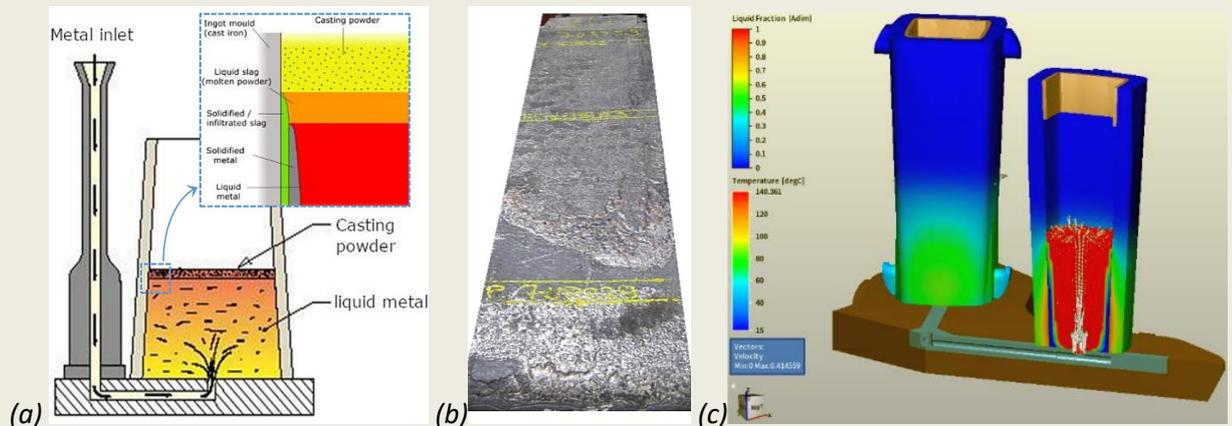


Offre de thèse 2024- CEMEF

TITRE	<i>Thermochimie des poudres de couverture pour la coulée en lingot</i>
Acronyme	TheCAP
Modalités d'encadrement	Projet de recherche réalisé au sein de l'équipe 2MS (Métallurgie, Mécanique, Structures et Solidification) du CEMEF (Centre de Mise en Forme des Matériaux, Mines Paris, PSL Université). Le doctorant sera encadré par différents permanents chercheurs et enseignants-chercheurs de l'équipe 2MS, et bénéficiera des moyens informatiques du CEMEF, ainsi que de la formation associée.
Objectif général	Modélisation des évolutions thermochimiques des poudres de couverture utilisées pour la coulée en lingotière, dans le cadre du projet ANR TheCAP (Thermochemistry of ingot CASTing Powders) incluant le laboratoire CEMHTI (Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation) et différents partenaires industriels du secteur de la métallurgie (ARCELORMITTAL, APERAM, ASCOMETAL, AUBERT&DUVAL, INDUSTRIEL), ainsi que deux sociétés de valorisation des logiciels (TRANSVALOR, SCC).
Contexte	<p>L'acier est principalement produit, à l'échelle mondiale, en utilisant le processus de coulée continue. Néanmoins, pour des nuances d'acier spécifiques, pour les produits forgés de grandes dimensions et pour des marchés de niche à faible volume, tels ceux associés aux secteurs de l'aéronautique, du nucléaire, de l'automobile ou de la défense, la coulée de lingots en source (i.e. par la partie inférieure de la lingotière) reste le seul procédé envisageable. Lors de ce procédé, l'acier liquide doit être protégé par une couche de poudre minérale, appelée poudre de couverture, comme schématisé à la figure (a). Cette poudre fond partiellement pour former un film de laitier liquide recouvrant la surface supérieure du métal, le reste demeurant sous forme pulvérulente. Cette poudre et ce revêtement répondent à différents objectifs :</p> <ul style="list-style-type: none"> • protéger le métal liquide de l'oxydation par l'air ambiant (isolation chimique), • « lubrifier » l'interface entre le métal qui se solidifie et la lingotière, • isoler thermiquement la surface supérieure du métal (ménisque), • absorber les inclusions non métalliques de l'acier.



Coulée de lingots en source et sa modélisation : (a) schéma de la coulée en lingotière en source avec agrandissement sur la région où les différents domaines d'intérêt sont en contact, (b) surface d'un lingot d'acier inoxydable de longueur 1,4 m coulé avec des poudres à faible teneur en carbone, (c) prédiction logicielle du procédé de coulée industrielle d'un lingot de 4,2 tonnes.

Par ses multiples actions, la poudre de couverture agit directement sur la qualité finale du lingot. Cet effet est visible sur la figure (b) où une nuance d'acier inoxydable a été coulée en source. La conséquence d'une poudre non appropriée sur la peau du lingot est la présence de marques et de profils irréguliers, avec des conséquences néfastes sur les propriétés métallurgiques et mécaniques d'usage. L'objectif du projet ANR TheCAP est de compléter la modélisation numérique de la coulée visualisée à la figure (c) en incluant une description des évolutions thermo-chimiques des poudres de couverture et de leurs transformations au cours du procédé, visant ainsi une meilleure définition de leur formulation, de leur utilisation, et une amélioration du rendement industriel en réduisant les chutes résultantes de la découpe de la peau des lingots.

Présentation détaillée

Le CEMEF a participé au développement de codes de calculs industriels, permettant de suivre, contrôler et optimiser les différentes étapes des procédés de coulée de lingots [1]. Dans le cadre du projet TheCAP, une modélisation numérique des transformations de phases subies par le lit de poudre devra être réalisée. Après son étalement sur le métal en fusion [2], la poudre de couverture subit une fusion partielle. Des réactions chimiques avec le métal liquide ont lieu. Peu de travaux existent pour modéliser les évolutions de cette poudre [3, 4]. La thèse proposée s'attachera à développer une modélisation par méthode de suivi de front permettant d'évaluer comment les différents domaines du matériau de couverture interagissent au cours de la coulée avec le métal en fusion et le moule, comme schématisé dans l'encart de la figure (a).

Un modèle numérique multicouche unidirectionnel faisant partie de la librairie de calcul PhysalurgY [5] sera étendu sur la base des équations de conservation de l'énergie et de la masse des différents solutés. Le nombre de domaines sera défini selon les observations expérimentales. Les réactions chimiques identifiées seront prises en compte pour le calcul des profils de composition. Une interaction forte avec les différents partenaires est attendue. Le modèle complet bénéficiera des mesures des propriétés de la poudre en fonction de la température menée au CEMHTI et par ARCELOMITTAL ainsi que des coulées expérimentales des autres partenaires industriels. A l'issue du projet, les résultats des développements numériques devront permettre de définir une condition aux limites équivalente simplifiée, associée à la poudre et à ses évolutions, pour application à la surface supérieure des lingots coulés lors de la simulation macroscopique du procédé, comme illustré en figure (c).

Réf. [1] J. Dairon, FUI AAP15 Project COMCEPT. Final report (2019).

Bibliographiques	<p>[2] S. Riber, Méthodes numériques pour la simulation des écoulements de matériaux granulaires par une approche continue, Doctorat en Mécanique numérique et Matériaux, Mines Paris – PSL, 2017</p> <p>[3] V. N. Neelakantan, S. Sridhar, K. C. Mills, D. Sichen, Mathematical model to simulate the temperature and composition distribution inside the flux layer of a continuous casting mould, Scandinavian Journal of Metallurgy 31 (2002) 191.</p> <p>[4] M. Supradist, A. W. Cramb, K. Schwerdtfeger, Combustion of carbon in casting powder in a temperature gradient, ISIJ international 44 (2004) 817.</p> <p>[5] Physalurgy, bibliothèque de calcul CEMEF, https://physalurgy.cemef.mines-paristech.fr</p>
Valorisation	<p>Communication dans les congrès nationaux et internationaux</p> <p>Publication dans les journaux scientifiques du domaine</p> <p>Implémentation dans les codes de calculs THERCAST® et SOLID®</p>
Outils	<p>Librairie Physalurgy : calcul thermodynamique, méthode de suivi de front, description des transformations métallurgiques (librairie PY)</p>
Mots-clé	<p>Coulée de lingot, Poudre de couverture, Solidification, Transformation de phases, Suivi de front, Couplage thermodynamique</p>
Profil & compétences	<p>Formation Ingénieur ou Master 2, dans les domaines des matériaux, de la mécanique ou des mathématiques appliquées. Etudiant(e) attiré(e) par les problématiques liées à la modélisation et la simulation numérique des phénomènes physiques, en science de l'ingénieur.</p> <p>Le/la doctorant(e) recevra, en complément, la formation nécessaire pour son activité de recherche dans le domaine de la science des matériaux, ainsi que dans le domaine du calcul scientifique et de la programmation, notamment pour maîtriser les outils informatiques nécessaires.</p>
Salaire brut annuel	<p>28,5k€</p>
Lieu	<p>CEMEF, Sophia Antipolis (Site de Mines Paris - PSL)</p>
Equipe CEMEF	<p>Métallurgie, Mécanique, Structures et Solidification – 2MS</p>
Encadrant / Dir. de thèse	<p>Charles-André GANDIN (charles-andre.gandin@minesparis.psl.eu)</p> <p>Gildas GUILLEMOT (gildas.guillemot@minesparis.psl.eu)</p>

Pour postuler : Le dépôt de votre candidature se fait en ligne uniquement en remplissant le formulaire CEMEF en ligne sur : <https://applyfor.cemef.mines-paristech.fr/phd/>