

Issue d'une séance de Travaux Pratiques de première année Sciences de l'ingénieur à l'ENS Paris-Saclay, cette ressource contient les éléments nécessaires à la mise en place de TP (fichiers pièces, courbes, valeurs...). La présence de résultats intermédiaires pourra permettre d'adapter le sujet aux moyens à disposition.

Cette ressource présente tout d'abord le contexte et les objectifs du TP, ainsi que les moyens nécessaires à la réalisation du TP complet. Dans les parties suivantes les différentes étapes développées dans le sujet sont détaillées.



Figure 1 : Une pièce « échelle » moulée

## 1 – Contexte - Objectifs

La conception de pièces de fonderie à partir de la définition des surfaces fonctionnelles est une opération qui nécessite beaucoup de savoir-faire impliquant la connaissance de règles métiers. Pour faciliter cette opération et parvenir plus rapidement à la définition d'un brut de fonderie exempt de défaut, on a recours à des logiciels de simulation de fonderie. Cette partie est présentée dans la ressource « Simulation de fonderie » [1], la vidéo « Fonderie : simulation de remplissage » [2] permet de visualiser la simulation de remplissage de la pièce échelle. Ces logiciels permettent de vérifier la bonne venue de la pièce, à condition d'être capable de renseigner correctement l'ensemble des paramètres...

L'objectif présenté aux apprenants est ainsi d'étudier à partir d'une coulée les paramètres pouvant impacter la bonne réalisation d'une pièce de fonderie. Afin de pouvoir réaliser correctement une simulation numérique, un de ces paramètres sera identifié à l'aide d'un essai instrumenté spécifique.

Les objectifs pédagogiques de la séance sont de permettre aux apprenants de :

- Se familiariser avec le procédé de fonderie et ses variantes (Sable-Coquille) ;
- Se confronter à la réalité d'une coulée, en manipulant les éléments technologiques associés (ustensiles de moulage, techniques de poteyage, réalisation de noyau...) ;
- Conduire et exploiter des simulations numériques en vue d'évaluer la pertinence d'hypothèses simplificatrices (réduction des dimensions du problème, homogénéité de zones) ;
- Manipuler des modèles analytiques thermiques en les simplifiant pour obtenir le résultat recherché.

Les niveaux associés à chacun de ces objectifs peuvent être adaptés en fonction des ressources mises à disposition des apprenants et des axes mis en avant dans le sujet et le discours.

La ressource « Fonderie : éléments d'initiation » [3] offre une présentation générale de la fonderie et des fondamentaux des différents procédés.

## 2 – Moyens à disposition

Un laboratoire de fonderie équipé d'un creuset AlSi-9 avec :

- Un moule permanent d'une pièce « échelle ». Ce demi-moule complété par une contre-plaque permet la coulée d'une pièce d'étude préliminaire.
- Un moule permanent instrumenté. Ce moule simple et de petites dimensions permet la réalisation de l'essai associé à l'identification du coefficient.
- Un poste informatique équipé d'une interface d'acquisition et 3 thermocouples
- Un poste de réalisation de noyau en sable à vert  
Silicate de soude, bouteille de CO<sub>2</sub> pour durcissement.

Dans une salle informatisée :

- Logiciel Inspire Cast et une aide à son utilisation ;
- [Vidéos du remplissage](#) [4].

## 3 – Manipulation : coulée d'une pièce

La coulée de la pièce « échelle » est réalisée avec l'aide d'un enseignant. L'objectif de cette partie est de familiariser les élèves avec le processus de coulée et les défauts potentiels d'une pièce de fonderie.

Les particularités associées à ce moule sont :

- Un écoulement très turbulent, générateur de défaut et d'incomplets ;
- Le moule par contre-plaque a permis l'acquisition par caméra grande vitesse de l'écoulement réel de l'aluminium fondu en remplaçant la contre-plaque par une plaque transparente.

Il est donc possible pour les étudiants de relier l'observation de l'écoulement et les défauts observés dans un cas très défavorable d'écoulement turbulent et incomplet.

### 3.1 - Proposition de questions pré-manipulation

- Lister l'ensemble des opérations d'un processus de coulée en coquille. La ressource « le moulage en coquille : procédé de réalisation de pièces métalliques » [6] apporte toutes les notions ;
- Pour chacune préciser les paramètres pouvant influencer la qualité de la pièce finie.

### 3.2 - Manipulation : coulée en coquille

- Mesurer la température initiale du moule et vérifiez la température du métal à l'aide du thermomètre infrarouge.



*Prise de mesure de la température*

- Revêtir les équipements de sécurité et couler la pièce. Vous prendrez soin de mesurer/estimer la durée du remplissage ainsi que la durée de solidification.



*Fermeture du moule en coquille*



*Équipement de sécurité*



*Coulée*

- Démouler la pièce et observer le résultat.



*Démoulage et refroidissement de la pièce pour la rendre manipulable*

### 3.3 - Proposition de question post-manipulation :

Relever l'ensemble des défauts présents sur la pièce et discuter de leur origine. Vous pourrez vous appuyer sur la liste élaborée en 3.1 ainsi que sur la [vidéo](#) en caméra rapide [1].

Un ensemble de photos illustrant les défauts observés est disponible dans l'Annexe TP fonderie : Défauts de coulée [5].

## 4 – Manipulation : essai instrumenté

Afin de prédire correctement la bonne ou mauvaise réalisation d'une pièce de fonderie, le coefficient d'échange thermique doit être correctement estimé. Il peut être alors utile de réaliser un essai spécifique afin de l'identifier. C'est l'objet de cette partie du TP.

Précisons qu'il a été ici fait le choix d'utiliser deux poteyages différents (Kaolin Blanc réfractaire, et graphite noir conducteur) pour chaque demi-moule. Il est ainsi possible de retrouver la

différence de conduction thermique à partir des relevés thermiques de chaque côté d'un même essai.

La conception du moule est ici adaptée à l'essai d'identification :

- Coulée en chute pour un remplissage rapide et un découplage remplissage/solidification ;
- Géométrie cylindrique simplifiée pour une étude 1D radiale ;
- Chapeau en sable permettant de réduire les pertes thermiques par le haut, forçant ainsi un flux radial ;
- Perçages fins non débouchant dans chaque demi-moule pour l'insertion de thermocouple et le relevé des températures « moule » de chaque côté ;
- Un trou débouchant dans le plan de joint permet de placer un thermocouple au sein d'un fourreau en laiton (visible ci-dessous) pour la mesure d'une température dans l'alliage coulé.

Un plan de la coquille et du noyau sont fournis en annexes [5].



Figure 2 : Cylindre moulé

#### 4.1 - Proposition de questions pré-manipulation :

- Discuter de la géométrie de la coquille instrumentée et de son « noyau »
- En quoi est-elle représentative d'une coulée réelle ?
- Quels éléments ont été volontairement modifiés ?
- Rappeler l'intérêt de poteyer les coquilles ;
- Quelle est la différence entre le poteyage blanc et le poteyage noir ?

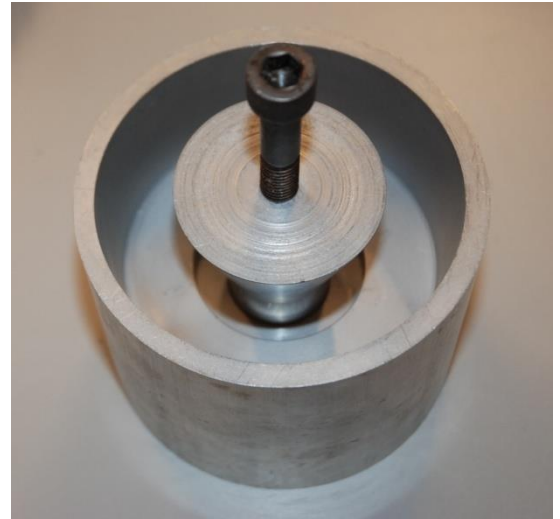
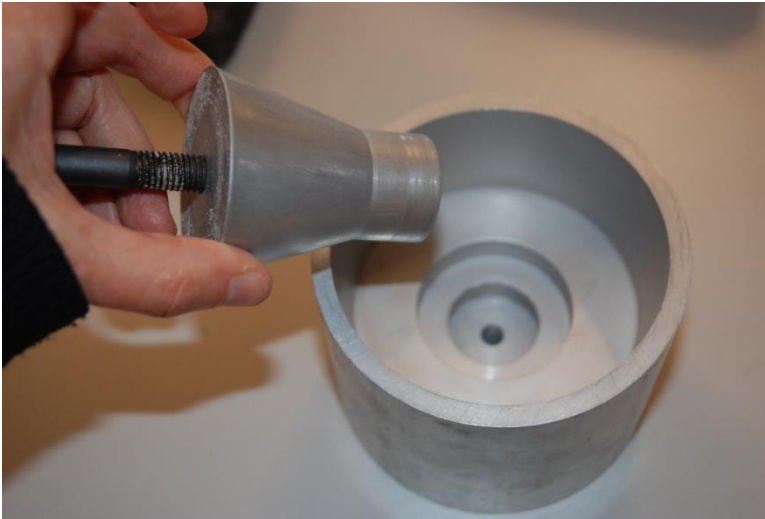
#### 4.2 - Manipulation : réalisation du noyau

Matériel :

- Boîte à noyau en aluminium ;
- Silice ;
- Silicate de soude ;
- Malaxeur ;
- Système d'injection de CO<sub>2</sub>.

##### 1) Préparer la boîte à noyau

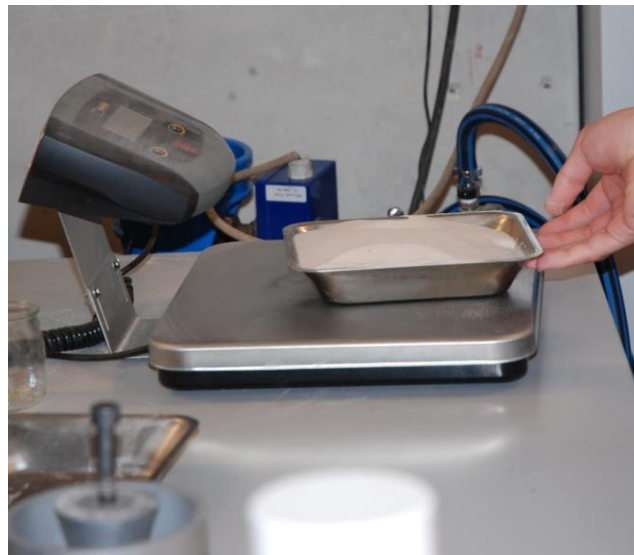
- Enduire les différentes parties de la boîte d'agent démoulant.
- Placer le cône dans la boîte en prenant attention à bien l'enfoncer complètement (les surfaces supérieures doivent être à niveau).



- Fixer le cône à l'aide de la vis M8.

## 2) Préparer du sable aggloméré

- Peser une quantité suffisante de silice pour remplir la boîte à noyaux



- Placer la silice dans le bol du malaxeur et mettre en marche à vitesse faible
- Peser la quantité nécessaire de silicate de soude (3% en masse)



- Verser doucement le silicate dans le malaxeur en route



### 3) Réaliser le noyau

- Remplir le noyau avec le sable aggloméré en tassant le mélange. Le tassage doit assurer le remplissage complet de la boîte à noyau et garantir une porosité à l'air suffisante pour le durcissage. Attention toutefois : lors de tassage en cours de remplissage il faut laisser une surface libre « accidentée » afin que le sable ajouté ensuite se lie à la couche déjà faite.



- Finir en tassant et raclant la surface supérieure du noyau.



- Piquer régulièrement le sable contenu dans la boîte à l'aide d'un clou sur les  $\frac{3}{4}$  de sa hauteur.



- Durcir le noyau avec le système d'amenée en CO<sub>2</sub> et sa ventouse. Attention : au début le sable n'est pas durci, ne pas mettre trop de pression.





#### 4) Démouler le noyau

- Afin de démouler le cône, retirer la vis de fixation M8 et visser à la place la vis M10.
- Retirer délicatement le cône.



- Plus de surface étant libérée, durcir à nouveau le noyau ;



- Retourner la boîte et démouler délicatement le noyau. S'il ne sort pas tout seul, tapoter la boîte.



- Au besoin, ébarber le noyau (traces de joint et surplus de sable).

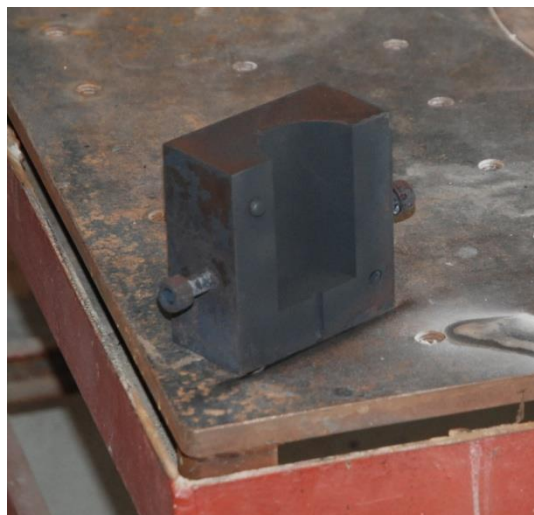
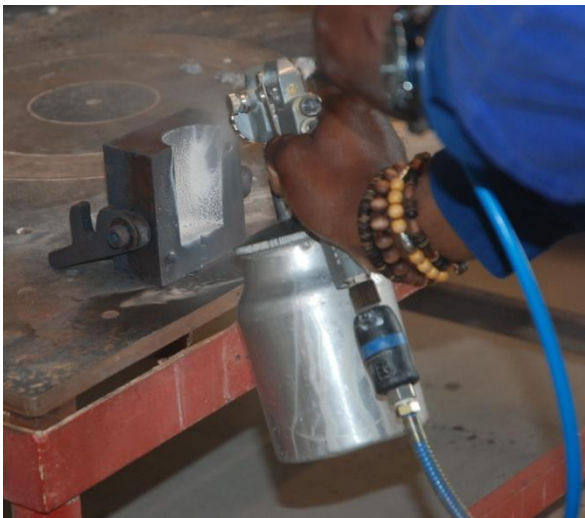


### 4.3 - Manipulation : essai instrumenté

Préparer le système d'acquisition pour la mesure complète du refroidissement.

Une fois le noyau prêt :

- Sortir les deux demi-coquilles du four et réaliser le poteyage : l'une avec un poteyage blanc et la seconde avec du noir.



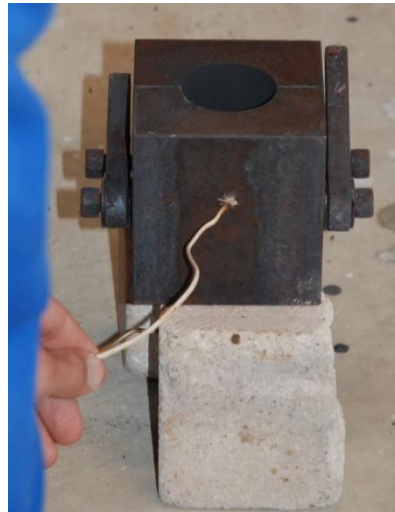
- Fermer le moule.



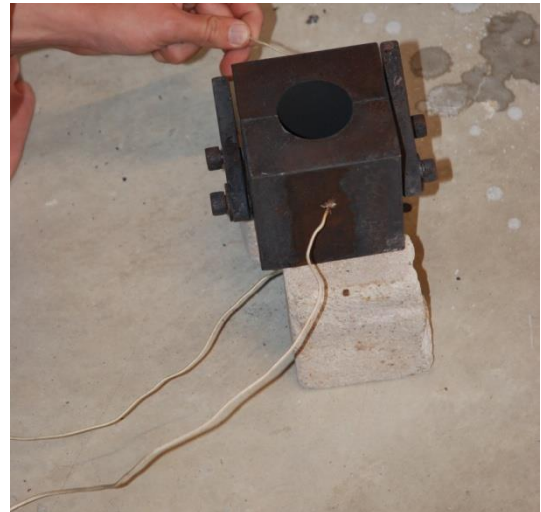
- Installer la coquille et le système d'acquisition : une sonde coté poteyage blanc, une sonde coté poteyage noir, une sonde placée au centre du cylindre (dans son fourreau protecteur visible figure 2). Attention : prendre soin de noter la correspondance position/numéro de thermocouple !



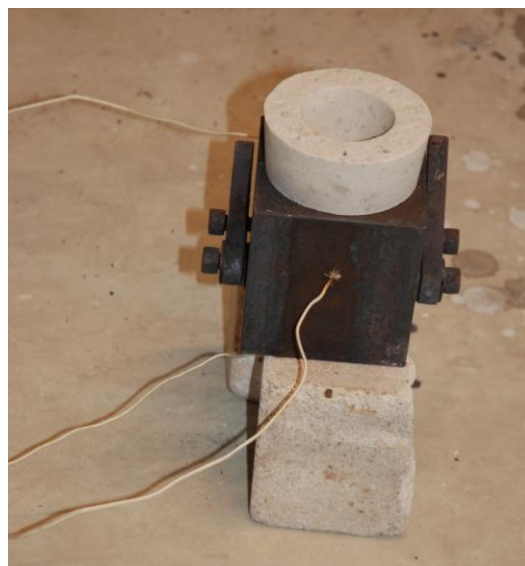
*Sonde centrale*



*Les deux sondes latérales*



- Poser le noyau sur la coquille.



- Lancer l'acquisition.



- Réaliser la coulée.

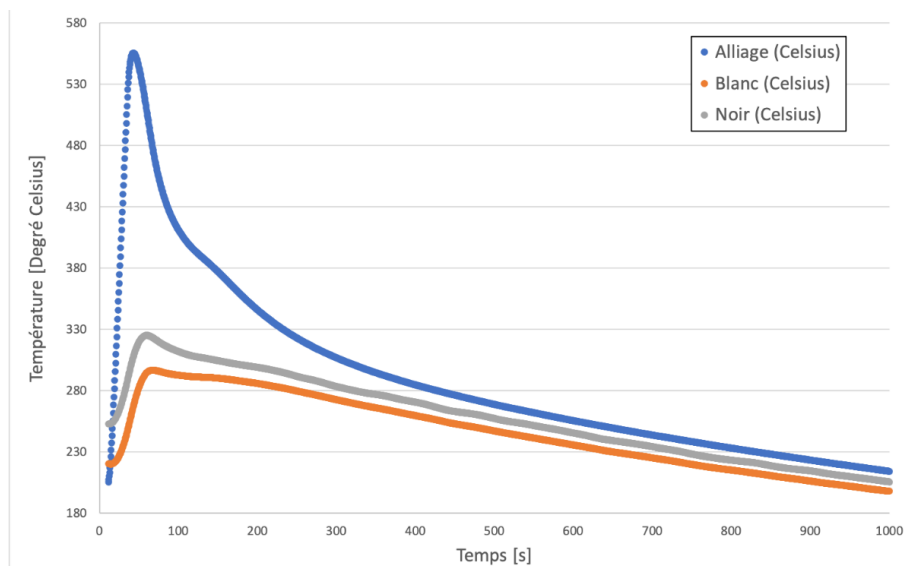


- Continuez l'acquisition jusqu'à ce que la pièce soit entièrement solidifiée et le refroidissement suffisamment ralenti (environ 15 à 20 minutes, sur une séance de 4h les mesures sont lancées en milieu de séance, la pièce refroidissant pendant la pause des élèves), arrêtez alors la mesure.



- Exporter les courbes au format csv.

L'ensemble de ces opérations devra être fait dans un temps le plus court possible afin d'éviter le refroidissement excessif de la coquille.



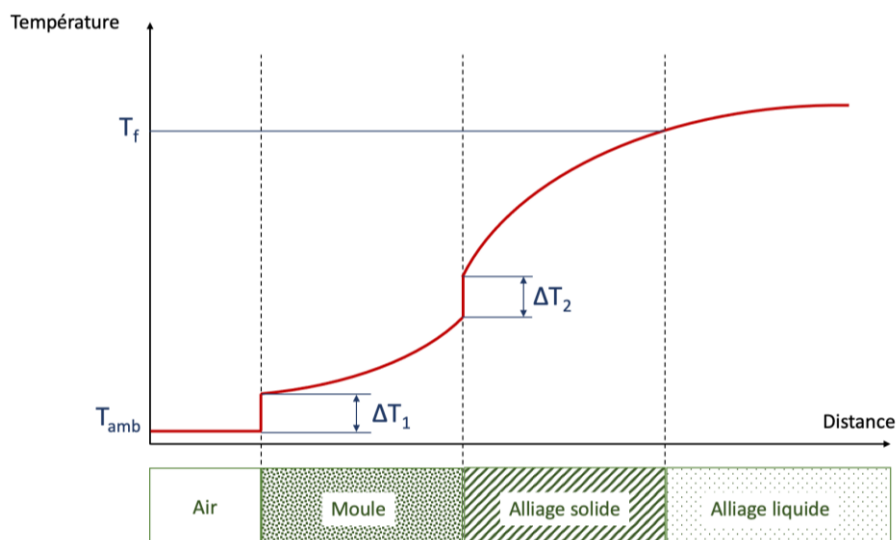
Exemple de courbes de températures relevées (fournies en Annexe TP Fonderie : Mesures [5])

## 5 – Exploitation de l'essai instrumenté : identification du coefficient d'échange thermique

À partir de l'essai précédent et des relevés thermiques effectués, il s'agit d'extraire la valeur du coefficient d'échange thermique à l'interface aluminium/fonte.

Les données de l'alliage coulé sont fournies dans l'Annexe TP fonderie : Données alliage AS13 [5]. La capacité calorifique  $C_a$  est de  $963 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ .

On rappelle la courbe ci-dessous décrivant l'allure générale de la température en fonction du rayon :



L'objectif de cette partie est que les apprenants arrivent à justifier - et potentiellement caractériser - les faibles erreurs en ne considérant que des variations de températures au niveau de l'interface Moule/Alliage. Dans ces hypothèses, et en se plaçant en dehors des changements de phases, les modèles théoriques se simplifient et permettent d'obtenir l'expression du coefficient de transfert instantané en fonction des mesures.

## Proposition de questions :

- Donner les équations régissant le flux de chaleur dans chaque zone (moule/solide/interfaces). Rappeler l'équation reliant l'évolution de la température avec le flux de chaleur.
- En intégrant les équations précédentes sur le volume de l'éprouvette, proposer une expression permettant de calculer l'évolution du coefficient de transfert  $h(t)$ . On ne se préoccupera pas pour l'instant des données connues ou non.
- Un modèle InspireCast intitulé « Cylindre.icast » (fourni en Annexe [5]) contient la mise en donnée de l'essai. Ouvrir et lancer le calcul de solidification seulement, avec une qualité moyenne (3/5). Une vidéo « Formation Inspire Cast Solidification » [7] est disponible sur [ce lien](#). Quelles hypothèses sont réalisées par la mise en donnée proposée ? Sont-elles cohérentes avec l'essai de coquille instrumentée ?
- Explorez les résultats de simulation et discuter des hypothèses réalisables afin de pouvoir calculer simplement le coefficient voulu. Vous étudierez notamment l'homogénéité et les différentes phases de la solidification et évaluez les erreurs impliquées par vos hypothèses.
- À partir des données expérimentales tracer l'évolution du coefficient de transfert pour chaque côté de la coquille. Discuter des résultats.

*NB : les évolutions étant lentes, le bruit de mesure peut impliquer de grandes fluctuations dans vos calculs. Si tel est le cas, vous pouvez filtrer vos mesures avant calculs par une moyenne glissante.*

## Références :

[1]: Simulation de fonderie, B. Anglade, H. Horsin Molinaro, Culture Sciences de l'Ingénieur, mars 2018, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/simulation-en-fonderie](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/simulation-en-fonderie)

[2]: Fonderie : simulation de remplissage, B. Anglade, C. Cheveaux, P. Mella, Y. Quinsat, Culture Sciences de l'Ingénieur, mars 2018, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/fonderie-simulation-de-remplissage](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/fonderie-simulation-de-remplissage)

[3]: Fonderie : éléments d'initiation, B. Anglade, H. Horsin Molinaro, Culture Sciences de l'Ingénieur, janvier 2018, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/fonderie-elements-dinitiation](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/fonderie-elements-dinitiation)

[4]: Fonderie : coulée d'alliage d'aluminium, C. Cheveaux, P. Mella, Y. Quinsat, Culture Sciences de l'Ingénieur, février 2018, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/fonderie-coulee-dalliage-daluminium](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/fonderie-coulee-dalliage-daluminium)

[5]: Annexes T.P. fonderie :

- Défauts de coulée sur pièce « Échelle »
- Plan Coquille
- Plan Noyau
- Mesures
- Données alliage AS13
- Modèle InspireCast

B. Anglade, P. Mella, Y. Quinsat, Culture Sciences de l'Ingénieur, Janvier 2022, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/tp-fonderie-realisation-de-pieces-par-moulage-en-coquille](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/tp-fonderie-realisation-de-pieces-par-moulage-en-coquille)

[6]: Le moulage en coquille : procédé de réalisation de pièces métalliques, B. Anglade, H. Horsin Molinaro, P. Mella, Y. Quinsat, Culture Sciences de l'Ingénieur, octobre 2016, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/ressources\\_pedagogiques/le-moulage-en-coquille-procede-de-realisation-de-pieces-metalliques](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/ressources_pedagogiques/le-moulage-en-coquille-procede-de-realisation-de-pieces-metalliques)

[7]: Formation Inspire Cast Solidification, Yann Quinsat, Culture Sciences de l'Ingénieur, Janvier 2022, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/formation-inspire-cast-solidification](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/formation-inspire-cast-solidification)

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