



## Avis de Soutenance

Madame Meimei LIU

Présentera ses travaux en soutenance

Soutenance prévue le **mardi 31 mars 2020** à 10h00

Lieu : Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Campus de Sevenans, Rue de Leupe  
90400 SEVENANS  
Salle : S401

Titre des travaux : Recherche et mise en œuvre de modèles de réseaux de neurones artificiels pour la projection thermique à flamme d'oxygène à haute vitesse (HVOF).

Ecole doctorale : SPIM - Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques

Section CNU : 61

Unité de recherche : Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne

Directeur de thèse : Sihao DENG

Codirecteur de thèse :  HDR  NON HDR

Soutenance :  Publique  A huis clos

Membres du jury :

<u>Nom</u>	<u>Qualité</u>	<u>Etablissement</u>	<u>Rôle</u>
M. Sihao DENG	Maître de Conférences	Université Bourgogne - Franche-Comté	Directeur de thèse
M. Hanlin LIAO	Professeur des Universités	Université Bourgogne - Franche-Comté	Examineur
M. Kondo Hloindo ADJALLAH	Professeur des Universités	Université de Lorraine	Examineur
M. Abdoul-fatah KANTA	Chargé de Recherche	Centre Sahélien d'Excellence en Ingénierie	Rapporteur
Mme Armelle VARDELLE	Professeur des Universités	Université de Limoges	Rapporteur
M. Didier KLEIN	Professeur des Universités	Université Bourgogne - Franche-Comté	Examineur

**Mots-clés :** Cr3C2-NiCr, HVOF, réseaux de neurones artificiels, Intelligence artificielle,

## Résumé de la thèse (en français) :

Dans les procédés de projection thermique du type HVOF (High Velocity Oxygen Fuel), les propriétés du revêtement sont sensibles aux caractéristiques des particules en vol qui dépendent elles-mêmes des paramètres opératoires. En raison de la complexité des réactions chimiques et des processus thermodynamiques qui interviennent dans la formation du dépôt, l'obtention d'un modèle multi-physique complet et l'accès à une description quantitative du procédé HVOF représentent encore actuellement un défi scientifique majeur. L'étude réalisée a eu pour but de développer une méthodologie robuste reposant sur la méthodologie des réseaux de neurones artificiels (ANN), en vue de répondre à ce besoin dans le cas des revêtements NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> élaborés par HVOF en mettant en oeuvre des paramètres opératoires variables. En premier lieu, 40 séries d'expériences de projection HVOF ont été conduites et les propriétés du revêtement obtenus ont été déterminées et analysées afin de créer les modèles ANN visés. La relation entre les paramètres opératoires, les caractéristiques des particules en vol et les propriétés du revêtement a été étudiée dans une approche initiale "intuitive", réalisée sur la base de considérations physico-chimiques classiques, ce qui a fourni une compréhension préliminaire du processus HVOF et des revêtements. Toutefois, bien que l'effet des paramètres du procédé sur ces derniers puisse être décrit qualitativement, il est impossible d'établir des corrélations quantitatives.. Aussi deux modèles ANN ont été développés et mis en oeuvre pour prédire les performances du revêtement (en termes de micro-dureté, porosité et taux d'usure) et traduire l'influence des paramètres opératoires (distance de projection, débit d'oxygène et débit de carburant) en faisant intervenir les variables intermédiaires (température et vitesse de particules en vol). Une procédure détaillée de création de ces deux modèles ANN est présentée, qui intègre les phénomènes physiques régissant le processus HVOF. Une série d'expériences supplémentaires a également été menée pour valider la fiabilité et estimer la précision de ces modèles ANN. Les résultats montrent que les modèles implicites ainsi développés ont des qualités prédictives satisfaisantes. La clarification des relations entre les conditions de projection, les comportements des particules en vol et les performances du revêtement est un élément clef pour assurer un contrôle optimal des revêtements déposés par HVOF. De plus, une analyse de la « valeur d'impact moyenne » (MIV) a été réalisée pour évaluer quantitativement l'influence relative de chaque entrée sur les données de sortie en vue d'affiner la prédiction. Enfin, les modèles ANN mis en forme ont été programmés et intégrés dans le système de contrôle de projection HVOF tel qu'il est mis en oeuvre au laboratoire, pour parvenir un système de contrôle intelligent. À l'aide de ce système, la température et la vitesse des particules en vol peuvent être calculées à partir des paramètres opératoires et les propriétés de revêtement spécifiques peuvent être estimées. Un modèle ANN inversé a également été développé, qui prédit les paramètres opératoires optimaux à appliquer en fonction du niveau de micro-dureté visé pour le revêtement. Ce travail contribue donc à la mise au point d'un système de contrôle intelligent applicable aux procédés de projection HVOF et la démarche suivie peut en outre être étendue à d'autres techniques de projection thermique. Ainsi, sur la base d'un nombre substantiel de données, ce travail a non seulement produit une analyse de la relation entre les paramètres opératoires du procédé, le comportement des particules en vol et les propriétés du revêtement, mais a également fourni une méthode de prédiction applicable aux revêtements déposés par HVOF, au travers d'un modèle ANN optimisé. Enfin, un logiciel prototype concrétisant un tel système de contrôle intelligent adapté au procédé de projection HVOF a également été élaboré.

## Abstract (in English):

In the high velocity oxygen fuel (HVOF) spray process, the coating properties are sensitive to the characteristics of in-flight particles, which are mainly determined by the process parameters. Due to the complex chemical and thermodynamic reactions during the deposition procedure, obtaining a comprehensive multi-physical model or analytical analysis of the HVOF process is still a challenging issue. This study proposes to develop a robust methodology via artificial neural networks (ANN) to solve this problem for the HVOF sprayed NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coatings under different operating parameters. First, 40 sets of HVOF spray experiments were conducted and the coating properties were tested for analysis and to build up the data set for ANN models. The relationship among the process parameters, behaviors of in-flight particles, and coating properties were investigated from an initial view, which provided a preliminary understanding of the HVOF process and sprayed coatings. Even though the effect of process parameters on the behaviors of in-flight particles and thus on the coating's properties can be roughly summarized, it is impossible to build up direct connections among them. Second, two ANN models were developed and implemented to predict coating's performances (in terms of microhardness, porosity and wear rate) and to analyze the influence of operating parameters (stand-off distance, oxygen flow rate, and fuel flow rate) while considering the intermediate variables (temperature and velocity of in-flight particles). A detailed procedure for creating these two ANN models is presented, which encodes the implicitly physical phenomena governing the HVOF process. A set of additional experiments was also conducted to validate the reliability and accuracy of the ANN models. The results show that the developed implicit models can satisfy the prediction requirements. Clarifying the interrelationships between the spraying conditions, behaviors of in-flight particles, and the final coating performances will provide better control of the HVOF sprayed coatings. Additionally, mean impact value (MIV) analysis was conducted to quantitatively explore the relative significance of each input on outputs for improving the effectiveness of the predictions. Lastly, the well-trained ANN models were programmed and integrated into the homemade HVOF spray control system to realize an intelligent control system. With this system, the temperature and velocity of in-flight particles can be calculated by entering process parameters, and thereafter obtaining specific coating properties. A reverse ANN model was also integrated, which calculates process parameters based on the microhardness of the coating to guide the selection of the best parameters. This integration provides a preliminary idea for the construction of an intelligent control system for HVOF spray process and can be promoted to other thermal spray technologies. Overall, based on a large data set, this work not only intuitively analyzed the relationship among process parameters, behaviors of in-flight particles, and coating's properties, but also provided a prediction method for the HVOF spray process and HVOF sprayed coatings via the optimized and well-trained ANN model. In addition, a prototype to realize an intelligent control system for HVOF spray process has also been suggested.