

Calcul des propriétés des plasmas d'azote et d'argon-hydrogène hors d'équilibre thermique pour la modélisation fiable de torches à plasma d'arc

Christophe Chazelas¹, Vincent Rat¹, Rodion Zhukovskii², Olivier Messe³, Dmitrii Ivchenko⁴
Fabien Larocca⁴, Simon Belveze²

1. IRCER, UMR CNRS 7315, Université de Limoges, Limoges, France
2. Oerlikon Balzers France, Limoges, France
3. Oerlikon AM Europe GmbH, Garching bei München, Allemagne
4. TRANSPOD France, Limoges, France

La projection plasma est l'un des nombreux procédés de projection thermique utilisées pour déposer un revêtement afin d'améliorer les performances d'une surface et ses propriétés associées telles que la résistance à la corrosion, à l'érosion, à l'usure ou aux hautes températures.

Cette méthode de dépôt met en œuvre une torche à plasma d'arc non-transféré qui est un dispositif de conversion énergétique et utilise l'énergie thermique d'un arc électrique pour chauffer un flux de gaz plasmagène pour produire un jet de plasma porté à haute température ($> 10\,000\text{ K}$) et haute vitesse ($> 1000\text{ m/s}$). De la poudre métallique ou céramique est injectée dans le jet de plasma. Les grains de poudres sont accélérés, chauffés et impactent un substrat dans un état semi-fondu permettant de former différents types de revêtements.

Pour mieux comprendre et optimiser les performances du revêtement, une modélisation du procédé de dépôt doit être entreprise. Pour faciliter l'effort de modélisation, quatre modules différents doivent être pris en compte : (i) formation de plasma, (ii) accélération et fusion du matériau dans le plasma, (iii) transport et projection et (iv) formation du dépôt.

Le sujet de thèse est lié à la formation du plasma. La simulation de la torche à plasma d'arc est souvent le seul moyen d'étudier les processus à l'intérieur de la torche et d'obtenir les données sur le flux thermique perdues aux électrodes, les champs de température et la vitesse du plasma.

Le modèle de torche à plasma développé à l'Institut de Recherche sur la Céramique (IRCER, UMR CNRS 7315) en collaboration avec Oerlikon Metco utilise le logiciel open source Code_Saturne qui met en œuvre une simulation magnéto-hydrodynamique du plasma d'arc à l'intérieur de la torche par la méthode des volumes finis. Le modèle calcule des champs de température et la vitesse du plasma, le potentiel électrique, la densité de courant et le champ magnétique induit par l'arc. Le modèle est capable de simuler le mouvement de l'arc électrique à l'intérieur de la torche, le flux de gaz plasmagène, le chauffage par effet Joule et le flux de chaleur dans les éléments solides de la torche. Il est important de mentionner que le modèle considère l'écart par rapport à l'équilibre thermodynamique local (ETL), c'est-à-dire qu'il prend en compte deux températures cinétiques différentes pour les électrons et les espèces lourdes de manière à améliorer les résultats et d'obtenir une plus grande précision en termes de prédiction de la tension et de la forme de l'arc, de la dynamique du plasma et des pertes thermiques à l'intérieur de la torche. Ainsi, le modèle à deux températures permet de simuler la torche et d'obtenir des prédictions plus fiables du fonctionnement de celle-ci. Cependant une telle approche rend le calcul des propriétés du plasma plus complexe. En effet, toutes les propriétés de thermodynamique et de transport, par exemple la densité du plasma, les conductivités thermique et électrique, l'enthalpie, la chaleur spécifique, la viscosité, la vitesse du son, etc., doivent être définies pour les deux types d'espèces. De plus, le plasma doit être traité comme un fluide à deux composants thermiques. Cette approche est déjà

mise en œuvre et validée pour l'argon pur, le gaz rare avec un nombre limité de réactions à considérer.

Cependant, les applications industrielles des torches à plasma impliquent des mélanges gazeux avec un gaz secondaire tel que l'azote-hydrogène ou l'argon-hydrogène pour obtenir des tensions d'arc plus élevées et par conséquent des enthalpies spécifiques du plasma plus élevées. La prise en compte des gaz diatomiques et des mélanges de gaz dans le procédé conduit à des chimies beaucoup plus complexes et nécessite un algorithme plus sophistiqué pour prendre en compte toutes les réactions parmi le large éventail d'espèces différentes présentes dans de tels plasmas.

Cette thèse de doctorat vise à poursuivre l'effort de simulation de torche à plasma mené par l'Institut de recherche sur la céramique (IRCER) de Limoges, en France, en collaboration avec Oerlikon. Le travail consiste à développer un algorithme de calcul des propriétés thermodynamiques et de transport de i) l'azote, dans un premier temps, et ii) de divers mélanges argon-hydrogène en fonction de deux paramètres : la température des électrons et la température des espèces lourdes. L'algorithme est destiné à être développé en collaboration avec l'équipe de simulation de torche plasma selon l'articulation suivante :

1. Calcul et correction des propriétés du plasma.
2. Introduction des propriétés calculées du plasma dans le modèle de torche à plasma et son application à la géométrie de la torche à plasma par le doctorant et l'équipe de simulation de la torche à plasma.
3. Validation expérimentale par Oerlikon : mesure des paramètres de fonctionnement de la torche (tension de la torche et ses fluctuations, perte de refroidissement dans la torche, comportement caractéristique de l'arc électrique), observation post-mortem des électrodes testées, et comparaison avec les prédictions du modèle.
4. Application des résultats de simulation au processus de développement de torches chez Oerlikon.

Modalités et motivation du choix du candidat.

Il est souhaité pour cette thèse que le/la doctorant-e soit diplômé d'un master de mathématiques appliquées ou physiques. La personne devait également démontrer une maîtrise des méthodes numériques, dynamiques des fluides, thermodynamiques et électromagnétique. Il devait également avoir de bonnes compétences en langage de programmation (C, FORTRAN, Python). Certaines compétences ont été jugées opportunes sans toutefois être nécessaire comme par exemple : i) Expérience dans le développement d'applications de simulation numérique, de calcul haute performance ou de méthodes d'éléments finis, ii) connaissance of Git pour suivre la progression des codes, iii) connaissance des plasmas et iv) connaissance des arcs électriques.

Présentation des partenaires.

L'Institut de Recherche sur les Céramiques (IRCER) possède les connaissances fondamentales des procédés de projection thermiques par plasma, sa simulation numérique et des bancs d'essais pour réaliser des expériences ainsi que l'analyse de données.

IRCER : Contacts : christophe.chazelas@unilim.fr et vincent.rat@unilim.fr

Oerlikon Metco est l'entité du groupe Oerlikon dont les retombées techniques et économiques sont les plus pertinentes sur ce projet. En effet, cette entité est focalisée sur les applications de projections thermiques et sert un grand nombre d'applications industrielles dans les secteurs

l'aéronautique, la production d'énergie, l'automobile, l'industrie du pétrole et du gaz, ainsi que des marchés spécialisés. Toutefois, cette activité pourrait à plus long terme bénéficier Oerlikon Balzers qui est aussi la plus grosse division du groupe Oerlikon.

Transpod France, entreprise localisée à Limoges, est également intéressée par certaines des données qui seront générées dans le cadre de ce projet. En effet, leur application de transport qui combine propulsion et lévitation nécessite un système de transmission d'énergie sans contact contenant les gaz plasmagènes étudiés dans cette thèse.