

La fonderie consiste à couler un métal ou un alliage liquide dans un moule afin de reproduire une pièce dans ses formes intérieures et extérieures, en limitant dans la mesure du possible les travaux de finition après refroidissement. Ce procédé de formage des métaux est utilisé dans de nombreux secteurs, les techniques utilisées (voir ressource « *Fonderie : éléments d'initiation* ») dépendent du matériau, des dimensions et des caractéristiques géométriques de la pièce à obtenir, et des quantités à produire. Cependant quelque soit le procédé employé, la simulation de la coulée permet de vérifier l'adéquation entre la pièce souhaitée et les moyens utilisés.

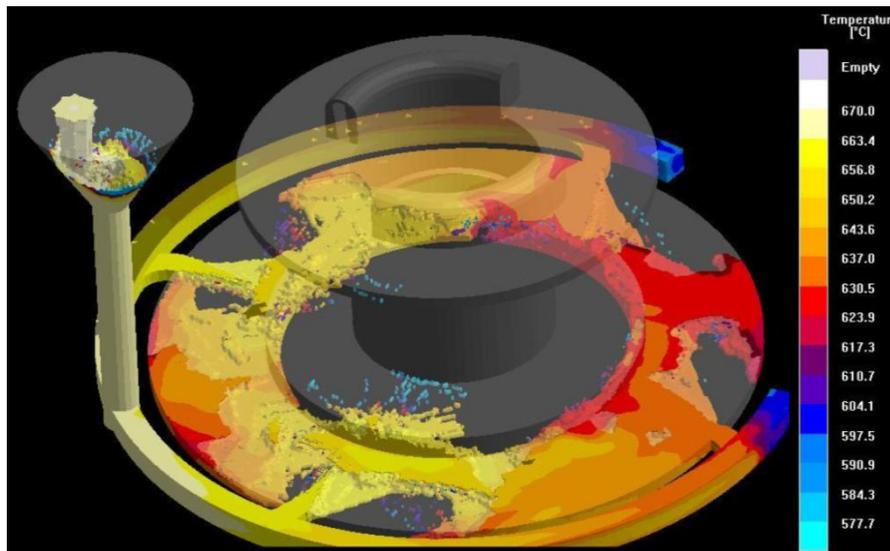


Figure 1 : Simulation de remplissage de l'empreinte de moulage

Cette ressource offre une présentation générale de la simulation de fonderie depuis l'apport de ces calculs numériques jusqu'aux possibilités d'obtention de différents résultats en fonction des objectifs en passant par l'évocation de la physique nécessaire aux calculateurs.

## 1 – Introduction

La simulation est un outil indispensable d'aide à la décision lors des phases de conception et d'industrialisation d'un produit manufacturé. Elle permet de vérifier la bonne adéquation entre le produit moulé et le procédé de fabrication de différents points de vue :

- Une première carte thermique de la solidification de la pièce seule permet de calculer le système de masselottage (voir ressource « *Fonderie : éléments d'initiation* »).
- Une analyse de l'évolution de la thermique du moule à chaque cycle donne les points clés pour la mise en place du système de refroidissement (voir ressource « *Le moulage en coquille : Procédé de réalisation de pièces métalliques* »).
- La carte des contraintes et des déformations engendrées par la solidification et l'interaction avec le moule fournit la maquette numérique de la pièce « telle que produite » et non « telle que conçue ».

Les logiciels de simulation de fonderie simulent, par des méthodes de résolution de type volumes finis ou éléments finis, les différentes phases du process.

## 2 – Objectifs de la simulation

La simulation permet de modéliser le comportement du matériau métallique coulé dans un moule durant toutes les phases du procédé :

- Dès les premiers instants du remplissage,
- Lors de la solidification,
- Jusqu'au refroidissement dans l'empreinte.

Les résultats souhaités sont très variés :

- Anomalies d'engorgement,
- Tourbillons,
- Zones à masselotter,
- Microstructures induites (vitesses refroidissement),
- Occurrences de défauts,
- Productivité,
- Thermique dans le moule,
- Contraintes dans le moule et/ou dans la pièce (mécanique),
- ...

## 3 – Apports et enjeux de la simulation

La simulation permet une optimisation de la conception du système d'alimentation par le choix de sa position et le dimensionnement des attaques. Elle permet d'appréhender les zones de pièces mal remplies, les éventuels entraînements d'air, et de visualiser les parties de pièces remplies en dernier. La ressource-vidéo « *Fonderie : coulée d'alliage d'aluminium* » à 250 images par seconde montre le remplissage d'un moule (figure 2) fermé par un verre. On y remarquera la circulation de l'alliage liquide dans les différents « couloirs » de la pièce.

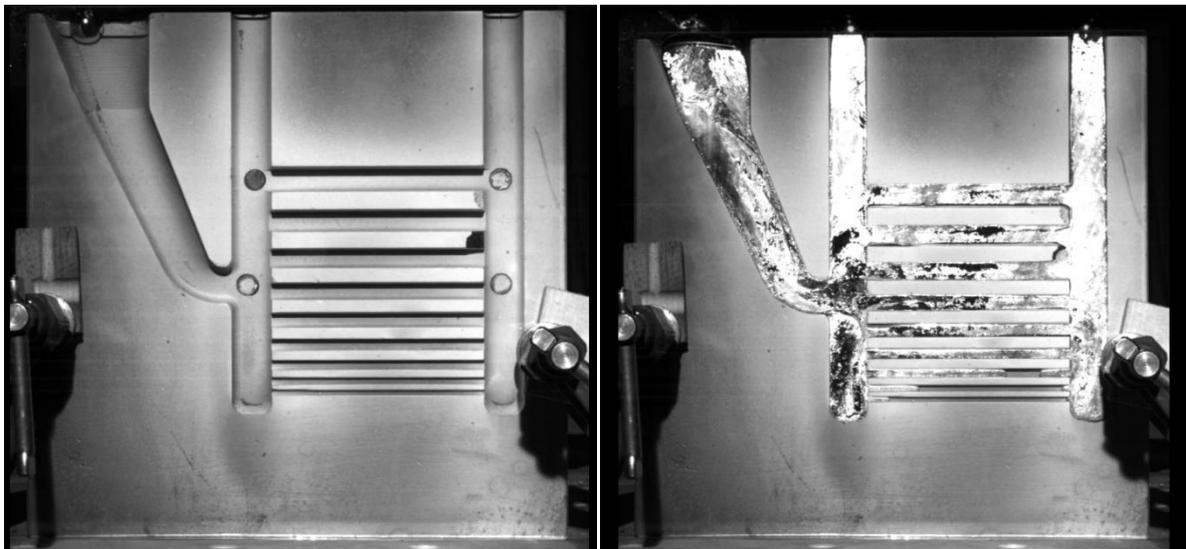


Figure 2 : Début et fin de remplissage d'un moule, images extraites de la ressource-vidéo « *Fonderie : coulée d'alliage d'aluminium* »

La simulation de fonderie entraîne alors une réduction de la durée de mise au point par moins de retouche outillage ainsi qu'une réduction du taux de rebut. La géométrie de la pièce peut être modifiée pour permettre une meilleure adéquation avec les contraintes de production. La thermique de moule (position des canaux d'eau ou de thermorégulation) peut être également simulées.

Les enjeux de la simulation vont permettre de vérifier des points importants comme :

- Le remplissage « correct » du moule évitant ainsi :
    - . Le risque de mal venue (voir ressource-vidéo « *Fonderie : coulée d'alliage d'aluminium* »),
    - . Le risque de soufflure,
    - . Le risque de casse.
    - . La solidification prématurée
    - . Une pression insuffisante
    - . Un emprisonnement d'air
    - . Des efforts sur les noyaux
    - . Des débits aux attaques
  - Le refroidissement de la pièce évitant ainsi :
    - . Le risque de retassure (voir ressources « *Fonderie : éléments d'initiation* » et « *Fonderie en coquille : positionnement de la coulée* »)
    - . Le risque de crique (voir ressource-vidéo « *Tomographie d'une pièce de fonderie avec crique* »)
    - . Les contraintes résiduelles
    - . Les zones en traction
    - . Le refroidissement hétérogène
- Et permettant de prévoir une solidification dirigée (voir ressource « *Fonderie en coquille : positionnement de la coulée* »).

## 4 – Le calcul numérique

Les calculs sont coûteux, ils ne seront pertinents que si le but de leur réalisation est cerné et en conséquence les modèles bien choisis. Le calcul dans sa globalité comprend trois phases : le pre-processing avec la récolte de données précises, le calcul proprement dit, et le post-processing.

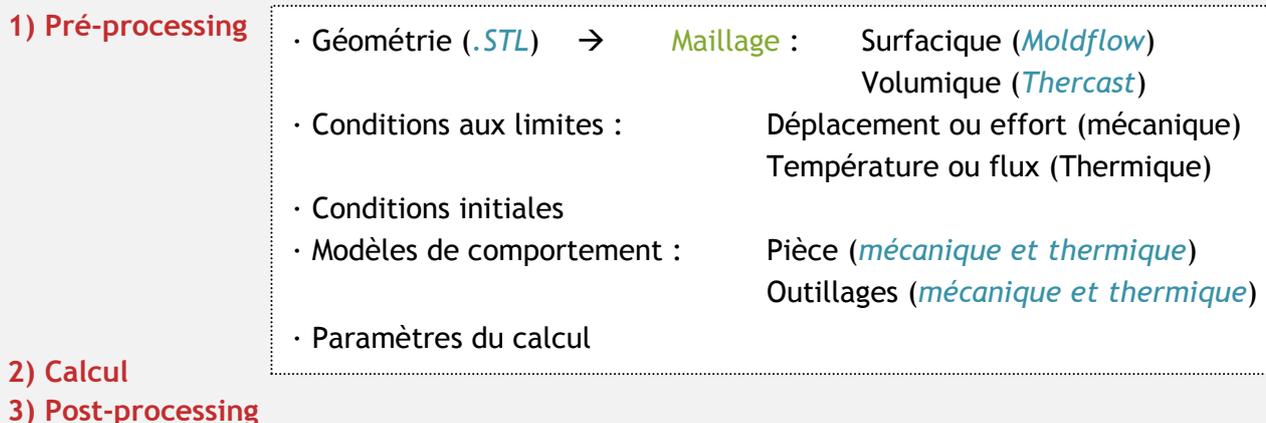


Figure 3 : Les trois phases du calcul numérique de la simulation de fonderie (Theracast)

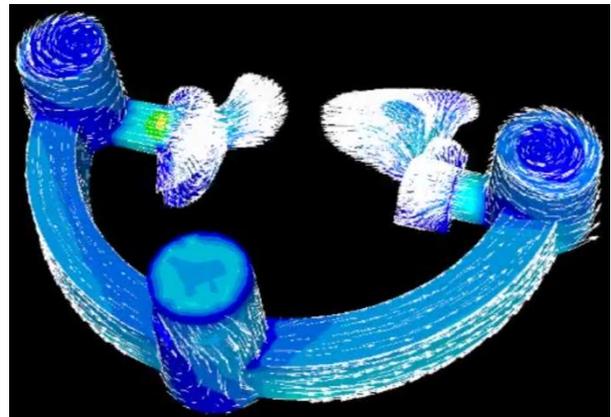
A l'issue du post-processing, il est possible d'obtenir différents résultats comme :

- Des cartes de température,
- Les états de la matière : liquide, solide, intervalle de solidification (fraction de solide)
- Les points chauds
- Le gradient de température
- La vitesse de refroidissement
- Les retraits
- Les fonctions critères : Niyama (porosité)

Les logiciels de simulation numérique des procédés de fonderie sont des logiciels d'analyse 3D par éléments finis (voir « Dossier Eléments Finis »). Le choix du logiciel dépend du but recherché, du coût de calcul en temps, et du coût de stockage en espace disque. La ressource-vidéo « Moulage en sable : simulation de coulée » réalisée à l'aide du logiciel Theracast simule le remplissage d'un moule en sable (figure 4a) ; « Moulage en sable : simulation des vitesses de coulée » modélise les vitesses de remplissage du moule (figure 4b)



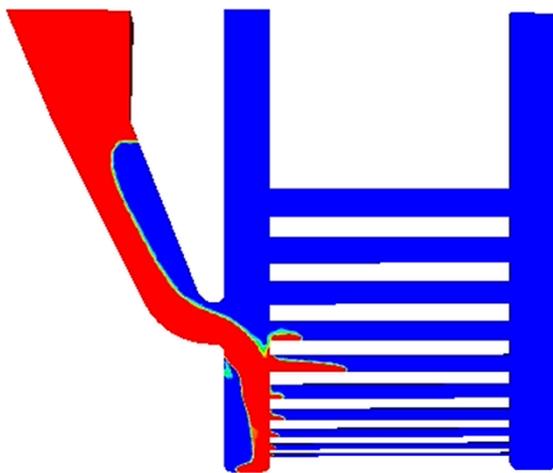
(a)



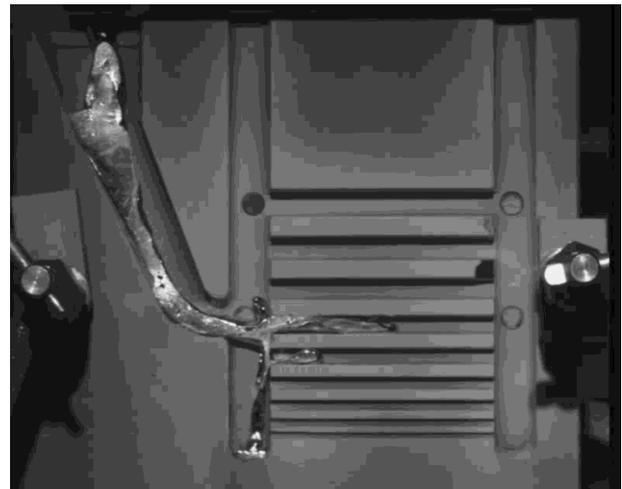
(b)

Figure 4 : (a) Simulation de coulée, (b) simulation des vitesses de coulée, extraits des ressources-vidéo, « Moulage en sable : simulation de coulée » et « Moulage en sable : simulation des vitesses de coulée »

L'exemple figure 5 est extrait de deux ressources-vidéo. L'une « Fonderie : simulation de remplissage » permet de visualiser le résultat du calcul numérique via le logiciel Theracast. La seconde « Fonderie : coulée d'alliage d'aluminium » est le remplissage réel du même moule.



(a)



(b)

Figure 5 : (a) Simulation de remplissage, (b) remplissage réel, extraits des ressources-vidéo « Fonderie : simulation de remplissage » et « Fonderie : coulée d'alliage d'aluminium »



Figure 6 : Pièce en sortie de moule, défaut de mal venues sur les barreaux inférieurs

## 5 – La physique nécessaire à la simulation

Dans ce paragraphe sont évoqués différents points de la base de données nécessaires à la simulation d'un procédé de fonderie, sans volonté de détail ni d'exhaustivité.

### 5.1 - La géométrie

Lors de la modélisation de la géométrie par éléments finis, maillage de type eulérien, il faut savoir que la taille de maille définit le temps de calcul et donc son coût. Il est souvent intéressant de choisir des tailles de mailles différentes par parties comme pour toute modélisation en éléments finis (voir « Dossier *Eléments Finis* »). Il faut savoir profiter des symétries, des zones pré-remplies (comme un bassin) et ne pas chercher à tout simuler (congés, petits détails...).

### 5.2 - La thermique

L'équation de la chaleur :  $\rho c_{eff} \frac{dT}{dt} - \nabla \cdot (k \nabla T) = 0$

#### Conduction en régime permanent

Loi de Fourier unidirectionnelle :  $q = -k \frac{dT}{dx}$

Equation différentielle unidirectionnelle :  $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{k}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$

	Valeurs de k [W/mK]
Cuivre	394
Aluminium	222
Fer	29
Sable	0.61

Chaleur nécessaire pour solidifier une longueur  $s$  :  $\rho H \frac{ds}{dt} = -\frac{dq}{dt} = k \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0}$

Solution de l'équation conduisant à la loi de Chvorinov (voir ressource « *Fonderie en coquille : positionnement de la coulée* ») :  $T_s = K \left( \frac{V}{A} \right)^n$

Avec  $T_s$  le temps de solidification,  $n = 1,5$  à  $2$ ,  $K$  est constant,  $M = \frac{V}{A}$  module géométrique rapport entre le volume  $V$  à solidifier et  $A$ , l'aire de l'enveloppe de  $V$ .

#### Conditions limites thermiques

- Interfaces thermiques :

Poteyage  $-k \nabla \cdot \vec{n} = \frac{1}{R_{ij}} (T - T_j^s)$

Lames d'air

Convection  $-k \nabla \cdot \vec{n} = \frac{1}{R_{ij}} (T - T_{ext})$

Rayonnement  $h = h_{cv} + \varepsilon_r \sigma_r (T + T_{ext}) (T^2 + T_{ext}^2)$

- Conditions de refroidissement

Température  $T = T_{imp}$

ou flux  $-k \nabla \cdot \vec{n} = \Phi_{imp}$

## Conditions initiales de température

Prise constante ou récupérée d'une carte de température d'un calcul précédent (remplissage).

## 5.3 - La mécanique

### Ecoulement

Equations de Navier-Stokes :  $\nabla \cdot \sigma + \rho \vec{f} = \rho \frac{d\vec{v}}{dt}$

Relations de comportement mécanique, visco-plasticité au sens large.

### Conditions de remplissage

Débit imposé  $\vec{v} = \vec{v}_{imp}$

Ou pression imposée  $\sigma \vec{n} = \vec{\tau}_{imp}$

### Conditions de contact

$$\sigma \vec{n} = \vec{\tau}_n + \vec{\tau}_f \begin{cases} \vec{\tau}_n = \sigma_n \vec{n} = (\sigma \vec{n} \cdot \vec{n}) \vec{n} \\ \vec{\tau}_f = \sigma \vec{n} - \vec{\tau}_n \end{cases}$$

Frottement nul

Frottement viscoplastique  $\tau = -\alpha K \|V\|^{p-1} V$

Frottement de Coulomb<sup>1</sup>

Frottement de Tresca<sup>2</sup>

## 5.4 - Le matériau

Comportement Viscoplasticité

Masse volumique [kg/m<sup>3</sup>]

Conductivité [W/m/K]

Chaleur massique [J/K/kg]

Courbe de solidification (Tf, intervalle)

Chaleur latente

Courbe de dilatométrie (retrait)

## 5.5 - Remarque

De la qualité de cette base de données, de la pertinence des conditions initiales et aux limites choisies et des modèles utilisés dépendent la précision et la fiabilité des résultats.

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>

<sup>1</sup> Charles-Augustin Coulomb (1736-1806), ingénieur et physicien français

<sup>2</sup> Henri Edouard Tresca (1814-1885) Ingénieur mécanicien français, professeur au CNAM de Paris