1
Input by :	Duration
<input checked="" type="checkbox"/> Temperature	
<input checked="" type="checkbox"/> Duration	
<b>Information</b>	
Final Time	Not Generated
Adjust Analysis Time/Step	Yes

Figure 4 : détail Programme de Frittage

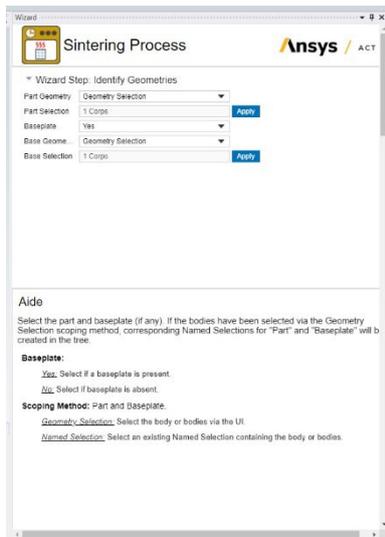
Figure 3 : détail de matériau de frittage

## 1. Utilisation du Sintering Process Wizard :

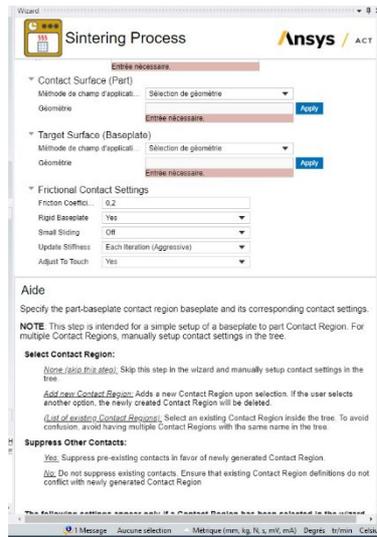
Dans Mechanical Ansys, le processus de frittage est facilité par l'assistant intégré, *le Sintering Process Wizard*, un outil essentiel pour les utilisateurs engagés dans la simulation de ce processus. Cet assistant guide méticuleusement l'utilisateur à travers la configuration des modèles de matériaux, des conditions aux limites, des charges thermiques ainsi que des résultats attendus. Il optimise également les paramètres du solveur pour garantir des simulations précises et stables. Grâce à sa structure intuitive, *le Sintering Process Wizard* simplifie considérablement la mise en place des simulations, rendant le processus accessible même aux utilisateurs moins expérimentés. Chaque page est dotée d'une *aide contextuelle* qui fournit des explications supplémentaires et des conseils pratiques pour remplir chaque section avec précision. En suivant méthodiquement ces étapes détaillées, l'utilisateur minimise les risques d'erreurs de configuration, assurant ainsi la fiabilité des résultats. De plus, en ajustant automatiquement certains paramètres du solveur, le wizard améliore encore la stabilité et la précision globale des simulations de frittage réalisées dans Mechanical.

Cet outil guide les utilisateurs à travers plusieurs étapes essentielles pour préparer leur modèle :

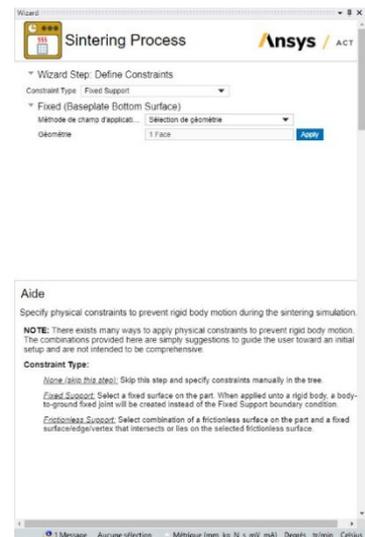
1. **Identification des Géométries** : Sélectionnez et définissez les formes géométriques de la pièce à simuler, en assurant une représentation précise.
2. **Définition des Contacts** : Spécifiez les interactions et les liaisons entre les différentes parties de la géométrie ou entre la pièce et son environnement, garantissant une simulation réaliste des conditions physiques.
3. **Définition des Contraintes** : Configurez les contraintes et les conditions aux limites nécessaires, telles que les fixations et les surfaces immobiles, pour modéliser correctement le comportement de la pièce.
4. **Génération de la Maille** : Créez une maille adaptée à la géométrie pour une simulation précise, en ajustant la densité et la qualité de la maille pour optimiser les résultats.
5. **Définition de la Gravité** : Intégrez la force gravitationnelle dans la simulation afin de prendre en compte son influence pendant le processus de frittage.
6. **Définition du Matériau de Frittage** : Spécifiez les propriétés du matériau utilisé, comme la densité et les caractéristiques mécaniques, essentielles pour simuler avec précision le comportement du matériau pendant le frittage.
7. **Définition du Programme de Frittage** : Définissez le programme thermique détaillé, comprenant les températures et les durées des cycles de chauffage et de refroidissement, pour reproduire fidèlement les conditions de frittage.
8. **Définition des Résultats et des Paramètres du Solveur** : Configurez les résultats attendus de la simulation et ajustez les paramètres du solveur pour garantir la stabilité et la précision des résultats finaux.



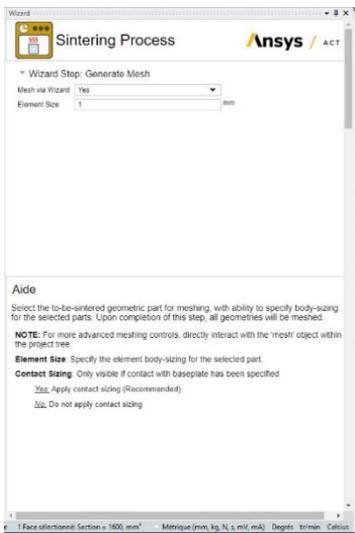
### Identification des Géométries



### Définition des Contacts



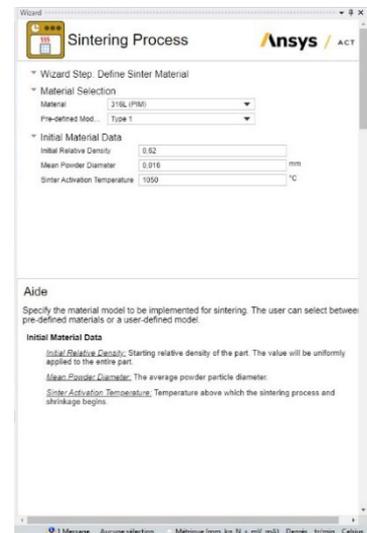
### Définition des Contraintes



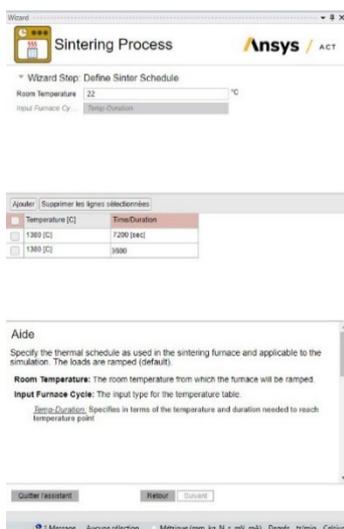
### Génération de la Maille



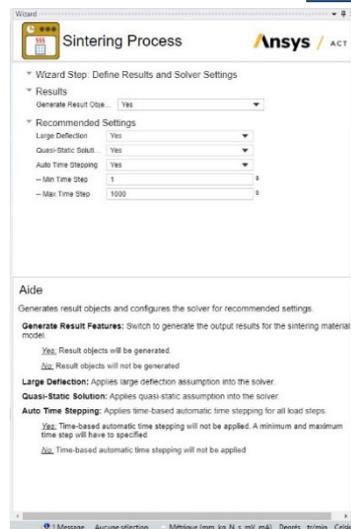
### Définition de la Gravité



### Définition du Matériau de frittage



### Définition du Programme de Frittage



### Définition des Résultats et des Paramètres du Solveur

## 2. Conclusion :

Le Sintering Process Wizard vous guide de manière intuitive à travers toutes les étapes nécessaires pour configurer une simulation de frittage de manière détaillée. En utilisant l'aide contextuelle disponible, vous pouvez efficacement configurer et optimiser votre simulation, assurant ainsi des résultats précis et fiables. Après avoir utilisé cet assistant, il est essentiel de vérifier les objets créés dans l'arborescence du projet pour garantir leur configuration correcte. Parcourez l'arborescence pour examiner chaque objet, comme le Matériau de Frittage et le Programme de Frittage, et assurez-vous que toutes les options spécifiées sont correctement mises en œuvre. Si nécessaire, ajustez ou ajoutez des éléments pour affiner la simulation selon vos besoins spécifiques. L'utilisation du Wizard pour le cycle thermique de frittage présente également l'avantage notable d'automatiser la configuration des étapes de charge. Cela élimine la nécessité de modifier manuellement les temps de fin des étapes de charge dans les paramètres d'analyse du projet, en ajustant automatiquement chaque phase de montée en température, de maintien isotherme et de refroidissement comme des étapes de charge distinctes.

Dans Mechanical, plusieurs modèles de matériau sont disponibles pour simuler le frittage de l'acier inoxydable 316L utilisé dans le moulage par injection de poudre (PIM). Ces modèles incluent le 316L-Type 1, basé sur les travaux de Song [1], le 316L-Type 2, basé sur les recherches de Song et al. [2], et le 316L-Type 3, dont le modèle provient de Zhang [3].

Chaque modèle est élaboré à partir de recherches spécifiques et adopte des approches distinctes pour modéliser le processus de frittage du 316L. Les différences entre ces modèles résident dans la manière dont ils traitent les modules viscoélastiques, les contraintes de frittage, la viscosité uniaxiale, la croissance des grains et les étapes de densification.

Ces modèles sont conçus pour servir de points de départ ou de références dans les simulations. Ils permettent aux ingénieurs et aux chercheurs d'initier leurs études de manière précise en utilisant des paramètres déjà établis pour analyser le comportement du matériau 316 L pendant le processus de frittage connus, puis d'ajuster et de calibrer ces paramètres en fonction de données expérimentales spécifiques ou des exigences du projet.

## 3. Exemple d'application :

La nouvelle approche de processus de fabrication additive est une approche de fabrication séquentiel qui permet d'obtenir des pièces vertes aux dimensions et aux propriétés mécaniques remarquables. Après les étapes de démoulage et de durcissement, les pièces vertes subissent un processus de frittage à une température juste inférieure à leur point de fusion et sont solidifiées, tandis que leur densité est également augmentée pour répondre aux exigences des normes.

Pendant le frittage, les proportions initiales des corps verts sont modifiées et peuvent être réduites jusqu'à 15 %. Ce changement dimensionnel est influencé par des paramètres tels que le profil du processus de frittage, la géométrie de la pièce, les propriétés du matériau, l'orientation du frittage de la pièce, etc.

Dans cette section, nous présentons un exemple simple de simulation de frittage (rétrécissement par frittage) en utilisant les procédures spécifiques d'Ansys Mechanical et d'Ansys Additive Suite. Pour ce faire, nous nous appuyerons sur l'aide d'ANSYS pour guider le processus. Nous

allons modéliser le processus de frittage appliqué à un pont à travée, représenté ici sur une plaque de base plane.

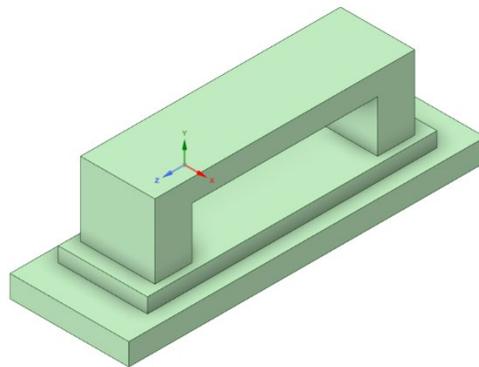


Figure : La géométrie de pont à travée avec sur une plaque de base plane.

Le modèle étudié est constitué d'acier inoxydable 316L dans son état "vert", c'est-à-dire juste après avoir été imprimé mais avant tout traitement thermique. L'objectif de cette simulation est d'analyser la densification du matériau au cours du frittage et de prédire la forme finale du pont après le retrait dimensionnel induit par ce processus.

Ce guide explique en détail l'utilisation du module complémentaire "Processus de frittage" d'ANSYS pour réaliser une simulation complète. Il présente les fonctionnalités clés, telles que l'assistant de processus de frittage, un outil interactif intégré qui guide l'utilisateur à travers les étapes de configuration. Le guide couvre également l'utilisation du matériau de frittage prédéfini par ANSYS, le 316L PIM, spécialement conçu pour simuler le comportement de l'acier inoxydable 316L, en tenant compte de ses propriétés viscoplastiques et de densification. Enfin, il explore l'analyse des résultats de frittage, en se concentrant sur des paramètres cruciaux comme la densité relative du matériau, qui reflète le degré de compaction atteint, et la contrainte de frittage, qui fournit des informations sur les forces internes générées lors du processus.

Dans cet exemple le processus de frittage est réalisé en un seul cycle de chauffage dans un four à cuve, où plusieurs pièces peuvent être traitées simultanément. Pour simplifier, ce cycle comprend une montée en température progressive jusqu'à atteindre une température cible. Une fois la température cible atteinte, le four maintient cette température constante pendant une période spécifique. Cette phase de maintien isotherme permet au matériau de se densifier uniformément sans subir de variations de température qui pourraient affecter la qualité du frittage.

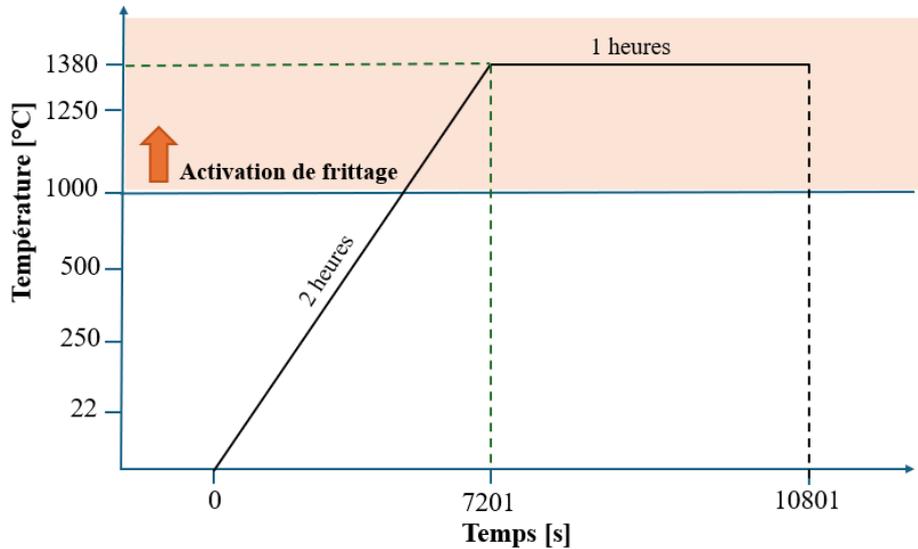
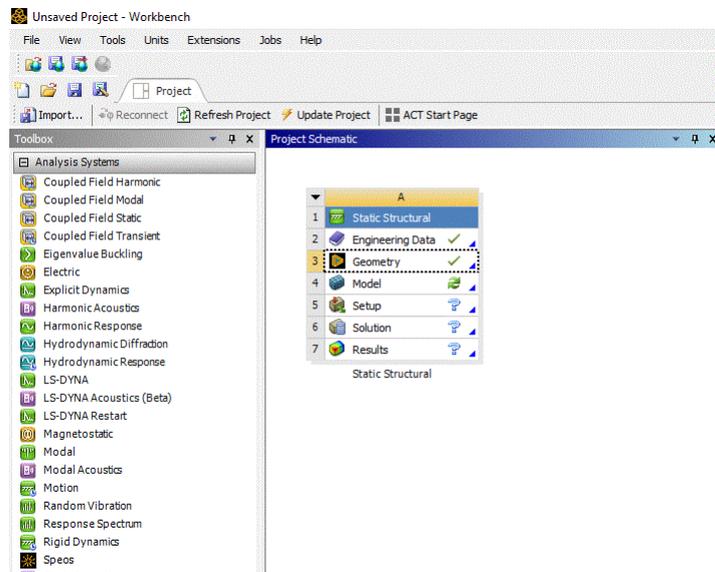
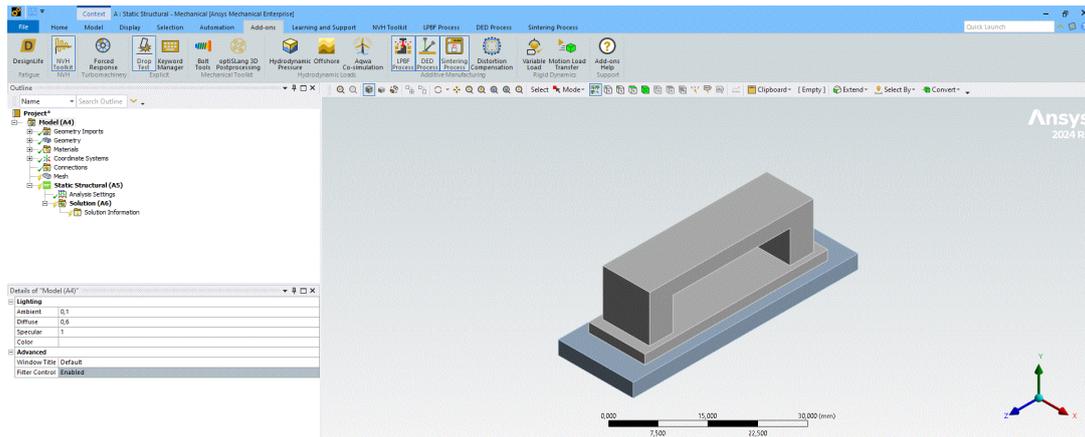


Figure : Le cycle de chauffage dans un four

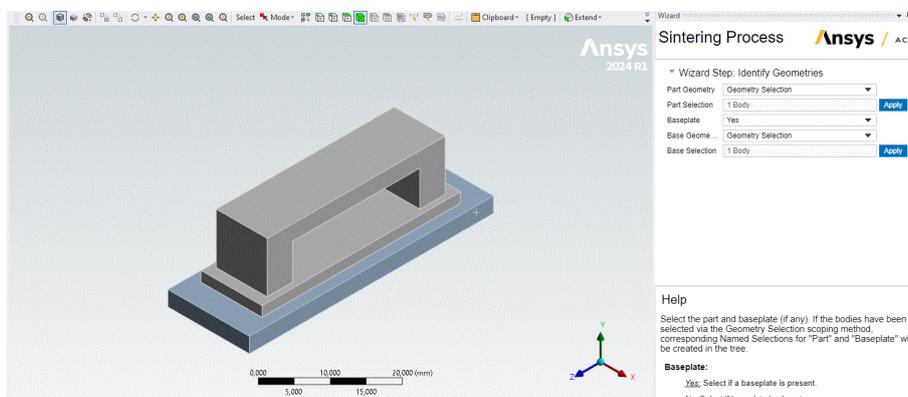
L'analyse de frittage est effectuée en utilisant l'outil "Static Structural" (Structure statique). Dans ce cadre, il n'est pas nécessaire de procéder à une formation initiale par jet de liant. La prochaine étape consiste à associer la géométrie, comprenant la pièce à simuler et une plaque de base destinée à prévenir les mouvements de corps rigides, puis à lancer l'outil Mechanical.



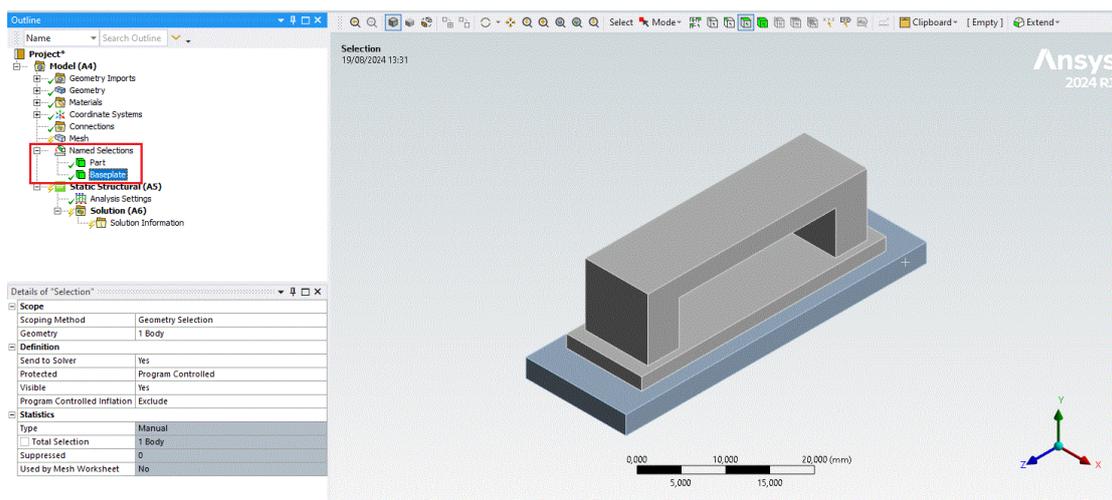
En chargeant le module complémentaire "Sintering Process" depuis l'onglet Add-ons, la configuration spécifique au frittage est simplifiée grâce à l'utilisation de l'assistant de processus de frittage.



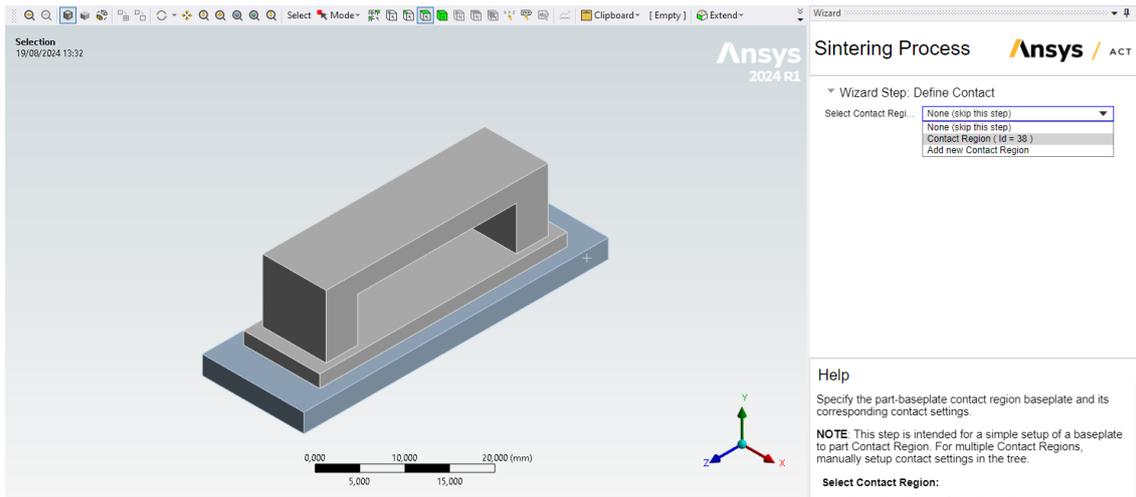
En ouvrant l'assistant, la première étape consiste à identifier le corps de la pièce, représenté par la pièce verte, ainsi que la base. Pour cela, utilisez le sélecteur de corps afin de choisir le corps du pont, puis cliquez sur "Appliquer" dans le champ Géométrie sous la section Partie. Ensuite, dans le champ Plaque de base, sélectionnez "Oui", car ce modèle inclut une plaque de base.



Une fois cette étape terminée, les sélections nommées pour le corps de la pièce (Pièce) et le corps de la base (Plaque de base) sont ajoutées à l'arborescence du projet.

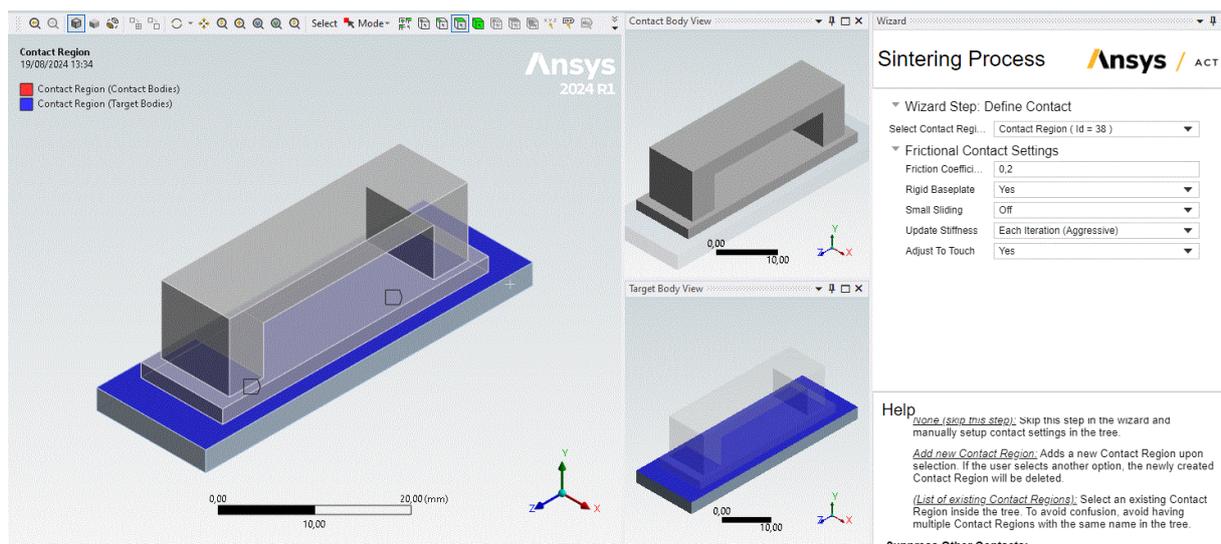


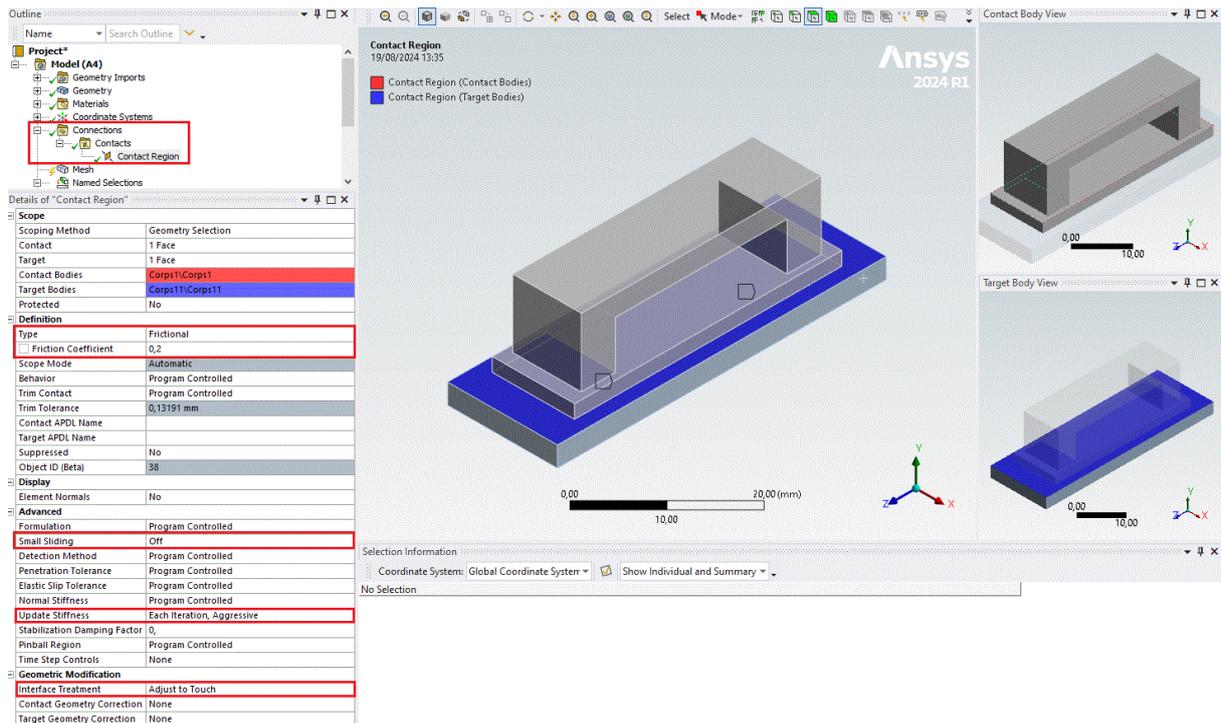
**L'étape suivante** consiste à définir le contact entre la pièce et la plaque de base. Cette détection peut être effectuée automatiquement ou manuellement dans l'outil Mechanical. L'assistant vous permet soit d'utiliser la région de contact détectée, identifiée par un numéro spécifique, soit de spécifier une nouvelle région de contact.



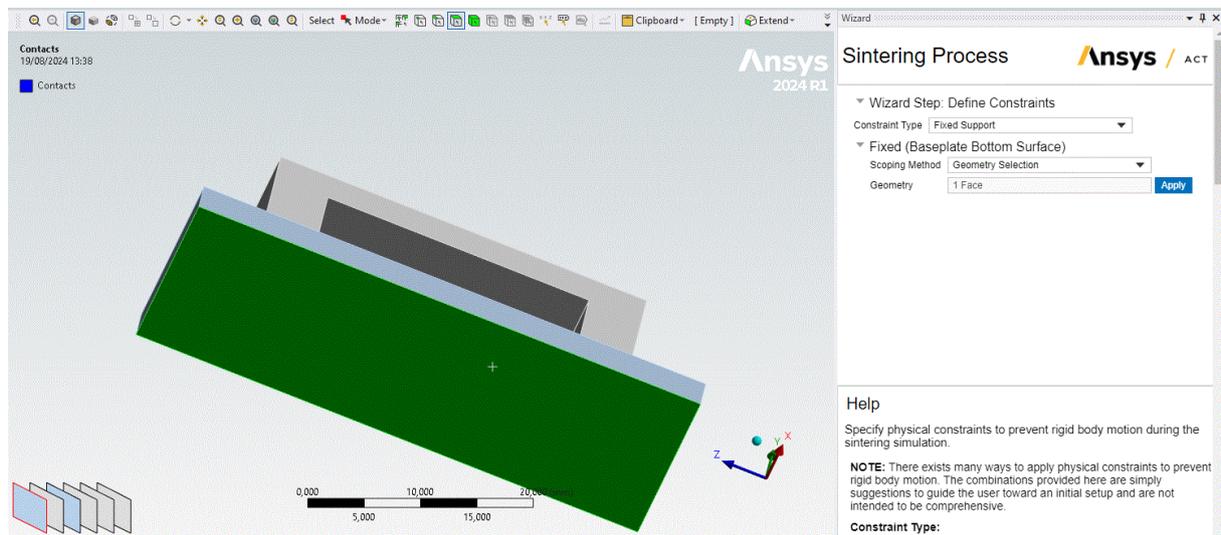
Utilisons les paramètres par défaut recommandés pour l'interface de contact entre la pièce et la plaque de base. Étant donné que la plaque de base est suffisamment grande et rigide, nous pouvons la considérer comme parfaitement rigide, ce qui nous permet d'ignorer sa flexibilité et d'accélérer ainsi le temps de simulation. Nous prévoyons que la pièce glissera sur la base lorsqu'elle se rétrécira pendant le frittage, c'est pourquoi nous veillerons à ce que l'option "Petit glissement" soit désactivée.

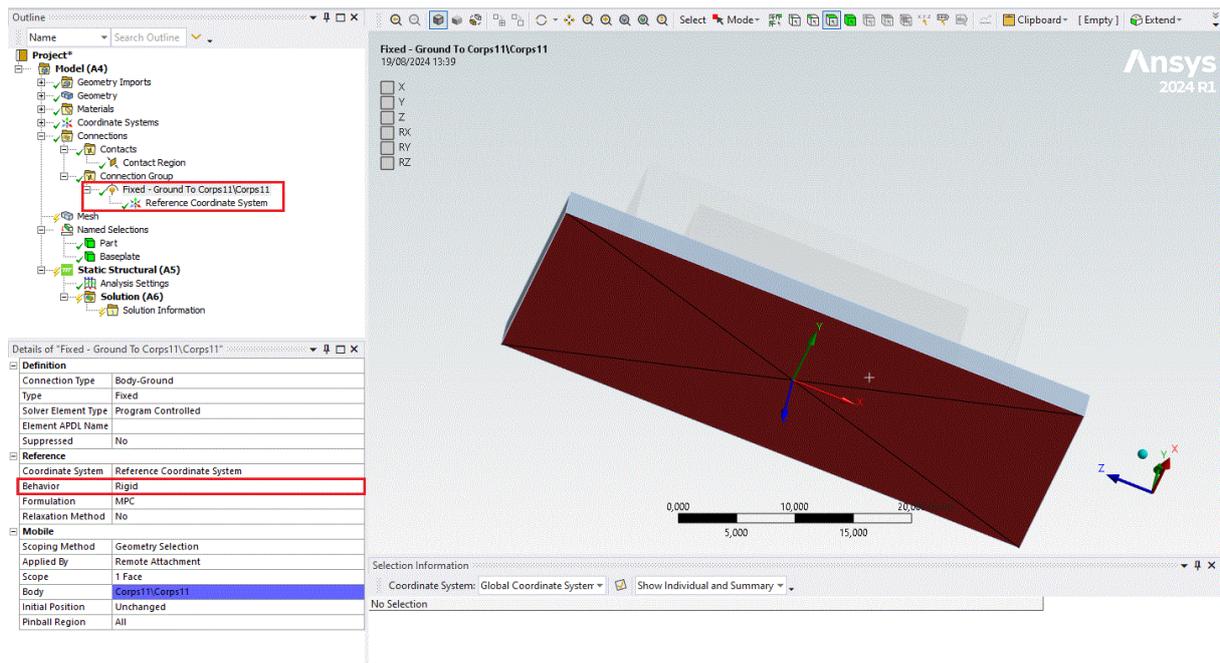
Ensuite, configurons le programme pour qu'il mette à jour la rigidité à la fin de chaque itération d'équilibre. Cette option est recommandée si nous ne sommes pas certains du facteur de rigidité normal à utiliser pour obtenir des résultats précis. Étant donné que nous avons défini la propriété "Type de contact" avec frottement, la propriété "Traitement de l'interface" précise comment l'interface de contact entre les paires de contacts est gérée. Pour optimiser la configuration du contact initial, nous utiliserons l'option "S'ajuster au toucher", qui comble tout écart initial et ignore toute pénétration initiale, créant ainsi un état initial sans contrainte où les paires de contacts se touchent seulement.



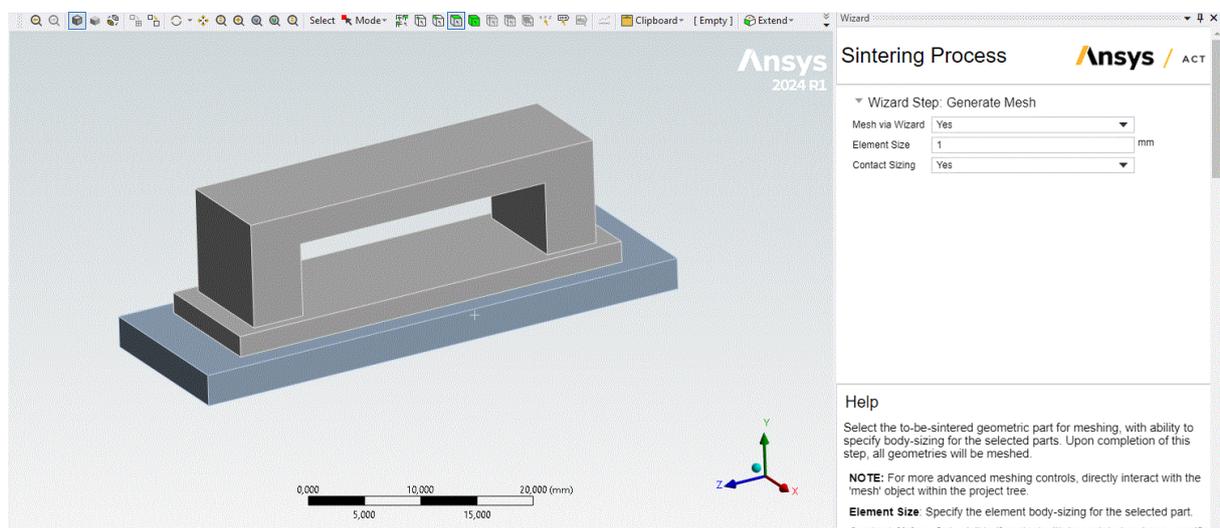


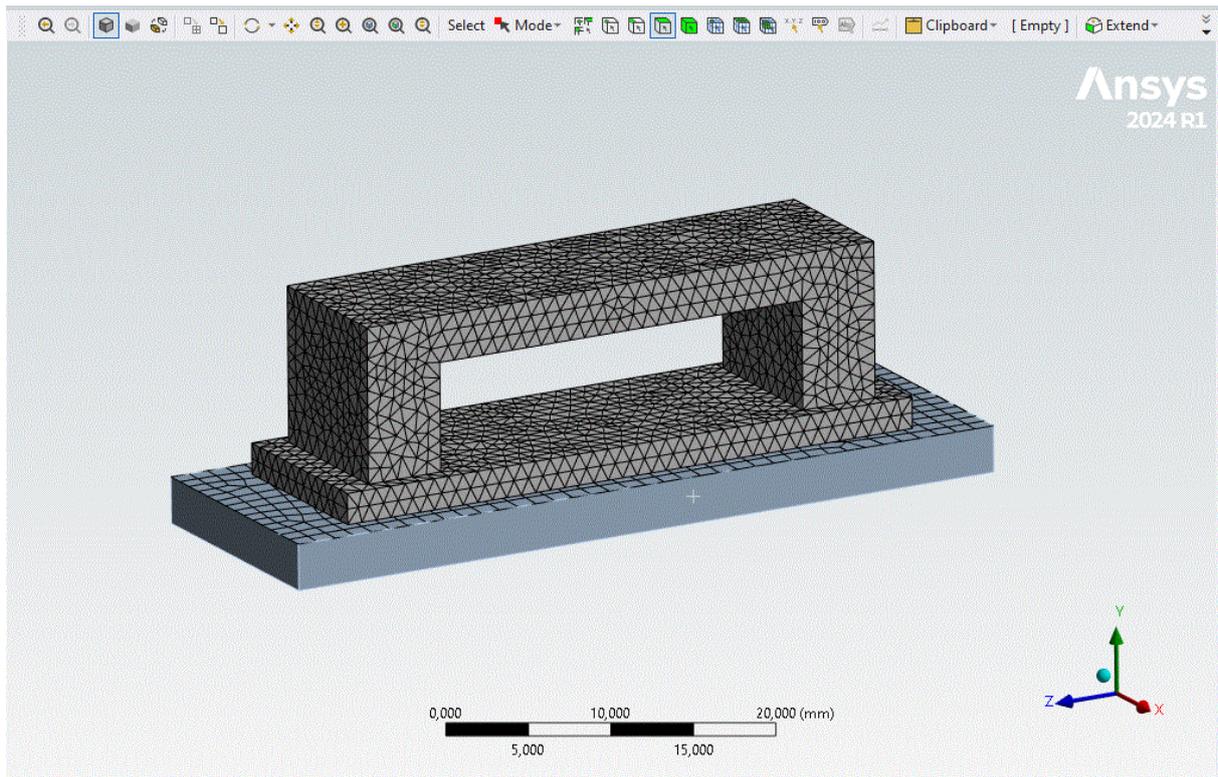
Au cours de la **troisième étape** de l'assistant, nous définirons les contraintes en appliquant un support fixe à la face inférieure de la plaque de base. Pour ce faire, sélectionnez "Support fixe" dans le menu "Type de contrainte". Ensuite, faites pivoter le modèle dans la fenêtre graphique, utilisez le sélecteur de face pour choisir la surface inférieure de la plaque, puis cliquez sur "Appliquer" dans la section "Géométrie". Lorsque cette contrainte est appliquée à un corps rigide, un joint fixe corps-sol sera automatiquement généré à la place de la condition limite "Support fixe", comme le montre l'arbre de projet.





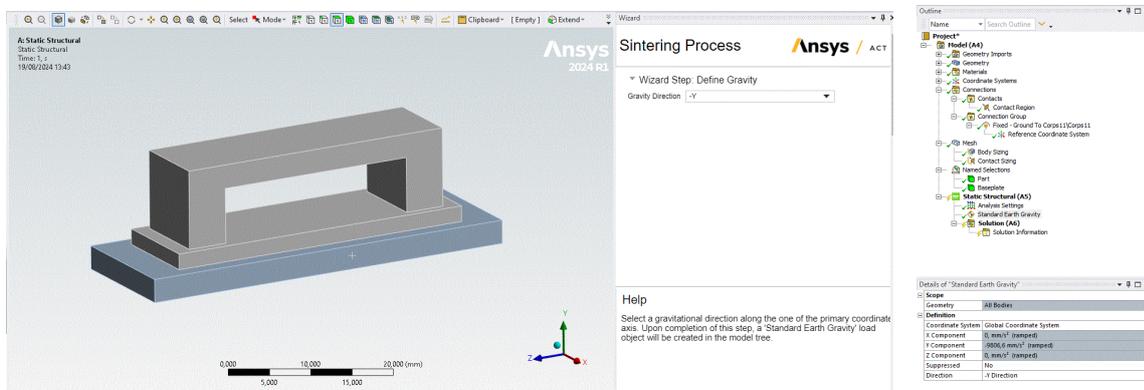
**La quatrième étape** consiste à générer le maillage. Dans cet exemple, nous allons spécifier un maillage de 1 mm dans la fenêtre de l'assistant, afin d'assurer qu'il y ait au moins trois éléments sur toute la hauteur de la travée du pont. Vous pouvez conserver l'option "Oui" (par défaut) pour le maillage via l'Assistant, ou bien passer cette étape et effectuer un maillage personnalisé ultérieurement. Ensuite, il est recommandé de garder l'option "Oui" (par défaut) pour le dimensionnement du contact. Cela permettra au maillage de créer des éléments de taille relativement uniforme sur les corps, en se basant sur les faces d'une région de contact face à face.





**La cinquième étape** de l'assistant se concentre sur la définition de la gravité dans la simulation. Ici, l'accélération gravitationnelle est intégrée pour représenter l'effet de la gravité sur le système, ce qui est essentiel pour une simulation réaliste. L'application de cette force permet de modéliser les interactions de frottement entre le pont et la plaque de base, jouant un rôle crucial dans le maintien de la stabilité du modèle en évitant les mouvements indésirables du corps rigide sous l'influence de la gravité.

Dans la fenêtre de configuration dédiée, vous pouvez ajuster les paramètres pour définir précisément la direction de la gravité. Cela inclut la spécification de l'orientation dans laquelle la force gravitationnelle agit, ce qui est crucial pour s'assurer que les effets physiques simulés correspondent aux conditions réelles que vous souhaitez analyser. L'étape de définition de la gravité garantit que les forces générées par la gravité sont correctement appliquées et orientées, renforçant ainsi l'authenticité des résultats de la simulation.

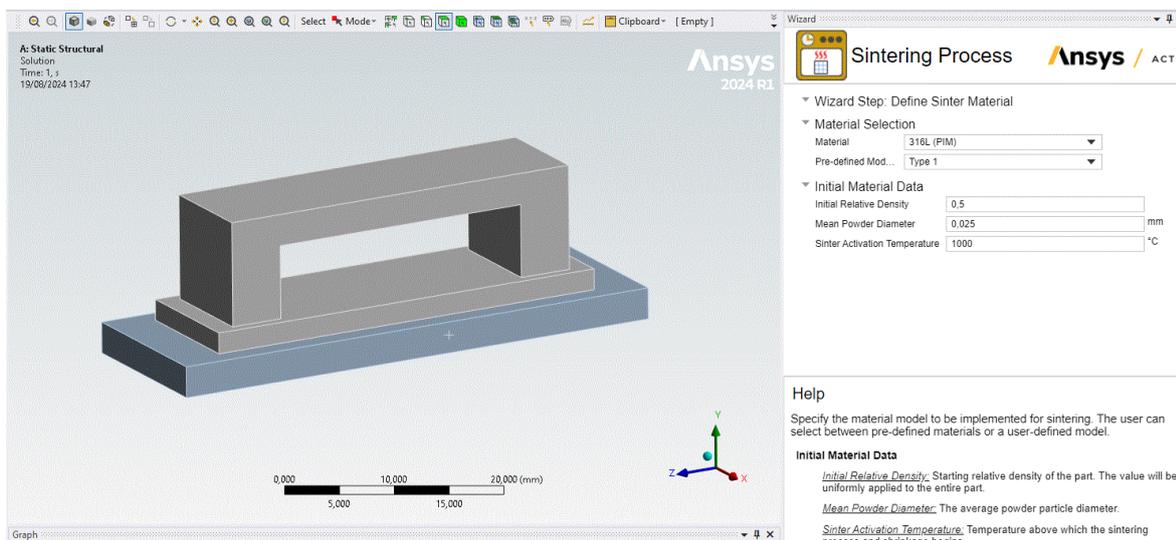


**La sixième étape** de l'assistant concerne la définition du matériau de frittage utilisé dans la simulation. À ce stade, vous pouvez choisir entre un matériau de frittage prédéfini par Ansys ou créer un matériau personnalisé. Dans cet exemple, nous sélectionnerons l'acier inoxydable 316L (PIM), qui est déjà inclus dans la bibliothèque des matériaux. Pour ce faire, choisissez "316L (PIM)" comme matériau et optez pour "Type 1" dans les modèles prédéfinis.

Ensuite, définissez la densité relative initiale à 0,5. Cela signifie que, au début de la simulation, la pièce sera modélisée avec une densité égale à 50 % de la densité maximale théorique du matériau. En d'autres termes, la pièce commence avec une densité qui est la moitié de la densité maximale que le matériau pourrait atteindre une fois complètement fritté. Cette valeur est appliquée de manière uniforme sur toute la pièce, ce qui signifie que chaque partie de la pièce aura la même densité initiale. Cette configuration permet de simuler le comportement du matériau pendant le processus de frittage, où la densité de la pièce évoluera progressivement vers la densité maximale à mesure que le frittage progresse.

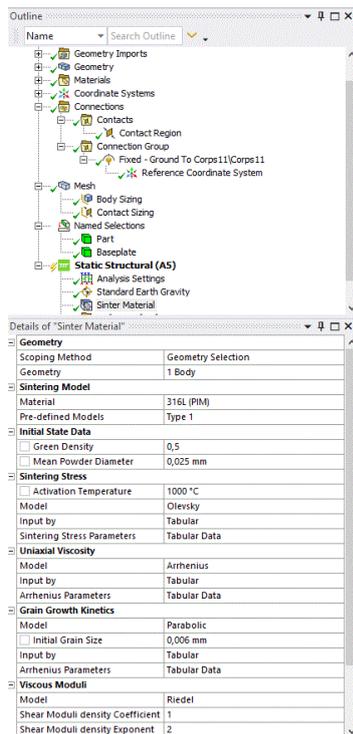
Conservez la valeur par défaut de 0,025 pour le diamètre moyen de la poudre. Ce paramètre indique la taille moyenne des particules de poudre utilisées dans le processus de fabrication. En d'autres termes, chaque particule de poudre a un diamètre moyen de 0,025 mm, ce qui influence le comportement du matériau pendant le frittage, notamment la manière dont les particules se fusionnent et se densifient au cours du processus.

Enfin, spécifiez 1000°C pour la température d'activation du frittage. Cette température marque le seuil au-delà duquel la contrainte de frittage commence à avoir un impact notable sur le matériau. En d'autres termes, à partir de 1000°C, les forces internes générées par le processus de frittage deviennent significatives et peuvent entraîner un retrait du matériau. Ce paramètre est crucial pour simuler correctement le comportement du matériau pendant le frittage, car il détermine à quel moment les effets thermiques influencent la densification et les propriétés finales de la pièce.



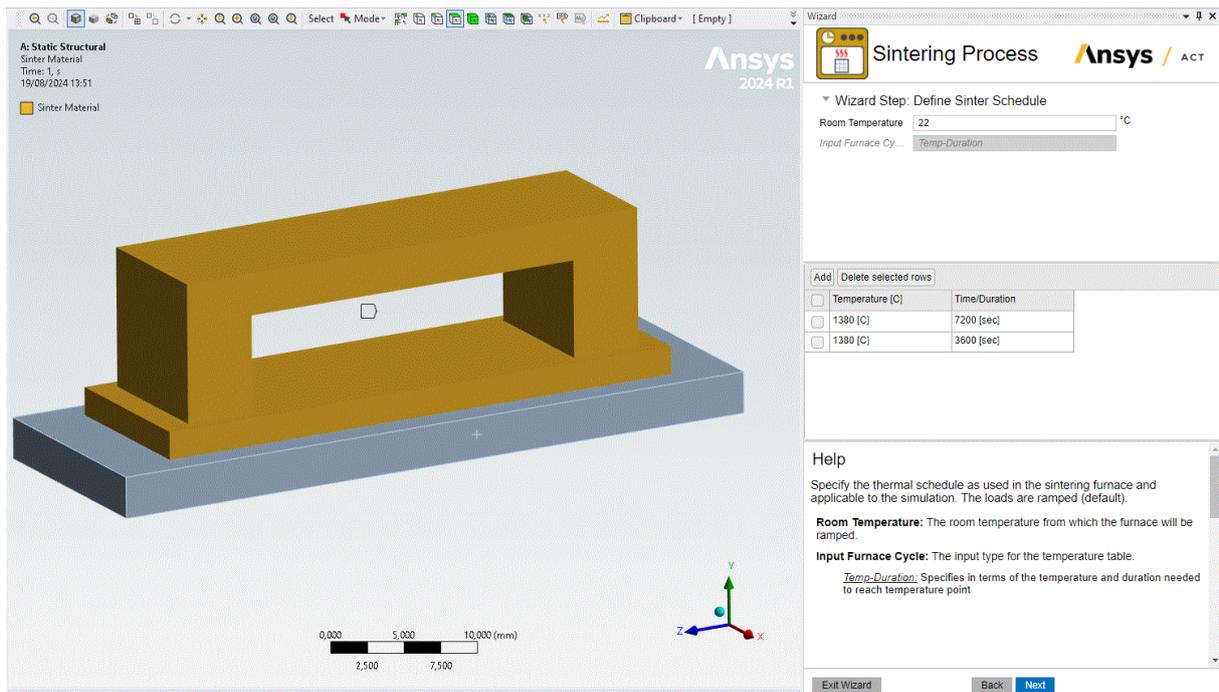
Une fois cette étape complétée, un objet intitulé matériau fritté "Sinter Material " est ajouté à l'arborescence du projet. Cet objet inclut tous les paramètres nécessaires pour le modèle de matériau, tels que les coefficients et les exposants requis pour la simulation. Ces valeurs sont automatiquement renseignées en fonction du type de modèle de frittage que vous avez sélectionné dans l'assistant. En d'autres termes, l'objet " Sinter Material " contient toutes les

informations spécifiques et ajustées nécessaires pour simuler avec précision le comportement du matériau pendant le frittage, selon les caractéristiques définies au préalable.

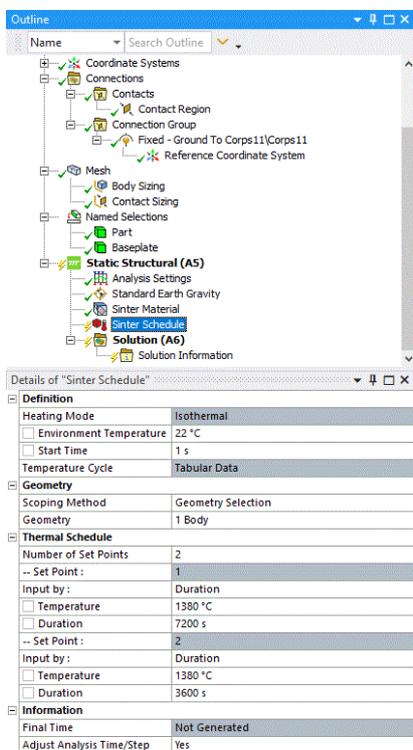


**La septième étape** de l'assistant est importante pour définir le programme de frittage, qui configure le profil thermique du four au cours du processus de frittage. Commencez par conserver la température ambiante par défaut de 22°C, qui représente la température initiale avant le début du chauffage. Ensuite, vous devez spécifier la montée en température du four. Pour cela, cliquez sur ajouter "Add" afin de créer une nouvelle étape dans le programme de frittage. Dans cette étape, entrez 1380°C pour la température et 7200 secondes pour la durée, ce qui indique que la température doit augmenter progressivement jusqu'à atteindre 1380°C en deux heures (7200 secondes). Cette phase de montée en température est essentielle pour simuler le chauffage du matériau jusqu'à la température de frittage.

Après avoir configuré la montée en température, il est nécessaire de définir la période durant laquelle la température sera maintenue. Cliquez de nouveau sur "Add" pour ajouter une nouvelle ligne dans le programme. Saisissez 1380°C pour la température et 3600 secondes pour la durée, ce qui signifie que la température doit être maintenue à 1380°C pendant une heure supplémentaire (3600 secondes). Cette étape est cruciale pour simuler le maintien à température élevée, permettant au matériau de se densifier correctement au cours du frittage.



Une fois que vous avez défini ces deux phases – la montée en température et le maintien à température – un objet intitulé "Sinter Schedule" (Programme de frittage) sera ajouté à l'arborescence du projet. Cet objet reflète la configuration thermique que vous venez de spécifier. Cependant, un éclair jaune à côté de l'objet "Sinter Schedule" indique qu'une action supplémentaire est requise pour finaliser la configuration.



Vous devez générer le programme de frittage pour appliquer ces paramètres dans la simulation. Cette génération implique de préparer et de valider le programme en intégrant les réglages

définis, assurant ainsi que le profil thermique soit correctement pris en compte lors de la simulation du frittage.

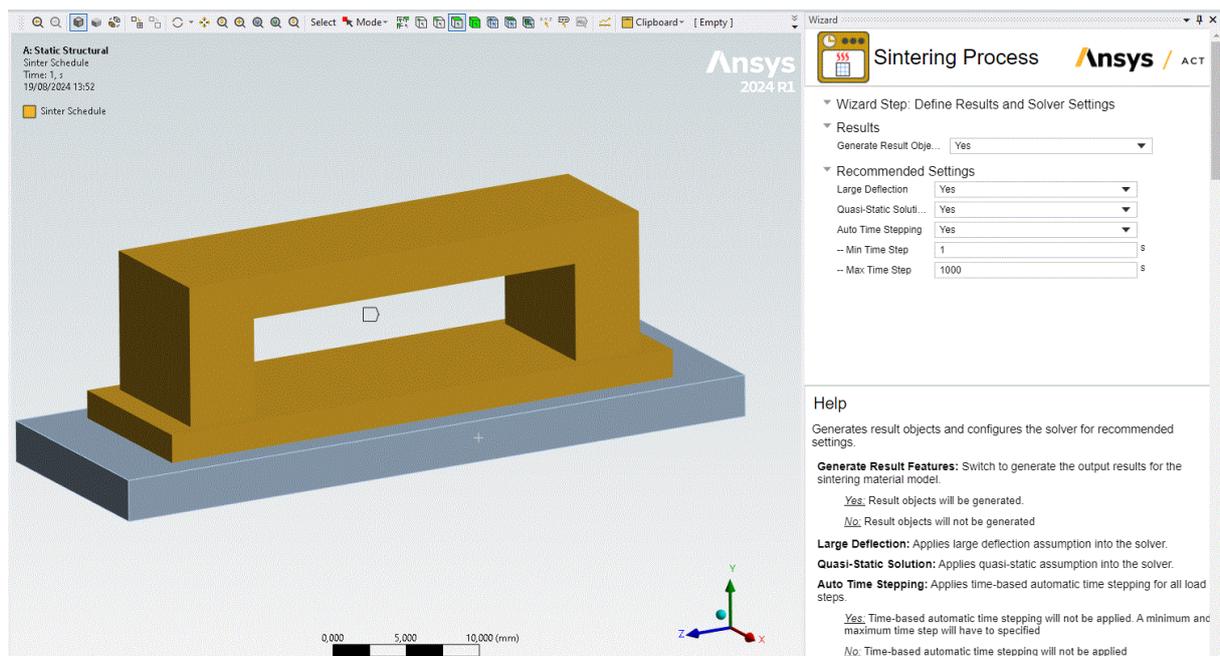
**La dernière étape** de l'assistant vous permet de personnaliser les paramètres finaux pour les résultats et le solveur de votre simulation. Cette phase est essentielle pour garantir que tous les aspects de la simulation sont correctement configurés avant de lancer les calculs.

Tout d'abord, vous devez décider si vous souhaitez générer des objets de résultats. En gardant la sélection par défaut sur "Oui", vous vous assurez que tous les résultats pertinents de la simulation seront inclus dans l'analyse. Cela permet de récupérer des informations détaillées sur le comportement du matériau et les résultats de la simulation.

Ensuite, vous devez déterminer si les grandes déformations doivent être prises en compte. L'option "Large Deflection" est activée par défaut, et il est recommandé de la conserver ainsi pour permettre à la simulation de gérer les déformations importantes qui pourraient survenir dans le modèle.

La simulation est également configurée pour utiliser une "Quasi-static solution", ce qui est approprié pour les analyses où les variations temporelles sont relativement faibles. En conservant "Oui" pour cette option, vous vous assurez que la simulation se concentre sur les aspects statiques du problème, tout en tenant compte des effets de déformation.

Pour le contrôle du pas de temps, gardez les valeurs par défaut pour optimiser la simulation. L'option "Auto Time Stepping" permet au solveur de gérer automatiquement le pas de temps pendant les calculs, ce qui est crucial pour obtenir des résultats précis tout en optimisant les performances de calcul. La valeur par défaut pour le pas de temps minimum est 1, ce qui assure que les étapes de temps sont suffisamment petites pour capturer les variations importantes, tandis que la valeur par défaut pour le pas de temps maximum est 1000, permettant de gérer efficacement les grands intervalles de temps tout en évitant des calculs trop lourds.

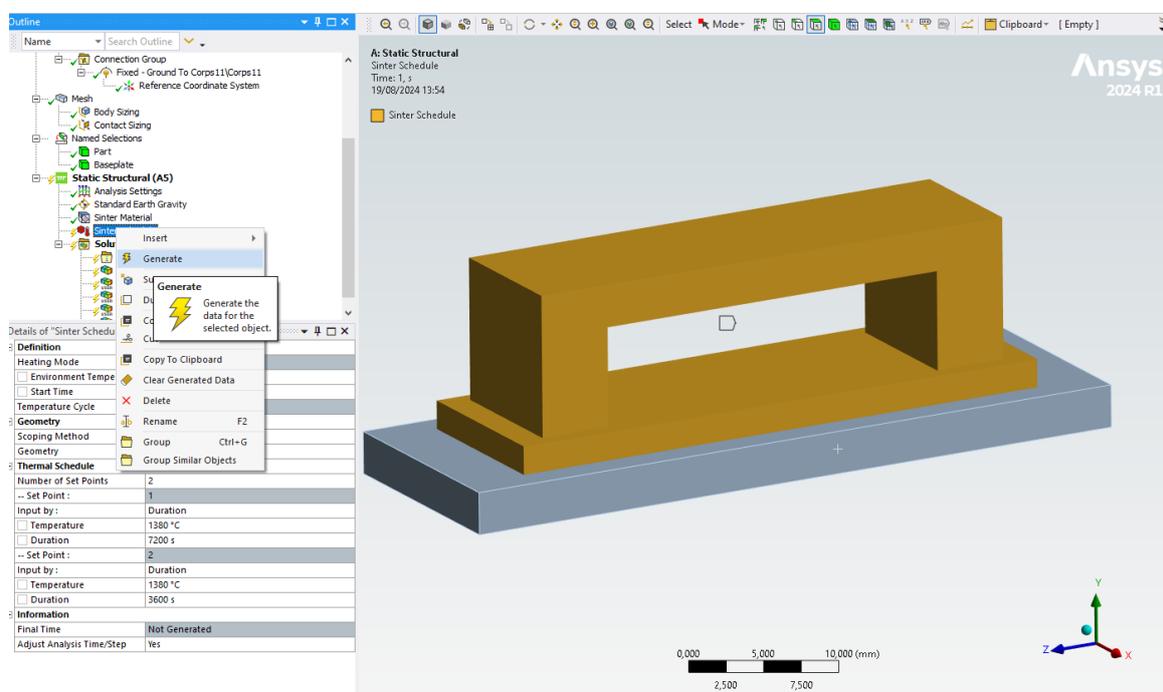


Une fois tous ces paramètres configurés, cliquez sur "Terminer" pour compléter la configuration de l'assistant. Cela finalise les paramètres de la simulation et prépare le modèle pour le calcul. Pour fermer le panneau de l'assistant, cliquez sur la croix située dans le coin supérieur droit de la fenêtre.

Lorsque cette étape est terminée, plusieurs éléments de résultat spécifiques au frittage sont ajoutés à l'arborescence du projet. Ces éléments incluent des données et des paramètres relatifs aux différentes phases du processus de frittage, tels que la densité, les contraintes et les déformations. Une fois la simulation terminée et les calculs effectués, nous examinerons ces éléments pour analyser les résultats et évaluer la performance du matériau tout au long du processus de frittage.

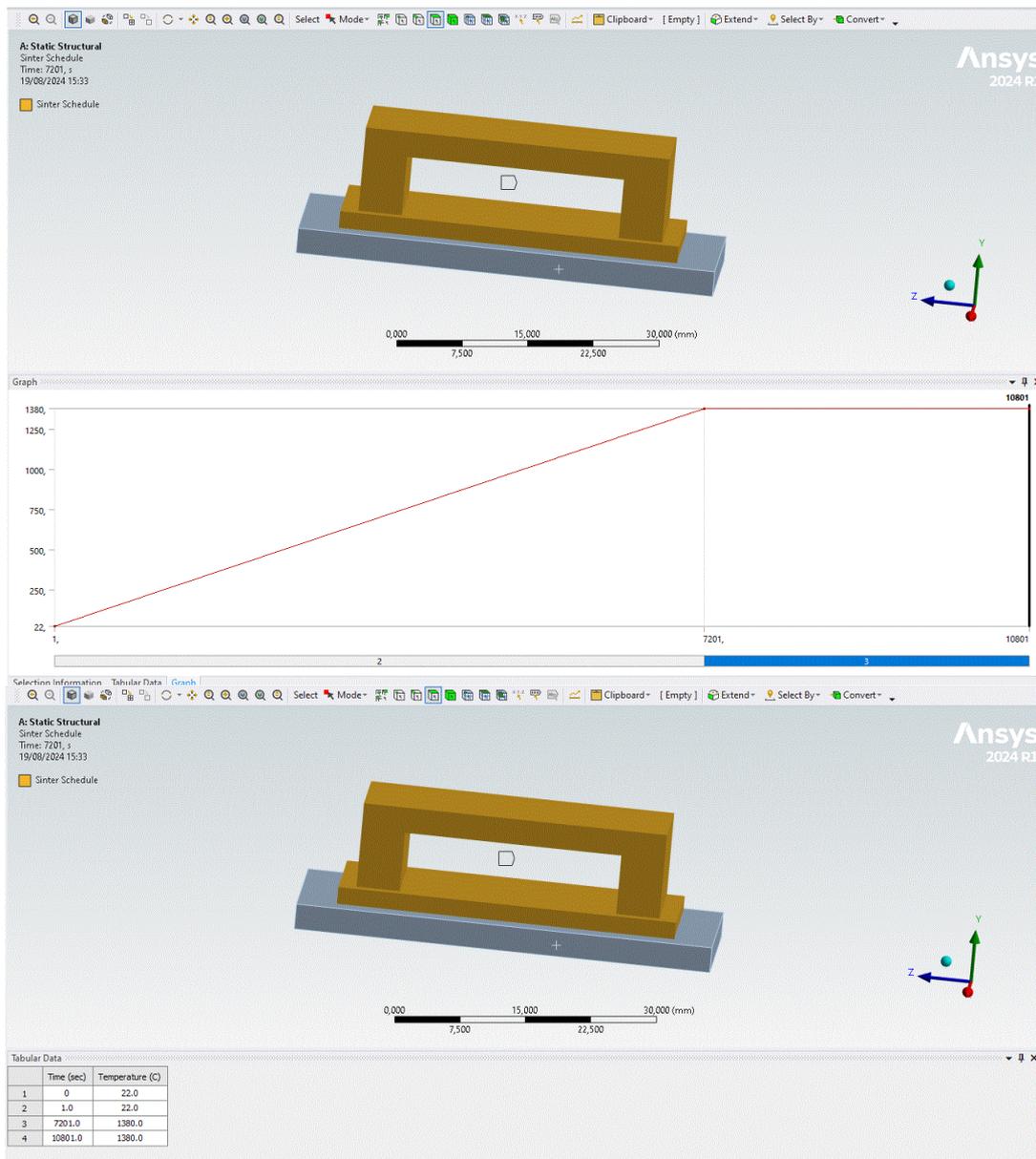
Une étape facultative dans le processus de simulation est de générer manuellement le programme de frittage avant de lancer la résolution. Cette étape permet de vérifier que toutes les données et paramètres associés au programme de frittage sont correctement configurés. En effectuant cette vérification préalable, vous pouvez vous assurer que le programme de frittage est conforme aux spécifications et qu'il n'y a pas d'erreurs dans les données saisies. Cela peut être particulièrement utile pour éviter des erreurs potentielles qui pourraient affecter les résultats de la simulation.

Pour générer le programme de frittage manuellement, localisez l'élément "Sinter Schedule" dans l'arborescence du projet sous l'analyse statique de la structure. Faites un clic droit sur cet élément, puis sélectionnez "Générer" dans le menu contextuel. Cette action lance le processus de génération du programme de frittage en se basant sur les paramètres que vous avez définis précédemment. Après quelques secondes, vous verrez apparaître un tracé graphique ainsi qu'un tableau détaillant le programme de frittage sous la fenêtre graphique.

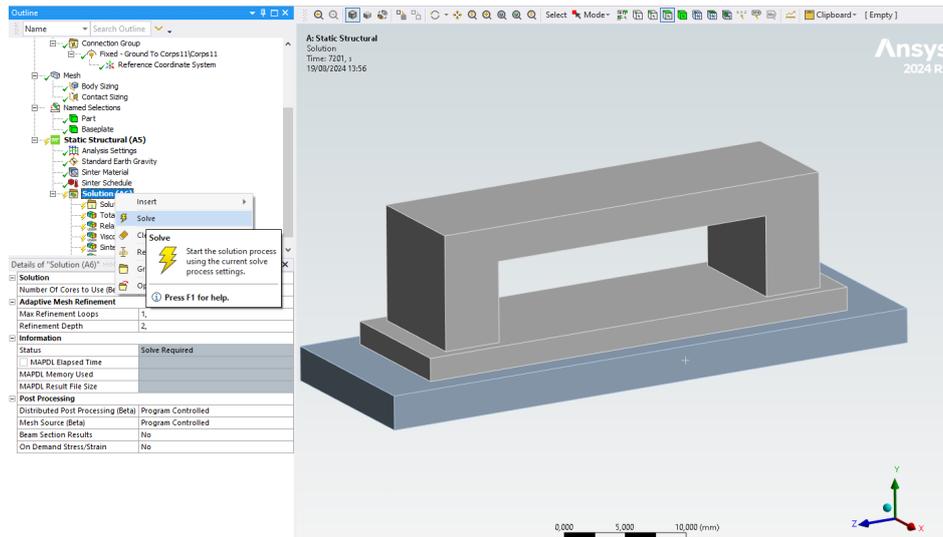


Le tracé graphique représente visuellement l'évolution de la température au cours du programme de frittage, illustrant les phases de montée en température et de maintien selon les spécifications que vous avez entrées. En parallèle, le tableau affiche des données numériques

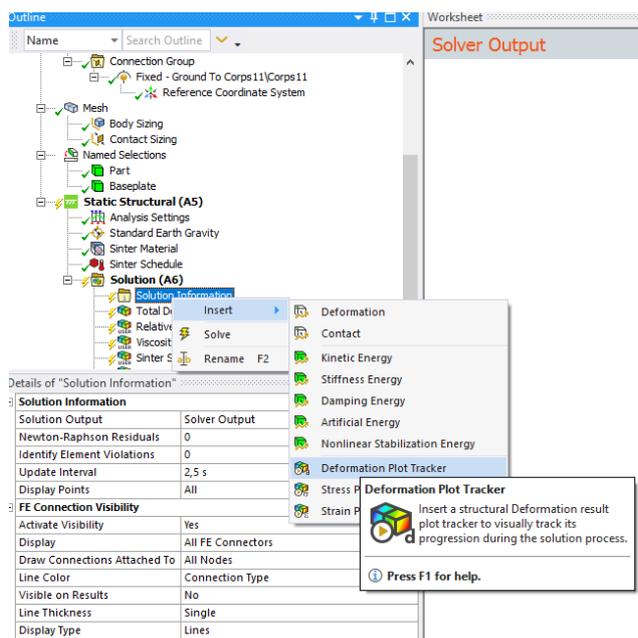
sur les différentes étapes de température, offrant une vue détaillée et quantifiable du programme. Ces outils visuels et numériques facilitent la vérification et l'analyse du programme de frittage. Il est également important de noter qu'un très petit pas, généralement d'une seconde, est automatiquement ajouté au début et à la fin du programme de frittage. Cet ajustement mineur est conçu pour améliorer la convergence de la simulation. En ajoutant ces pas supplémentaires, le solveur peut mieux gérer les transitions entre les différentes phases de température, ce qui optimise la précision et la stabilité des calculs. Ce processus garantit que la simulation reflète plus fidèlement les conditions réelles du frittage, permettant d'obtenir des résultats plus fiables et précis.



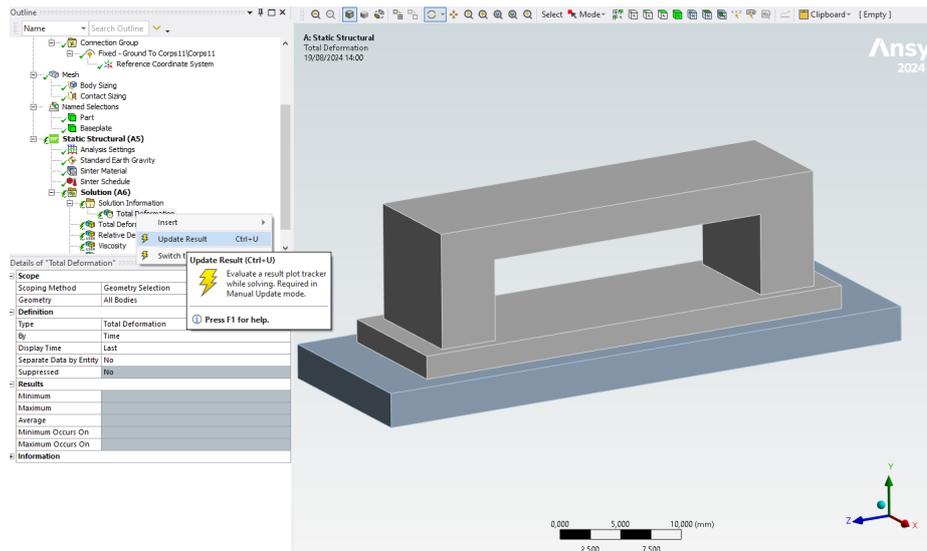
Vous êtes maintenant prêt à aborder la résolution du problème. Pour débiter, dans l'analyse statique de la structure, faites un clic droit sur "Solution" dans l'arborescence du projet, puis choisissez "Solve" pour lancer la simulation. Cela initiera le calcul de la solution en fonction des paramètres de conditions que vous avez définis précédemment.



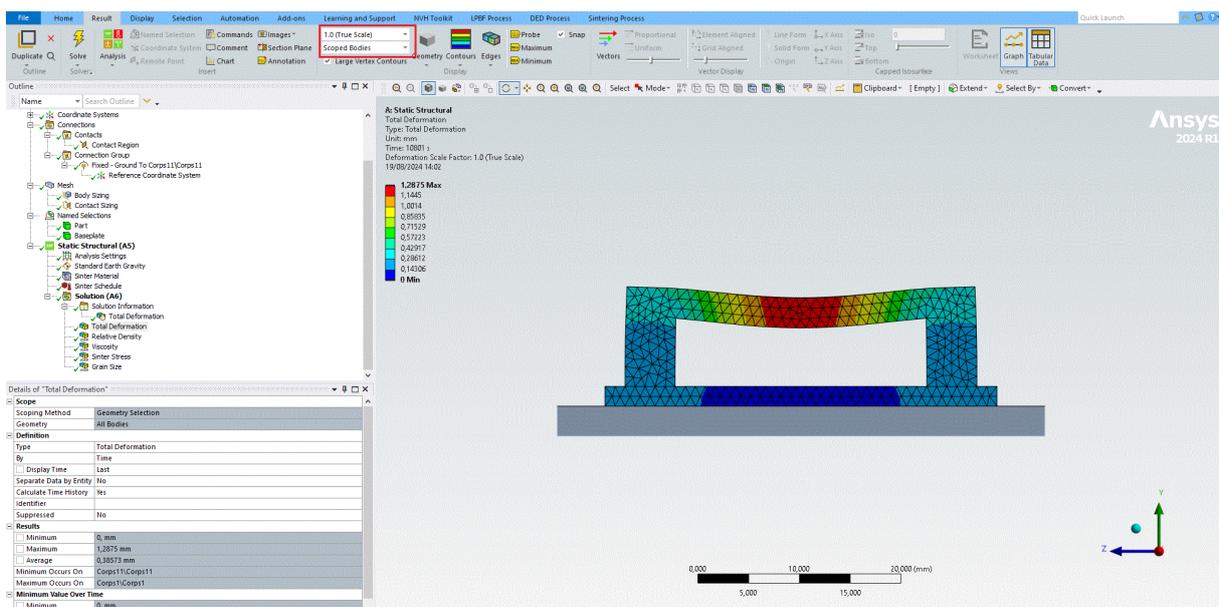
Pendant que la simulation est en cours, vous pouvez suivre l'évolution des déformations en temps réel. Pour ce faire, faites un clic droit sur "Solution Information" dans l'arborescence du projet, puis cliquez sur "Insert" et choisissez "Deformation Plot Tracker". Cette option vous permet de visualiser le tracé des déformations tout au long de la résolution, vous offrant ainsi un aperçu dynamique des modifications qui se produisent dans le modèle au fur et à mesure que la simulation progresse.



Il est conseillé de mettre régulièrement à jour le tracé des déformations pour obtenir des instantanés actualisés de l'état de déformation. Pour ce faire, faites un clic droit sur le tracé de la déformation totale dans la fenêtre graphique, puis sélectionnez "Mettre à jour le résultat". Cette action actualise le tracé avec les dernières données de la simulation, permettant ainsi d'observer les déformations les plus récentes et d'assurer une compréhension précise du comportement du modèle pendant le processus de frittage.



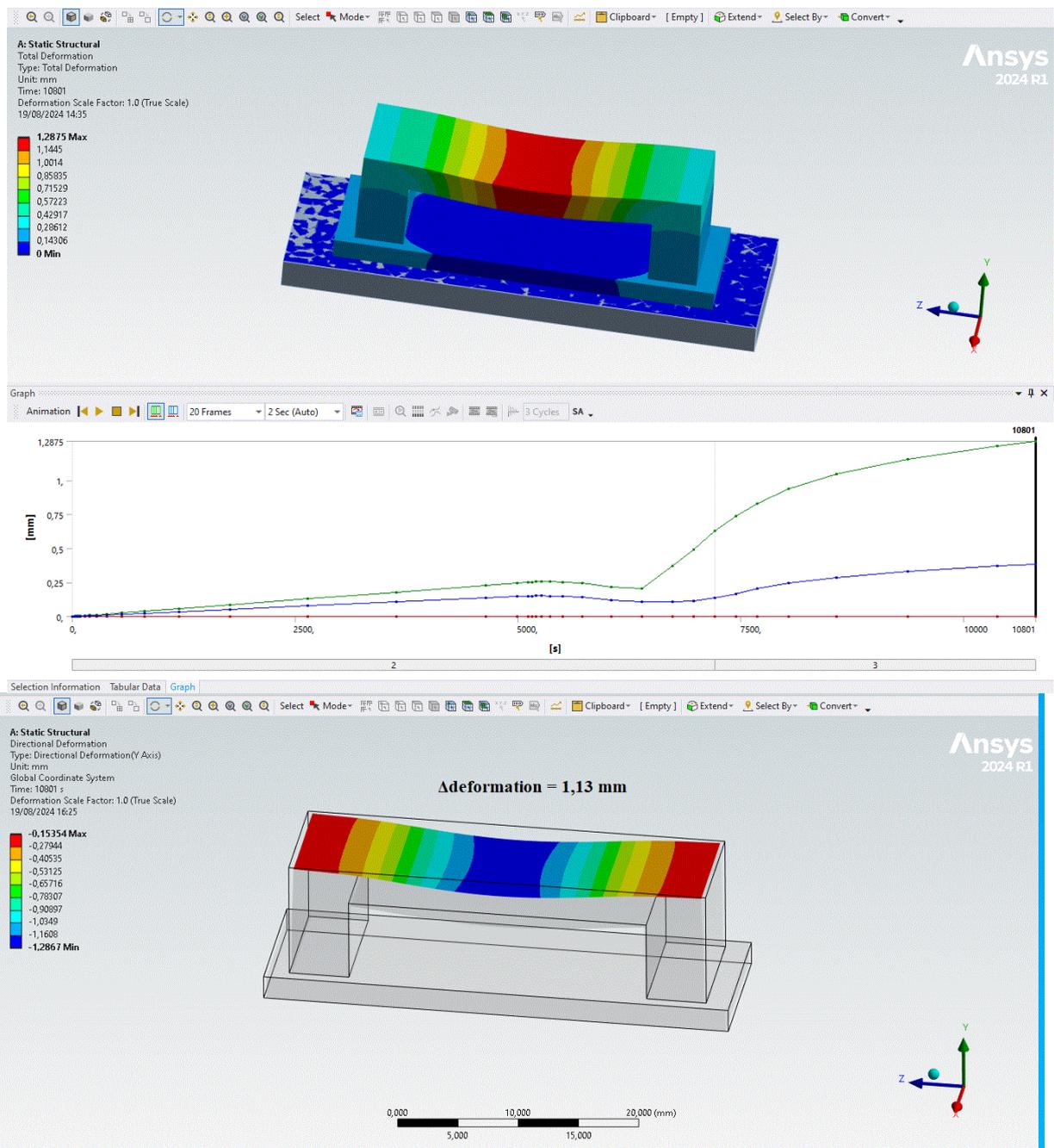
Une fois la simulation terminée, vous pouvez examiner les résultats en accédant aux différents éléments de résultat présents dans l'arborescence du projet. Pour commencer, il est recommandé d'ajuster l'échelle d'affichage afin d'obtenir une vue plus précise des déformations. Dans le ruban de l'onglet "Results", réglez l'échelle sur 1.0 (True Scale). Cette configuration vous permet de visualiser les déformations réelles du modèle à l'échelle correcte, offrant ainsi une meilleure compréhension des modifications subies par la pièce.



Ensuite, sélectionnez "Total Deformation" pour afficher les déformations résultantes dans le modèle. Vous constaterez que la travée du pont présente une flexion notable au milieu, causée par la gravité et les déformations viscoplastiques. En dessous de la fenêtre graphique, le graphique temporel illustre l'évolution du comportement du modèle au cours du processus de frittage. Le graphique représente l'évolution des déformations du matériau au cours du processus de frittage. Au début, il montre une expansion thermique : lorsque le matériau est chauffé, il se dilate naturellement en raison de l'augmentation de la température. C'est une réaction typique des matériaux à la chaleur, où les particules s'éloignent les unes des autres, provoquant un gonflement de la pièce.

À mesure que le chauffage se poursuit et que la température continue d'augmenter, on atteint un point crucial : la température d'activation du frittage. À ce stade, le comportement du matériau change de manière significative. Au lieu de continuer à se dilater, le matériau commence à se rétracter. Ce retrait est provoqué par la densification du matériau, un phénomène où les particules commencent à se rapprocher les unes des autres pour former une structure plus compacte. C'est un processus clé dans le frittage, qui vise à réduire les vides dans le matériau et à augmenter sa densité.

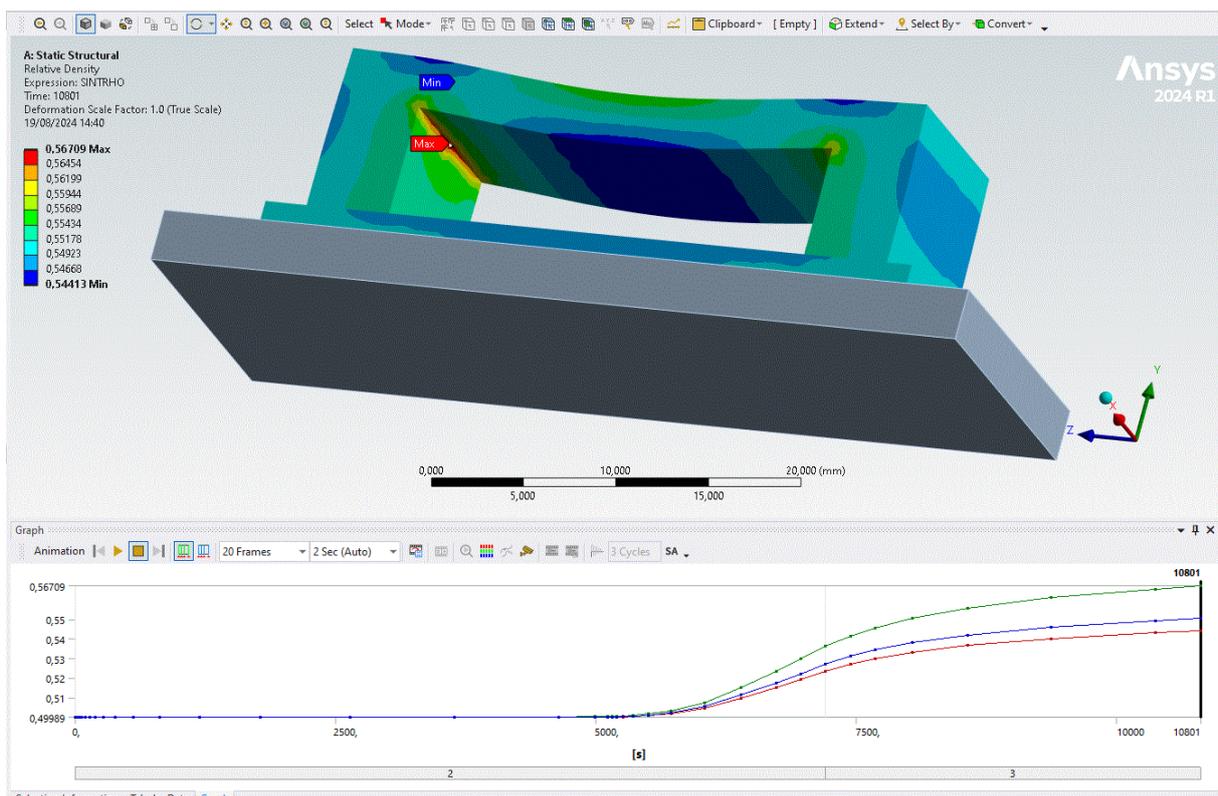
Pour mieux comprendre et visualiser ces déformations dans le temps, vous pouvez utiliser les commandes d'animation disponibles. Ces commandes vous permettent de voir les déformations se dérouler progressivement comme dans une vidéo animée. Cela donne une vision dynamique et continue de la manière dont la pièce se dilate et se rétracte au cours du cycle thermique, rendant le processus de frittage plus compréhensible et intuitif.



Après avoir examiné les déformations, il est important de passer à l'analyse de la densité du matériau en cliquant sur l'option la densité relative "Relative Density". Cette analyse permet de voir comment la densité du matériau se distribue à travers le modèle, révélant des zones de densification et de moindre densité.

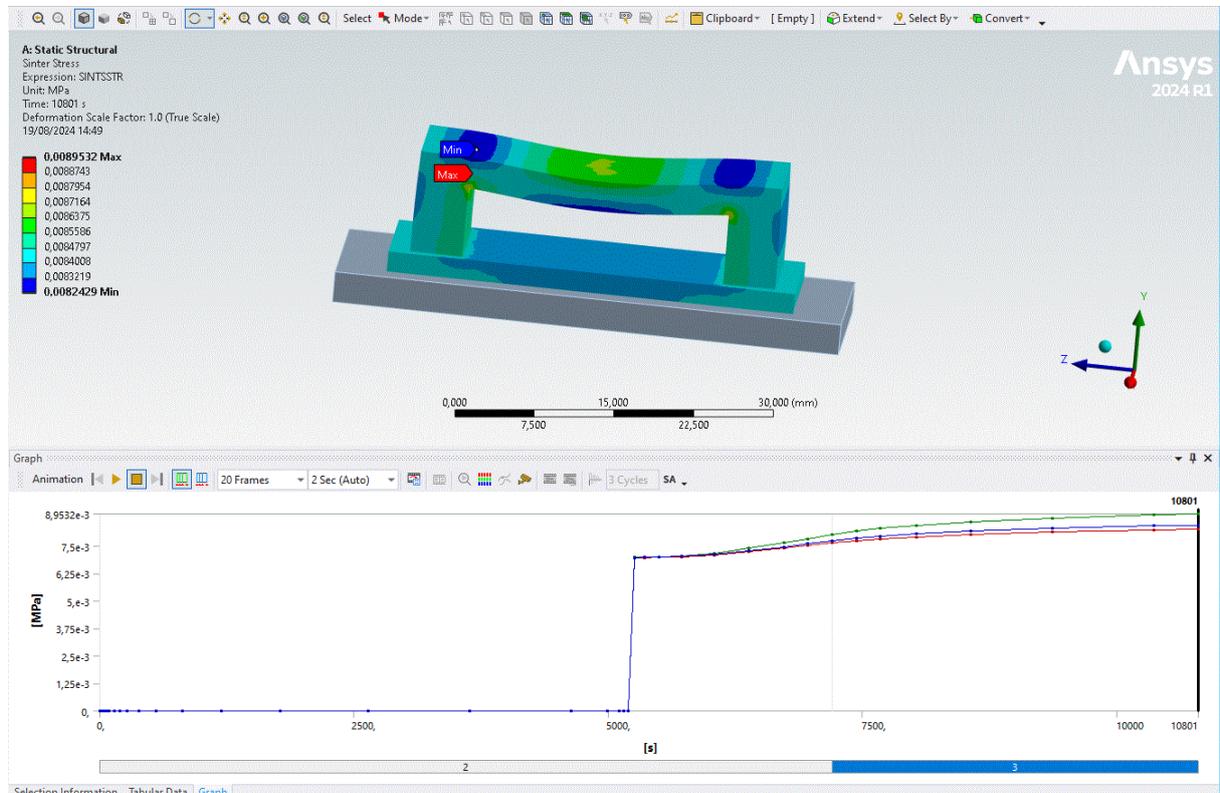
En étudiant les résultats, vous observerez que la densité maximale atteint 0,566, soit environ 56% de la densité théorique maximale. Cette valeur élevée est particulièrement notable au sommet de la travée du pont. Cette région du modèle est soumise à une compression, ce qui pousse les particules du matériau à se rapprocher les unes des autres, augmentant ainsi la densité dans cette zone. La compression joue un rôle crucial dans le processus de frittage, car elle favorise le rapprochement des particules, réduisant les vides et augmentant la densité globale du matériau.

En revanche, la partie inférieure de la travée présente une densité plus faible. Cette différence s'explique par le fait que cette zone est principalement soumise à des forces de traction, qui tendent à éloigner les particules les unes des autres, limitant ainsi la densification. Ces variations de densité à travers la structure montrent clairement comment les différentes contraintes mécaniques (compression et traction) influencent le comportement du matériau pendant le frittage, en modifiant la façon dont les particules se regroupent ou se dispersent.



Pour finaliser l'analyse, sélectionnez contrainte de frittage "Sinter Stress" afin d'examiner les forces internes qui provoquent le retrait du matériau pendant le processus de frittage. Lorsque la température atteint le seuil d'activation du frittage, une transformation importante se produit : la contrainte de frittage augmente de manière significative. Cette augmentation rapide et marquée est le facteur principal qui déclenche le retrait du matériau. À ce stade, les particules commencent à se rapprocher, réduisant les vides entre elles, ce qui entraîne une diminution des dimensions globales de la pièce.

La contrainte de frittage joue donc un rôle crucial dans la densification du matériau, car elle génère les forces nécessaires pour compacter les particules, ce qui aboutit à une structure plus dense et homogène. La compréhension et le contrôle de cette contrainte sont essentiels pour optimiser le processus de frittage et éviter les défauts tels que les fissures ou les distorsions, qui peuvent se produire si les contraintes ne sont pas correctement gérées.



## V. Références :

L'aide Ansys.

1. Song, J. (2007). Experiments, modelling and numerical simulation of the sintering process for metallic or ceramic powders.
2. Song, J., Gelin, J. C., Barriere, T., & Liu, B. (n.d.). Experiments and numerical modelling of solid state sintering for 316L stainless steel components. 800.
3. Zhang, R. (2005). Numerical Simulation of Solid-state Sintering of Metal Powder Compact Dominated By Grain Boundary Diffusion.
4. Maruccio, C and al (2015) , Integration of CAD, CAE and CAM procedures for ceramic components undergoing sintering. Journal of the European Ceramic Society.
5. Samantaray M and al. (2017) Computational modeling of heat transfer and sintering behavior during direct metal laser sintering of AlSi10Mg alloy powder. Comptes Rendus Mécanique
6. Paudel, B. J, Conover, D., Lee, J., & To, A. C. A computational framework for modeling distortion during sintering of binder jet printed parts. Journal of Micromechanics and Molecular Physics. 6.4 (2021): 95-102
7. Kerbart, G., Manière, C., Harnois, C., & Marinel, S. (n.d.). Predicting final stage sintering grain growth affected by porosity.