



Modélisation des procédés et des propriétés des dépôts élaborés par projection thermique

Rodolphe Bolot

► To cite this version:

Rodolphe Bolot. Modélisation des procédés et des propriétés des dépôts élaborés par projection thermique. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Franche Comté (UFC), Besançon, FRA.; Université de Technologie Belfort - Montbéliard, 2008. tel-03345367

HAL Id: tel-03345367

<https://theses.hal.science/tel-03345367>

Submitted on 15 Sep 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Mémoire d'habilitation à diriger des recherches

Modélisation des procédés et des propriétés des dépôts élaborés par projection thermique

Ecole doctorale Sciences pour l'Ingénieur et Microtechniques (SPIM)

Présenté par

Rodolphe BOLOT

le 27 novembre 2008 à 14h30

UTBM, site de Sévenans, amphi P228.

devant le jury composé de :

Jacques AMOUROUX, LGPPTS, UMPC-ENSCP, Paris, rapporteur.

Alain DEGIOVANNI, LEMTA, ENSEM, Nancy, rapporteur.

Laurent FULCHERI, CEP, ENSMP, Sophia-Antipolis, rapporteur.

Armelle VARDELLE, SPCTS, ENSIL, Limoges, rapporteur.

Zhi-Qiang FENG, LMEE, Université d'Evry, examinateur.

Christian LEXCELLENT, FEMTO-ST, ENSMM, Besançon, président du jury.

Christian CODDET, LERMPS, UTBM, Sévenans, examinateur.

SOMMAIRE

Remerciements	1
Notice individuelle :	
Introduction	2
Curriculum Vitae	3
Résumé de la thématique de thèse et publications associées	4
Activités de recherches entre 1999 et 2008	5
Perspectives de recherche	10
Insertion dans la vie du laboratoire	11
Activités d'encadrements et participations à des jurys	14
Responsabilités administratives et enseignements	15
Publications en revues internationales et articles de congrès	16
Brevets et rapports principaux	20
Détail des activités de recherche :	
<i>Thème 1</i> : Modélisations diphasiques : interactions jet/particules	22
<i>Thème 2</i> : Transferts thermiques transitoires et contraintes générées en projection thermique	32
<i>Thème 3</i> : Calcul numérique de la conductivité thermique de dépôts élaborés par projection thermique	42
<i>Thème 4</i> : Optimisation du design d'outils	50
<u>Cas n°1</u> : Design d'une extension de tuyère pour projection plasma sous très faible pression	50
<u>Cas n°2</u> : Optimisation du design d'un pistolet de type Arc fil destiné à la réalisation de revêtements dans des cylindres pour l'industrie automobile	59
<i>Thème 5</i> : Modélisation des écoulements de plasma d'induction HF destinés à la formation de nanoparticules.	65
<i>Note</i> : Avertissement destiné aux utilisateurs de FLUENT de la communauté de la projection thermique	72
<i>Conclusion et perspectives</i>	77

Remerciements

Ce document présente une synthèse de mes activités de recherche menées au sein du Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux, les Procédés et les Surfaces, depuis Septembre 2000, date à laquelle j'ai été nommé maître de conférence à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard après y avoir soutenu ma thèse en mai 1999.

Je tiens à remercier Monsieur Christian CODDET, directeur du LERMPS non seulement pour son soutien à ma candidature à l'habilitation à diriger des recherches, mais aussi pour ses conseils prodigués concernant notamment l'élaboration du dossier d'inscription.

J'ai également très apprécié les suggestions et conseils de Monsieur Ghislain MONTAVON, Professeur à l'Université de Limoges, que je remercie lui aussi vivement.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance et adresser mes plus sincères remerciements à Madame Armelle VARDELLE, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Limoges, Monsieur Laurent FULCHERI, HDR, Maître de Recherche à Mines Paris'Tech (Sophia-Antipolis), Monsieur Alain DEGIOVANNI, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique de Nancy et Monsieur Jacques AMOUROUX, Professeur Emérite à l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Paris (Université Pierre et Marie Curie) pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail, qui plus est en cette période de l'année toujours très chargée.

Je remercie également Monsieur Zhi-Qiang FENG, Professeur à l'IUP d'Evry qui a examiné ce travail ainsi que Monsieur Christian LEXCELLENT, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques de Besançon qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

J'ai par ailleurs particulièrement apprécié la présence de chacun le 27 novembre malgré des timings très serrés.

Enfin je ne saurais terminer sans remercier Monsieur Didier KLEIN, Professeur à l'UTBM qui a relu ce manuscrit ainsi que l'ensemble des collègues qui ont pu favoriser le bon déroulement de la journée du 27 dont plus particulièrement Madame Ghislaine BERTRAND, HDR, Maître de Conférences à l'UTBM et Monsieur Christophe VERDY, Ingénieur de Recherche à l'UTBM.

Introduction

Après avoir réalisé ma thèse au laboratoire LERMPS de l'UTBM d'octobre 1995 à mai 1999, j'ai été nommé maître de conférences en septembre 2000, puis titularisé en 2001.

Thermicien de formation, mon sujet de thèse a porté sur la modélisation CFD du procédé de traitement de surface de type APS (projection thermique par jet de plasma sous air ambiant). Dans ce cadre, j'ai notamment développé un code de calcul de la composition des plasmas à l'équilibre chimique, de leurs propriétés thermodynamiques et de leurs coefficients de transport. J'ai ensuite utilisé le logiciel commercial CFD PHOENICS pour modéliser les écoulements.

Dans le cadre de mes travaux de recherche post-thèse, je me suis intéressé à la modélisation des autres procédés de traitement de surface disponibles au LERMPS.

Ma thématique de recherche est entièrement tournée vers la finalité première du laboratoire :

L'élaboration de dépôts protecteurs

Mes différents axes de recherche seront présentés dans ce mémoire. Les deux premiers thèmes abordés concernent les deux principaux éléments influençant la structure, les propriétés et la qualité des dépôts élaborés :

- Etat des particules au moment de leur impact sur la surface à revêtir.
- Etat thermique du substrat lors de l'élaboration du dépôt (co-encadrement de la thèse de Monsieur Jianfei LI sur ce sujet).

La troisième thématique abordée concerne ensuite les propriétés des dépôts élaborés : j'ai développé dans ce cadre, un code de calcul permettant d'estimer la conductivité thermique effective de structures poreuses telles que les dépôts projetés thermiquement.

Une part importante de mon activité portant sur des travaux en liaison avec l'industrie (17 rapports industriels dont 10 en tant qu'auteur principal depuis la fin de ma thèse), j'ai été amené à travailler sur l'optimisation de divers procédés et (ou) outils. Dans une quatrième partie, j'ai donc ensuite illustré deux contributions personnelles à l'optimisation des outils de projection :

- Optimisation du design de tuyères divergentes destinées à un procédé de projection plasma sous très faible pression (co-encadrement de la thèse de Monsieur Dmitry SOKOLOV sur le sujet).
- Amélioration d'une tête de déviation pour le procédé Arc fil en projection interne (2 brevets d'invention B1 dans ce cadre).

De par mon activité de modélisation des plasmas, j'ai par ailleurs été contacté par une équipe de l'EMPA (Thoune, Suisse) travaillant sur la production de nanoparticules par plasma d'induction HF : une collaboration internationale s'en est suivie en marge de la thèse de Monsieur Cornelis SCHREUDERS chargé de modéliser le procédé à l'EMPA. Il s'agit là du dernier thème abordé.

A l'heure actuelle, ces différentes activités se sont traduites par une douzaine de publications en revues internationales avec comité de lecture, une trentaine d'articles de congrès internationaux, quatre articles de congrès nationaux et quelques participations à des journées d'études.

J'ai par ailleurs réalisé 16 présentations orales et 12 présentations par affiche lors de mes participations à ces différents congrès.

Rodolphe BOLOT

Etat civil : né le 22 Août 1971 à Lure (70).

Situation familiale : vie maritale, un enfant.

Email Rodolphe.Bolot@utbm.fr

3 route de Lure, 70200 FROTEY LES LURE



03 84 30 22 53 (personnel)

03 84 58 31 79 (utbm)

Maître de conférences depuis septembre 2000

Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM)

Département de Mécanique et Conception (DMC)

Membre du CNU en section 62 (collège MDC)**Titulaire de la PEDR depuis octobre 2006****Cursus Universitaire**

1991 Diplôme Universitaire de Technologie en Génie Thermique et Energie, IUT de Belfort.

1993 Maîtrise de Sciences et Techniques en Energétique Industrielle – UFR STGI, Belfort.

1994 Diplôme d'Études Approfondies (DEA) – UFR STGI, Belfort.

Intitulé du DEA : "Techniques d'Analyse et d'Optimisation en Énergétique"

Sujet du stage : Modélisation et visualisation de la propagation d'ondes acoustiques dans des conduits de section variable.

Responsable du stage : J.-P. PRENEL

1999 **Doctorat** (Ecole doctorale Sciences pour l'Ingénieur et Microtechniques, UFC)

Thèse soutenue le 6 mai 1999 à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

Titre : Modélisation des écoulements de plasmas d'arc soufflé :

Application à la projection de matériaux pulvérulents.

Laboratoire d'accueil : LERMPS

Financement : bourse UTBM (2 ans) puis ATER (1/2 poste)

Mention : Très honorable avec félicitations du jury composé de :

C.C. BERNDT (Pr)

Université de New-York, USA

Examinateur

M.I. BOULOS (Pr)

Université de Sherbrooke, Canada

Président du jury

B. CHERON (Pr)

Université de Rouen

Rapporteur

C. CODDET (Pr)

UTBM

Directeur de thèse

P. FAUCHAIS (Pr)

Université de Limoges

Rapporteur

M. IMBERT (Pr)

UTBM

Co-directeur de thèse

P. NYLÉN (Dr)

Université de Trollhättan, Suède.

Membre invité

Expériences professionnelles

Depuis 09/00 Maître de Conférences – Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

De 03/00 à 08/00 Ingénieur de Recherche - LERMPS

Employeur : PERSEE/UTBM - Contrat : PRéCI

(Pôle Régional de Conception et d'Innovation)

Mots clés : modélisation – CAO – procédé arc/fil.

De 09/99 à 02/00 Ingénieur de Recherche - LERMPS

Employeur : PERSEE/UTBM - Contrat : SNECMA div. SEP (Site de Vernon).

Mots clés : modélisation - écoulements supersoniques - tuyères LAVAL.

De 10/95 à 05/99 Doctorat - LERMPS - Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

Mots clés : modélisation - jets de plasma impactants - transferts thermiques

De 09/97 à 08/99 Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER) – UTBM.

De 10/94 à 07/95 Service National, BA 116, Armée de l'Air.

Durant 1994 Stage de DEA (5 mois) - Institut de Génie Energétique de Belfort (IGE).

Mots clés : visualisations - ondes acoustiques – LASER

Thématique de thèse : Jets de plasma de type APS

J'ai réalisé ma thèse au sein du laboratoire LERMPS (EA 3316) de l'UTBM sous la direction des professeurs Christian Coddet et Michel Imbert. Mes travaux se sont déroulés sur un peu plus de 3 ans et demi (début en octobre 1995, soutenance le 6 mai 1999) et se sont inscrits dans le cadre de la modélisation du procédé de projection thermique par plasma d'arc soufflé sous air ambiant (procédé APS pour Atmospheric Plasma Spray). Ce procédé consiste à injecter le matériau à projeter sous forme de poudre dans un jet de plasma (gaz partiellement ionisé porté à une température de l'ordre de 13 000K sous l'effet d'un arc électrique). Les particules de poudre sont alors entraînées par le jet de plasma, accélérées et fondues puis les gouttelettes produites s'écrasent sur la surface à revêtir, formant ainsi le dépôt protecteur (applications anti-corrosion, anti-usure, barrière thermique, etc.).

Résumé de la thèse :

Le développement d'un code de calcul destiné à la détermination des propriétés thermodynamiques et des coefficients de transport des plasmas thermiques a tout d'abord été réalisé. Ce code est décrit tout au long du premier chapitre. Les tables de Gurvich (0-20000K) ont été utilisées concernant les propriétés des espèces individuelles. Une méthode de minimisation de l'énergie de Gibbs a été employée pour la détermination des équilibres thermochimiques et la théorie cinétique des gaz a été appliquée pour estimer les coefficients de transport des plasmas en utilisant différents potentiels d'interactions suivant le type des espèces composant le mélange. Ce code est employé dans toute la suite : il est la base de l'ensemble des calculs réalisés. Il a depuis été retranscrit en FORTRAN (au lieu de MATLAB).

Le second chapitre consiste en une étude paramétrique destinée à identifier les éléments les plus influents au niveau de la modélisation des jets de plasma. Les influences de paramètres tels que débits de gaz, diamètre d'anode ou bien encore modèle de turbulence y sont notamment abordées en utilisant le logiciel PHOENICS (code commercial de calcul CFD "Computational Fluid Dynamics").

L'originalité première du travail concerne le troisième chapitre. Celui-ci est consacré à la modélisation des jets de plasma impactants et des flux thermiques transmis dans une telle configuration. Une extension à 2 couches au modèle k- ϵ de Chen & Kim a été implantée dans le logiciel PHOENICS de manière à calculer les échanges thermiques plus précisément. Ceci permet de traiter à la fois le jet de plasma présentant une nature turbulente et la sous-couche visqueuse formée sur la surface à l'impact du jet. Le recours à l'utilisation délicate de fonctions de paroi est ainsi évité.

Le quatrième et dernier chapitre traite de l'entraînement des particules injectées dans le jet. Une approche Lagrangienne est utilisée, ce qui permet notamment le couplage entre les équations de transport des particules et l'équation de conduction de la chaleur au sein même d'une particule isolée. En effet, cet élément est déterminant pour les matériaux réfractaires tels que les céramiques, pour lesquels on dénote des gradients thermiques importants entre le cœur et la surface de particules.

Production scientifique associée :

Ma thèse a donné lieu à 2 articles en revues internationales avec comité de lecture [11, 12] : l'un est le fruit d'une collaboration internationale avec Per Nylén (Université de Trollhättan, Suède) et l'autre concerne le chapitre principal et a été publié dans la prestigieuse revue *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Cet article a été accepté fin 1999 et publié en 2001. Un troisième article est paru dans *The PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics & its applications* [13] (comité de lecture interne à la société CHAM distribuant le logiciel PHOENICS). Durant cette période, j'ai également participé à la rédaction de 4 articles de congrès internationaux [39-42] et j'ai notamment réalisé une présentation orale à Indianapolis en 1997. J'ai aussi participé à la conférence internationale des utilisateurs de PHOENICS (présentation orale, Séville, 1997) ainsi qu'à une journée d'études SFT [52] en 1998.

Les numéros font référence à la liste complète figurant en fin de notice.

Activités de recherche entre 1999 et 2008

Préambule :

Le laboratoire LERMPS utilise et développe différents procédés de traitement de surface par projection thermique. Parmi ceux-ci, on trouve le procédé APS abordé dans la présentation de mes travaux de thèse et le procédé VPS ou LPPS ("Vacuum" ou "Low Pressure Plasma Spray") consistant à élaborer des dépôts non plus sous air mais sous pression résiduelle de gaz neutre, afin d'éviter toute oxydation. On distingue également le procédé HVOF ("High Velocity Oxygen Fuel") pour lequel la source thermique d'origine électrique (arc) est remplacée par une source d'origine chimique (combustion d'un mélange combustible/oxygène). Cette combustion étant par ailleurs réalisée sous pression, les jets HVOF présentent traditionnellement une forte vitesse (écoulement supersonique en sortie de tuyère). Enfin on trouve également le procédé arc-fil pour lequel le matériau à projeter se trouve initialement sous la forme de 2 fils connectés aux bornes d'un générateur de courant continu et orientés de manière convergente vers un point situé au milieu d'un écoulement d'air ou de gaz neutre.

Introduction :

Ayant soutenu ma thèse à l'UTBM en mai 1999, j'ai tout d'abord poursuivi mon activité d'ATER jusqu'à la fin du contrat d'engagement avant de bénéficier (à compter de septembre 1999) de 2 contrats successifs d'Ingénieur de Recherche de 6 mois chacun. J'ai ensuite postulé sur un poste de Maître de Conférences à l'UTBM et j'ai été nommé en septembre 2000.

Je me suis dès lors concentré sur le développement de modèles permettant de mieux comprendre le fonctionnement des différents procédés de projection utilisés au laboratoire et les mécanismes intervenant dans l'élaboration des revêtements.

Ainsi, ma première thématique de recherche porte naturellement sur la modélisation des interactions jet/particules, qu'elle s'applique aux procédés plasma, HVOF ou arc-fil. En effet, il est évident que l'état des particules au moment de leur impact et de leur écrasement sur la surface à revêtir joue un rôle prépondérant au niveau de la qualité des dépôts produits. Par exemple, suivant le taux de fusion des particules, on peut retrouver ou non des particules partiellement fondues dans le dépôt. De même, plus la vitesse des particules est élevée, plus on observe que les dépôts sont denses, c'est-à-dire que le taux de porosité diminue.

Toutefois, l'état des particules au moment de leur impact n'est pas le seul paramètre agissant sur les propriétés des dépôts. En effet, l'évolution de la température de l'ensemble dépôt/substrat au cours de la projection joue par exemple un rôle significatif sur l'état de contraintes engendré. De même, la température de surface joue un rôle essentiel sur l'écrasement des particules. En particulier, au-delà d'une certaine température, des galettes bien régulières peuvent être formées et les éclaboussures disparaissent, ce qui favorise la cohésion du dépôt.

Ainsi, ma seconde thématique de recherche concerne la modélisation des flux thermiques transférés en cours de projection, la modélisation de la dissipation de ces flux dans l'ensemble dépôt/substrat ainsi que l'état de contraintes engendré. En pratique, ces flux ont une double origine correspondant pour l'une à l'impact du jet et pour l'autre au flux de matière déposée.

Lors de ces études, nous avons été confrontés à des difficultés concernant les propriétés effectives des dépôts à prendre en compte. Dans le cadre de la thèse de Monsieur Jianfei LI soutenue en 2005, nous avons par exemple appliqué des coefficients aux propriétés du matériau dense, pour traduire les effets de la structure poreuse du dépôt sur ses propriétés effectives. Une troisième thématique de recherche est donc née, portant quand à elle sur l'estimation des propriétés effectives des dépôts. Dans ce cadre, j'ai notamment été amené à développer un logiciel basé sur l'analyse d'image de coupes micrographiques transversales des dépôts.

Enfin, il est évident que les outils de projection jouent aussi un rôle au niveau de la qualité des dépôts produits. J'ai donc également consacré une partie de mes travaux à une quatrième thématique portant sur l'optimisation du design des outils. Les développements principaux réalisés dans ce cadre ont concerné le design de tuyères divergentes pour projection plasma sous très faible pression ou encore le design de buses de déviation pour l'arc-fil rotatif (procédé permettant de réaliser des dépôts à l'intérieur de cylindres destinés à l'industrie automobile).

Mes activités de recherche d'après thèse sont développées ci-après autour de ces 4 thématiques interconnectées.

I. Modélisations diphasiques : interactions jet/particules

Tel que mentionné ci-dessus, l'état des particules au moment de leur impact agit fortement sur la qualité des dépôts produits. De nombreux travaux ont donc été menés dans le but d'étudier les interactions jet/particules et de prédire l'état des particules (température, fusion, vitesse) au moment de leur impact sur le substrat ou les couches précédemment déposées. Les premiers modèles développés (portant sur les procédés APS et HVOF) sont de type Eulérien Lagrangien, ce qui signifie qu'un repère Eulérien (fixe) est utilisé pour décrire l'écoulement et qu'un repère Lagrangien (accroché à la particule) est utilisé pour la phase particulaire. Par ailleurs, l'effet des particules sur l'écoulement a été négligé si bien que l'écoulement agit sur les particules et définit leurs trajectoires mais pas l'inverse. En contrepartie, cette approche permet de décrire plus précisément le devenir de chaque particule : propagation de la chaleur et du front de fusion au sein même d'une particule isolée. Cet avantage est tout à fait intéressant notamment pour les matériaux réfractaires comme les céramiques ou les polymères. C'est d'ailleurs pour ce type de matériaux que 2 articles ont été publiés en revues internationales avec comité de lecture sur le sujet de la description des interactions jet/particules portant sur le procédé APS [8-10]. D'autres articles portant sur cette thématique ont également été publiés lors de congrès internationaux aussi bien pour le procédé APS [38] que l'HVOF [36].

A partir de l'analyse (par calcul) des trajectoires de particules, nous avons également pu mettre en évidence qu'il était difficile d'éviter le colmatage de la buse dans le cas de projections plasma sous très faible pression incluant un divergent long et profilé [5].

Plus récemment, un modèle couplé (incluant la prise en compte de l'effet des particules sur l'écoulement) a été utilisé pour le procédé arc-fil dans le cas d'un dispositif de type TAFA. Ce modèle présente cette fois l'avantage de permettre la prise en compte de l'effet de charge sur le jet (influence du débit de matière), ce qui constitue l'un des points forts de l'article en question [1].

Au final, cette thématique a donc été abordée dans le cadre de 4 articles en revues internationales avec comité de lecture.

II. Modélisations des jets impactants, des flux transférés, des aspects thermiques dans l'ensemble dépôt/substrat et des contraintes engendrées

La température du substrat au moment de l'élaboration d'un dépôt par projection thermique est un paramètre essentiel agissant à différents niveaux sur la qualité des revêtements produits. De par les différences de dilatation entre le substrat et le matériau projeté, une température trop élevée du substrat pourra engendrer des contraintes thermiques importantes lors du retour de l'ensemble à température ambiante (d'où possible décollement, etc.). En contrepartie, au-delà d'une certaine température du substrat, on remarque souvent une amélioration de l'étalement des gouttelettes fondues lors de leur impact. Les éclaboussures deviennent alors minimales et l'impact des gouttelettes produit des galettes bien régulières favorisant l'adhésion et la cohésion du dépôt.

C'est dans ce contexte que j'ai co-encadré Monsieur Jianfei LI qui a réalisé sa thèse au LERMPS sur le sujet de la formation des contraintes dans les dépôts élaborés par projection thermique (co-encadrement avec le Professeur Christian Coddet, directeur de thèse). Aussi, la maîtrise des températures et des flux s'étant avérée essentielle, nous avons travaillé à la fois sur des logiciels commerciaux (SYSWELD et FLUENT) et nous avons développé par ailleurs nos propres outils concernant la conduction thermique tridimensionnelle transitoire dans des solides multicouches soumis à des sources thermiques en mouvement.

Les travaux menés avec Jianfei LI dans le cadre de sa thèse ont donné lieu à 6 articles de congrès internationaux avec actes [20, 23, 25-26, 29-30] et une participation à une journée d'études organisée par le LERMPS (avec actes) [49].

Par ailleurs, concernant l'estimation des flux transférés par les jets de type HVOF, plusieurs études portant à la fois sur les aspects expérimentaux et la modélisation ont été menées. Ces études ont notamment fait usage de techniques calorimétriques [22] et une méthode basée sur l'analyse de réponse transitoire a aussi été développée plus récemment [14]. Concernant ces derniers travaux, nous comptons les soumettre en revue après avoir ajouté une partie modélisation afin de permettre des comparaisons entre modélisations et mesures.

Cette activité portant sur la quantification des flux thermiques transférés par les jets a également été reprise dans le cadre de plusieurs partenariats industriels.

III. Modélisation des propriétés effectives des dépôts

Les travaux menés dans le cadre de la thèse de Monsieur Jianfei LI ont mis en évidence le fait qu'il est essentiel de connaître les propriétés effectives des dépôts si l'on veut prédire convenablement les champs de contraintes engendrés lors de leur élaboration. En effet, dans le cadre de cette thèse, nous avons dû faire usage de coefficients appliqués aux propriétés du matériau dense afin de prendre en compte l'effet de la structure poreuse des dépôts. Bien évidemment, ces coefficients influencent fortement les champs de contraintes calculés.

Dans cette optique, je développe depuis 2004 un logiciel permettant d'estimer la conductivité thermique des structures poreuses telles que les dépôts élaborés par projection thermique.

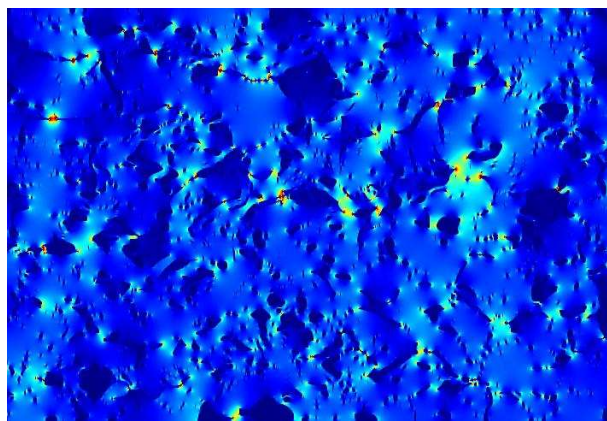
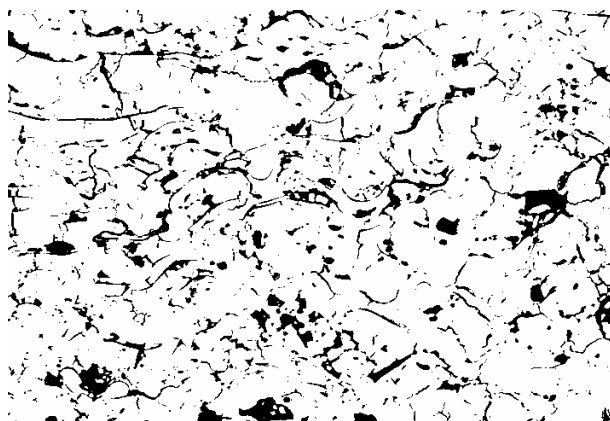
Ce logiciel utilise directement l'image binaire du champ de porosité (micrographie de la coupe transversale d'un dépôt) comme support de maillage et chaque pixel est alors interprété comme un volume d'intégration de l'équation de conduction de la chaleur en régime stationnaire.

En imposant un gradient de températures entre les faces supérieure et inférieure de la structure et en affectant une conductivité thermique à chaque pixel (différente en fonction de sa couleur), il est possible de déterminer numériquement le flux thermique traversant la structure et d'en estimer une conductivité thermique effective dépendant du flux traversant et de l'épaisseur de l'échantillon.

A présent, les techniques numériques de résolution du système d'équations ont été optimisées : le logiciel utilise notamment les méthodes SOR (Successive Over-Relaxation) et LSOR (Line Successive Over-Relaxation) pour résoudre la matrice formée (dont la taille correspond au nombre de pixels de l'image). La méthode SOR est identique à celle utilisée à l'ONERA (Châtillon, France) par J.M. Dorvaux mais la méthode LSOR est maintenant préférée car elle permet un gain de temps appréciable.

Aujourd'hui, ses applications au niveau du LERMPS sont multiples. Nous avons commencé par étudier l'influence de l'architecture du réseau poreux sur l'efficacité d'une barrière thermique de type zircone yttrée. Nous avons ensuite mis en évidence l'influence du procédé d'élaboration, en couplant par exemple la projection APS avec une refusion LASER *in-situ*. Plus récemment, nous avons comparé des dépôts d'alumine produits en APS (poudre) et flamme (baguettes) (procédés St. GOBAIN ROKIDE et MASTERJET). J'ai aussi étendu les fonctionnalités du logiciel de deux à trois phases. Enfin, dans le cadre du projet européen **NEWAC** (New Aero Engine Core Concept), j'ai utilisé ce logiciel pour estimer les propriétés de dépôts abrasables de type AlSi/polyester utilisés dans les applications aéronautiques. De même, une extension tridimensionnelle est prévue dans le cadre du futur projet européen **RISE** (Rub-In tolerant material design for Improved Seal Efficiency) et le logiciel pourrait encore être utilisé dans le cadre d'un troisième projet européen portant cette fois sur les barrières thermiques : **ARAGON** (Advanced theRmal barrier coAtinGs for lOw emissioN flight turbines).

A l'heure actuelle, cette thématique a donné lieu à participation à 4 congrès internationaux avec actes [15, 18, 21, 27], 2 congrès nationaux avec actes [43, 45], 2 présentations à des congrès sans actes [47-48], ainsi que 3 publications en revues internationales [4, 7, 9].



Coupe micrographique d'un dépôt de zircone yttrée (gauche) et image du flux thermique à travers la structure (droite) [45].

IV. Optimisation du design d'outils

Cette thématique a été abordée dans le cadre de plusieurs études ayant porté sur différents procédés. Deux cas sont présentés ci-après.

IV.1. Optimisation du design de tuyère pour projection plasma sous très faible pression

Lors de la projection de poudres métalliques, le procédé APS présente l'inconvénient de produire des dépôts parfois trop oxydés de par un entraînement important d'air ambiant dans le plasma. Le procédé VPS (ou LPPS) permet de s'affranchir de ce problème puisque la projection s'effectue cette fois sous atmosphère contrôlée (pression résiduelle de gaz neutre).

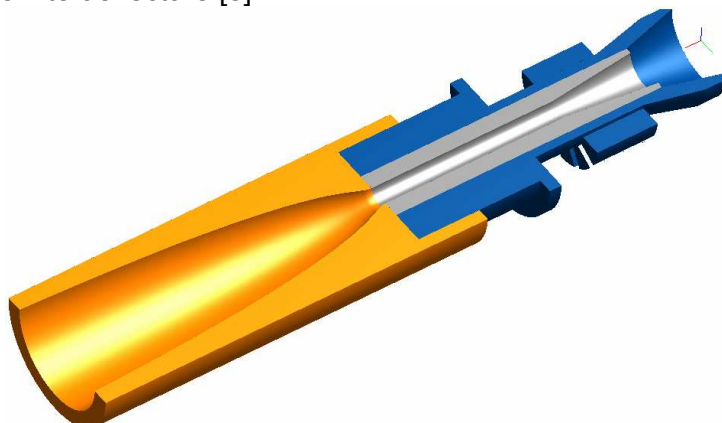
Le projet LETS, coordonné par Monsieur Didier Klein, professeur à l'UTBM, consiste à réaliser des projections sous très faible niveau de pression dans le but de produire des dépôts hybrides entre projection thermique et PVD (Dépôt Physique en phase Vapeur) tout en conservant une vitesse d'élaboration équivalente à celle de la projection thermique. J'interviens dans ce projet dans le cadre du co-encadrement doctoral de Dmitry SOKOLOV.

Sous très faible pression (de l'ordre de 1 mb), le jet de plasma s'allonge considérablement (d'une dizaine de centimètres à plusieurs mètres) si bien qu'une enceinte adaptée a tout d'abord dû être construite.

Ainsi, la partie modélisation de cette thèse porte sur le développement d'outils adaptés aux projections sous très faible pression. En effet, les tuyères utilisées lors de la réalisation de projections thermiques sous vide possèdent le plus souvent un divergent de forme conique permettant d'adapter la pression amont à celle de l'enceinte de projection. Les jets de plasma obtenus présentent une nature supersonique qui se caractérise par l'observation de diamants lumineux. Ces diamants traduisent la présence d'ondes de compression/expansion également associées à de forts gradients des grandeurs caractéristiques du jet. Ces zones de forts gradients ne peuvent être évitées que par utilisation d'un "design" de divergent adéquat. Nos travaux portant sur le design de tuyères divergentes reposent sur une extension de la méthode de Foelsch (*The Analytical design of an Axially Symmetric Laval Nozzle for a Parallel and Uniform Flow*, J. Aeronaut. Sci., 1949) (équation quasi-analytique du contour du profil) que nous avons nous même développée. En effet, dans les développements réalisés par Foelsch dès 1949, une dérivée thermodynamique est considérée comme unitaire. Or, à très haute température (application aux plasmas), il s'avère que cette dérivée peut varier significativement. Nous avons donc étendu la théorie de Foelsch en faisant de cette dérivée un paramètre supplémentaire dans les équations du profil.

En pratique, si nous avons effectivement pu observer un comportement plus unidirectionnel du jet lors de l'utilisation d'une extension possédant un divergent de profil optimisé, nous avons néanmoins constaté qu'il devient difficile d'éviter le colmatage dans l'extension lorsque l'injection du matériau est réalisée de manière radiale au voisinage du col. Ce type d'extension semble donc disposer d'un fort potentiel dans le cas d'une injection axiale du matériau à projeter. Dans le cas contraire, l'utilisation d'un divergent court demeure la meilleure solution technologique.

Ces travaux ont pour l'heure donné lieu à 5 articles de congrès internationaux avec actes [19, 24, 28, 33, 35], 1 article de congrès national avec actes [46] et une publication en revue internationale avec comité de lecture [5].



Buse F4 allongée équipée d'un divergent optimisé pour projection sous très faible pression

IV.2. Optimisation du design d'outils de type arc-fil

Suivant le procédé arc-fil, deux fils du matériau à projeter sont connectés aux bornes d'un générateur de courant continu et guidés vers un même point situé au centre d'un jet gazeux. Un arc électrique est ainsi créé, permettant la fusion du matériau dont les gouttelettes sont entraînées par l'écoulement et projetées sur la surface à revêtir. Les outils utilisés présentent généralement des géométries complexes, nécessitant la réalisation d'études tridimensionnelles pour lesquelles la génération d'un maillage structuré est parfois difficile. L'étude tridimensionnelle de l'écoulement a tout d'abord été réalisée sous PHOENICS (logiciel CFD commercial) à l'aide du module CAD to CFD permettant l'importation directe de la CAO du dispositif (format STL) dans le milieu de calcul composé d'un maillage structuré. Ces travaux ont donné lieu à un article de congrès international avec actes, présenté oralement lors d'ITSC (International Thermal Spray Conference) 2001 à Singapour [37].

Par la suite, j'ai co-encadré Monsieur Irmantas Guedzevicius lors de son séjour au LERMPS (9 mois à compter du 1^{er} octobre 2001) réalisé dans le cadre de sa thèse puis collaboré avec le docteur Zhu qui a réalisé un séjour post-doctorat au LERMPS sur ce même procédé. Ces 2 collaborations ont donné lieu à un article de conférence internationale [32] et une revue internationale avec comité de lecture [6] portant sur différents aspects du design du dispositif. Enfin plus récemment nous avons utilisé FLUENT pour étudier ce procédé et les travaux correspondants ont été publiés en revue internationale avec comité de lecture [1].

A partir de 2003, j'ai commencé à travailler sur un procédé de type arc-fil rotatif permettant de réaliser des dépôts à l'intérieur de cylindres dans le cadre d'une collaboration avec PSA Peugeot-Citroën (centre technique de Belchamp). Si les moyens dont nous avons pu disposer sont bien inférieurs à ceux consacrés par la concurrence, j'ai néanmoins été amené à co-encadrer plusieurs stagiaires (stages d'ingénieur ou DEA) dans le cadre de cette activité. Les travaux réalisés (initialement classés confidentiels) ont donné lieu à **2 dépôts de brevets** en association avec PSA Peugeot-Citroën [B1-B2] et nous n'avons donc pas publié sur le sujet durant plus de 2 ans. Les brevets en question portent sur le design des buses utilisées. Cette activité a ensuite donné lieu à une publication en revue internationale avec comité de lecture [2] dans laquelle nous avons démontré tout l'intérêt du procédé développé au LERMPS tant en terme de qualité de dépôt (adhérence) qu'en terme de simplicité de mise en œuvre (seule une tête de déviation tourne mais pas l'ensemble du dispositif).

Pour conclure concernant cette partie, le tableau suivant présente une synthèse de mes activités de recherche d'après thèse en terme de production scientifique.

La classification adoptée est la suivante :

RICL : Articles en revues internationales avec comité de lecture

CI : Actes de congrès internationaux (ou nationaux pour 4 d'entre eux)

Tableau de synthèse des activités de recherche d'après thèse en terme de production scientifique :

Thématique		Production scientifique		
		RICL	CI	Brevets
Modélisation des procédés par calculs CFD	Procédé			
	APS	2	6	
	LPPS, LETS	1	6	
	Plasmas d'induction	1	2	
	HVOF		3	
	Arc-fil fixe	2	2	
	Arc-fil rotatif	1	1	2
	Sous total	7	20	2
Modélisations thermiques / contraintes			7	
Modélisation des propriétés de dépôts		3	6	
Total		10	33	2

La ligne 3 (plasmas d'induction) concerne une collaboration scientifique mentionnée page 13.

Perspectives de Recherche

Dans l'immédiat, je souhaite continuer à développer le programme basé sur l'analyse d'image de coupes micrographiques de dépôts, permettant aujourd'hui d'estimer la conductivité thermique effective de structures poreuses. Les développements réalisés seront multiples. Dans un premier temps il est convenu dans le cadre du futur projet européen RISE (Rub-In tolerant material design for Improved Seal Efficiency) de développer une version tridimensionnelle du programme permettant de travailler non plus sur des coupes micrographiques mais sur des images volumiques obtenues par tomographie. A ce sujet, l'application en question me semble particulièrement bien choisie puisque la sensibilité vis-à-vis de la résolution est moins importante que pour les barrières thermiques poreuses de type zircone yttrée par exemple, pour lesquelles nous insistons toujours sur le fait que des résolutions supérieures amélioreraient les résultats. Ici, c'est moins vrai et les résolutions obtenues en tomographie sont susceptibles d'être suffisantes pour l'obtention de résultats intéressants.

Une autre orientation de développement concernera l'extension des propriétés physiques pouvant être calculées. En effet, en bidimensionnel, le logiciel libre OOF (NIST) permet déjà d'estimer des propriétés mécaniques (tel que le module d'élasticité longitudinal par exemple) de matériaux poreux ou multiphasiques. Dans le modèle que je développe, si le cas de la conductivité électrique pourrait d'ores et déjà être considéré sans nécessiter de gros développements, le cas des propriétés mécaniques est envisageable mais demandera toutefois des efforts supérieurs. Depuis un certain temps, le cas de la conductivité ionique est également souvent évoqué dans le cadre des piles à combustible de type SOFC : là encore les possibilités du logiciel seront sûrement étendues.

A ce sujet, j'ai récemment reçu l'appui d'un nouveau thésard que je co-encadre depuis octobre 2008 avec Hanlin LIAO (professeur à l'UTBM) sur le sujet de la modélisation des propriétés de dépôts. Les objectifs de thèse de Monsieur Jiang-Hao QIAO seront de passer à la 3D en thermique et de réaliser des calculs 2D d'estimation du module d'élasticité effectif de structures poreuses.

Des contacts ont également été initiés afin d'utiliser le modèle développé dans le cadre d'un autre projet européen portant plus sur les fonctionnalités d'origine du logiciel, à savoir les applications de type barrière thermique (programme ARAGON : Advanced theRmal barrier coAtinGs for lOw emissioN flight turbines).

A plus long terme, je constate aujourd'hui qu'une part croissante de mes activités se porte progressivement de l'analyse du procédé (calculs CFD) vers les fonctionnalités du dépôt. Cette tendance est naturelle et cohérente dans la mesure où l'étude d'un procédé ne peut se faire sans s'intéresser aux résultats du procédé en question. Elle s'explique aussi par le fait que le procédé est un outil mais pas une finalité pour un laboratoire tel que le LERMPS pour lequel la finalité est le dépôt. Néanmoins, je reste persuadé que d'importants développements doivent encore être réalisés concernant l'amélioration des outils. Toutefois, dans la plupart des cas, ces développements ne pourront être réalisés qu'en partenariat avec les industriels fabricants de matériels.

Plusieurs dossiers ANR incluant des activités de modélisation sont également en cours de discussion avec différents partenaires. Ainsi, le dossier ANR blanc intitulé PORODYN porte sur l'utilisation du procédé cold-spray pour la réalisation de dépôts abrasables d'alliages métalliques. Suivant ce procédé, le matériau est peu chauffé mais fortement accéléré. Il en résulte des dépôts souvent très denses et peu oxydés. Dans ce cadre, nos partenaires sont le Centre des Matériaux (Mines ParisTech - ARMINES, Evry), le laboratoire MATEIS (INSA Lyon) et le CRITT M2T (Nancy).

Un second dossier porte sur le procédé de projection plasma sous très faible pression. Dans ce cadre, l'acquisition d'une torche (ou d'un système de torches) à injection axiale est envisagé, ce qui devrait permettre d'utiliser des divergents optimisés et de produire des jets quasi-unidirectionnels. Par ailleurs, le matériau pouvant alors être injecté très en amont dans le système, la modélisation de l'arc électrique et du couplage électromagnétique sera prévue dans le cadre de ce projet dans lequel nous interviendrions en collaboration avec le laboratoire SPCTS (Limoges) mais aussi SNECMA et SAINT-GOBAIN Coating-Solutions notamment.

Insertion dans la vie du laboratoire

I. Présentation

Comme indiqué précédemment, je réalise ma recherche au sein du laboratoire LERMPS de l'UTBM. L'activité de recherche du LERMPS est tournée vers les procédés d'élaboration de matériaux en couches minces par voie sèche (adaptation de la fonctionnalité des surfaces). Elle est centrée sur les techniques mettant en œuvre des jets de particules ou la condensation de vapeur.

L'activité comporte :

- des phases de modélisation, tant au niveau des processus d'élaboration qu'au niveau du comportement mécanique ou thermique du matériau élaboré,
- des phases d'étude des procédés d'élaboration de dépôts y compris en ce qui concerne les matériaux de départ (poudres et cibles) et les opérations connexes (préparations de surface, notamment par laser, maîtrise des flux thermiques par préchauffage ou par refroidissement cryogénique, parachèvement par usinage ou polissage, etc.),
- des phases de caractérisation des dépôts et revêtements, en particulier du point de vue des propriétés d'usage.

D'un point de vue infrastructure, l'activité est aujourd'hui organisée autour de deux plates-formes technologiques : une plate-forme projection thermique (site de Sévenans) et une plate-forme dépôts en phase vapeur (à Montbéliard).

A la suite du départ de Monsieur Michel Imbert (professeur à l'UTBM) de notre équipe, j'ai été l'animateur de la thématique modélisation au sein du LERMPS durant plusieurs années (jusqu'à août 2005) et membre du comité de direction du laboratoire à ce titre. Après plusieurs restructurations, le comité de direction du LERMPS est maintenant uniquement composé des membres Professeurs et HDR du laboratoire. Chacun d'entre eux possède une responsabilité (école doctorale, enseignements, plates-formes, contrats industriels, relations extérieures).

Même si je ne fais plus partie du comité de direction, mon rôle au sein du LERMPS est resté inchangé : je m'occupe de la quasi-totalité des activités de modélisation qui s'y déroulent, en particulier concernant les différents procédés de projection utilisés (plasmas d'arc sous air ou sous pression résiduelle de gaz neutre, HVOF, Arc-fil fixe ou rotatif).

II. Participations à des contrats de recherche

Au niveau contrats industriels, j'interviens dès qu'il y a une activité de modélisation de prévue. Ainsi, dès fin 1999, je suis intervenu dans le cadre d'un partenariat avec **SEP-SNECMA**. Dans ce cadre, j'ai écrit 3 rapports confidentiels [R15, R16, R17] durant ces 6 mois d'étude.

Je suis intervenu en 2001 sur un contrat industriel avec **MATRA BAe Dynamics** (MDBA) dans le cadre d'une étude mêlant expérimental (partie gérée par Patrick Gougeon, ECC) et modélisation (partie gérée par moi-même). Cette étude a porté sur la réalisation de tests thermiques sur différents matériaux afin de vérifier leur résistance (pour la partie expérimentale). J'ai personnellement travaillé sur la modélisation des flux transférés par un jet HVOF impactant le matériau à courte distance. La partie expérimentale de l'étude a ensuite été reprise par Christophe Verdy (IR). Me concernant, cette étude a donné lieu à 2 rapports industriels [R8-R13].

En 2002, j'ai travaillé dans le cadre d'un contrat avec **SIEMENS-AG** portant sur la simulation robotique hors-ligne. Là encore, ces travaux ont été réalisés avec plusieurs autres membres du LERMPS (Régis Bonnet et Olivier Landemarre, IR) chargés de la partie robotique (génération de trajectoires hors-ligne). Mon travail personnel a porté sur la définition du flux thermique déplacé par la torche plasma fixée sur le robot, dans différentes configurations (rapport industriel [R12]).

En 2002 et 2003, j'ai été amené à travailler sur un contrat en partenariat avec **S^t. GOBAIN** Pont-à-Mousson, portant sur la multi-injection de ZnAl dans un jet HVOF. Les modélisations que j'ai réalisées pour l'occasion étaient tridimensionnelles et incluaient la présence de plusieurs injecteurs. J'ai notamment étudié la déformation du jet HVOF provoquée par la multi-injection.

Cette activité a donné lieu à 2 rapports industriels (un rapport d'avancement et un rapport de synthèse) sur la période [R10-R11]. Le montant des travaux réalisés correspond à 51 000 € HT (volets modélisation et expérimentations).

En 2003 et 2004, j'ai réalisé un travail portant sur la modélisation du procédé arc-fil rotatif dans le cadre d'un partenariat avec le centre technique de Belchamp de **PSA Peugeot-Citroën**. Cette étude a porté sur le développement d'un procédé permettant la réalisation de revêtements dans des cylindres de blocs moteur destinés à l'industrie automobile. Il s'agit d'une technologie destinée à remplacer les blocs fonte (ou blocs aluminium + fourreaux) par des blocs alu revêtus intérieurement par projection. A l'échelle mondiale, plusieurs technologies sont utilisées dans cette optique à l'heure actuelle (procédé de projection plasma développé par Sulzer-Metco, procédé arc-fil type LDS développé par Daimler-Chrysler, etc.). J'ai encadré plusieurs stagiaires de DEA qui ont eux aussi travaillé sur cette activité. Cette étude a donné lieu à plusieurs rapports industriels [R7-R9], deux dépôts de brevets [B1-B2] dont je suis co-auteur, et j'ai récemment écrit un article en revue internationale portant sur le sujet [2]. A titre d'exemple, le montant des travaux réalisés en 2003 [R9] s'élevait à 12 260 € HT pour la partie modélisation.

En 2004/2005, j'ai contribué à une collaboration avec **SNECMA/SEP** (site de Vernon) portant sur l'étude des flux thermiques transférés par un jet HVOF. Cette collaboration s'est notamment traduite par une publication (congrès international) commune [22].

En 2004/2005 toujours, j'ai développé un code de calculs destiné à l'estimation de la conductivité thermique des dépôts élaborés par projection thermique. Cette activité est née d'une collaboration interne avec Ghislain Montavon (alors Maître de Conférences au LERMPS et aujourd'hui Professeur au laboratoire SPCTS de Limoges) et Guy Antou (alors doctorant à l'UTBM et aujourd'hui Maître de Conférences à Limoges). En effet, ces derniers ont émis des besoins à ce sujet concernant les barrières thermiques de type zircone yttrée. Elle a également impliqué d'autres partenaires comme Françoise Hlawka et Alain Cornet (Institut National de sciences appliquées de Strasbourg) ou encore Claude Becker (Laboratoire de technologies industrielles, Luxembourg). Par ailleurs, les applications que nous trouvons aujourd'hui à ce logiciel sont multiples comme mentionné dans mes activités de recherche. En particulier, je l'ai utilisé dans cadre du projet européen **NEWAC** (New Aero Engine Core Concept) et le développement d'une version tridimensionnelle du programme est prévu dans le cadre du futur projet européen **RISE** (Rub-In tolerant material design for Improved Seal Efficiency). Concernant son utilisation dans le cadre de NEWAC, j'ai par ailleurs écrit un article qui a été présenté lors d'ITSC 2008 à Maastricht [15] (partenariat **SULZER-METCO**).

En 2007, j'ai repris une activité de participation importante aux contrats industriels à travers une collaboration avec **AREVA NP**. Dans cette collaboration (dont je m'occupe à 80%), j'ai eu à concevoir un dispositif spécial dont l'utilisation est classée confidentielle.

J'ai tout d'abord conçu complètement le dispositif (montant relatif à cette action : 11 475 € HT). Cette première partie étant terminée, le dispositif a été fabriqué au laboratoire puis testé avec succès fin 2007. La dernière validation en présence de l'industriel a été réalisée en février 2008 (montant de cette seconde phase : 13 185 € HT). J'ai également écrit un rapport d'étude pour chacune des deux phases [R4-R5]. Suite aux discussions ayant suivi la dernière étape de validation, l'industriel a émis le souhait de passer à un troisième volet et d'aboutir fin 2008 à un test de fonctionnement en conditions réelles. Cette troisième phase (**3 690€ HT**) a en fait été réalisée avec succès en juin 2008 et il n'est pas impossible que ces travaux se poursuivent fin 2008 ou en 2009.

Début 2008, suite à une collaboration déjà initiée par ailleurs avec la société **Hydro Aluminium** (Danemark), j'ai formulé une proposition d'étude (5 100 € HT pour la partie modélisation) destinée à améliorer leur procédé de fabrication (type arc-fil). Cette proposition a reçu un avis favorable et a été validée par nos interlocuteurs. Le but principal de l'étude (réalisée mi 2008) a été d'améliorer les rendements de projection de leur procédé. Par ailleurs, deux nouveaux rapports ont encore été rédigés [R1, R3] à cette occasion.

III. Collaborations scientifiques

Concernant mes autres activités de collaborations internationales, j'ai entamé en 2006 un partenariat avec une équipe de l'**EMPA** (Thoune, Suisse) travaillant sur un procédé de fabrication de nano-poudres par plasmas d'induction. Cette collaboration s'est inscrite dans le cadre de la thèse de Monsieur Cornelis Schreuders (EMPA). Suivant ce procédé, un matériau précurseur est injecté axialement dans un plasma d'induction. Ce matériau est vaporisé puis se recondense lors du refroidissement du plasma en aval du générateur. Des nano-particules sont ainsi créées par nucléation, puis tendent à former des agglomérats par coagulation. Le processus est alors stoppé par trempe à l'aide d'un dispositif d'injection de gaz froid. Le but de notre collaboration était de mieux comprendre les phénomènes observés afin de mieux les maîtriser. Nous disposons pour ce faire du logiciel FLUENT de part et d'autre. J'ai développé un modèle incluant un couplage électromagnétique complet. Ce modèle est exprimé sous forme de vecteur potentiel magnétique et résout deux équations de conservation pour la composante tangentielle du vecteur potentiel (une pour sa composante réelle et une pour sa composante imaginaire). Les champs électrique et magnétique correspondants peuvent alors être déduits et les termes de couplage (effet Joule, forces de Lorentz) peuvent être calculés. Le modèle est par ailleurs établi en domaine étendu, ce qui signifie que les équations électromagnétiques sont résolues non seulement dans la zone du plasma mais aussi en dehors (inducteur et ambiance).

Le modèle développé permet ainsi de prendre en compte l'influence de la géométrie de l'inducteur (positionnement, nombre de tours) mais aussi de la fréquence du courant (3 MHz ou 13.56 MHz). Il permet de définir des conditions (débits de gaz, niveau de pression, etc.) qui permettent par exemple d'éviter la présence d'un écoulement inverse peu après la sortie d'injecteur (de par les forces de Lorentz).

A l'heure actuelle, cette collaboration a donné lieu à un article de conférence nationale [44] et à un article de congrès international [16] publié ensuite en revue internationale à comité de lecture [3]. Par ailleurs, cette activité portant sur la modélisation des plasmas d'induction complète parfaitement mes autres activités sur les plasmas d'arc.

Je terminerai cette partie par un tableau de synthèse des collaborations universitaires, scientifiques ou industrielles auxquelles j'ai participé à l'heure actuelle dans le cadre de mes activités au LERMPS. Seuls les partenariats ayant donné lieu à au moins un rapport industriel ou une conférence commune sont indiqués.

Tableau de synthèse des partenariats de recherche :

Procédé ou projet	Partenariats	Année	Production scientifique
APS	Univ. de Trollhättan, SE SIEMENS AG, DE	1999 2002	1 revue int. 1 rapport indus.
LPPS	SNECMA/SEP, Vernon	1999/2000	3 rapports indus.
Plasmas d'induction	EMPA, Thoune, CH	2006/2007	1 revue, 2 conf.
HVOF	MATRA BAe Dynamics	2001/2002	2 rapports indus.
	St. GOBAIN PAM	2002/2003	2 rapports indus.
	SNECMA/SEP	2004/2005	1 conf.
	GEMMA AREVA NP	2007 2007/2008	1 rapport indus. 2 rapports indus.
Arc-fil fixe	PRÉCI	2000	1 conf., 1 rapport
	Hydro Aluminium, DK	2008	2 rapports indus.
Arc-fil rotatif	PSA Peugeot-Citroën	2003/2005	1 revue, 1 conf. 2 brevets 2 rapports indus.
Logiciel conductivité	SPCTS, Univ. Limoges	2006/2007	3 conf.
	SULZER-METCO, CA (projet UE NEWAC)	2007/2008	1 conf.

Activités d'encadrement

Co-encadrements de thèses et de DEA :

Nom du diplômé : Jianfei LI Diplôme : doctorat		
Titre du travail : Modélisation des mécanismes de formation des contraintes résiduelles dans les dépôts élaborés par projection thermique.		
Date de début : 09/01	Date de fin : 22/12/05	% encadrement : 50
Composition du jury : Ghislain Montavon (SPCTS, Univ. Limoges, rapporteur), Caroline Richard (UTC, rapporteur), Christian Lexcellent (UFC, président du jury), Christian Coddet (UTBM, directeur de thèse), <u>Rodolphe Bolot</u> (UTBM, encadrant), François Peyraut (UTBM).		
Mention : Très honorable.		
Directeur de thèse : Christian CODDET (taux d'encadrement 50%)		
Production scientifique avec le diplômé : 6 actes de congrès internationaux		
Nom du candidat : Dmitry SOKOLOV Diplôme : doctorat		
Titre du travail : Contribution au développement de la projection sous très faible pression.		
Date de début : 11/03	Date de fin prévue : 03/2009	% encadrement : 50
Directeur de thèse : Didier KLEIN (taux d'encadrement 50%)		
Production scientifique avec le diplômé :		
1 publication en revue internationale et 1 acte de congrès international.		
Nom du diplômé : Irmantas GEDZEVICIUS Diplôme : stage cadre doctorat		
Sujet du travail : Etude expérimentale et modélisation portant sur le procédé arc-fil		
Date de début : 10/01	Date de fin : 06/02	% encadrement : 40
Production scientifique avec le diplômé : 1 acte de congrès international		
Encadrement réalisé lors de son séjour au laboratoire (9 mois) effectué dans le cadre de sa thèse (Université de Vilnius)		
Nom du diplômé : Jing DENG Diplôme : DEA		
Sujet du travail : Modélisations portant sur le procédé arc-fil rotatif.		
Date de début : 02/04	Date de fin : 07/04	% encadrement : 100
Nom du diplômé : Mhmad-led CHAHIN Diplôme : DEA		
Sujet du travail : Modélisations portant sur le procédé arc-fil rotatif.		
Date de début : 02/03	Date de fin : 07/03	% encadrement : 100
Nom du diplômé : Toufik BOUSHAKI Diplôme : DEA		
Titre du travail : Modélisation de l'injection radiale d'une poudre d'alliage Zn/Al dans un jet HVOF		
Date de début : 02/02	Date de fin : 06/02	% encadrement : 100
Nom du diplômé : Jianfei LI Diplôme : DEA		
Sujet du travail : Modélisation de la formation des contraintes dans les dépôts.		
Date de début : 02/01	Date de fin : 06/01	% encadrement : 100

Participations à des jurys de thèse ou de DRT :

Nom du diplômé : Jianfei LI Diplôme : doctorat		
Date de soutenance : 22/12/05	Lieu : UTBM	Qualité : membre
Titre du travail : Modélisation des mécanismes de formation des contraintes résiduelles dans les dépôts élaborés par projection thermique.		
Nom du diplômé : Arnaud BOURGIER Diplôme : DRT Qualité : membre		
Date de soutenance : 23/03/06	Lieu : CEA Valrhô – Site de Marcoule.	
Sujet du travail : Développement de torches à plasma pour un procédé de vitrification de déchets.		
Nom du diplômé : David Alexandre CABART Diplôme : DRT Qualité : <u>rapporteur</u>		
Date de soutenance : 19/12/06	Lieu : CREST Belfort	
Titre : Choix, implantation et développement d'un outil de simulation d'applications frigorifiques.		

Tâches administratives

Membre de la section 62 du CNU :

Depuis l'automne 2007, j'ai été nommé pour 4 ans, membre de la section 62 du CNU (collège MDC). Pour la première session à laquelle j'ai participé (janvier 2008), j'ai rapporté sur 26 dossiers de candidats à la qualification Maître de Conférences. J'ai également accepté d'animer le groupe de travail chargé de redéfinir les critères de qualification pour les prochaines sessions.

Membre élu du Conseil d'Administration de l'UTBM :

J'ai fait partie du conseil d'administration de l'UTBM représentant la catégorie des Maîtres de Conférences jusqu'à mai 2008. Le rôle de cette instance concerne notamment la définition de la politique globale de l'école. Dans ce cadre, j'ai également participé à un comité de pilotage réseau (CPR) de l'UTSEUS (cadre de la création d'une Université de Technologie à Shanghai) qui s'est déroulé à Paris mi-janvier 2008. Toujours à ce titre, j'ai également fait partie du conseil de discipline de l'UTBM dont j'ai été le secrétaire lors des 3 sessions auxquelles j'ai participé. Cette instance, composée de membres du CA, a pour rôle de juger des infractions commises au sein de l'établissement.

Membre du bureau du Département Mécanique et Conception :

Je suis actuellement membre (élu) du bureau du département Mécanique et Conception (GMC) de l'UTBM depuis novembre 2005 (réélu en 2007) : les objectifs de ce bureau concernent notamment la définition des nouvelles orientations à donner au département, la création de nouvelles Unités de valeur, etc.

Référé pour le compte de 3 revues internationales :

Journal of Materials Processing Technology / Journal of Thermal Spray Technology / Journal of Thermal Science

Activités en matière d'enseignement

Les enseignements auxquels je participe au sein de l'UTBM relèvent de la thermodynamique, la mécanique des fluides, la modélisation par calcul numérique et l'informatique. Au total, j'ai jusqu'à présent participé aux enseignements de huit UV différentes :

Les 3 auxquelles j'ai consacré le plus de temps ces derniers semestres sont :

- Modélisation numérique pour l'ingénieur 2 – Applications et codes industriels (2^{ème} cycle)

Responsable de la réalisation des cours, travaux dirigés (TD) et travaux pratiques (TP) de la partie "mécanique des fluides - volumes finis" de cette UV ayant pour but de former les étudiants à l'utilisation des codes industriels disponibles en calcul numérique (solides, fluides et thermique). J'ai entièrement rédigé la partie du cours (et les exercices de TD correspondants) portant sur l'application de la méthode des volumes finis en CFD.

Les TP, initialement réalisés sous PHOENICS, le sont aujourd'hui avec FLUENT. Je suis d'ailleurs l'interlocuteur de l'UTBM concernant les logiciels FLUENT et FLOWMASTER.

- Algorithmique : programmation pour l'ingénieur mécanicien (2^{ème} cycle)

Je dispense (en alternance avec Jean-Jacques Hunsinger, MDC à l'UTBM) les cours, TD et TP de cette UV ayant pour objectif de former l'ingénieur mécanicien à l'algorithmique et à la programmation. Les points abordés en fin de programme concernent notamment le codage des images, la résolution de systèmes d'équations ou encore la programmation orientée automates. On y réalise par exemple en TP (FORTRAN) l'affichage d'une image sur une fenêtre graphique.

- Thermodynamique (1^{er} cycle, cursus anglophone)

J'interviens souvent à différents niveaux dans le cadre de l'UV de thermodynamique de tronc commun (1^{er} cycle). Par ailleurs, j'assure notamment 50% des cours et des TD de cette UV dans sa version anglophone. En effet, depuis quelques temps, l'UTBM offre la possibilité aux étudiants qui le souhaitent de suivre une partie de leur cursus en anglais. Ceci est aussi attractif dans le cadre de l'accueil d'étudiants étrangers dont le niveau initial en français serait trop faible pour suivre un cours.

Liste des publications, communications et brevets entre 1997 et 2008

Le tableau de synthèse suivant relate l'ensemble de mon activité de publication au cours du temps. Dans ce tableau, les différentes catégories ont été subdivisées ainsi :

RICL : Revues Internationales avec Comité de Lecture

CIAS : Articles de Congrès Internationaux Avec Sélection sur Résumés

CN : Actes de Congrès Nationaux (CFM, Matériaux 2002 et 2006)

CO : Communications Orales

CA : Communications par Affiches

Divers : Congrès sans acte ou journées d'études avec actes

RI : Rapports Industriels

Les actes de congrès de type *International Thermal Spray Conference* sont classés dans la catégorie CIAS. A ce sujet, depuis 2003, ceux publiés par ASM bénéficient de plus, d'un processus de revue du texte complet (2 référés par article) ce qui nécessite l'envoi des articles dès le mois de novembre de l'année précédente.

La revue de type *PHOENICS Journal* (1997) a été prise en compte en tant que CIAS.

L'absence d'article sur 2000 est liée à mon statut d'Ingénieur de Recherche durant cette année.

Tableau de synthèse des publications par année :

Année	RICL	CIAS	CN	CO	CA	Divers	RI	Brevets
1997		3		2				
1998		2		1	1	1		
1999	1	1					1	
2000							3	
2001	1	3		4		1	1	
2002		2	1		2		2	
2003	1	6		3	4	1	2	
2004		5		2	2		2	
2005	4	3		1	1			2
2006	1	1	2	1	2	1		
2007	3	3	1	2		2	2	
2008	1	2					4	
Total	12	31	4	16	12	6	17	2

Publications dans des revues internationales avec comité de lecture :

- 1) R. Bolot, M.P. Planche, H. Liao, C. Coddet, "A Three-Dimensional Model of the Wire Arc Spray Process and its Experimental Validation", *Journal of Materials Processing Technology*, **200** (1-3) (2008), pp. 94-105.
- 2) R. Bolot, H. Liao, C. Mateus, C. Coddet, J.M. Bordes, "Optimization of a Rotating Twin Wire-Arc Spray Gun", *Journal of Thermal Spray Technology*, **16** (5-6) (2007), pp. 783-790.
- 3) R. Bolot, C. Coddet, C. Schreuders, M. Leparoux, S. Siegmann, "Modeling of an Inductively Coupled Plasma for the Synthesis of Nanoparticles", *Journal of Thermal Spray Technology*, **16** (5-6) 2007, pp. 690-697.
- 4) S. Costil, C. Verdy, R. Bolot, C. Coddet, "On the Role of Spraying Process on Microstructural, Mechanical and Thermal Response of Alumina Coatings", *Journal of Thermal Spray Technology*, **16** (5-6) (2007), pp. 839-843.
- 5) R. Bolot, D. Sokolov, D. Klein, C. Coddet, "Nozzle developments for thermal spraying at very low pressure", *Journal of Thermal Spray Technology*, **15** (4) (2006), pp. 827-833.
- 6) H.L. Liao, Y.L. Zhu, R. Bolot, C. Coddet, S.N. Ma, "Size distribution of particles from individual wires and the effects of nozzle geometry in twin wire arc spraying", *Surface and Coatings Technology*, **200** (2005) pp. 2123-2130.
- 7) R. Bolot, G. Antou, G. Montavon, C. Coddet, "A two-dimensional heat transfer model for thermal barrier coating average thermal conductivity computation", *Numerical Heat Transfer Part A: Applications*, **47** (9) (2005) pp. 875-898.

- 8) C. Mateus, S. Costil, R. Bolot, C. Coddet, "Ceramic/fluoropolymer composite coatings by thermal spraying – a modification of surface properties", *Surface and Coatings Technology*, **191** (2005) pp. 108-118.
- 9) G. Antou, G. Montavon, F. Hlawka, R. Bolot, A. Cornet, C. Coddet, F. Machi, "Thermal and mechanical properties of partially stabilized zirconia manufactured by hybrid plasma spray process", *High Temperature Material Processes*, **9** (1) (2005) pp. 109-125.
- 10) M.P. Planche, R. Bolot, C. Coddet, "In-flight Characteristics of Plasma Sprayed Alumina Particles: Measurements, Modeling and Comparison", *Journal of Thermal Spray Technology*, **12** (1) (2003) pp. 101-111.
- 11) R. Bolot, C. Coddet, M. Imbert, "On the use of a low-Reynolds extension to the Chen-Kim k- ϵ model to predict thermal exchanges in the case of an impinging plasma jet", *International Journal of Heat & Mass Transfer*, **44** (6) (2001) pp. 1095-1106.
- 12) P. Nylén, R. Bolot, A. Hansbo, C. Coddet, "Modelling and Measurements of Particle in-flight Characteristics of Atmospheric Plasma Sprayed Yttria Stabilised Zirconia", *Heat and Mass Transfer under Plasma Conditions*, The Annals of the New York Academy of Sciences, **891**, (1999) pp. 236-245.

Revues sans facteur d'impact :

- 13) R. Bolot, C. Coddet, M. Imbert, "The use of the PHOENICS code for Plasma Jet Modelling", *The PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics & its applications*, **10** (3) (1997) pp. 87-104.

Actes de congrès internationaux :

Pour les articles suivants, la mention OP figurant à droite à la fin de chaque article signifie que l'auteur figurant en **gras** a réalisé la présentation orale de l'article en question lors du congrès alors que la mention PP signifie qu'il a présenté l'article sous forme d'une affiche.

- 14) R. Bolot, O. Landemarre, C. Coddet, "Thermal fluxes transferred by HVOF jets produced by different guns", dans *Thermal Spray Crossing Borders* (proceedings de International Thermal Spray Conference 2008, 2-4 juin 2008, Maastricht, The Netherlands), Ed. E. Lugscheider, Pub DVS, DE, 2008.
- 15) R. Bolot, J.L. Seichepine, F. Vucko, C. Coddet, D. Sporer, P. Fiala, B. Bartlett, "Thermal Conductivity of AlSi/Polyester Abradable Coatings", dans *Thermal Spray Crossing Borders* (proceedings de International Thermal Spray Conference 2008, 2-4 juin 2008, Maastricht, The Netherlands), Ed. E. Lugscheider, Pub DVS, DE, 2008.

Récompense : cet article a reçu le prix du meilleur article de la session POSTER lors de la conférence. Il sera publié dans « Welding and Cutting » en 2009.

- 16) **R. Bolot**, C. Coddet, C. Schreuders, M. Leparoux, S. Siegmann, "Modeling of an Inductively Coupled Plasma for the Synthesis of Nanoparticles", pp. 179-184 de *Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions* (proceedings of 2007 International Thermal Spray Conference, 14-16 mai 2007, Beijing, Chine), Eds. B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.-C. Lau, C.-J. Li, R.S. Lima, G. Montavon, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2007. OP
- 17) **R. Bolot**, H. Liao, C. Mateus, C. Coddet, J.M. Bordes, "Optimization of a Rotating Twin Wire Arc Spray Gun", pp. 347-352 de *Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions* (proceedings of 2007 International Thermal Spray Conference, 14-16 mai 2007, Beijing, Chine), Eds. B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.-C. Lau, C.-J. Li, R.S. Lima, G. Montavon, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2007. OP
- 18) **S. Costil**, C. Verdy, R. Bolot, C. Coddet, "On the Role of Spraying Process on Microstructural, Mechanical and Thermal Response of Alumina Coatings", pp. 533-537 de *Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions* (proceedings of 2007 International Thermal Spray Conference, 14-16 mai 2007, Beijing, Chine), Eds. B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.-C. Lau, C.-J. Li, R.S. Lima, G. Montavon, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2007. OP
- 19) R. Bolot, D. Sokolov, **D. Klein**, C. Coddet, "Nozzle developments for thermal spraying at very low pressure", dans *Thermal Spray 2006: Science, Innovation and Application* (proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference, 15-18 mai 2006, Seattle, Washington, USA), Eds. B.R. Marple, C. Moreau, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2006. PP
- 20) **R. Bolot**, J. Li, C. Coddet, "Some key advices for the modeling of plasma jets using FLUENT", pp. 1367-1371 de *Thermal Spray connects: Explore its surfacing potential* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 2-4 mai 2005, Bâle, CH), Ed. E. Lugscheider, Pub. DVS, DE, 2005. PP
- 21) **G. Antou**, F. Hlawka, R. Bolot, G. Montavon, C. Coddet, A. Cornet, "Pore network architecture and thermal conductivity of Y-PSZ TBCs in situ remelted during their deposition", pp. 1424-1429 de *Thermal Spray connects: Explore its surfacing potential* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 2-4 mai 2005, Bâle, CH), Ed. E. Lugscheider, Pub. DVS, DE, 2005. PP
- 22) **R. Bolot**, C. Verdy, C. Coddet, D. Cornu, M. Choulant, "Analysis of thermal fluxes transferred by an impinging HVOF jet", pp. 992-997 de *Thermal Spray connects: Explore its surfacing potential* (proceedings

- de International Thermal Spray Conference, 2-4 mai 2005, Bâle, CH), Ed. E. Lugscheider, Pub. DVS, DE, 2005. OP
- 23) **R. Bolot**, J. Li, C. Coddet, "Modeling of thermal plasma jets: a comparison between PHOENICS and FLUENT", dans *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 10-12 mai 2004, Osaka, JAP), ISBN 3-87155-792-7, Pub. DVS, DE, 2004. OP
- 24) **R. Bolot**, D. Klein, C. Coddet, "Design of a nozzle extension for thermal spray under very low pressure conditions", dans *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 10-12 mai 2004, Osaka, JAP), ISBN 3-87155-792-7, Pub. DVS, DE, 2004. OP
- 25) J. Li, **R. Bolot**, H. Liao, C. Coddet, "Numerical study of residual stresses formation during the APS process", dans *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 10-12 mai 2004, Osaka, JAP), ISBN 3-87155-792-7, Pub. DVS, DE, 2004. PP
- 26) **R. Bolot**, J. Li, R. Bonnet, C. Coddet, "Heat transfers at the impact of a plasma jet on a two-layer material", dans *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 10-12 mai 2004, Osaka, JAP), ISBN 3-87155-792-7, Pub. DVS, DE, 2004. PP
- 27) G. Antou, R. Bolot, **G. Montavon**, C. Coddet, F. Hlawka, A. Cornet, "Prediction of thermal spray coating thermal conductivity by 2D heat transfer modelling", dans *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 10-12 mai 2004, Osaka, JAP), ISBN 3-87155-792-7, Pub. DVS, DE, 2004. PP
- 28) **R. Bolot**, D. Klein, C. Coddet, "Visualization and Modeling of the structure of a plasma jet under very low pressure conditions", article F4094 de PSFVIP 4 (Pacific Symposium on Flow Visualisation and Image Processing), 3-5 juin 2003, Chamonix, FR, 2003. OP
- 29) **R. Bolot**, J. Li, R. Bonnet, C. Mateus, C. Coddet, "Modeling of the Substrate Temperature Evolution during the APS Thermal Spray Process", pp 949-954 de *Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 5-8 mai 2003, Orlando, USA), Eds. C. Moreau and B. Marple, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2003. OP
- 30) J. Li, **R. Bolot**, H. Liao, C. Coddet, "On the use of SYSWELD and PHOENICS for the computation of heat transfer in a substrate exposed to an impinging plasma jet", pp. 971-976 de *Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 5-8 mai 2003, Orlando, USA), Eds. C. Moreau and B. Marple, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2003. OP+PP
- 31) **R. Bolot**, H. Deng, H. Liao, C. Coddet, "On the study of thermal fluxes transferred during the HEATCOOL® process", pp. 965-970 de *Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 5-8 mai 2003, Orlando, USA), Eds. C. Moreau and B. Marple, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2003. PP
- 32) I. Gedzevicius, **R. Bolot**, H. Liao, C. Coddet, A.V. Valiulis, "Application of CFD for Wire-Arc Nozzle Geometry Improvement", pp. 977-980 de *Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 5-8 mai 2003, Orlando, USA), Eds. C. Moreau and B. Marple, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2003. PP
- 33) **R. Bolot**, D. Klein, C. Coddet, "Effect of the chamber pressure on the structure of a plasma jet", pp. 1087-1092 de *Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 5-8 mai 2003, Orlando, USA), Eds. C. Moreau and B. Marple, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2003. PP
- 34) **R. Bolot**, M. Imbert, C. Coddet, "Three dimensional transient modeling of the substrate temperature evolution during the coating elaboration", pp. 979-984 de *Tagungsband Conference Proceedings* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 4-6 mars 2002, Essen), Ed. E. Lugscheider, Pub. DVS, DE, 2002. PP
- 35) **R. Bolot**, D. Klein, C. Coddet, "Influence of the nozzle design on the structure of a plasma jet under vacuum conditions", pp. 938-943 de *Tagungsband Conference Proceedings* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 4-6 mars 2002, Essen), Ed. E. Lugscheider, Pub. DVS, DE, 2002. PP
- 36) **R. Bolot**, M.P. Planche, C. Coddet, "Modeling of the Natural Gas HVOF Process", pp. 911-916 de *Thermal Spray 2001: New Surfaces for the New Millennium* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 28-30 mai 2001, Singapour), Eds. C.C. Berndt, K.A. Khor, E.F. Lugscheider, Pub. ASM Int., Materials Park, OH-USA, 2001. OP
- 37) **R. Bolot**, R. Bonnet, G. Jandin, C. Coddet, "Application of CAD to CFD for the Wire Arc Spray Process", pp. 889-894 de *Thermal Spray 2001: New Surfaces for the New Millennium* (proceedings de

International Thermal Spray Conference, 28-30 mai 2001, Singapour), Eds. C.C. Berndt, K.A. Khor, E.F. Lugscheider, Pub. ASM Int., Materials Park, OH-USA, 2001. OP

38) **R. Bolot**, V. Monin, C. Coddet, "Correlation between Simulations and Plasma Sprayed Coatings Properties", pp. 883-888 de *Thermal Spray 2001: New Surfaces for the New Millennium* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 28-30 mai 2001, Singapour), Eds. C.C. Berndt, K.A. Khor, E.F. Lugscheider, Pub. ASM Int., Materials Park, OH-USA, 2001. OP

39) **R. Bonnet**, R. Bolot, C. Coddet, "Simulation of the thermal spray process and off-line programming", pp. 519-526 de *Tagungsband Conference Proceedings* (proceedings de United Thermal Spray Conference, 17-19 mars 1999, Düsseldorf), Ed. E. Lugscheider, P.A. Kammer, Pub. DVS, 1999.

40) **R. Bolot**, V. Monin, C. Coddet, M. Imbert, "Mathematical Modeling of a Plasma Jet Impinging on a flat Structure", pp. 439-444 de *Thermal Spray: Meeting the Challenges of the 21st Century*, Vol. 1 (proceedings de International Thermal Spray Conference, 25-29 mai 1998, Nice) Ed. C. Coddet, Pub. ASM Int., Materials Park, OH-USA, 1998. PP

41) **M.P. Planche**, R. Bolot, O. Landemarre, C. Coddet, "Comparison between experimental and numerical results on in-flight particles characteristics", pp. 355-360 de *Thermal Spray: Meeting the Challenges of the 21st Century*, Vol. 1 (proceedings de International Thermal Spray Conference, 25-29 mai 1998, Nice), Ed. C. Coddet, Pub. ASM Int., Materials Park, OH-USA, 1998. OP

42) **R. Bolot**, C. Coddet, M. Imbert, "Mathematical modeling of a free plasma jet discharging into air and comparison with probe measurements", pp. 549-555 de *Thermal Spray: A United Forum for Scientific and Technological Advances* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 15-18 septembre 1997, Indianapolis), Ed. C.C. Berndt, Pub. ASM Int., Materials Park, OH-USA, 1997. OP

Actes de congrès nationaux :

43) G. Antou, R. Bolot, G. Montavon, "Transferts de masse et de chaleur dans des couches poreuses épaisses de céramiques élaborées par projection thermique", 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, (Grenoble, 27-31 août), 2007.

44) **R. Bolot**, C. Schreuders, M. Leparoux, S. Siegmann, C. Coddet, "Modélisation de la synthèse de nanoparticules par plasma d'induction haute fréquence", actes du colloque MATERIAUX 2006 (Dijon, 13-17 novembre), 2006. PP

45) **R. Bolot**, G. Antou, G. Montavon, C. Coddet, "Calcul numérique de la conductivité thermique de dépôts de zircone yttrée élaborés par projection thermique", actes du colloque MATERIAUX 2006 (Dijon, 13-17 novembre), 2006. OP

46) D. Klein, Z. Salhi, L. Dembinski, R. Bolot, P. Gougeon, T. Grosdidier, H. Aourag, C. Coddet, "Développement de dépôts par projection thermique à très faible pression", actes du colloque MATERIAUX 2002 (Tours, 21-26 octobre), Ed. UTBM, 2002.

Autres communications orales ou par affiches lors de congrès mais sans actes :

47) R. Bolot, G. Antou, **G. Montavon**, "Quantification of heat and mass transfers through thick thermal-sprayed porous layers", EUROMAT 2007, Nuremberg, DE (10-13 septembre 2007). OP

48) **JL. Seichepine**, R. Bolot, D. Sporer, P. Fiala, B. Bartlett, C. Coddet, "Measurement and numerical simulation of thermal and mechanical properties of AlSi-Polyester abradable coatings", EUROMAT 2007, Nuremberg, DE (10-13 septembre 2007). PP

Participations à des journées d'études avec actes :

49) **R. Bolot**, J. Li, "Effets thermiques de l'apport de matière en projection thermique", Recueil de conférences de la journée technique *Fabrication rapide de pièces à partir de poudres métalliques*, UTBM, Site de Sévenans, 22 juin 2006, pp. 23-28. OP

50) **C. Verdy**, R. Bolot, H. Deng, P. Gougeon, C. Coddet, "Les Plasmas Thermiques", actes des 2^{èmes} journées du réseau Plasmas Froids, Bonascre, 12-15 octobre 2003. OP

51) **R. Bolot**, M. Imbert, C. Coddet, "Transferts thermiques à l'impact d'un jet de plasma", actes des Journées Franco-Allemandes organisées par l'ATTT et l'AWT et intitulées *Le traitement thermique commence à la surface*, Belfort, 19/20 avril 2001. OP

52) **B. Sério**, **R. Bolot**, V. Pina, "Etude expérimentale et numérique des champs de température de particules dans les jets de plasmas", actes des journées d'études de la SFT intitulées *Mesures de températures dans les écoulements (éventuellement réactifs, multiphasiques, ...) par méthodes optiques*, PARIS, 21 janvier 1998. OP

Brevets :

B1) Christian Coddet, Rodolphe Bolot, Jean-Michel Bordes, Cornelis Meekel.
"Dispositif de projection de particules métalliques par arc électrique entre deux fils", BREVET D'INVENTION B1, n° de publication : 2 866 901, n° d' enregistrement national : 04 02049, date de dépôt : 27/02/2004, date de mise à disposition du public de la demande : 02/09/2005.

B2) Christian Coddet, Rodolphe Bolot, Jean-Michel Bordes, Cornelis Meekel.
"Dispositif de projection de particules métalliques par arc électrique entre deux fils", BREVET D'INVENTION B1, n° de publication : 2 866 902, n° d' enregistrement national : 04 02050, date de dépôt : 27/02/2004, date de mise à disposition du public de la demande : 02/09/2005.

Rapports principaux

R1) R. Bolot, C. Verdy, "CFD study of arc spray of Zn wires to improve the deposition efficiency with a Metallisation gun", Rapport industriel ref. 08065-080718, Commande HYDRO ALUMINIUM, (33 pages), (07/2008).

R2) C. Verdy, R. Bolot, C. Coddet, "Etude conceptuelle pour la réalisation de cyclages thermiques à haut flux et essais de validation", Rapport industriel ref. 08013-080720, Commande SNECMA-DMS n°111800038915, (52 pages) (07/2008).

R3) C. Verdy, R. Bolot, H. Liao, C. Coddet, "Study on arc-wire Zn particles", Rapport industriel ref. 07030-080520, Commande HYDRO ALUMINIUM, (12 pages) (05/2008).

R4) R. Bolot, C. Adam, Rapport industriel ref. LERMPS/PERSEE 07011-080529, Commande AREVA n°72A/1007017574/07.09.2007/RVN, (47 pages) (05/2008).

R5) R. Bolot, Rapport industriel ref. LERMPS/PERSEE 07011-070504, Commande AREVA n°72A/1007 005474/01.03.2007/RVN, (51 pages) (05/2007).

R6) O. Landemarre, R. Bolot, C. Coddet, Rapport Industriel Ref. 07007-151007, commande GEMMA n°07040004CLB (10/2007).

R7) R. Bolot, J. Deng, "Modélisation et optimisation de l'atomisation de fils fondus par le procédé arc-fil rotatif", Rapport industriel ref. 04007-04016, commande PSA n°24113489 (10/2004).

R8) R. Bolot, C. Verdy, C. Coddet, "Modélisation des flux transférés par une torche HVOF sur une surface plane – Comparaison avec des résultats expérimentaux", Rapport industriel ref. 04021-040630, commande MDBA (06/2004).

R9) M.I. Chahin, R. Bolot, C. Mateus, H. Liao, "Etude et réalisation de dépôts à l'intérieur de cylindres par torche tournante à arc électrique pour application dans les blocs moteurs – Configuration des buses de déviation", Rapport industriel ref. 4963.2003/02019, commande PSA n°3810011857 (10/2003).

R10) P. Bertrand, R. Bolot, P. Gougeon, C. Coddet, "Etude sur le comportement de particules de Zn-Al injectées dans une flamme HVOF, rapport de synthèse", Rapport industriel ref. 02018-030301, commande Saint-Gobain PAM n°02.03 (03/2003).

R11) R. Bolot, "Influence de la multi-injection sur le dépôt de ZnAl en HVOF", Rapport industriel ref. 02018-021031 (10/2002).

R12) R. Bonnet, O. Landemarre, R. Bolot, C. Coddet, "Thermal Spray Coatings Simulation Step 2", Rapport industriel n°01026-020830, commande SIEMENS AG n°0001/127276 (08/2002).

R13) P. Gougeon, R. Bolot, C. Coddet, "Tests thermiques sur pièces composites de propulseur", Rapport industriel ref. 01007-010615, commande MATRA BAe Dynamics n°122028.1 (06/2001).

R14) R. Bolot, "Modélisation tridimensionnelle du procédé arc/fil : application au pistolet TAFA 9000", Rapport d'activité ref. N°00014-001003, commande PRé CI 625 R (09/2000).

R15) R. Bolot, "Modélisation tridimensionnelle de l'injection du gaz porteur dans une tuyère de forme LAVAL", Rapport d'activité ref. N°98021-000229, commande SEP-SNECMA 874694 (03/2000).

R16) R. Bolot, "Modélisation des écoulements de plasma sous pression résiduelle de gaz neutre II", Rapport d'activité ref. N°98021-000130, commande SEP-SNECMA, (01/2000).

R17) R. Bolot, "Modélisation des écoulements de plasma sous pression résiduelle de gaz neutre", Rapport d'activité ref. N°98021-991012, commande SEP-SNECMA, (10/1999).

R18) R. Bolot, "Composition des plasmas à l'équilibre chimique, propriétés thermodynamiques, coefficients de transport", Rapport d'activité n°2 (06/1996).

R19) R. Bolot, "Modélisation de l'écoulement dans une buse de type HVOF" (sujet traité), Rapport d'activité n°1 (12/1995).

R20) R. Bolot, "Modélisation de la propagation et visualisation des ondes acoustiques dans les conduits de section variable", Rapport de stage de DEA (1994).

Partie 2

Développement des activités de recherche

Thème I : Modélisations diphasiques : interactions jet/particules

L'état des particules au moment de leur impact sur la surface à revêtir agit fortement sur la qualité des dépôts produits. Par exemple, Il est généralement observé que le taux de porosité diminue avec l'augmentation de la vitesse des particules.

D'une manière générale, un dépôt élaboré par projection thermique est constitué d'un enchevêtrement de lamelles (splats) incluant de multiples porosités et, suivant la technique de projection et le matériau projeté, des particules partiellement fondues et des oxydes.

De nombreux travaux ont donc été menés dans le but d'étudier les interactions jet/particules et de prédire l'état des particules (température, taux de fusion, vitesse) au moment de leur impact sur le substrat ou les couches précédemment déposées. Les premiers modèles développés (portant sur les procédés APS et HVOF) sont de type Eulérien Lagrangien et ne permettent pas de prendre en compte l'effet de la phase particulaire sur l'écoulement primaire. Cette approche permet de décrire plus précisément le devenir de chaque particule : propagation de la chaleur et du front de fusion au sein même d'une particule isolée. Cet avantage est tout à fait intéressant notamment pour les matériaux réfractaires comme les céramiques ou les polymères. C'est d'ailleurs pour ce type de matériaux que 2 articles ont été publiés en revues internationales avec comité de lecture sur le sujet de la description des interactions jet/particules portant sur le procédé APS [1-2]. D'autres articles portant sur cette thématique ont également été publiés lors de congrès internationaux aussi bien pour le procédé APS [3] que l'HVOF [4].

Plus récemment, un modèle couplé (permettant la prise en compte de l'effet de charge sur l'écoulement) a été utilisé pour le procédé arc fil dans le cas d'un dispositif de type TAFE 9000 [5]. Dans cet article, un second challenge était d'ordre géométrique : en arc fil, les outils utilisés sont relativement complexes et incluent de nombreuses pièces. Il a été mis en évidence que la complexité interne de l'outil agit fortement sur les champs externes des grandeurs caractéristiques principales de l'écoulement. De ce fait, le modèle doit par ailleurs être tridimensionnel et inclure un minimum d'approximations géométriques.

Tous les travaux menés l'ont été dans le cadre de collaborations internes au laboratoire.

Résultats principaux obtenus à travers la synthèse de 3 articles en revue internationale

1. Propagation du front de fusion dans une particule isolée

Comme indiqué ci-dessus, les modèles développés pour les applications de projection de poudre en APS ont été élaborés dans le but de suivre le devenir de particules individuelles. Ils permettent donc de suivre la propagation du front de fusion dans une particule isolée tout au long de sa trajectoire dans le jet. On met ainsi en évidence que si les particules les plus petites sont rapidement fondues, il n'en est pas de même pour les plus grosses, notamment dans le cas de matériaux réfractaires tels que l'alumine.

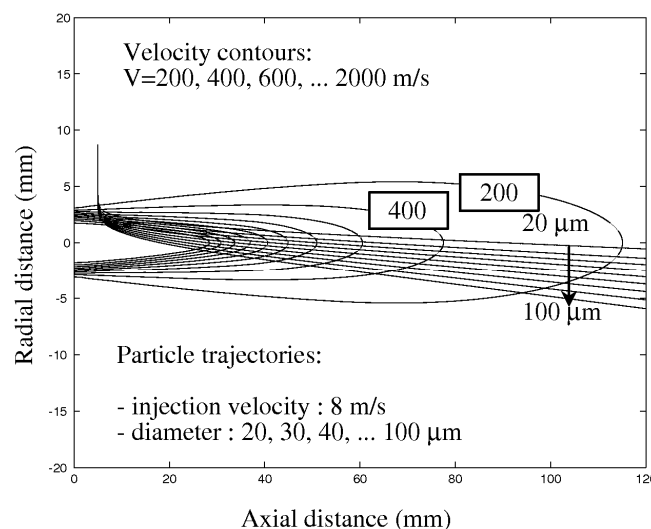


Figure I.1 : Iso vitesses et trajectoires de particules d'alumine de différentes tailles injectées avec une vitesse de 8 m/s dans le jet de plasma [1].

La figure 1 présente les lignes iso vitesses et les trajectoires de particules d'alumine injectées dans un jet de plasma constitué d'un mélange argon/hydrogène [1]. Les champs des grandeurs caractéristiques du jet (vitesses, température, etc.) ont été calculés à l'aide de PHOENICS (logiciel CFD commercial, CHAM, Wimbledon, UK) et tous les développements nécessaires ont été réalisés en FORTRAN. Pour une même vitesse d'injection, les particules les plus grosses pénètrent plus dans le jet relativement aux plus petites. D'une manière générale, il existe en effet une ségrégation des particules dans le jet de plasma en APS. La figure 2 présente les isothermes et trajectoires de particules d'alumine de 60 μm injectées à différentes vitesses dans le même jet de plasma. Plus la vitesse d'injection est élevée, plus les particules pénètrent dans le jet.

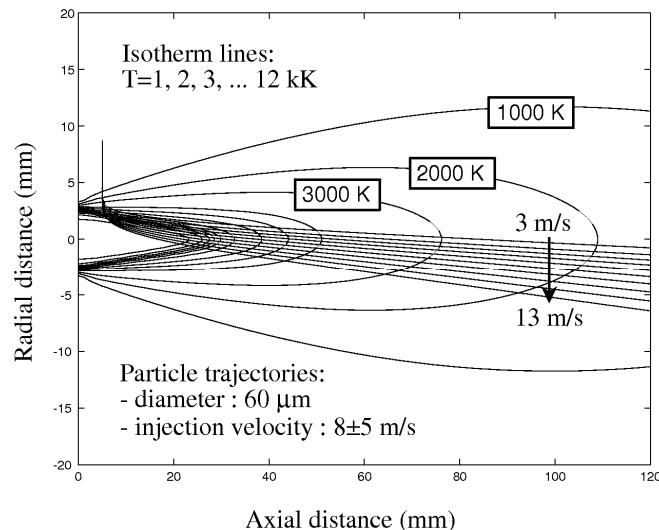


Figure I.2 : Isothermes et trajectoires de particules d'alumine de 60 μm injectées dans le jet de plasma avec différentes vitesses [1].

La figure 3 présente l'évolution des températures de surface et de cœur de particules de différentes tailles injectées dans le jet de plasma avec une vitesse de 8 m/s (particules de la figure 1) en fonction de leur position axiale dans le jet. Pour les particules les plus petites, le front de fusion atteint rapidement le cœur de la particule. Au contraire, les particules de taille supérieure à 50 μm ne sont pas complètement fondues à la distance de 100 mm, correspondant à la distance de projection. Ainsi, il est probable que l'on retrouvera des particules partiellement fondues dans le dépôt élaboré avec ces paramètres.

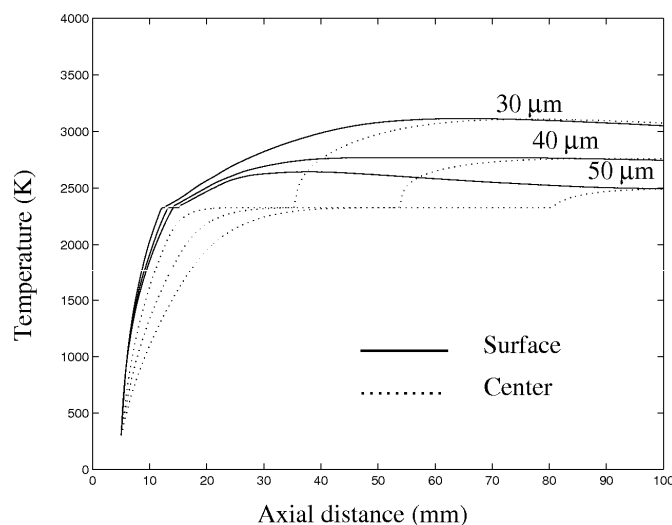


Figure I.3 : Evolution des températures de surface et de cœur de particules de différentes tailles injectées dans un jet de plasma avec une vitesse de 8 m/s [1].

Une étude très similaire portant sur la projection de matériaux polymères a ensuite été réalisée dans le cadre d'une collaboration avec Mademoiselle Crisalia MATEUS, doctorante au laboratoire à l'époque [2]. Les résultats principaux de ces deux études portent donc sur le suivi de la propagation du front de fusion dans une particule isolée. Toutefois, dans le modèle alors développé, le couplage bidirectionnel n'a pas été implémenté, ce qui signifie que les particules injectées dans le plasma n'ont pas d'effet sur le jet. Dans le cas de fortes charges, la modification des champs de vitesse et le refroidissement local du jet lié à l'injection des particules n'est donc pas pris en compte.

2. Prise en compte de l'effet de charge : application au procédé Arc fil

En 2008, une étude portant sur la modélisation du procédé Arc fil pour un pistolet de type TAFE 9000 (similaire au PRAXAIR 9000) a été réalisée dans le cadre d'une collaboration interne avec Marie-Pierre PLANCHE et Hanlin LIAO [5]. Dans cette étude, le calcul tridimensionnel de l'écoulement à l'intérieur et à l'extérieur du pistolet a été réalisé et les interactions jet/gouttelettes sont calculées à l'aide de deux méthodes différentes. Suivant la première méthode, le couplage est négligé (pas d'influence de la phase particulaire sur l'écoulement primaire) alors que suivant la seconde, l'effet de charge peut être quantifié car l'effet des gouttelettes sur le jet est pris en compte. L'étude en question inclut à la fois mesures expérimentales et modélisations. Ainsi, les particules ont été collectées à la distance de projection et les distributions granulométriques ont été mesurées expérimentalement puis réinjectées dans le modèle. De ce fait, aucun modèle d'atomisation du fil n'est nécessaire. Le modèle a ensuite été validé sur la base de comparaisons entre calculs et mesures de vitesse des particules en vol.

De par son faible coût et sa vitesse de déposition élevée, le procédé de traitement de surface de type Arc fil est très largement répandu pour la projection des métaux ou alliages métalliques : il est notamment utilisé dans de nombreuses applications contre la corrosion et l'usure. Les outils conventionnels utilisent deux bobines de fil directement reliées à l'anode et à la cathode d'un générateur de courant continu. Les deux fils avancent régulièrement et sont guidés vers un point où un jet de gaz atomise les parties progressivement fondues au niveau de l'arc électrique généré (température d'environ 6000K). Des gouttelettes sont ainsi formées et projetées sur la surface à revêtir. Le principe du procédé est donc simple mais les propriétés des revêtements fabriqués dépendent significativement des paramètres de projection toutefois moins nombreux qu'en projection plasma. L'influence des paramètres les plus importants, comme le design de l'outil ou la nature du gaz d'atomisation est souvent discutée dans la littérature spécialisée mais le savoir-faire demeure encore aujourd'hui principalement basé sur la pratique et l'expérience car très peu de travaux de modélisation portent sur l'étude de ce procédé. La compréhension des différents phénomènes influençant le procédé est donc devenue essentielle en vue d'améliorations complémentaires. Ici, le code de calcul CFD FLUENT (Lebanon, NH, USA) a été utilisé pour réaliser l'étude tridimensionnelle du procédé dans le cas d'un outil utilisé industriellement.

De nombreuses études sont actuellement consacrées à la modélisation des procédés de projection plasma ou HVOF. Beaucoup d'auteurs utilisent encore des modèles bidimensionnels s'appliquant convenablement pour ces procédés dans pas mal de cas. Quelques études portent aussi sur des modèles tridimensionnels avec des géométries relativement simples (exemple : ensemble formé d'une buse axiale et d'un injecteur radial). Le cas du procédé Arc fil est plus particulier : la plupart des outils commerciaux sont composés de nombreux éléments si bien que l'ensemble présente une géométrie relativement complexe. Au final, dans la plupart des cas, un modèle bidimensionnel ne peut représenter convenablement le procédé.

En 2001, nous avons utilisé le module CAD to CFD de PHOENICS (logiciel CFD commercial) pour calculer l'écoulement à travers un pistolet de type TAFE 9000 [6]. Avec ce module, l'ensemble de la tête du pistolet est directement importé (au format STL) et est placé dans un domaine de calcul composé d'hexaèdres réguliers. Certaines des cellules sont ainsi bloquées par la présence du solide. Dans un second temps, les résultats calculés sont visualisés dans le module de réalité virtuelle du logiciel (Virtual Reality Environment). Avec cette approche,

la mise en place du problème est rapide en supposant que le fichier STL nécessaire ait été préalablement généré à l'aide d'un logiciel de CAO. D'un autre côté, une augmentation du raffinement du maillage est requise ce qui peut mener à des temps de calcul importants. De plus, aucune possibilité n'est prévue pour la prise en compte d'une seconde phase.

En 2008, nous avons utilisé le logiciel FLUENT (version 6.2.16) au lieu de PHOENICS [5]. FLUENT permet d'utiliser des maillages non structurés constitués de cellules tétraédriques par exemple. La première étape est alors de réaliser la géométrie souhaitée sous GAMBIT (package CAO/maillage associé à FLUENT) ou de l'importer si elle est déjà disponible par ailleurs (formats STEP ou IGES préférentiellement). Quelques petits aménagements doivent ensuite être généralement réalisés : pour cette application, nous en avons réalisé un seul dans le but d'éviter la génération de cellules ultraplates dans l'espace réservé aux guide-fils (problème lié à la présence d'une pièce de révolution tangente à un plan).

La figure 4 présente les différents éléments de la tête d'un pistolet de type TAFE 9000 [5] :

- enveloppe en aluminium, vissée sur la tête du pistolet
- convergent de couleur verte, équipé de 4 petites fentes espacées tous les 90° pour le passage du gaz secondaire
- diffuseur primaire de type croix longue
- guide-fils vissés dans les connecteurs et venant s'insérer dans le diffuseur primaire.

En réalité, différentes options sont disponibles pour le diffuseur primaire (types croix ou fente, longue ou courte), et pour le convergent de couleur (diamètre différent en fonction de la couleur). Ici, le diffuseur de type croix longue a été représenté avec le convergent vert (diamètre 0.3 pouces, soit 7.62 mm). Il s'agit de la configuration utilisée lors des manipulations expérimentales.

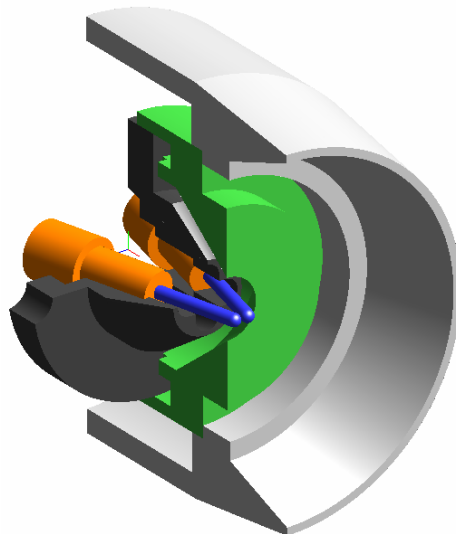


Figure 1.4 : CAO de l'ensemble des pièces composant la tête du pistolet TAFE 9000 [5].

Les modèles implémentés et la mise en place des conditions aux limites ont été présentés plus précisément dans [5]. En particulier, différentes fonctions ont été programmées de sorte à définir les coefficients de transport de l'air comprimé de manière adéquate, ou encore la relation exprimant le coefficient de traînée des gouttelettes en fonction du nombre de Reynolds. Les routines nécessaires (langage C) ont d'ailleurs été fournies.

Le matériau projeté est le fil TAFE de type 38T de diamètre 1.6 mm (98% Fe, 0.8% C, 0.7% Mn). La tension était de 31 V environ dans chaque cas et le courant d'arc électrique a été ajusté à différentes intensités (de 100 à 250 A). Des données expérimentales ont été utilisées pour établir une relation entre le débit de fil et l'intensité de courant :

$$D \text{ (kg/h)} = 0.002986 \, I^{1.387} U^{0.1137}$$

où D représente le débit de matière injectée en kg/h, I est le courant d'arc (A) et U désigne la tension (V).

L'outil de mesure DPV a été utilisé pour caractériser le jet de particules : il permet de mesurer les principales caractéristiques des particules en vol comme la vitesse, la température ou bien encore le diamètre. Le principe des mesures est basé sur la détection des radiations des particules chaudes à l'aide d'un capteur. La vitesse est le paramètre le plus fiable : elle est déduite du temps mis pour percevoir le signal émis par une particule passant devant un dispositif à deux fentes. La température est déduite du ratio d'intensité du signal mesuré à deux longueurs d'ondes distinctes, en utilisant l'hypothèse de corps gris. Le diamètre est quant à lui déduit de l'intensité du signal et exige une calibration en vue de l'obtention de résultats réalistes. A ce sujet, la distribution granulométrique de la poudre est généralement utilisée pour définir un facteur correcteur à appliquer au diamètre initial non corrigé.

Dans le cadre de notre étude, les particules ont été collectées à la distance de projection de 200 mm et le coefficient correcteur a été estimé à partir du diamètre moyen des particules collectées et du diamètre moyen non corrigé initialement fourni par le DPV (le facteur correcteur étant le rapport des 2). Une fois la correction appliquée, le diamètre moyen corrigé du DPV correspond au diamètre moyen de la granulométrie des particules collectées. En pratique, cette étape a été réalisée par analyse d'image et mesure du diamètre des particules sur plus d'une centaine d'images pour chaque ensemble de paramètres. Cette méthode est donc valide uniquement si l'on suppose que toutes les particules sont indifféremment détectées.

Au final, le tableau 1 résume les paramètres de distribution granulométrique déduits pour les différentes intensités de courant et issus du diamètre DPV corrigé. Le même facteur correctif a été appliqué pour l'ensemble des différents paramètres. La deuxième colonne donne le diamètre moyen en terme de fraction numérique alors que les deux colonnes suivantes donnent les paramètres de la distribution de Rosin-Rammler déduits après interpolation réalisée à l'aide du solveur Excel (utilisé pour minimiser l'erreur entre résultats expérimentaux et corrélation analytique). D'après ce type de distribution, la fraction massique des particules ayant une taille supérieure à d est donnée par :

$$y(d) = \exp \left[- \left(\frac{d}{\bar{d}} \right)^n \right]$$

où $\bar{d}$ et n représentent le diamètre moyen et le paramètre d'étalement de la distribution respectivement. En réalité, $\bar{d}$ est défini de sorte que la fraction massique des particules ayant une taille supérieure à $\bar{d}$ soit de 36.9%. 63% des particules (en fraction massique) ont donc une taille inférieure à ce paramètre, ce qui signifie que sa valeur est logiquement supérieure au plus traditionnel d_{50} .

Tableau 1.1 : Paramètres de distribution granulométrique aux différentes intensités de courant ($P=0.414$ MPa =60 PSI)

I (A)	$\bar{d}_n$ (μm)	$\bar{d}$ (μm)	n
100	18.8	33.4	3.20
175	20.3	35.3	3.61
250	20.5	36.7	3.56

La figure 5 présente les distributions granulométriques mesurées (diamètre DPV corrigé) en terme de fraction massique ainsi que leur interpolation obtenue à l'aide d'une corrélation de type Rosin-Rammler. On peut conclure au vu de l'allure correcte de l'interpolation, qu'une distribution de type Rosin-Rammler convient tout à fait à l'application.

Par ailleurs, bien qu'il existe une petite diminution du diamètre moyen des particules avec l'intensité de courant, les différences en fonction des paramètres restent modérées, ce qui témoigne d'une faible influence de l'intensité de courant sur la taille des gouttelettes atomisées. Bien sûr, les courbes représentées sur la figure 5 correspondent à $1-y(d)$.

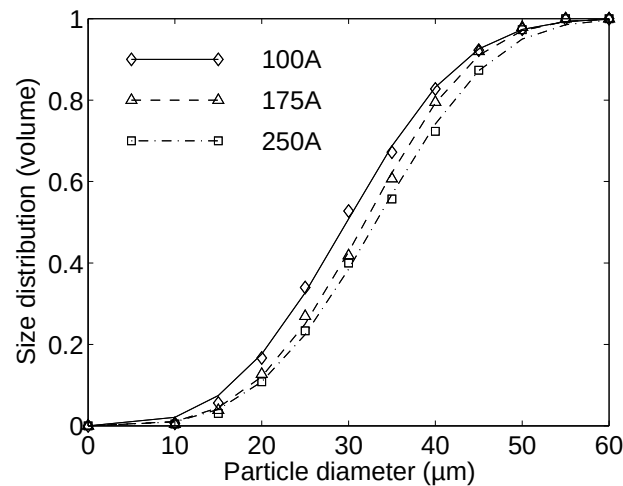


Figure I.5 : Influence de l'intensité de courant sur la distribution granulométrique - mesures (losanges, triangles et carrés) et courbes d'interpolation de type Rosin-Rammler [5].

Les résultats principaux obtenus par modélisation sont multiples : tout d'abord le jet externe produit n'a rien à voir avec celui qui serait issu d'un orifice circulaire de même diamètre en utilisant une hypothèse d'axisymétrie. A titre d'exemple, la figure 6 présente les champs de vitesse calculés dans les deux plans de symétrie du système pour une pression d'alimentation de 0.414 MPa et un courant d'arc de 100A. Le modèle de turbulence k- ϵ standard a été utilisé avec un nombre de Prandtl turbulent de 0.85. La vitesse augmente le long de l'axe du pistolet et on remarque l'écoulement de l'air secondaire à travers les 4 orifices permettant son passage autour du diffuseur de type croix longue. Il existe une zone de très forte vitesse juste autour du point d'intersection des fils. Cette zone de forte vitesse présente une forme en V dans le plan vertical (déviations de l'écoulement liée à la présence des fils). On note également une différence significative au niveau de l'expansion du jet dans les plans vertical et horizontal. En particulier le jet est nettement plus étalé dans le plan des fils que dans le plan vertical. Cette différence avait déjà été notée dans l'étude réalisée précédemment avec PHOENICS [6]. A ce sujet, ce n'est pas seulement la présence des fils qui explique ce résultat car nous avons depuis pu vérifier, pour un autre pistolet de géométrie différente, que ce résultat est inversé : à savoir que pour un pistolet de marque METALLISATION, l'expansion du jet externe est plus importante dans le plan perpendiculaire à celui des fils [7]. Ainsi, le design des éléments internes est essentiel.

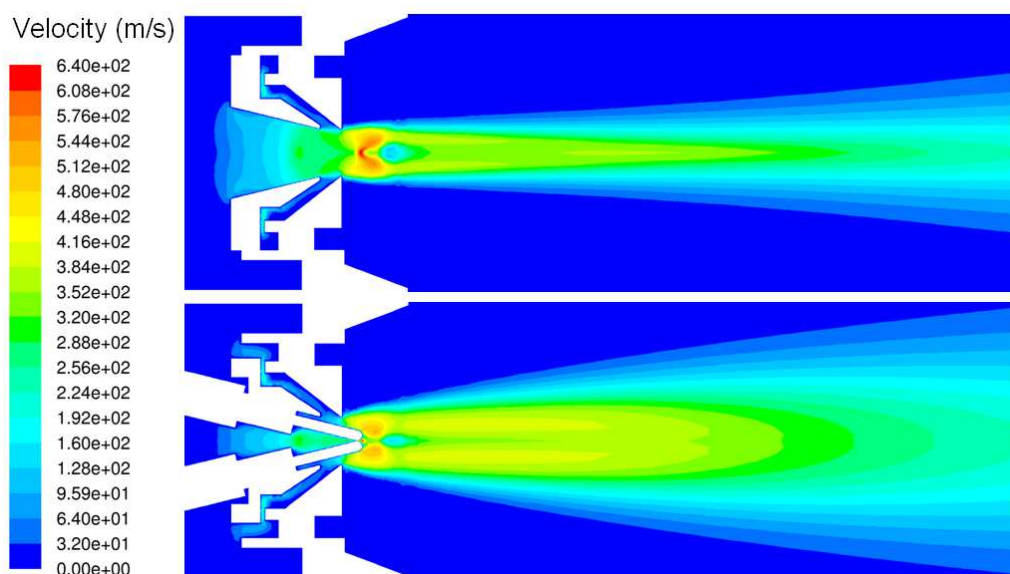


Figure I.6 : Champs de vitesse (norme) dans le plan vertical (dessus) et le plan horizontal (bas) sur un domaine présentant une étendue axiale de 100 mm au-delà du plan de sortie du carter en aluminium [5].

La figure 7 présente les trajectoires des gouttelettes fondues visualisées dans les deux plans de symétrie et colorées en fonction de leur vitesse axiale pour le cas précédent, soit une charge en matière projetée de 2.62 kg/h correspondant à une intensité de 100A. La dimension axiale du domaine extérieur est de 200 mm. L'étalement du jet de matière est plus faible dans le plan vertical (dessus, vue de côté) que dans le plan horizontal (bas, vue de dessus). Plus précisément, l'angle de divergence est d'environ 12° dans le plan vertical contre 20° dans le plan horizontal. Il est à noter que les gouttelettes situées au cœur du jet sont ici masquées par celles situées en périphérie. On distingue tout de même quelques trajectoires rouges au centre, ce qui témoigne de la présence de particules possédant une vitesse plus élevée.

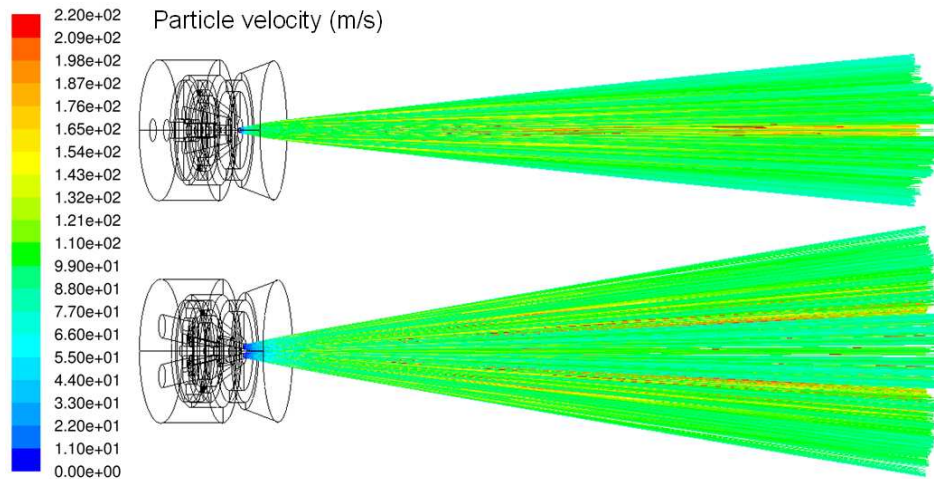


Figure I.7 : Trajectoires des gouttelettes visualisées dans le plan vertical (dessus) et le plan horizontal (bas) [5].

Le modèle $k-\epsilon$ standard est encore aujourd'hui le plus renommé et le plus couramment utilisé. Néanmoins, l'une de ses principales faiblesses concerne le calcul des jets ronds pour lesquels il est considéré comme inadapté car sous-estimant la longueur du cœur potentiel de manière importante (anomalie des jets ronds). Le modèle $k-\epsilon$ Realizable particulièrement adapté, quant à lui, à la modélisation des jets ronds a donc également été testé. La figure 8 illustre les résultats obtenus au niveau des profils axiaux de la vitesse de l'écoulement d'air avec ces deux modèles pour l'intensité de 100 A : le cœur du jet présente des longueurs quasi identiques pour les deux modèles et les vitesses prédites deviennent légèrement supérieures avec le modèle standard à partir d'une distance de 120 mm. En fait, il semble que la perturbation de l'écoulement occasionnée par les fils et les éléments amonts soit suffisante pour annihiler les différences habituellement observées entre les deux modèles, ce qui indique une nouvelle fois que le comportement de l'écoulement est bien différent de celui d'un jet rond.

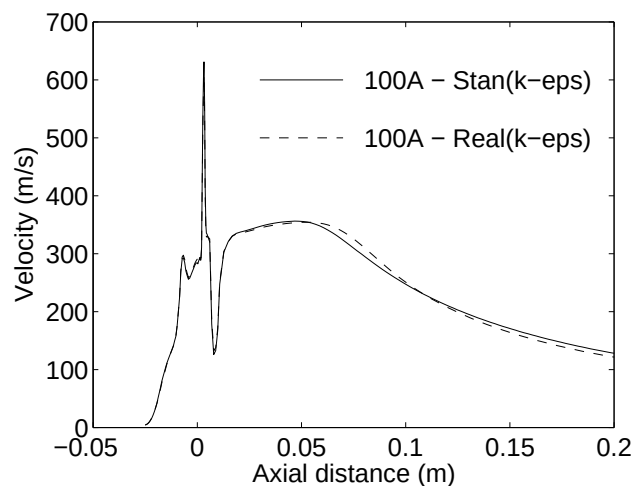


Figure I.8 : Composante axiale de la vitesse de l'écoulement d'air à l'intérieur du pistolet et dans le jet externe pour les modèles de turbulence $k-\epsilon$ standard et Realizable [5].

Les résultats précédents concernaient le cas d'une intensité de 100 A uniquement. La figure 9 présente l'effet de charge sur la composante axiale de la vitesse le long de l'axe du pistolet. Il n'y a aucun effet de charge sur l'écoulement à l'intérieur du pistolet. Toutefois, ce n'est plus le cas dans le cœur du jet externe. A la distance de 30 mm relativement à la sortie, la composante axiale de la vitesse est inférieure de 50 m/s pour l'intensité de 250 A relativement au modèle négligeant l'effet de charge. Les résultats sont intermédiaires pour les autres intensités. Toutefois, la différence entre les 4 courbes s'atténue avec la distance axiale. En particulier, elle n'est plus que de 5 m/s à la position axiale de 200 mm (130 m/s pour le modèle découplé contre 125 m/s pour le modèle couplé avec l'intensité de courant de 250 A).

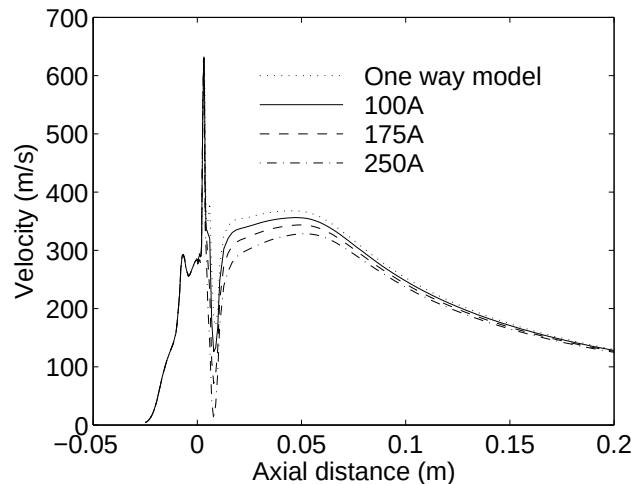


Figure I.9 : Effet de charge sur la composante axiale de la vitesse du gaz suivant l'axe de la torche (modèle de turbulence k- ϵ standard) [5].

On peut aussi noter que la vitesse maximale est d'environ 600 m/s et que cette valeur est atteinte juste au point d'intersection des fils. Cette vitesse très importante est en fait liée au fait qu'un espace très fin a été laissé entre les deux fils au niveau du maillage (voir figure 6). Cependant, il est évident que la distance entre les fils fluctue dans le temps de par l'accrochage périodique de l'arc : contact quasi-réel d'où fusion, puis évacuation des gouttelettes atomisées, puis nouveau contact, etc. Par conséquent, cette vitesse maximale ne doit pas être regardée avec trop d'attention car elle fluctue certainement significativement dans le temps.

La figure 10 présente une comparaison entre vitesses de particules mesurées et calculées pour une intensité de courant de 100 A. Les barres d'erreur et "boîtes" d'erreur ont pour amplitude l'écart type sur chaque valeur ($\pm\sigma$). Pour les mesures, les particules considérées dans la classe 20 μm sont celles dont le diamètre corrigé est compris entre 17.5 et 22.5 μm et ainsi de suite. Au contraire, pour le modèle, un nombre fini de diamètres différents est considéré pour la phase particulaire. Pour un diamètre donné, il s'avère que les vitesses calculées sont plus élevées que celles mesurées. La différence est d'environ 10 m/s pour les plus petites et atteint 20 m/s pour les plus grosses. Ainsi, la pente de la courbe donnant la vitesse en fonction du diamètre est plus élevée pour les mesures que pour le modèle. En fait, tout semble indiquer que le coefficient correcteur appliqué au diamètre au niveau du DPV était trop élevé : en d'autres termes, il n'est pas impossible que les particules considérées ici dans la classe 20 μm soient en fait celles dont le diamètre est plus proche de 30 et ainsi de suite. Ceci tendrait donc à indiquer que notre méthode de calibration du diamètre n'est pas forcément idéale. Pour rappel, elle n'est valide que si toutes les particules sont indifféremment détectées, ce qui n'est pas forcément évident. En particulier, il se peut que les particules les plus petites soient trop froides et que le signal correspondant soit trop faible surtout à la distance de 200 mm. Si tel était le cas, il y aurait une erreur commise sur le facteur correcteur appliqué de sorte qu'en réalité les particules détectées par le DPV possèdent finalement un diamètre supérieur à celui que nous considérons. D'ailleurs, à ce sujet, c'est directement un facteur correcteur qu'il faudrait appliquer sur le diamètre et pas un simple décalage des courbes expérimentales vers la droite : ceci va tout à fait dans le sens de ce que nous observons !

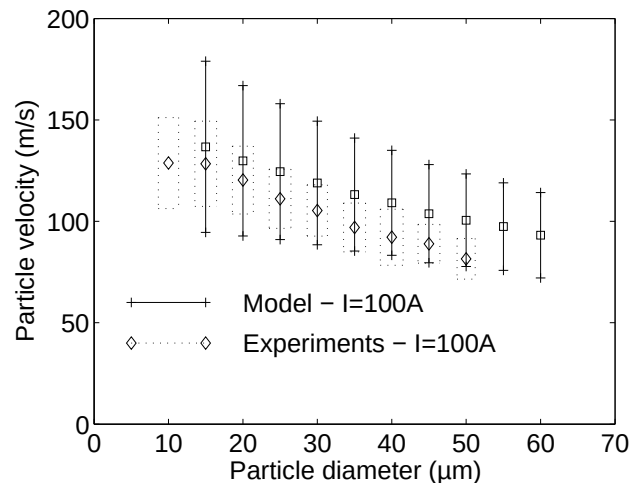


Figure I.10 : Comparaison entre vitesses expérimentales et calculées pour différentes classes de taille ($I=100A$) [5].

Conclusion

Les premiers modèles évoqués dans cette partie ont permis de modéliser la propagation du front de fusion au sein d'une particule isolée. Ils présentent un avantage pour les matériaux réfractaires projetés en APS et permettent d'estimer le taux de fusion des particules injectées dans le jet de plasma en fonction des paramètres de projection à une distance donnée. Toutefois, ils ne permettent pas de prendre en compte l'effet de charge (refroidissement local du jet et influence sur le champ de vitesse) occasionné par les particules elles-mêmes.

Un modèle tridimensionnel du procédé de projection de type Arc fil a ensuite été présenté pour un pistolet de type TAFA 9000 (équivalent au PRAXAIR 9000). Les différents éléments constituant la tête du pistolet ont tout d'abord été générés en CAO sous GAMBIT et le maillage a été construit en considérant quatre volumes distincts. Le logiciel CFD FLUENT a alors été utilisé pour étudier l'écoulement à l'intérieur du pistolet et en dehors de l'outil de projection (jet externe). Deux modèles de turbulence différents ont été testés, à savoir le modèle $k-\epsilon$ standard et le modèle $k-\epsilon$ dit Realizable considéré comme bien mieux adapté à l'étude des jets ronds. Le fait que ces deux modèles fournissent des résultats proches pour cette application, et très différents pour un simple jet rond, indique que la complexité de la tête du pistolet implique un calcul tridimensionnel, car le jet externe produit se comporte différemment d'un jet rond. En particulier, il présente un étalement bien inférieur dans le plan vertical relativement à celui observé dans le plan horizontal (celui des fils). Deux modèles différents ont été utilisés pour prendre en compte la phase secondaire (gouttelettes métalliques atomisées au niveau de l'arc). Le premier ne prend pas en compte l'effet des particules sur le jet alors que le second inclut les termes de couplage permettant de représenter cet effet et permet ainsi de modéliser l'effet de charge. Pour ce modèle, la distribution granulométrique de la taille des gouttelettes atomisées a été estimée à partir de celle de particules collectées à la distance de projection. Ceci permet notamment d'éviter d'avoir recours à un modèle d'atomisation susceptible de ne pas fournir la même chose que les mesures expérimentales au niveau granulométrie. En particulier, nous utilisons donc directement la bonne granulométrie ce qui constitue un avantage. Toutefois, des mesures expérimentales préalables sont nécessaires. La quantité de matière projetée (définie par l'avance des fils) a été déduite des paramètres électriques sur la base d'une relation dérivée de mesures expérimentales. Le modèle a été validé sur la base de comparaisons avec des mesures de vitesse de particules en vol, réalisées avec le système de diagnostic DPV. Les résultats obtenus pour la pression d'atomisation de 0.415 MPa (60 PSI) ont été considérés comme satisfaisants tout en suggérant que le calibrage du diamètre (nécessaire au DPV) peut expliquer les différences observées. Les résultats obtenus pour une pression plus faible du gaz d'atomisation (0.275 MPa, soit 40 PSI) ont par contre montré des différences plus importantes pouvant toutefois s'expliquer. En particulier, le fait que la vitesse de particules mesurée ne dépende pas du diamètre [5] peut être attribué à un éventuel problème de détection des particules les plus petites, présentant par ailleurs une température plus faible. Cette hypothèse confirmerait qu'il

existe bien une sélection des particules détectées par le DPV, tendant à indiquer que le calibrage du diamètre est alors faussé.

Références :

- [1] M.P. Planche, R. Bolot, C. Coddet, "In-flight Characteristics of Plasma Sprayed Alumina Particles: Measurements, Modeling and Comparison", *Journal of Thermal Spray Technology*, **12** (1) (2003) pp. 101-111.
- [2] C. Mateus, S. Costil, R. Bolot, C. Coddet, "Ceramic/fluoropolymer composite coatings by thermal spraying – a modification of surface properties", *Surface and Coatings Technology*, **191** (2005) pp. 108-118.
- [3] R. Bolot, V. Monin, C. Coddet, "Correlation between Simulations and Plasma Sprayed Coatings Properties", pp. 883-888 de *Thermal Spray 2001: New Surfaces for the New Millennium* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 28-30 mai 2001, Singapour), Eds. C.C. Berndt, K.A. Khor, E.F. Lugscheider, Pub. ASM Int., Materials Park, OH-USA, 2001.
- [4] R. Bolot, M.P. Planche, C. Coddet, "Modeling of the Natural Gas HVOF Process", pp. 911-916 de *Thermal Spray 2001: New Surfaces for the New Millennium* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 28-30 mai 2001, Singapour), Eds. C.C. Berndt, K.A. Khor, E.F. Lugscheider, Pub. ASM Int., Materials Park, OH-USA, 2001.
- [5] R. Bolot, M.P. Planche, H. Liao, C. Coddet, "A Three-Dimensional Model of the Wire Arc Spray Process and its Experimental Validation", *Journal of Materials Processing Technology*, **200** (1-3) (2008), pp. 94-105.
- [6] R. Bolot, R. Bonnet, G. Jandin, C. Coddet, "Application of CAD to CFD for the Wire Arc Spray Process", pp. 889-894 de *Thermal Spray 2001: New Surfaces for the New Millennium* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 28-30 mai 2001, Singapour), Eds. C.C. Berndt, K.A. Khor, E.F. Lugscheider, Pub. ASM Int., Materials Park, OH-USA, 2001.
- [7] R. Bolot, C. Verdy, "CFD study of arc spray of Zn wires to improve the deposition efficiency with a Metallisation gun", Rapport Industriel ref. 08065-080718, HYDRO ALUMINIUM, (33 pages), (07/2008).

Thème II : Transferts thermiques transitoires et contraintes générées en projection thermique

Comme indiqué précédemment, les dépôts élaborés par projection thermique sont constitués d'un enchevêtrement de lamelles solidifiées présentant une structure plus ou moins poreuse suivant les conditions d'élaboration. S'il est facilement compréhensible que l'état des particules au moment de leur impact sur le substrat joue un rôle essentiel sur l'architecture du dépôt, il en va de même pour les aspects thermiques en cours de projection qui présentent des influences multiples sur les propriétés résultantes des dépôts.

Tout d'abord, les balayages successifs opérés sur la surface à revêtir conduisent souvent à une augmentation progressive de la température du substrat en cours de projection. Dans certaines applications, il est parfois souhaitable de maintenir une température de projection constante. Dans ce cas, un préchauffage du substrat est alors utilisé pour le porter préalablement à la température qu'il atteindra en fin de projection ou un système de refroidissement est mis en place afin de limiter l'augmentation de température de l'ensemble.

La température de surface du substrat au moment de l'impact des gouttelettes fondues influence significativement la structure des lamelles formées. En effet, à basse température, on observe souvent la présence d'éclaboussures alors qu'au-delà d'une température critique, il devient possible d'obtenir des galettes bien régulières favorisant l'adhésion et la cohésion du dépôt. Il a notamment été suggéré dans la littérature qu'il pourrait s'agir d'un problème de contamination du substrat : le ou les contaminants subissant un brusque changement d'état lors de l'impact des gouttelettes du matériau projeté à haute température. En effet, des mesures expérimentales ont montré que pour des substrats préalablement pollués par différentes substances, la formation de galettes régulières peut être obtenue à partir du moment où le substrat est préchauffé au-delà de la température de vaporisation du contaminant.

A un second niveau, la température du substrat joue aussi un rôle essentiel au niveau de la formation des contraintes dans le dépôt. A ce sujet, il est courant de considérer deux types de contraintes. Les contraintes de trempe sont celles qui apparaissent au moment de l'impact, l'écrasement, la solidification et le refroidissement quasi instantané des gouttelettes individuelles. La contraction thermique provoquée par le brusque refroidissement crée des contraintes en tension dans les lamelles. Dans le cas des céramiques, ces contraintes sont généralement relaxées par la formation de microfissures alors que dans le cas des métaux (ou alliages), ces contraintes sont généralement relaxées par des déformations élastiques et (ou) plastiques. Les contraintes thermiques apparaissent quant à elles au moment du retour à température ambiante de l'ensemble dépôt/substrat de par la différence de dilatation entre les deux matériaux. Ainsi, lorsque le matériau d'apport possède un coefficient de dilatation supérieur à celui du substrat, on obtient des contraintes thermiques en tension dans le dépôt qui viennent se superposer aux contraintes de trempe. Au contraire, lorsque le matériau d'apport possède un coefficient de dilatation inférieur à celui du substrat, on observe alors des contraintes en compression dans le dépôt pouvant annihiler les contraintes de trempe. Ainsi donc, une température trop importante de l'ensemble dépôt/substrat est susceptible de provoquer des déformations et des contraintes thermiques importantes lors du retour de l'ensemble à température ambiante.

On comprend donc aisément que les flux thermiques mis en jeu lors des projections sont susceptibles d'influencer fortement les propriétés et la qualité des dépôts produits. C'est dans ce contexte que j'ai co-encadré Monsieur Jianfei LI qui a réalisé sa thèse au LERMPS sur le sujet de la formation des contraintes dans les dépôts élaborés par projection thermique en APS (co-encadrement avec le Professeur Christian CODDET, directeur de thèse). Aussi, la maîtrise des températures et des flux s'étant avérée essentielle, nous avons travaillé à la fois sur des logiciels commerciaux (SYSWELD, PHOENICS, FLUENT) et nous avons développé par ailleurs nos propres outils concernant la conduction thermique tridimensionnelle transitoire dans des solides multicouches soumis à des sources thermiques en mouvement. Au niveau des flux transférés, la contribution de l'impact du jet de plasma a été déterminée par modélisation CFD [1-3] alors que celle liée à la matière déposée est le plus souvent déduite de mesures expérimentales (profils de cordons de matière déposée). Enfin, des travaux de modélisation réalisés à l'aide du logiciel SYSWELD ont permis d'appréhender la formation des contraintes en cours de projection.

Les travaux menés avec Monsieur Jianfei LI dans le cadre de sa thèse ont donné lieu à 6 articles de congrès internationaux avec actes [4-9].

Par ailleurs, concernant l'estimation des flux transférés par les jets de type HVOF, plusieurs études portant à la fois sur les aspects expérimentaux et la modélisation ont été menées. Ces études ont notamment fait usage de techniques calorimétriques [10] et une méthode basée sur l'analyse de réponse transitoire a aussi été développée plus récemment [11]. Cette activité portant sur la quantification des flux thermiques transférés par les jets a également été considérée dans le cadre de plusieurs partenariats industriels.

Résultats principaux obtenus à travers la synthèse de 5 articles

J'ai commencé à étudier les jets de plasma impactant par modélisation relativement tôt [1-3]. Le logiciel CFD PHOENICS (CHAM, Wimbledon, UK) permet en effet de modéliser les jets de plasma en introduisant des routines "utilisateur" programmées en FORTRAN. D'une manière générale, les jets de plasma présentent une nature turbulente si bien que des modèles de turbulence de type k-ε sont généralement utilisés. Toutefois, il est nécessaire d'effectuer un raffinement du maillage dans la sous-couche visqueuse formée sur la surface sur laquelle le jet impacte et d'utiliser des modèles avancés (modèles à 2 couches pour lesquels ε est prescrit dans la sous-couche en proche paroi) si l'on souhaite pouvoir quantifier convenablement les flux thermiques transférés au substrat par l'impact du jet.

La figure 1 présente le champ de température d'un jet de plasma impactant une surface plane [3]. Le calcul a été réalisé avec une extension à deux couches au modèle k-ε de Chen & Kim : il concerne une torche F4 utilisée avec un mélange argon/hydrogène (45/15 NI/min) et une intensité de 600A. La distance torche/substrat est ici de 80 mm.

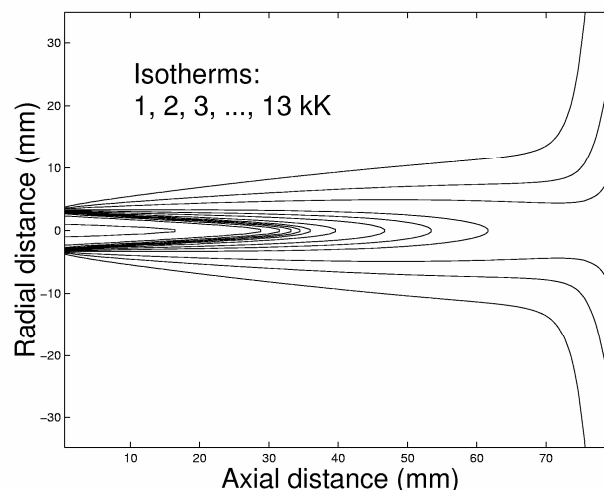


Figure II.1 : Champ de température calculé pour un jet de plasma impactant (K)
Extension à 2 couches au modèle k-ε de Chen & Kim
Torche F4 de 7 mm de diamètre - Ar/H₂ (45/15 NI/min) – I=600 A [3].

La figure 2 présente le profil radial du flux thermique transféré à un substrat dont la température de surface est maintenue à température ambiante pour le jet ci-dessus [3]. Cette figure inclut par ailleurs deux courbes de régression obtenues en supposant deux types de profils radiaux. On remarque immédiatement que le profil radial du flux transféré n'est pas correctement approximé par un profil gaussien (traits discontinus). Au contraire, nous avons remarqué qu'un profil de type :

$$\phi(r) = \frac{\phi_0}{1 + (r/R_0)^2}$$

convient tout à fait et permet une interpolation correcte des profils calculés par CFD (ligne pointillée).

Dans cette équation, ϕ_0 et R_0 dépendent des paramètres et de la distance de projection [3]. Ce type de profil a dès lors toujours été retenu dans nos travaux ultérieurs.

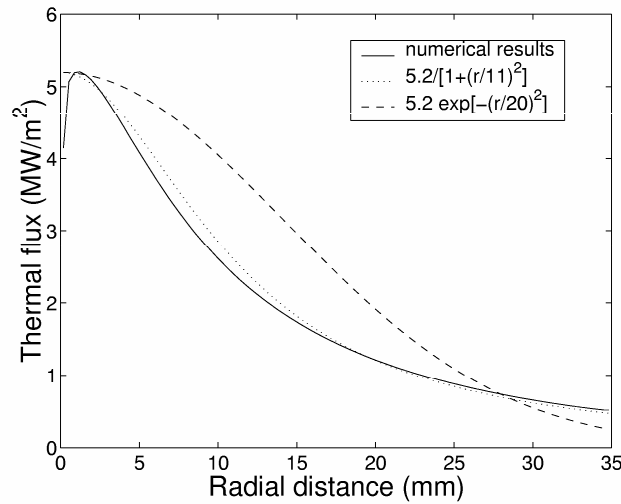


Figure II.2 : Profil radial du flux thermique transféré par l'impact du jet de plasma représenté sur la figure 1 (paramètres identiques) [3].

L'étude de la dissipation du flux thermique dans le substrat a tout d'abord été réalisée pour différents matériaux [3]. Le tableau 1 présente les propriétés des matériaux considérés.

Tableau II.1 : Propriétés thermiques des différents substrats considérés.

	Aluminium	Cuivre	Acier 25CD4	TA6V
ρ (kg.m ⁻³)	2700	8960	7850	4420
C (J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹)	880	385	440	554
λ (W.m ⁻¹ .°C ⁻¹)	237	401	47	5.8

La figure 3 présente un champ surfacique typique de température obtenu lors d'un balayage unique de la surface du substrat par le jet de plasma [3]. Le cas présenté concerne un substrat d'acier et la vitesse de balayage est de 1 m/s.

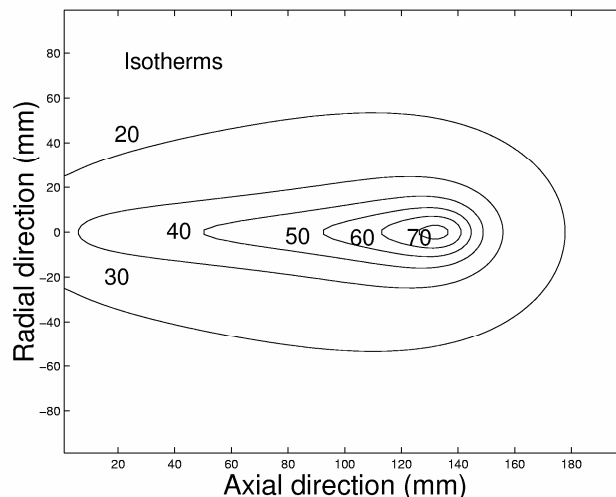


Figure II.3 : Champ surfacique de température obtenu pour un substrat épais (20 mm) en acier et dans le cas d'une vitesse de déplacement de 1 m/s [3].

Dans le cadre des travaux réalisés avec Jianfei LI (co-encadrement de sa thèse), nous avons testé l'utilisation de deux codes de calcul commerciaux (SYSWELD et PHOENICS) pour une application similaire à celle présenté ci-dessus [4]. Les résultats obtenus avec PHOENICS étaient identiques à ceux calculés avec notre code interne. Par contre, les différences initialement observées avec SYSWELD ont été expliquées par la suite : il s'agissait en réalité d'un problème d'implémentation de la fonction exprimant le profil [6]. De plus, dans ce même papier [4], nous avons mis en évidence l'effet de l'épaisseur du substrat. Les figures 4 et 5

présentent les champs de température de surface calculés pour un substrat épais (20 mm) et un substrat fin (2 mm) en aluminium pour une distance torche/substrat de 100 mm. On observe alors un comportement bien différent : dans le second cas (substrat fin), la chaleur ne diffuse pas dans la profondeur du substrat (qui est chauffé sur toute son épaisseur). Ainsi, la température de surface calculée pour un même flux augmente et reste élevée même après le passage du jet.

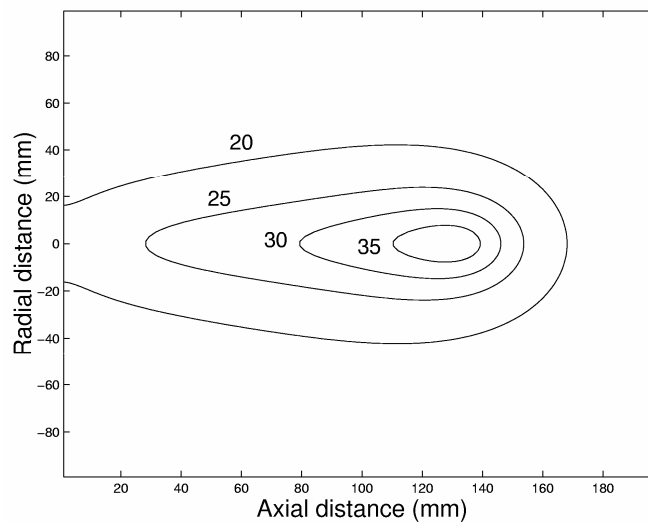


Figure II.4 : Champ de température de surface obtenu pour un substrat en aluminium épais pour une distance torche/substrat de 100 mm [4].

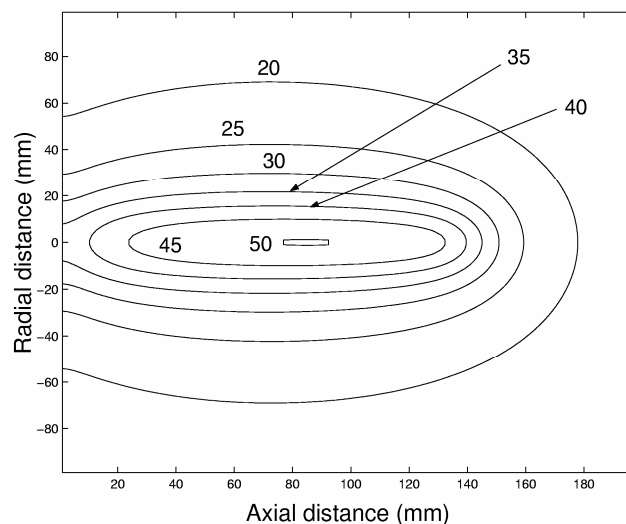


Figure II.5 : Champ de température de surface obtenu pour un substrat en aluminium d'épaisseur 2 mm pour une distance torche/substrat de 100 mm [4].

Toujours dans ce même article, les influences de la vitesse de balayage et de la distance de projection ont été étudiées pour d'autres conditions : nous avons notamment montré que pour un substrat fin en TA6V, la température maximale transitoire atteinte par la surface était inversement proportionnelle à la racine carrée de la vitesse de balayage.

Dans un autre article publié la même année avec Jianfei LI [5], nous avons pris en compte la contribution du flux de particules sur l'échauffement du substrat. La figure 6 présente le champ de température d'un jet de plasma dans des conditions de projection utilisées pour l'alumine (torche F4 de 6 mm de diamètre interne avec un mélange argon/hydrogène (35/8 NI/min) et une intensité de courant de 500A). Vu que les paramètres sont différents des précédents, et surtout que la distance torche/substrat est plus élevée (120 mm contre 80), le flux thermique maximal transféré par le jet de plasma est bien inférieur ($\phi_0 = 0.56 \text{ MW/m}^2$ au lieu de 5.2) mais présente un étalement supérieur ($R_0 = 20 \text{ mm}$ au lieu de 11).

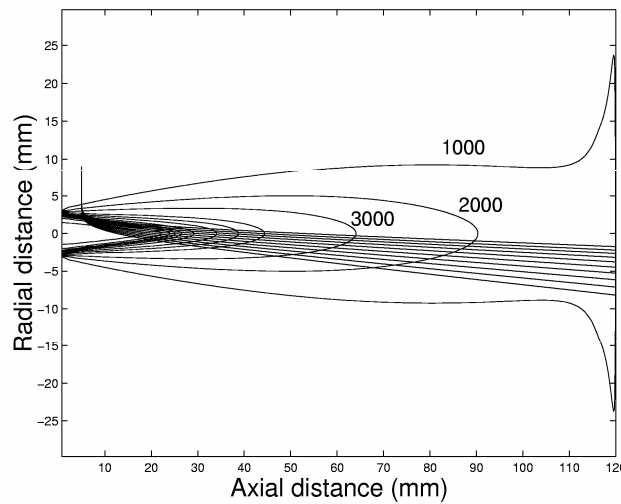


Figure II.6 : Champ de température du jet de plasma utilisé pour la projection d'une poudre d'alumine (torche F4 ID 6 mm / plasma Ar/H₂ 35/8 NI/min / I=500A) [5].

Le flux thermique apporté au substrat par la matière déposée (impact, étalement, solidification et refroidissement quasi instantané des gouttelettes projetées) dépend fortement de la répartition de matière dans le jet. Pour cette raison, nous avons utilisé la distribution réelle du flux de matière sur le substrat pour quantifier cette contribution. Cette méthode requiert la mesure préalable du profil du cordon de matière obtenu après plusieurs passes opérées à une même position et à vitesse de déplacement constante. Dans la plupart des cas, les profils radiaux mesurés sont très proches d'une gaussienne mais ils peuvent toutefois présenter une excentricité plus ou moins prononcée.

La figure 7 présente le profil d'un cordon d'alumine mesuré par acoustique pour 60 passes successives réalisées avec une vitesse de déplacement de 0.5 m/s et pour un débit de poudre de 30 g/min. La hauteur du cordon ainsi généré est de 720 μ m (soit 12 μ m par passe). Le profil est ici quasi parfaitement interpolé par une gaussienne. A partir de considérations mathématiques définies plus précisément dans l'article [5], nous avons finalement montré que le flux thermique correspondant pouvait être exprimé suivant :

$$\psi(r) = \frac{\dot{m}_s}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \Delta h_{mat}$$

Dans cette équation, $\dot{m}_s$ est le débit de matière projeté pondéré par le rendement de projection et s'exprime en fonction du profil du cordon suivant :

$$\dot{m}_s = \rho V_x S / n$$

où ρ est la masse volumique du dépôt, V_x la vitesse de déplacement de la source, S la section du cordon et n le nombre de passes.

Par ailleurs, σ est le rayon de la gaussienne et Δh_{mat} la variation d'enthalpie du matériau projeté entre la température moyenne des particules au moment où elles impactent le substrat et la température du substrat.

On peut aussi exprimer S en fonction de l'intégrale de la gaussienne. Il vient alors :

$$S = h_{max} \sigma \sqrt{2\pi}$$

Dans le cas considéré, nous avons conclu que la contribution des particules pouvait être estimée par :

$$\psi(r) = 7.93 \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) (\text{MW.m}^{-2})$$

avec $\sigma = 5$ mm.

On peut aussi estimer la contribution globale de l'apport thermique lié aux particules suivant :

$$\psi_p = 2\pi \int_0^{\infty} \psi(r) r dr = 2\pi \psi_o \sigma^2$$

où $\psi_o = 7.93 \text{ MW.m}^{-2}$ et $\sigma = 5 \text{ mm}$.

Ainsi, il vient pour ce cas une puissance de l'ordre de 1250 W correspondant à environ 4.5% de la puissance électrique consommée au niveau de l'arc.

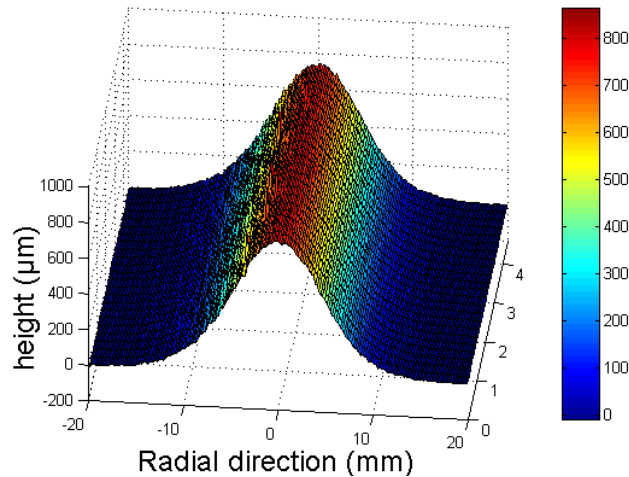


Figure II.7 : Profil du cordon d'alumine mesuré par acoustique pour 60 passes réalisées avec une vitesse de déplacement de 0.5 m/s [5].

Les figures 8 et 9 présentent les champs surfaciques de température d'un substrat d'acier épais, calculés soit avec uniquement la contribution du jet de plasma, soit en prenant en compte celle du flux de matière déposée [5]. Il est évident que la contribution du flux de matière déposée est essentielle concernant l'importance de l'élévation transitoire de la température du substrat. Aux distances de projection conventionnelles (couramment de l'ordre de 120 mm en APS), le flux thermique lié à l'impact du jet de plasma est relativement étalé et d'amplitude maximale moindre. Au contraire, lorsque les profils de cordons de matière sont relativement étroits (faible dispersion des particules dans le jet), la contribution du flux lié au matériau déposé est très focalisée et donc très intense notamment au centre du flux de matière.

Tous les calculs présentés jusqu'alors ont été obtenus pour un substrat homogène. Lors de projections, cette hypothèse n'est en réalité valide que lors des premières passes. Par la suite, une couche de dépôt se forme progressivement sur la surface du substrat.

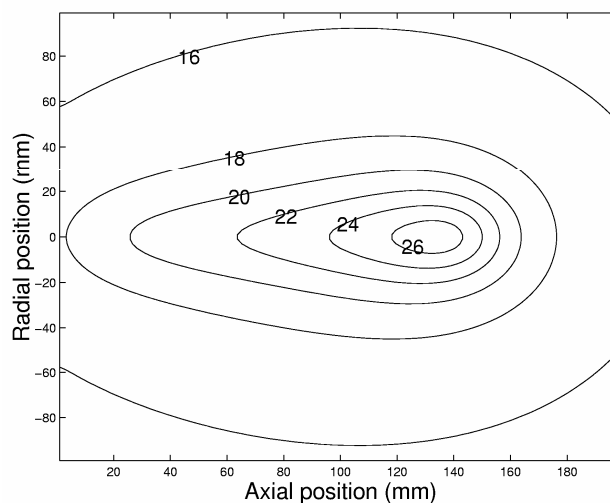


Figure II.8 : Champ surfacique de température calculé sans la contribution de la matière déposée (substrat acier / vitesse de déplacement de 0.5 m/s / distance 120 mm) [5].

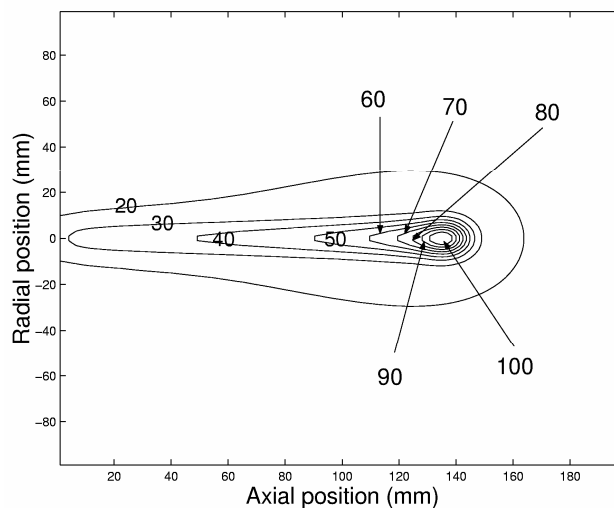


Figure II.9 : Champ surfacique de température calculé avec la contribution de la matière déposée. (substrat acier / vitesse de déplacement de 0.5 m/s / distance 120 mm / alumine 30 g/min) [5].

Conformément aux résolutions qui avaient été prises dans les conclusions de l'article [5], nous avons présenté l'année suivante avec Jianfei LI, un modèle permettant de prendre en compte des substrats multicouches [6]. Dans un premier temps, le cas d'un dépôt d'alumine d'épaisseur 100 μm (puis 300) élaboré sur un substrat d'acier a été considéré. Si les champs surfaciques de température correspondants n'incluent aucune isotherme au-delà de 110°C sans la couche d'alumine, les lignes isothermes maximales représentées vont jusqu'à 140°C pour une épaisseur de dépôt de 100 μm et 180°C pour une épaisseur de dépôt de 300 μm . La figure 10 présente non pas le champ surfacique mais le champ de température dans la profondeur du matériau multicouche composé d'un substrat épais d'acier revêtu d'une couche de 300 μm d'alumine [6]. Les contributions des flux sont identiques à celles précédemment considérées. On remarque une cassure nette des lignes isothermes à la profondeur de 300 μm correspondant à la transition alumine/acier. Cette transition est bien sûr provoquée par la discontinuité des propriétés du matériau.

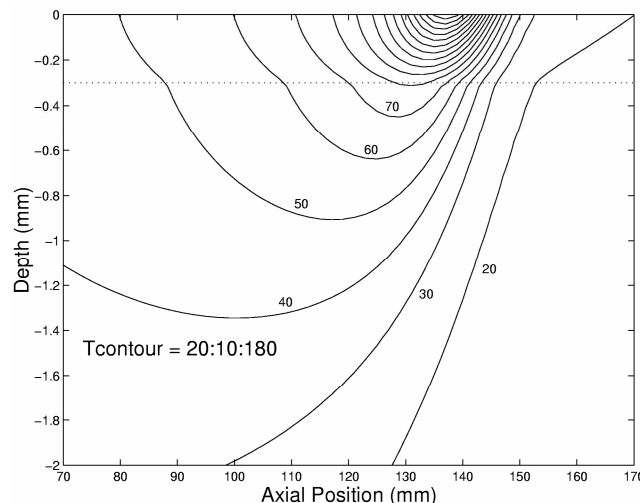


Figure II.10 : Champ de température dans la profondeur d'un matériau multicouche constitué d'un substrat épais d'acier et d'un revêtement de 300 μm d'alumine [6].

Dans ce même article nous avons ensuite considéré le cas d'un dépôt de zircone élaboré sur un substrat d'acier identique au précédent. Dans ce deuxième cas, la conductivité du dépôt est bien inférieure à celle du dépôt d'alumine (1.5 W.m⁻¹.°C⁻¹ au lieu de 15), et la couche forme une réelle barrière thermique sur la surface du substrat. Les paramètres de projection étant différents (mélange Ar/H₂ 40/12 NI/min, intensité de 600A, distance de projection de 140 mm, débit de poudre de 50 g/min), un changement des sources thermiques s'en suit. Au final, les valeurs suivantes ont été retenues [6] :

$\phi_0 = 0.55 \text{ MW.m}^{-2}$ et $R_0 = 25 \text{ mm}$ pour la contribution du jet de plasma et :
 $\psi_0 = 6.88 \text{ MW.m}^{-2}$ et $\sigma = 4.25 \text{ mm}$ pour la contribution du flux de matière.

La figure 11 présente le champ de température de la surface du revêtement de zircon (épaisseur $100\mu\text{m}$) lors du passage du jet. Les isothermes sont ici représentées tous les 40°C et la valeur maximale atteinte est de 440°C .

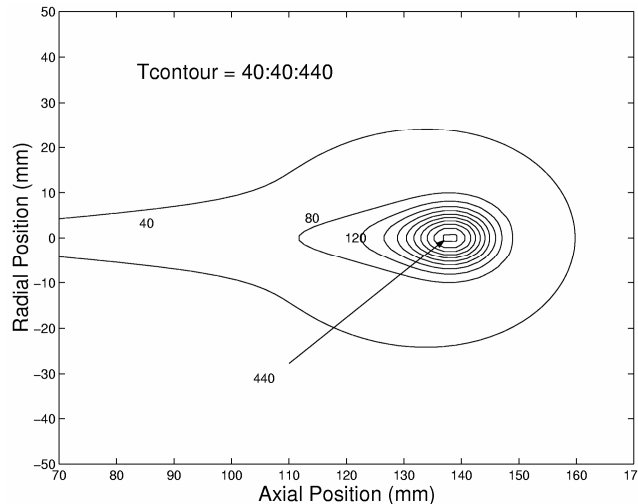


Figure II.11 : Champ surfacique de température du revêtement de zircon élaboré sur le substrat d'acier (vitesse de déplacement de 0.5 m/s) [6].

La figure 12 présente le champ de température obtenu dans la profondeur de l'ensemble dépôt/substrat. Les isothermes 20°C et 30°C ont été ajoutées. On remarque que seule la surface (ou plus exactement la couche de zircon) chauffe de manière intense, la température de l'acier ne dépassant pas 80°C quant à elle. Le dépôt de zircone joue donc parfaitement son rôle de barrière thermique.

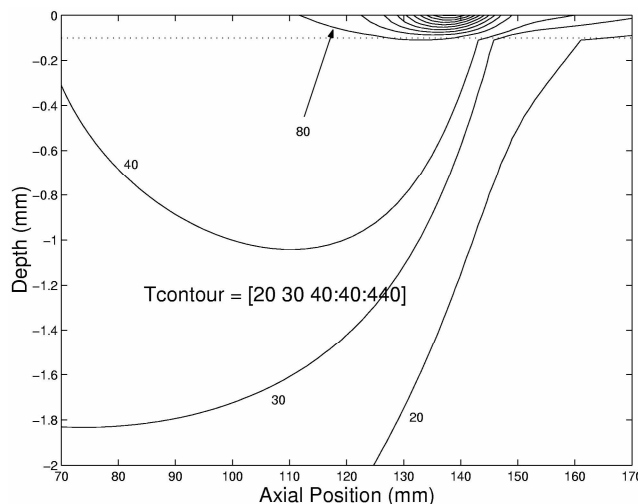


Figure II.12 : Champ de température dans la profondeur de l'ensemble dépôt de zircon / substrat d'acier (vitesse de déplacement de 0.5 m/s) [6].

Dans la suite de sa thèse, Jianfei LI a tout d'abord traité différents cas de préchauffage de pièces géométriquement plus complexes qu'un simple substrat plan, en considérant des passes successives du jet de plasma. Pour ce faire il a utilisé SYSWELD. Enfin, dans le dernier chapitre de sa thèse, il a abordé la modélisation de la formation des contraintes dans les dépôts (toujours sous SYSWELD) et nous avons publié ces résultats toujours dans le cadre d'un congrès [7]. Le modèle implémenté considère la formation de chaque sous-couche de revêtement par activation progressive des éléments constitutifs d'une couche au cours du déplacement de la plume de

matière. La figure 13 présente le champ de contrainte σ_{xx} (x étant la direction du déplacement de la source) obtenu après refroidissement complet de l'ensemble dépôt/substrat pour le cas d'un dépôt d'alumine d'épaisseur 200 μm élaboré sur un substrat d'acier 316L d'épaisseur 1 mm. Le dépôt a été élaboré à l'aide de 10 passes successives, chacune venant générer une épaisseur de dépôt de 20 μm . On note la présence de contraintes négatives (compression) dans le dépôt, balancées par des contraintes en tension dans le substrat dont l'intensité est maximale près de l'interface dépôt/substrat. Dans ce cas, ce sont les contraintes thermiques générées lors du refroidissement global de l'ensemble dépôt/substrat qui ont pris le dessus sur les contraintes de trempe (tension) générées dans le dépôt au moment de son élaboration (et relaxées par formation de microfissures). Dans ce même article, nous avons également montré qu'il existait une excellente cohérence entre déformée calculée et mesurée pour ce même cas.

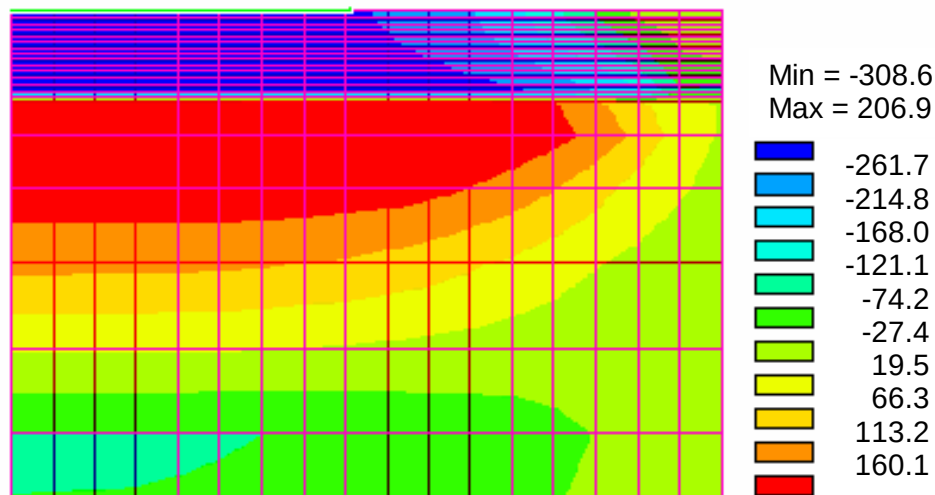


Figure II.13 : Champ de contrainte σ_{xx} généré lors de la réalisation d'un dépôt d'alumine sur un substrat d'acier de 1 mm d'épaisseur [7].

Conclusion

Cette partie a permis de suivre l'évolution des modèles développés notamment dans le cadre de la thèse de Jianfei LI que j'ai co-encadré. Ces modèles incorporent des sources thermiques mobiles correspondant à la fois à la contribution du jet de plasma et à celle du flux de matière projetée lors de l'élaboration d'un revêtement. De nombreux calculs ont été réalisés, soit avec des outils commerciaux (PHOENICS, FLUENT, SYSWELD), soit par le biais du développement d'un code interne permettant le calcul tridimensionnel transitoire de la conduction thermique dans des substrats éventuellement composites et soumis à diverses sources. Le suivi de l'évolution du travail réalisé dans le cadre de sa thèse, a ici été présenté à travers de nombreux articles (dont Jianfei et moi-même sommes coauteurs) publiés essentiellement lors de congrès spécialisés dans le domaine de la projection thermique. L'objectif final clairement identifié dès le départ dans le cadre de la thèse de Jianfei LI était de modéliser la formation des contraintes générées en cours de projection. Cet objectif a été atteint avec succès dans le cas de géométries simples (dépôt élaboré sur une lame plane). Des limites ont toutefois été atteintes notamment pour des cas géométriquement plus complexes, nécessitant des calculs 3D : les temps de calculs nécessaires avec la machine dont nous disposions à l'époque n'étaient plus gérables. C'est uniquement à partir de 2005 (date de la fin de la thèse de Jianfei) que j'ai pris conscience de l'importance de publier en revue plutôt qu'en congrès et j'assume donc totalement la responsabilité du fait qu'aucun article n'ait été publié en revue, ce qui me semble aujourd'hui dommage au vu de la quantité de travail concernée. Les deux autres articles que nous avons en commun Jianfei LI, Christian CODDET, et moi, ne concernent pas les aspects thermiques dans les substrats et (ou) aspects contraintes. En réalité, ils portent sur l'identification puis la rectification (suggestion d'un correctif) d'un problème que nous avons détecté lors de la modélisation des jets de plasma sous FLUENT. Cette partie sera détaillée plus loin dans le dossier.

Références :

- [1] R. Bolot, C. Coddet, M. Imbert, "On the use of a low-Reynolds extension to the Chen-Kim $k-\epsilon$ model to predict thermal exchanges in the case of an impinging plasma jet", *International Journal of Heat & Mass Transfer*, **44** (6) (2001) 1095-1106.
- [2] R. Bolot, V. Monin, C. Coddet, M. Imbert, "Mathematical Modeling of a Plasma Jet Impinging on a flat Structure", pp. 439-444 de *Thermal Spray: Meeting the Challenges of the 21st Century*, Vol. 1 (proceedings de International Thermal Spray Conference, 25-29 mai 1998, Nice) Ed. C. Coddet, Pub. ASM Int., Materials Park, OH-USA, 1998.
- [3] R. Bolot, M. Imbert, C. Coddet, "Three dimensional transient modeling of the substrate temperature evolution during the coating elaboration", pp. 979-984 de *Tagungsband Conference Proceedings* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 4-6 mars 2002, Essen), Ed. E. Lugscheider, Pub. DVS, DE, 2002.
- [4] J. Li, R. Bolot, H. Liao, C. Coddet, "On the use of SYSWELD and PHOENICS for the computation of heat transfer in a substrate exposed to an impinging plasma jet", pp. 971-976 de *Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 5-8 mai 2003, Orlando, USA), Eds. C. Moreau and B. Marple, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2003.
- [5] R. Bolot, J. Li, R. Bonnet, C. Mateus, C. Coddet, "Modeling of the Substrate Temperature Evolution during the APS Thermal Spray Process", pp. 949-954 de *Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 5-8 mai 2003, Orlando, USA), Eds. C. Moreau and B. Marple, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2003.
- [6] R. Bolot, J. Li, R. Bonnet, C. Coddet, "Heat transfers at the impact of a plasma jet on a two-layer material", dans *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 10-12 mai 2004, Osaka, JAP), ISBN 3-87155-792-7, Pub. DVS, 2004.
- [7] J. Li, R. Bolot, H. Liao, C. Coddet, "Numerical study of residual stresses formation during the APS process", dans *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 10-12 mai 2004, Osaka, JAP), ISBN 3-87155-792-7, Pub. DVS, 2004.
- [8] R. Bolot, J. Li, C. Coddet, "Modeling of thermal plasma jets: a comparison between PHOENICS and FLUENT", dans *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 10-12 mai 2004, Osaka, JAP), ISBN 3-87155-792-7, Pub. DVS, DE, 2004.
- [9] R. Bolot, J. Li, C. Coddet, "Some key advices for the modeling of plasma jets using FLUENT", pp. 1367-1371 de *Thermal Spray connects: Explore its surfacing potential* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 2-4 mai 2005, Bâle, CH), Ed. E. Lugscheider, Pub. DVS, DE, 2005.

Thème III : Calcul numérique de la conductivité thermique de dépôts élaborés par projection thermique

Les dépôts élaborés par projection thermique sont constitués d'un enchevêtrement de lamelles résultant de l'écrasement et de la solidification rapide de gouttelettes fondues, et présentent une architecture poreuse dépendant de leurs conditions d'élaboration. Dans le cas des barrières thermiques de type zircone partiellement stabilisée à l'yttria, l'architecture du réseau poreux du dépôt influence fortement sa conductivité thermique apparente. En particulier, les pores interlamellaires et fissures horizontales constituent des résistances thermiques additionnelles orientées perpendiculairement au flux incident, ce qui contribue à réduire considérablement la conductivité thermique effective de tels dépôts. Par conséquent, le taux de porosité global n'est pas le seul critère influençant la conductivité thermique d'un dépôt. En particulier, l'architecture du réseau et l'orientation des pores et fissures jouent un rôle crucial. Ainsi, la plupart des barrières thermiques utilisées pour les chambres de combustion des turboréacteurs dans l'industrie aéronautique font usage de poudres de morphologie spéciale (sphères creuses) permettant d'augmenter le taux de porosité interlamellaire et de diminuer la conductivité thermique apparente des dépôts élaborés.

De nombreuses corrélations ont été suggérées dans la littérature pour exprimer l'influence du taux de porosité sur la réduction de la conductivité thermique d'un matériau. La plupart d'entre elles ne prennent toutefois pas en compte la morphologie des pores. Dutton [1] a toutefois rapporté les travaux de Hasselman [2] qui a suggéré une relation pour des pores modélisés par des ellipses. Cette relation prend donc en compte l'allongement des pores. Toutefois, il semble difficile de modéliser des pores interlamellaires très fins par de simples ellipses.

Des mesures expérimentales sont par ailleurs couramment réalisées pour déterminer la conductivité thermique apparente des dépôts de barrière thermique élaborés par projection thermique afin d'appréhender les effets des paramètres opératoires du procédé ou de contrôler la qualité des revêtements. La première méthode consiste à mesurer la différence de température apparaissant en régime stationnaire entre les deux faces d'un dépôt soumis à un flux connu. La seconde méthode (méthode "flash"), basée sur une mesure transitoire, permet de déterminer la diffusivité thermique du matériau et d'en déduire sa conductivité thermique [3]. Suivant cette méthode, la face avant du dépôt est irradiée par un pulse d'énergie photonique qui augmente rapidement la température de la face opposée de quelques degrés. Dans ce cas, la diffusivité thermique du matériau est alors directement reliée à l'épaisseur de l'échantillon et au temps mis par la face opposée pour atteindre 50% de son augmentation maximale [4-5].

L'utilisation de calculs numériques basés sur la méthode des éléments finis (FEM) pour prédire la conductivité thermique apparente d'un dépôt poreux a été proposée [6-8] mais seules des structures de revêtement et architectures de pores simplifiées ont pu être considérées. Aujourd'hui, l'utilisation de ce type de méthode est toutefois accessible pour des structures réelles, notamment à travers le code OOF dans sa seconde version.

Dorvaux *et al.* [9] ont été les premiers à utiliser une méthode de type différences finies. Cette méthode permet de considérer la structure réelle du réseau poreux, obtenue par microscopie électronique puis traitée par analyse d'image. Chaque pixel de l'image d'une coupe micrographique du dépôt est alors interprété comme une cellule d'intégration de l'équation de conduction de la chaleur en régime stationnaire. En imposant un gradient de température entre deux lignes opposées de l'image et en affectant à chaque pixel une conductivité thermique en fonction de sa couleur, il est possible de déterminer numériquement le flux thermique traversant l'échantillon et d'en déduire une conductivité thermique effective.

Suite à un besoin interne au laboratoire exprimé par Ghislain MONTAVON dans le cadre de la thèse de Guy ANTOU, j'ai développé une méthode numérique sur des bases identiques à celles de Jean-Marc Dorvaux à l'ONERA (Châtillon, France). Toutefois, dans la première version du logiciel [10], les calculs étaient relativement longs si bien qu'un travail important a été consacré aux techniques de résolution du système d'équations dérivé. Si Dorvaux semble continuer à utiliser la méthode SOR (Successive Over Relaxation), nous avons toutefois montré

tout l'intérêt de l'utilisation de la méthode LSOR (Line Successive Over Relaxation) qui permet un gain de temps non négligeable. Ces travaux ont été publiés dans la revue *Numerical Heat Transfer : Part A* [11]. A ce sujet, le gain de temps obtenu avec cette méthode dépend notamment du critère de convergence exigé. En effet, si nous avons décidé d'arrêter le calcul à une valeur du résidu égale à 10^{-7} au lieu de 10^{-9} , les résultats auraient été plus mitigés [11, cf. figure 9]. De plus, notre code est programmé en FORTRAN plutôt qu'en C. Les tableaux bidimensionnels étant organisés différemment dans ces deux langages, il se peut également que les gains en vitesse ne soient pas identiques. Quoi qu'il en soit, les algorithmes SOR et LSOR permettent de passer d'un temps de calcul de l'ordre de la journée (constaté avec Gauss-Seidel) à un temps de calcul de quelques minutes pour une même image et sur un même ordinateur.

Résultats principaux obtenus : synthèse de 6 articles dont 3 en revues internationales

Les applications du logiciel développé sont aujourd'hui multiples au sein du laboratoire si bien que je devrais bientôt bénéficier de l'aide d'un doctorant sur ce sujet. Nous avons donc commencé avec des dépôts de barrière thermique de type zircone partiellement stabilisée à l'yttria [10-13]. En particulier, le logiciel nous a permis de mettre en évidence l'influence de la structure du dépôt et du procédé d'élaboration sur sa conductivité thermique effective. Dans un second temps, nous avons considéré le cas de dépôts d'alumine élaborés par plasma ou à l'aide du procédé flamme/baguettes développé par SAINT-GOBAIN [14]. Aujourd'hui, nous l'appliquons également à des dépôts abrasables de type AlSi/polyester dans le cadre du programme européen NEWAC (New Aero Engine Core Concept) [15].

Dépôts de zircone partiellement stabilisée à l'Yttria

Avec l'objectif permanent d'augmenter les rendements des machines, les sollicitations thermiques imposées à de nombreuses structures sont en constante augmentation. Utilisés conjointement avec des sous-couches de complaisance en MCrAlY (où M désigne Ni et/ou Co), les dépôts de zircone partiellement stabilisée à l'yttria (Y-PSZ) sont couramment utilisés dans les industries de l'aéronautique et de l'automobile pour permettre une augmentation des températures de fonctionnement et pour protéger les composants métalliques des phénomènes d'oxydation et de corrosion.

La figure 1 présente une image MEB typique (712x484 pixels) de la coupe transversale d'un dépôt de Y-PSZ et la figure 2 l'image binaire obtenue après traitement. La résolution est de $0.144 \mu\text{m}/\text{pixel}$ si bien que la largeur totale de l'image représente une zone d'environ $100 \mu\text{m}$. Le revêtement a été produit à l'aide de la poudre PLASMATEX 108S de Saint-Gobain (8% en masse de Y_2O_3). La structure poreuse complexe est caractérisée par la présence de pores globulaires et de nombreuses fissures. Le taux de porosité déterminé par analyse d'image (nombre de pixels noirs / nombre total de pixels) est de l'ordre de 12.5% [11].

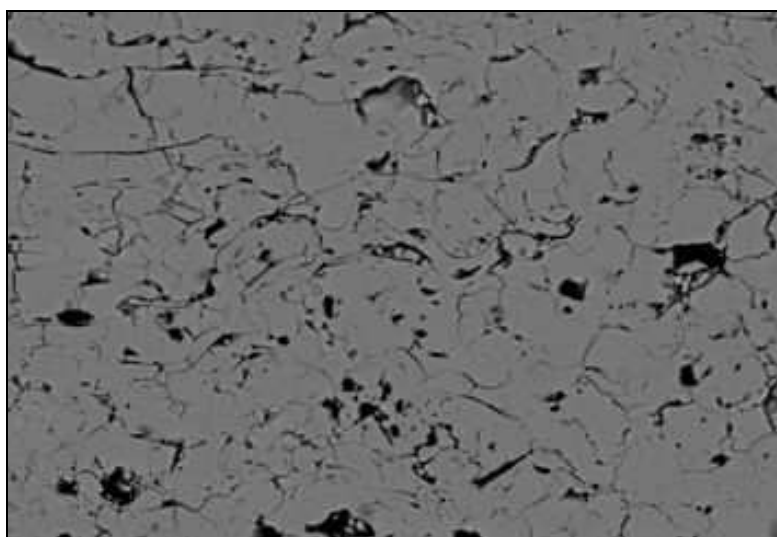


Figure III.1 : Coupe micrographique d'un dépôt de Y-PSZ obtenue par MEB [11].

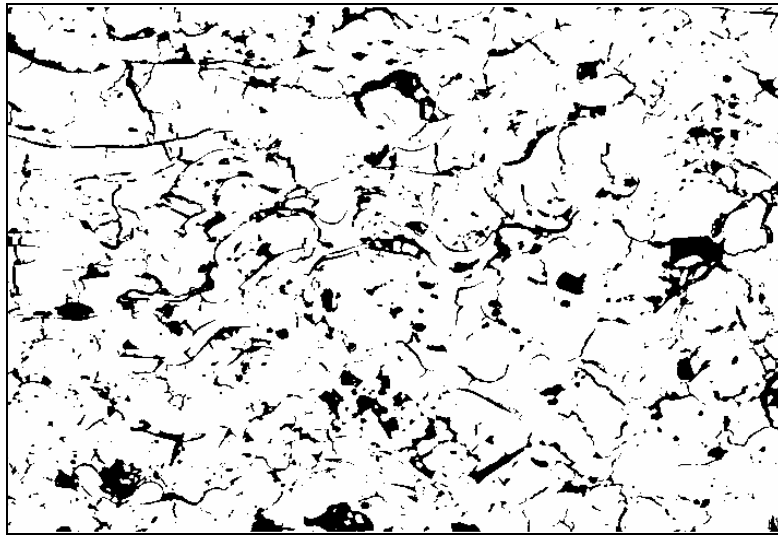


Figure III.2 : Image binaire de l'architecture poreuse obtenue après traitement d'image [11].

Les images 3 et 4 présentent les champs de température et de flux calculés pour la structure de la figure 2 pour des valeurs de conductivité de $2.5 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ pour la matrice blanche et de $0.025 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ pour les pores.



Figure III.3 : Champ de température associé au réseau de porosité de la figure 2.

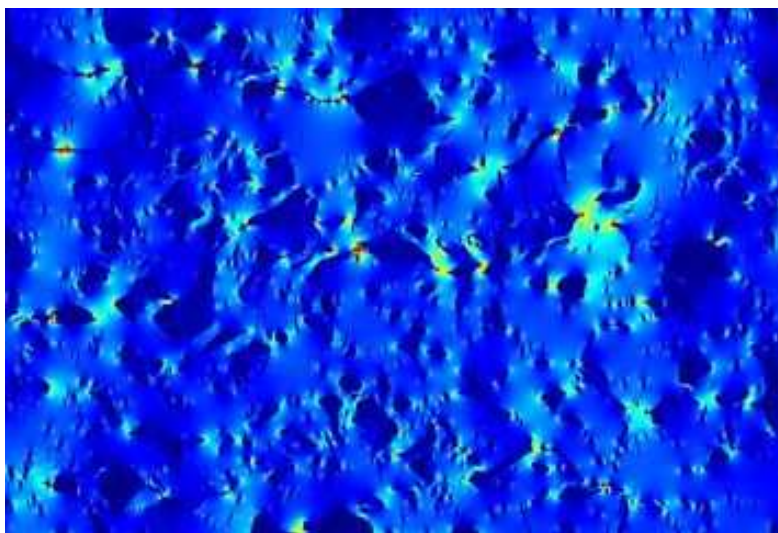


Figure III.4 : Flux thermique associé au réseau de porosité de la figure 2.

Pour une différence de température imposée, la grandeur principale de sortie du logiciel est le flux thermique traversant la structure, ce qui permet de déduire sa conductivité thermique apparente. Pour le cas ci-dessus, le flux thermique traversant la structure représente ainsi seulement 47% du flux qui la traverserait en l'absence de porosité.

Il vient ainsi :

$$\kappa_{eff} / \kappa_{dens} = 0.47$$

Cette valeur de 0.47 est donc celle obtenue pour un rapport $\kappa_{dens} / \kappa_{pores}$ de 100. Lorsque l'on double ou divise ce rapport par 2 (valeurs de 50 et de 200), la valeur de 0.47 ne varie en fait que de 10% [11].

Le cas d'une seule image a été traité ici. En réalité, si l'on souhaite obtenir une valeur fiable du rapport $\kappa_{eff} / \kappa_{dens}$, il est préférable de considérer au moins une douzaine d'images issues du même dépôt. Dans le cas ci-dessus, l'image choisie était toutefois représentative de la valeur moyenne obtenue.

Un intérêt principal du logiciel est de pouvoir quantifier la conductivité thermique apparente d'un dépôt en fonction du procédé de fabrication dont dépend grandement l'architecture du dépôt. A titre d'exemple, la figure 5 présente deux architectures typiques de dépôts obtenus par projection plasma conventionnelle (a) et par refusion LASER *in situ* (b). Dans les 2 cas, la poudre utilisée est la METCO 204B-NS constituée de sphères creuses. Cependant, les architectures des deux dépôts sont très différentes. En particulier, la refusion par LASER de chaque couche élaborée crée des fissures horizontales très larges. L'utilisation de notre logiciel a permis de définir un rapport $\kappa_{eff} / \kappa_{dens}$ de 0.37 pour le procédé conventionnel et de 0.22 pour le procédé de refusion laser *in situ* qui permet donc de diminuer de près de 40% la conductivité thermique apparente du dépôt. Ces résultats ont été confirmés expérimentalement par méthode "flash".

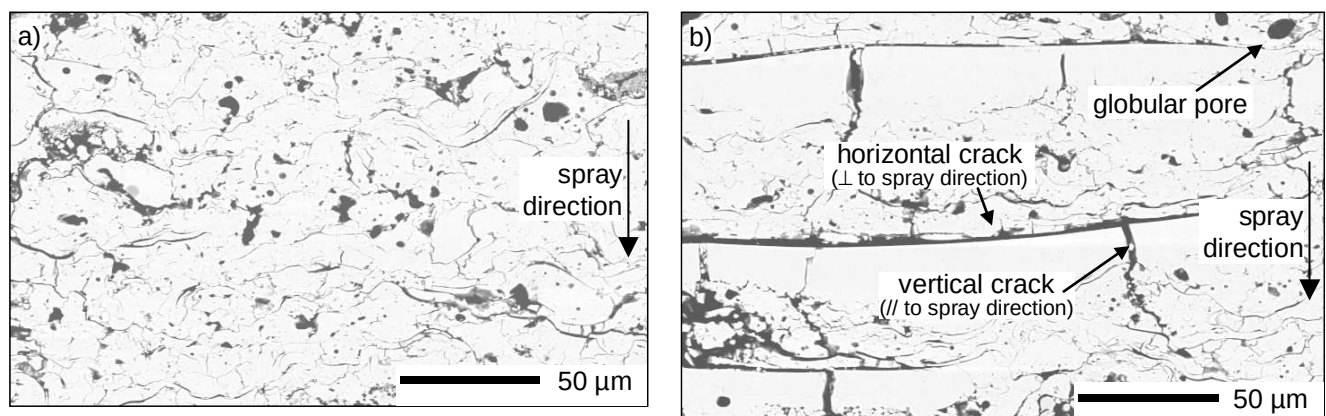


Figure III.5 : Architecture de dépôts de zircone partiellement stabilisée à l'yttria, obtenus par projection plasma conventionnelle (a) et assistée par refusion LASER *in situ* (b).

En terme de valeurs pures de la conductivité thermique, en considérant une conductivité thermique de $2.5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour le matériau dense [16-18], les coefficients de réduction de 0.47, 0.37 et 0.22 précités correspondent à des valeurs de 1.17 , 0.92 et $0.55 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ respectivement. Il devient donc possible de corréler la conductivité thermique effective du dépôt au procédé d'élaboration influençant sa microstructure.

Dépôts d'alumine élaborés avec le procédé ROKIDE®

La technologie de projection de baguettes à la flamme développée par SAINT-GOBAIN Coating Solutions (procédés ROKIDE® et MASTER Jet®) est robuste et économique. Le procédé ROKIDE® permet de projeter des baguettes d'alumine de différentes tailles (4.8, 6.3 et 7.9 mm de diamètre) à l'aide d'un système unique et breveté. Les particules ne peuvent quitter le dispositif qu'après fusion complète. Ces particules ont alors une énergie cinétique et une masse leur permettant de rester fondues jusqu'à ce qu'elles atteignent le substrat. Les lamelles formées sur le substrat bénéficient de plus d'une forte cohésion et le procédé permet par ailleurs de former un dépôt d'une épaisseur pouvant être supérieure au mm si besoin. Ainsi, il permet

d'élaborer des revêtements céramiques présentant une très bonne résistance à l'usure et aux chocs, ainsi que de meilleures propriétés d'isolation électrique. Le procédé MASTER Jet® est quasi équivalent au ROKIDE sans toutefois être spécialement destiné à la projection de baguettes en céramique. Néanmoins, le débit de matière est plus régulier avec le procédé ROKIDE® (meilleur contrôle de la vitesse d'avance de la baguette).

La figure 6 présente les structures de revêtements d'alumine produits par projection de poudre en APS (gauche) et à l'aide du procédé ROKIDE® (droite). Les deux structures présentent des différences flagrantes. En particulier, le dépôt élaboré en APS présente une structure plus fine liée à une plus faible taille des particules projetées. Il comprend également de nombreuses microfissures. Au contraire, les lamelles formées avec le procédé ROKIDE® sont de taille nettement supérieure et présentent des fissures verticales certainement liées à la relaxation des contraintes de trempe (contraction rapide des lamelles lors de leur refroidissement quasi instantané).

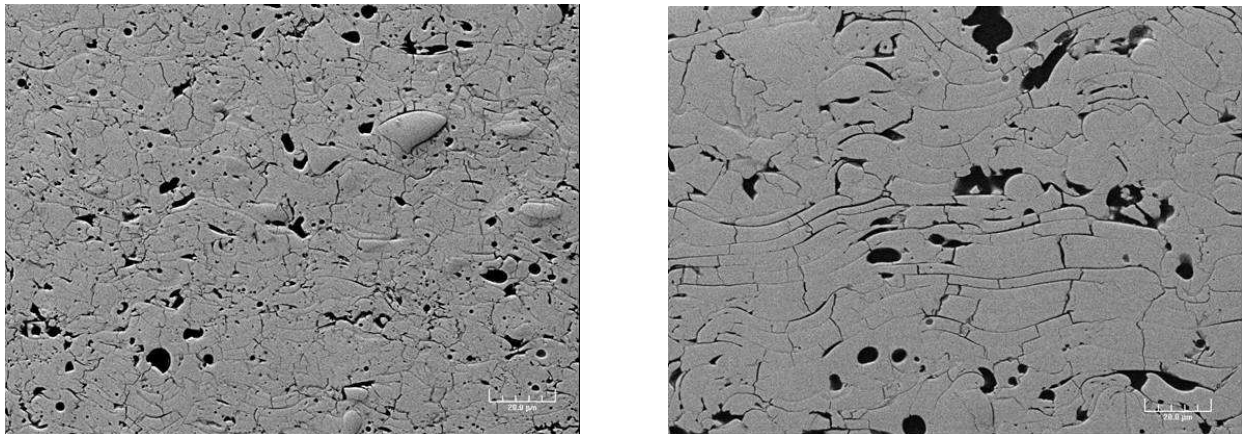


Figure III.6 : Architectures de dépôts d'alumine élaborés en APS (gauche) et à l'aide du procédé ROKIDE® (droite) [14].

Des calculs de conductivité thermique ont été menés par Florence MOITRIER, stagiaire, avec le logiciel que je développe [14]. Ces calculs ont été réalisés sur des images de 1024 par 768 pixels à la résolution de $0.17\mu\text{m}$ par pixel. La conductivité thermique de l'alumine étant assez sensible à la température (forte diminution avec la température), ces calculs ont été obtenus pour plusieurs niveaux de température. Au final, à température ambiante, la conductivité thermique calculée pour les dépôts réalisés en APS est de $18\text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ environ alors que celle des revêtements élaborés avec le procédé ROKIDE® (ou le procédé MASTER Jet®) est de $9\text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, soit deux fois moins. Cette différence notable est liée à la présence de nombreuses porosités interlamellaires horizontales dans la structure du dépôt élaboré avec le procédé ROKIDE®. Ces porosités interlamellaires agissent comme des barrières thermiques orientées perpendiculaires au gradient de température.

Dépôts abrasables de type AlSi/polyester

Les joints abrasables sont utilisés dans les applications aéronautiques pour minimiser la distance entre pales tournantes et parties statiques. Les matériaux utilisés s'usinent par frottement, permettant ainsi d'obtenir des ajustements au plus près. Dans le but d'obtenir les propriétés requises (notamment usinabilité), ces joints peuvent être générés par projection thermique et sont alors généralement élaborés à partir de poudres mélangées de différents matériaux. Dans cette étude, le cas d'un matériau composite de type AlSi/polyester est considéré : en particulier, les revêtements ont été élaborés à partir de deux poudres différentes (METCO 601 NS et DURABRADE 1605).

Le code de calcul OOF2 [19], développé par NIST (National Institute of Standards and Technology) est un programme orienté objet spécialement dédié à l'étude par éléments finis des structures multiphasiques telles que les revêtements élaborés par projection thermique. Dans sa version 2, il permet de réaliser des calculs de conductivité thermique comme nous le faisons. Ce

code a donc été utilisé en parallèle au notre pour réaliser des calculs sur des images de dépôts abrasables similaires.

La figure 7 présente l'architecture d'un dépôt abrasable de type AlSi/polyester (poudre DURABRADE 1605) à deux niveaux de grossissement différents ainsi que les images binaires correspondantes. Ces images binaires ont subi un traitement à l'aide d'un filtre de type DESPECKLE. Au grossissement de 50 (images du dessus), il est intéressant de noter que la phase conductrice blanche n'est pas continue aussi bien dans le sens du dessus vers le bas que dans le sens de la gauche vers la droite. Au contraire, au grossissement de 200, la phase blanche est quasi continue dans le sens vertical et un trajet continu complet peut être tracé de la gauche vers la droite en ne suivant que des pixels blancs.

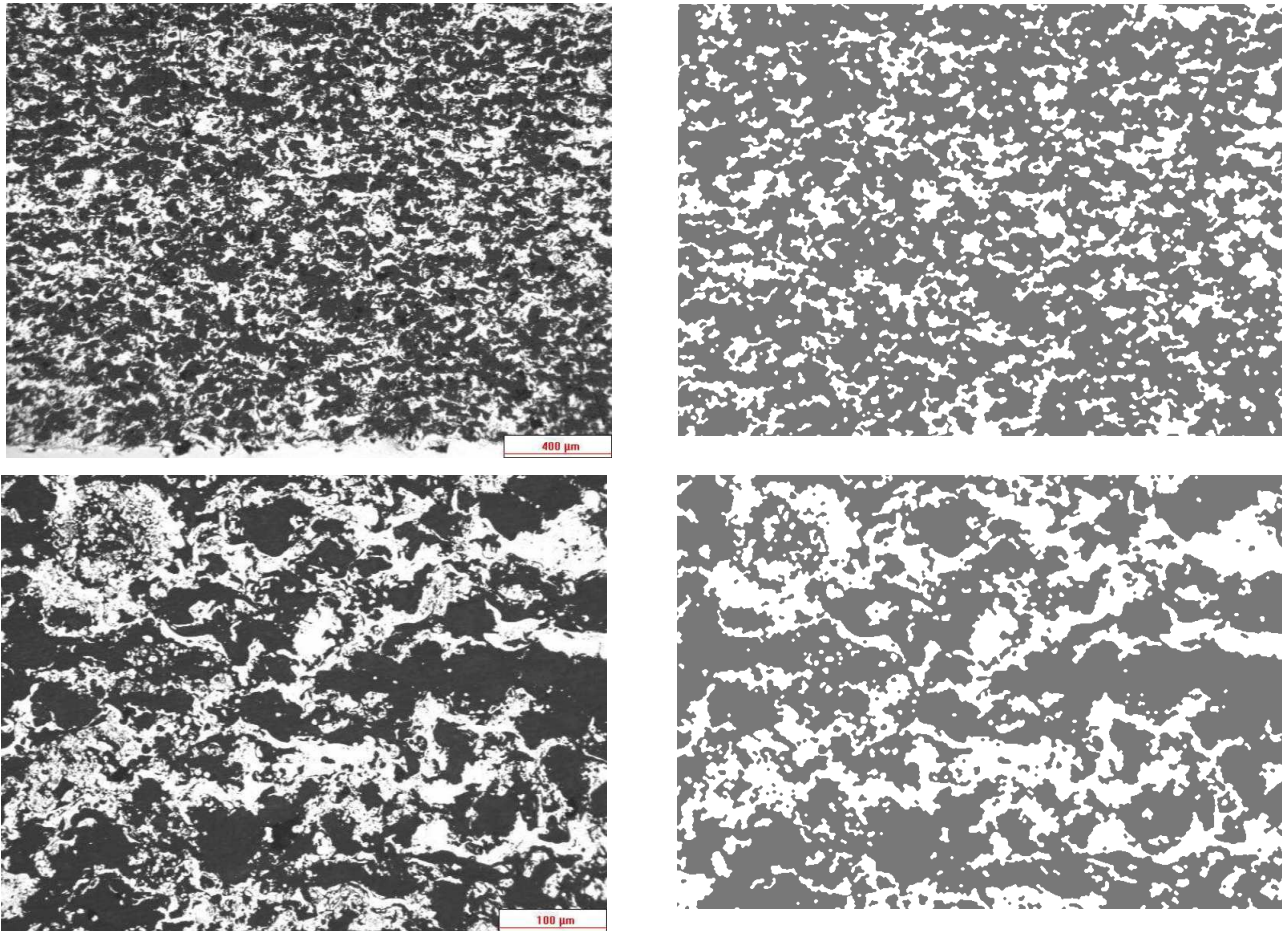


Figure III.7 : Architecture d'un dépôt abrasable de type AlSi/polyester prise à deux niveaux de grossissement différents et images binaires correspondantes [15].

En considérant les résultats obtenus avec notre code TS2C, nous avons pu noter que la conductivité thermique effective calculée aussi bien dans le sens vertical que dans le sens transversal, augmente de manière importante pour le grossissement de 200 : en effet, la chaleur parvient à se frayer un chemin à travers la matrice conductrice blanche sans avoir à traverser la phase polyester de conductivité thermique nettement inférieure. Ainsi, si des grossissements importants doivent être considérés lors de l'utilisation du code pour les barrières thermiques (de sorte à capturer les porosités interlamellaires sans en altérer la continuité), il n'en est plus de même pour les revêtements abrasables. En effet, le critère le plus important à considérer dans ce cas, est assurément de couvrir une zone suffisamment large pour être représentative de la discontinuité de la phase conductrice. En utilisant des grossissements trop importants, on risque de créer des ponts conducteurs à travers le polymère et de produire ainsi une augmentation de la conductivité thermique effective calculée du dépôt. Au final, en retenant des valeurs de $130 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour la phase AlSi (pixels blancs) et de $0.17 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour la phase polymère (pixels noirs), la conductivité thermique calculée avec TS2C est de $0.467 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour le grossissement le plus faible (image du dessus de la figure 7) et de $0.85 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour le plus fort grossissement (image du bas sur la figure 7), alors que la valeur expérimentale mesurée est de 0.53 [15].

Lorsque l'on considère la conductivité thermique suivant la direction transversale, les valeurs calculées sont de $0.756 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour le faible grossissement et $4.5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour le plus fort grossissement (augmentation très nette produite de par la continuité de la phase blanche de la gauche vers la droite sur l'image située en bas de la figure 7).

Concernant les comparaisons avec OOF2, nous avons observé des différences et nous en recherchons actuellement la ou les raison(s). Néanmoins, en considérant l'image prise au plus faible grossissement, la valeur calculée avec OOF2 est de $0.51 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ après diminution de la résolution d'image d'un facteur 2 (contre 0.46 avec notre code TS2C dans ces mêmes conditions), ce qui représente une différence de l'ordre de 10% entre les deux logiciels [15]. En effet, pour des raisons de mémoire (RAM de 1 Go seulement sur l'ordinateur utilisé), il ne nous a pas été possible pour l'heure de réaliser des calculs avec OOF2 tout en gardant la résolution d'image initiale. Ceci est tout de même étonnant dans la mesure où la RAM nécessaire avec TS2C n'est que de 32 Mo pour une image prise à sa résolution maximale !

Conclusion

Nous avons présenté succinctement et utilisé le code de calcul TS2C spécialement conçu pour quantifier l'effet de l'architecture d'un dépôt élaboré par projection thermique sur sa conductivité thermique effective. Ce code est basé sur une méthode de type différences finies et utilise directement l'image binaire du champ de porosité comme support de maillage. Il effectue la résolution suivant une méthode itérative d'un système d'équations linéaires dont la dimension est égale au nombre total de pixels de l'image. Il permet notamment de définir, pour une image donnée, le rapport de la conductivité thermique effective d'un dépôt relativement à celle du matériau dense, en fonction du rapport de la conductivité thermique du matériau dense à celle des pores (de l'ordre de 100 pour la zircone partiellement stabilisée à l'yttria). Il permet aussi de mettre en évidence l'influence du procédé d'élaboration sur la conductivité thermique apparente. Par exemple, la refusion laser *in situ* permet de diminuer de près de 40% la conductivité thermique apparente du dépôt en créant des fissures horizontales agissant comme résistances thermiques.

Nous avons ensuite pu mettre en évidence que les dépôts d'alumine élaborés avec le procédé ROKIDE® présentent des conductivités thermiques effectives nettement plus faibles que ceux élaborés en APS. Enfin, concernant le calcul de la conductivité thermique de dépôts abrasables de type AlSi/polyester, nous avons mis en évidence qu'un changement s'impose au niveau du choix du niveau de grossissement. Pour les barrières thermiques, le grossissement doit être le plus fort possible afin de capturer convenablement les pores interlamellaires. Au contraire, pour des dépôts abrasables tels que ceux que nous avons considérés, il convient de s'assurer prioritairement, que le grossissement utilisé permette de couvrir une zone suffisamment large pour être représentative de la discontinuité de la phase conductrice. Au final, si le ratio entre la conductivité thermique du dépôt relativement à celle du matériau dense est de l'ordre de 0.2 à 0.5 pour barrières thermiques, le ratio entre la conductivité thermique du dépôt relativement à celle de la phase conductrice devient inférieur à 0.005 pour les dépôts abrasables (pour lesquels la phase de faible conductivité thermique est majoritaire dans le dépôt).

Références :

- [1] R. Dutton, R. Wheeler, K.S. Ravichandran, K. An, Effect of Heat Treatment on the Thermal Conductivity of Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings, *J. Thermal Spray Technol.*, **9** (2), 204-209, 2000.
- [2] D.P.H. Hasselman, Effect of cracks on thermal conductivity, *J. Comp. Mater.*, **12** (10), 403-407, 1978.
- [3] A. Degiovanni, Diffusivité et méthode flash, *Revue Générale de Thermique*, n°185, 420-442, 1977.
- [4] W.J. Parker, R.J. Jenkins, C.P. Butler, G.L. Abbott, Flash Method of determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity, *J. Appl. Phys.*, **32** (9), 1679-1684, 1961.
- [5] H. Wang, R.B. Dinwiddie, Reliability of Laser Flash Thermal Diffusivity Measurements of the Thermal Barrier Coatings, *J. Thermal Spray Technol.*, **9** (2), 210-214, 2000.

- [6] A. Kulkarni, Z. Wang, T. Nakamura, S. Sampath, A. Goland, H. Herman, J. Allen, J. Ilavsky, G. Long, J. Frahm, R.W. Steinbrech, Comprehensive microstructural characterization and predictive property modeling of plasma-sprayed zirconia coatings, *Acta Mater.*, **51**, 2457–2475, 2003.
- [7] K. Bakker, Using the finite element method to compute the influence of complex porosity and inclusion structures on the thermal and electrical conductivity, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **40** (15), 3503-3511, 1997.
- [8] K.J. Hollis, Pore Phase Mapping and Finite-Element Modeling of Plasma Sprayed Tungsten Coatings, in C.C. Berndt and S. Sampath (eds.), *Thermal Spray Science & Technology*, ASM Int, Materials Park, OH-USA, 403-408, 1995.
- [9] J.M. Dorvaux, O. Lavigne, R. Mévrel, M. Poulain, Y. Renollet, C. Rio, Modelling the thermal conductivity of thermal barrier coatings, Proc. 85th AGARD SMP Meeting on Thermal Barrier Coatings, 1997.
- [10] G. Antou, R. Bolot, G. Montavon, C. Coddet, F. Hlawka, A. Cornet, Prediction of thermal spray coating thermal conductivity by 2D heat transfer modelling, dans *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 10-12 mai 2004, Osaka, JAP), ISBN 3-87155-792-7, Pub. DVS, DE, 2004.
- [11] R. Bolot, G. Antou, G. Montavon, C. Coddet, A two-dimensional heat transfer model for thermal barrier coating average thermal conductivity computation, *Numer. Heat Transfer, Part A*, **47** (9), 875-898, 2005.
- [12] G. Antou, F. Hlawka, R. Bolot, G. Montavon, C. Coddet, A. Cornet, Pore network architecture and thermal conductivity of Y-PSZ TBCs in situ remelted during their deposition, pp. 1424-1429 de *Thermal Spray connects: Explore its surfacing potential* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 2-4 mai 2005, Bâle, CH), Ed. E. Lugscheider, Pub. DVS, DE, 2005.
- [13] G. Antou, G. Montavon, F. Hlawka, R. Bolot, A. Cornet, C. Coddet, F. Machi, Thermal and mechanical properties of partially stabilized zirconia manufactured by hybrid plasma spray process, *High Temp. Mater. Processes*, **9** (1), 109-125, 2005.
- [14] S. Costil, C. Verdy, R. Bolot, C. Coddet, "On the Role of Spraying Process on Microstructural, Mechanical and Thermal Response of Alumina Coatings", *Journal of Thermal Spray Technology*, **16** (5-6) (2007), pp. 839-843.
- [15] R. Bolot, J.L. Seichepine, F. Vucko, C. Coddet, D. Sporer, P. Fiala, B. Bartlett, Thermal Conductivity of AlSi/Polyester Abradable Coatings, International Thermal Spray Conference 2008, Maastricht, PB, à paraître.
- [16] R. Mévrel, J.C. Laizet, A. Azzopardi, B. Leclercq, M. Poulain, O. Lavigne, D. Demange, Thermal diffusivity and conductivity of $Zr_{1-x}Y_xO_{2-x/2}$ ($x=0.$, 0.084 and 0.179) single crystals, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **24**, 3081-3089, 2004.
- [17] R. Azzopardi, R. Mévrel, B. Saint-Ramond, E. Olson, K. Stiller, Influence of aging on structure and thermal conductivity of Y-PSZ and Y-FSZ EB-PVD coatings, *Surf. Coat. Technol.*, **177-178**, 131-139, 2004.
- [18] A. Azzopardi, R. Mévrel, Conductivité thermique de dépôts barrière thermique EB-PVD après traitement thermique, Recueil de conférences de Matériaux 2002, Tours, France, 2002.
- [19] <http://www.ctcms.nist.gov/oof/>

THEME IV : Optimisation du design d'outils

Les outils de projection dont nous disposons au LERMPS et que nous utilisons quotidiennement, sont le plus souvent les outils utilisés dans le milieu industriel (torche plasma SULZER-METCO F4, etc.). Toutefois, en tant que laboratoire, il est de notre ressort d'être porteur, tant dans le domaine de la conception de nouveaux outils (ou de l'amélioration d'outils existants), que dans celui du développement de nouveaux procédés. Ainsi, en 2007-2008, les deux contrats principaux dont je me suis occupé ont porté, pour l'un sur l'amélioration d'un outil de type Arc fil destiné à une application particulière, et pour l'autre sur la conception complète d'un nouvel outil permettant de réaliser de la réparation de surface. Concernant ces deux contrats, je n'en donnerai aucun détail dans ce dossier pour cause de confidentialité. Néanmoins, j'ai choisi de développer plus particulièrement deux autres cas, à savoir :

- l'optimisation de tuyères divergentes pour projection plasma sous très faible pression
- l'amélioration d'un outil de type Arc fil rotatif destiné à la réalisation de revêtements dans des cylindres destinés à l'industrie automobile.

Concernant le premier cas, il n'existe pas de problème de confidentialité puisque c'est un sujet sur lequel nous communiquons régulièrement et que nous tentons d'être porteur dans le domaine. De plus, c'est le sujet sur lequel j'ai co-encadré Monsieur Dmitry SOKOLOV dans le cadre de sa thèse.

Concernant le second, il n'existe plus de problème de confidentialité puisque les suggestions que nous avons proposées ont été brevetées et que nous avons ensuite publié sur le sujet. J'ai par ailleurs encadré plusieurs DEA dans ce cadre.

1. Design d'une extension de tuyère pour projection sous très faible pression

Le procédé de projection thermique de type APS est largement utilisé dans l'industrie du traitement de surface. De par la température importante du jet de plasma de type APS, il est notamment particulièrement bien adapté à l'élaboration de dépôts céramique. Néanmoins, de par l'oxydation des particules en vol, la projection de métaux ou d'alliages est parfois plus délicate notamment lorsque la qualité du dépôt doit être privilégiée. En particulier, certaines technologies avancées nécessitent la production de dépôts denses et non oxydés de matériaux tels qu'alliages cuivre ou TA6V. Pour ces applications, le procédé de projection sous faible pression (LPPS ou VPS) est bien plus approprié. En particulier, l'utilisation d'un environnement inerte permet d'éviter toute oxydation. De plus, la vitesse élevée des jets de plasma produits sous faible pression permet d'augmenter la vitesse des particules projetées, de diminuer le taux de porosité et d'obtenir ainsi des dépôts plus denses. Les équipements conventionnels utilisés en LPPS sont conçus pour fonctionner sous quelques centaines ou dizaines de millibars (typiquement une cinquantaine). Dans ces conditions, les torches utilisées peuvent ne différer que faiblement de celles utilisées en APS. Par exemple, la torche Sulzer-Metco F4VB est relativement similaire à la F4 excepté la présence d'un divergent conique en sortie permettant d'adapter la pression amont à celle de l'enceinte.

En effet, lorsque la pression d'enceinte est suffisamment faible, l'écoulement devient supersonique dans le divergent et on peut alors observer des diamants (zones de forte pression) tout au long de l'axe du jet externe. Ces dernières années, un intérêt croissant s'est porté sur l'exploration de niveaux de pression d'enceinte plus faibles. En particulier, la projection thermique sous très faible pression est une alternative susceptible de combler le vide entre dépôt physique en phase vapeur (PVD) et projection thermique basse pression (LPPS) tout en conservant la vitesse de déposition du second procédé.

Sous très faible pression, il a été montré que le diamètre et la longueur du jet de plasma augmentent fortement. Par exemple, si la longueur d'un jet de plasma est d'environ 200 mm à 70 mbar, elle devient nettement supérieure au mètre à 1 mbar. Comme la dimension radiale du jet augmente proportionnellement, on peut espérer être en mesure de revêtir des zones relativement larges d'une couche de dépôt homogène. Aujourd'hui, le laboratoire LERMPS est équipé d'une installation permettant d'atteindre un niveau de pression inférieur au mbar (de l'ordre de 50 Pa) en cours de projection. Dans ces conditions, la dimension du jet de plasma devient si importante

qu'elle a nécessité un agrandissement de la chambre, réalisé par le biais de l'assemblage de deux cuves VPS. Toutefois, bien que la taille du jet augmente de manière substantielle avec la diminution de la pression d'enceinte, sa structure devient fortement inhomogène tel qu'observé sur la figure 1. En fait, comme le divergent de la tuyère est conçu pour un niveau de pression d'enceinte supérieur, le jet de plasma produit est assez fortement sous détendu en sortie de divergent, si bien qu'expansions et recompressions se succèdent tout au long de l'axe du jet, ce qui produit une alternance de zones très lumineuses (pression et température élevées) et de zones moins brillantes (forte vitesse mais plus faibles niveaux de température et de pression). La nature inhomogène du jet de plasma peut permettre à la poudre injectée dans l'écoulement de s'échapper et de se re-solidifier, ce qui peut dégrader la qualité des revêtements élaborés.



Figure IV.A.1 : Photographie d'un jet plasma produit sous une pression d'enceinte de 50 Pa avec une tuyère conventionnelle de type F4VB (plasma d'argon à 40 NI/min sous 700 A) [1-3].

La figure 2 présente l'image d'un dépôt de cuivre d'épaisseur 300 μ m élaboré sous très faible pression avant et après attaque chimique au FeCl_3 permettant de révéler la structure recristallisée du revêtement [3-4]. On peut noter d'après la figure de gauche que le dépôt est très dense de par la forte vitesse des particules au moment de leur impact sur le substrat. Par ailleurs, lors de ces mêmes manipulations, un dépôt de vapeur condensée de 5 μ m d'épaisseur a été obtenu sur des plaques de verre placées à 60 cm du jet de plasma. Le but du projet LETS coordonné par le Professeur Didier Klein avec qui j'ai co-encadré Dmitry SOKOLOV, est donc de produire des dépôts hybrides entre projection thermique et PVD (dépôt physique en phase vapeur) tout en conservant la vitesse de déposition du premier nommé.

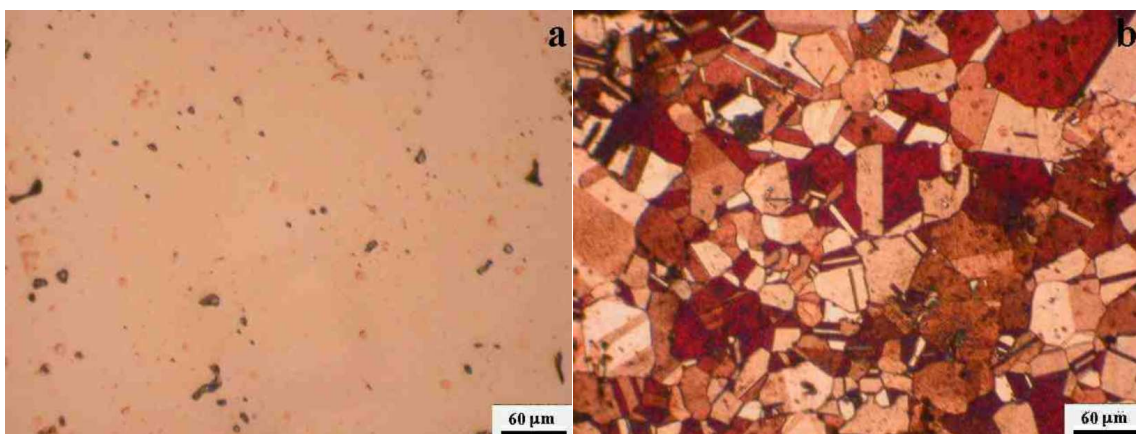


Figure IV.A.2 : Dépôt de cuivre de 300 μ m produit sous une pression d'enceinte de 0.6 mbar [3-4].

Développement de nouvelles tuyères :

Même pour un écoulement idéalement détendu, le jet issu d'une tuyère équipée d'un divergent conique présente une composante radiale d'où un jet externe inhomogène. Ainsi, il n'est pas possible de produire un jet unidirectionnel avec un divergent conique. Pour ce faire, l'utilisation d'un divergent de type contour cloche est nécessaire. Ce type de tuyère redresse l'écoulement parallèlement à l'axe de la tuyère en sortie. Même si une méthode de construction de profil a été proposée dès 1949 par Foelsch [5], leur conception et leur usinage sont plus complexes si bien que des divergents coniques sont encore utilisés le plus souvent.

Néanmoins, l'utilisation de tuyères équipées d'un divergent de type contour cloche, n'est pas nouveau en soit. Henne *et al.* [6] ou encore Schwenk *et al.* [7] ont montré que leur intérêt en projection thermique ne se limite pas au seul procédé LPPS, mais concerne aussi l'APS.

Les différentes étapes dans le design d'un contour de tuyère optimisé, ont été résumées par Foelsch [5] : le profil est composé de trois parties différentes :

- rayon de courbure au col
- partie rectiligne
- courbe de transition

Plus récemment, nous avons suggéré l'utilisation d'une méthode approximative [8]. Tout d'abord, le rapport de diamètre entre sortie et col est déterminé en fonction du rapport des pressions. La longueur de la tuyère divergente et le diamètre au col sont ensuite calculés. Enfin, le profil est déterminé à l'aide d'une équation approximative. Les résultats CFD obtenus avec PHOENICS ont montré que le jet externe pouvait être dépourvu d'ondes de compression avec cette méthode approximative [8].

D'après la théorie des écoulements compressibles à travers les tuyères convergentes/divergentes, l'écoulement amont n'est pas influencé par les conditions dans la chambre, dans des conditions supersoniques. Concernant les jets de plasma sous vide, cette hypothèse a été confirmée par les mesures de pression réalisées par Rahmane *et al.* [9-10] et Gindrat *et al.* [11]. Ainsi, la pression de sortie calculée doit être celle de la chambre pour obtenir un jet correctement détendu. Comme le rapport de pression dépend directement du rapport des sections, ce paramètre doit être calculé en premier. En particulier, il a été montré [8] que le rapport des sections doit satisfaire :

$$\frac{A_e}{A^*} = \frac{1}{M_e} \left[\frac{2\alpha + (\gamma - 1)M_e^2}{2\alpha + (\gamma - 1)} \right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

dans laquelle le nombre Mach en sortie M_e peut être calculé à partir de :

$$\frac{P^*}{P_e} = \left[\frac{2\alpha + (\gamma - 1)M_e^2}{2\alpha + (\gamma - 1)} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Dans ces équations, les deux dérivées thermodynamiques γ et α sont définies par :

$$\gamma = (\partial \ln P / \partial \ln \rho)_S \text{ et } \alpha = -(\partial \ln \rho / \partial \ln T)_P$$

Pour un écoulement non réactif (figé), il vient $\alpha = 1$ si bien que l'équation 1 devient :

$$\frac{A_e}{A^*} = \frac{1}{M_e} \left[\frac{2}{\gamma+1} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2 \right) \right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

Dans la plupart des cas, cette dernière équation est celle utilisée dans les articles traitant des écoulements de plasma à travers une tuyère. Plus strictement, cette équation n'est valide que dans une situation d'écoulement figé pour laquelle la dérivée α est unitaire. En considérant, le cas extrême opposé (équilibre chimique), il a été montré que les deux dérivées γ et α varient fortement en fonction de la température [3]. Par conséquent, les caractéristiques du contour d'un divergent dépendent de l'hypothèse utilisée pour estimer ces deux dérivées.

Le tableau 1 présente l'évolution des deux dérivées γ et α pour un plasma d'argon en fonction de la température [3].

Tableau IV.A.1 : Dérivées thermodynamiques sous condition d'équilibre chimique (Ar - P=100 kPa).

T(kK)	4	6	8	10	12	14
$\alpha = -(\partial \ln \rho / \partial \ln T)_P$	1	1	1.02	1.21	1.91	2.83
$\gamma = (\partial \ln P / \partial \ln \rho)_S$	1.67	1.67	1.53	1.25	1.16	1.15

Au vu de ce tableau, il est clair que les dérivées thermodynamiques varient de manière importante en supposant l'équilibre chimique. Au contraire, ces dérivées ne changeraient que faiblement en supposant une hypothèse de chimie figée. En première approximation, on peut considérer qu'elles resteraient inchangées à $\alpha = 1$ et $\gamma = 5/3$.

Les tuyères que nous avons souhaité concevoir doivent être utilisées à de forts rapports de pression (de l'ordre de 200 au lieu de 10 pour une tuyère conventionnelle). Le tableau 2 présente l'influence des dérivées thermodynamiques sur le rapport de section A_e/A^* requis par un rapport de pression de 160 [3]. On peut observer que ce rapport de section dépend fortement de l'hypothèse utilisée pour estimer ces dérivées : le rapport de section est environ deux fois plus faible pour un écoulement figé (première ligne) relativement à celui calculé avec l'hypothèse d'équilibre (lignes 2 et 3). De plus, le rapport de température déduit est également largement influencé par l'hypothèse de calcul : en considérant une température au col de 13 000 K, la température de sortie n'excéderait pas 1700 K avec l'hypothèse d'écoulement figé. Au contraire, de par les recombinaisons chimiques, la température de sortie resterait bien supérieure (5400-7800 K) avec l'hypothèse d'équilibre. Les deux dernières lignes du tableau ont été obtenues en supposant $\alpha = 1$. Dans ce cas, le rapport de section requis est plus élevé.

Tableau IV.A.2 : Influence des dérivées thermodynamiques sur le rapport de section requis et sur le rapport de température calculé (rapport de pression de 160) [3].

	γ	α	β	M_e	A_e/A^*	d_e/d^*	T^*/T_e
1	1.67	1	2.50	5.25	11.06	3.33	7.61
2	1.25	1.21	5.72	4.45	21.65	4.65	2.43
3	1.16	1.91	10.01	5.12	22.02	4.69	1.66
4	1.25	1	5.00	4.10	23.47	4.85	2.76
5	1.16	1	7.25	3.83	29.42	5.42	2.01

Dans ce tableau, la dérivée β quantifie le rapport relatif entre variations de pression et de température. Plus cette dérivée est faible, plus la chute de température provoquée par la détente dans la tuyère est élevée. Avec une hypothèse d'équilibre, cette dérivée augmente de par l'augmentation du C_p .

$$\beta = (\partial \ln P / \partial \ln T)_s = \frac{C_p}{nR\alpha}$$

(n étant le nombre de moles par unité de masse, nR possède l'unité $J.kg^{-1}.K^{-1}$)

Quoi qu'il en soit, on peut noter que le rapport des sections (sortie/col) et des diamètres est très largement supérieur à celui nécessité par un rapport de pression de 10 [8].

Profil du divergent :

Une fois le rapport de section estimé avec l'une ou l'autre des hypothèses indiquées ci-dessus, le profil doit être déterminé. Suivant sa méthode, Foelsch [5] se réfère à la fonction $\tau = r/r^*$. A partir de l'équation 1, il vient :

$$\tau^2 = \frac{1}{M} \left[\frac{2\alpha + (\gamma - 1)M^2}{2\alpha + (\gamma - 1)} \right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

La différentielle logarithmique de τ donne :

$$\frac{d\tau}{\tau} = \frac{dr}{r} = \frac{(M^2 - \alpha)dM}{2M(\alpha + [(\gamma - 1)/2]M^2)}$$

La fonction ψ utilisée pour définir le contour du profil peut ensuite être calculée par intégration numérique de :

$$d\psi = \frac{1}{\sqrt{M^2 - 1}} \frac{d\tau}{\tau} = \frac{(M^2 - \alpha)/\sqrt{M^2 - 1}dM}{2M(\alpha + [(\gamma - 1)/2]M^2)}$$

ce qui donne :

$$\psi = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{4(\gamma+1)}{(\gamma-1)(3\alpha+1)}} \operatorname{atan} \left(\sqrt{\frac{4(\gamma-1)}{(\gamma+1)(3\alpha+1)}} (M^2 - 1) \right) - \operatorname{atan} \left(\sqrt{M^2 - 1} \right) \right]$$

L'équation ci-dessus représente une extension de la solution dérivée par Foelsch [5] qui s'écrit :

$$\psi = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{(\gamma+1)}{(\gamma-1)}} \operatorname{atan} \left(\sqrt{\frac{(\gamma-1)}{(\gamma+1)}} (M^2 - 1) \right) - \operatorname{atan} \left(\sqrt{M^2 - 1} \right) \right] \text{ pour } \alpha = 1.$$

En particulier la nouvelle fonction ψ s'applique plus efficacement pour les écoulements réactifs pour lesquels α peut différer de 1. Dans la mesure où pas mal d'applications du domaine de la combustion sont souvent concernées par les tuyères de type contour cloche, cette nouvelle équation représente un avancement intéressant pas seulement pour les écoulements de plasmas.

L'angle au col du divergent peut ensuite être calculé par :

$$\omega = \psi_e / 2$$

dans laquelle l'indice e indique la sortie ("exit").

Les étapes suivantes concernant les méthodes à utiliser pour le design du divergent sont similaires à celles décrites par Foelsch [5].

La figure 5 présente les contours correspondant aux 5 conditions listées dans le tableau 2 en considérant un diamètre au col de 5 mm [3]. La tuyère la plus courte est obtenue pour $\gamma=5/3$ correspondant à une condition de chimie figée. Une diminution de γ tout en conservant $\alpha=1$ donne un divergent plus long et de diamètre supérieur (comparaison des cas 1, 4 et 5 dans l'ordre). Une augmentation de α tout en conservant γ inchangé produit un allongement de la tuyère et une diminution du diamètre de sortie (comparaison entre 4 et 2 ou entre 5 et 3). On peut par ailleurs noter que le divergent obtenu pour le cas n°3 (plus grande valeur de α) est plus significativement influencé par le rayon de courbure au col que les autres.

On peut également remarquer que la longueur de tuyère requise est supérieure à 60 mm quel que soit le cas considéré. En particulier la tuyère la plus longue présente une longueur supérieure à 100 mm.

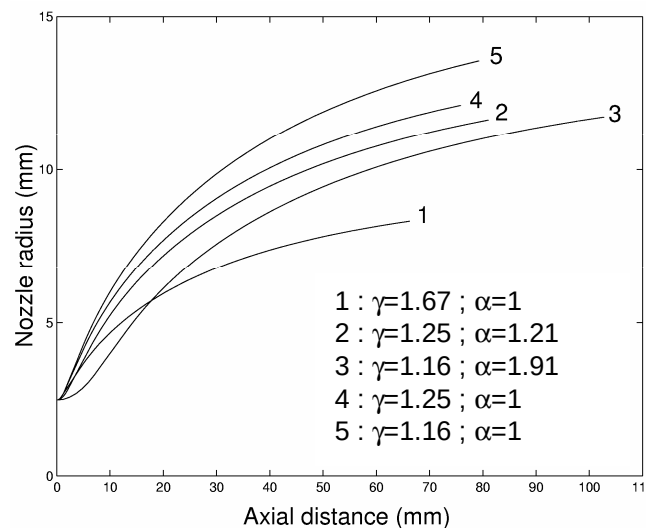


Figure IV.A.5 : Profils de divergents de type contour cloche calculés pour les paramètres du tableau 2 et en considérant un diamètre au col de 5 mm [3].

Partie expérimentale :

De par les dimensions requises, aucun des outils VPS actuels n'est équipé d'un divergent suffisamment grand pour y usiner un tel profil. Ainsi, il a été décidé d'adapter une extension en sortie d'une buse rallongée de type F4 fournie par MEDICOAT AG et présentant un diamètre au col de 5 mm. La figure 6 présente l'extension conçue pour le cas n°5 : elle présente une longueur de 79 mm, un angle de divergent de 23° et un diamètre interne de 27.1 mm en sortie [12-13]. Le prototype correspondant a été usiné au département GSP de l'UTBM.

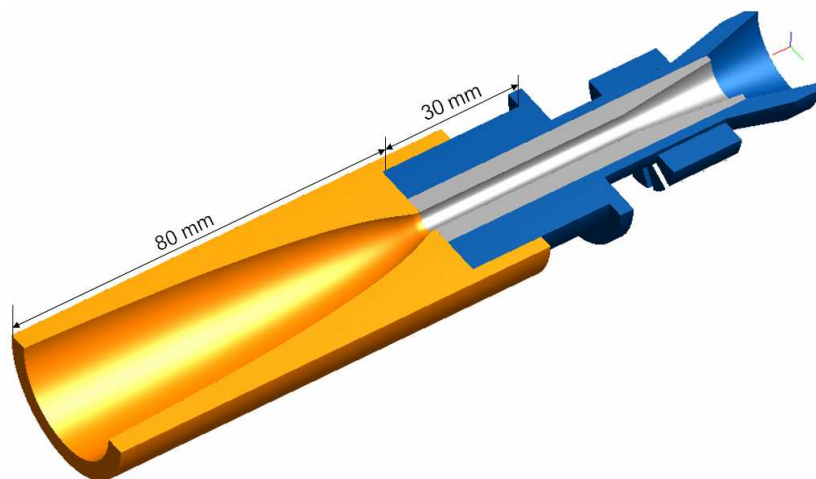


Figure IV.A.6 : Vue de la buse MEDICOAT de type F4 rallongée (bleue) équipée du divergent de type contour cloche (doré) [12-13].

L'extension de type contour cloche doit être refroidie dans le but d'empêcher toute surchauffe. L'utilisation d'un circuit de refroidissement supplémentaire a donc été décidée. La figure 7 présente une vue CAO du circuit d'eau enroulé autour de l'extension puis brasé. De plus, trois trous non émergents ont été usinés le long de l'extension afin d'y placer des thermocouples dans le but de contrôler la température. Ces trous ont ensuite été remplis d'un matériau réfractaire. En pratique, la gamme de température mesurée par ces thermocouples est comprise entre 120°C (plasma de type argon pur) et 270°C (mé lange argon/hydrogène) [12-13].



Figure IV.A.7 : Vue CAO du circuit de refroidissement additionnel enroulé puis brasé autour de l'extension de type contour cloche [12-13].

La figure 8 présente une photographie du dispositif expérimental dans l'enceinte maintenant formée de deux cuves VPS jointes.

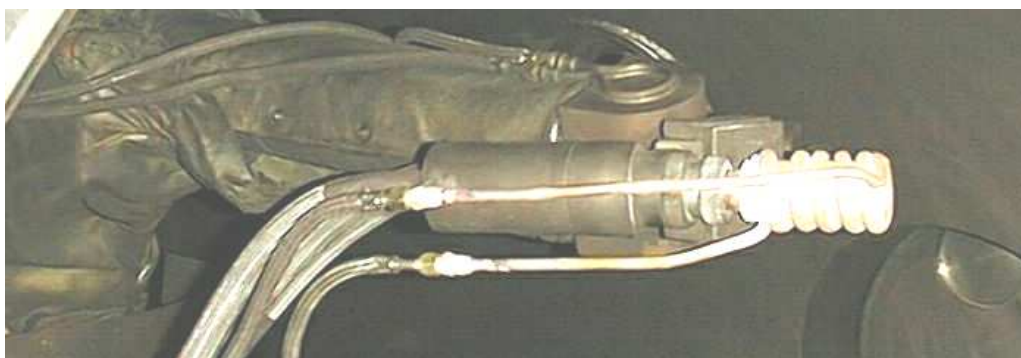


Figure IV.A.8 : Photographie de la torche montée sur le bras du robot et équipée de l'extension de type contour cloche avec son circuit de refroidissement additionnel [12-13].

Suite aux premières manipulations expérimentales, des pertes thermiques importantes ont été relevées dans le circuit de refroidissement primaire. Afin de limiter ces pertes, il a donc été décidé de raccourcir au maximum la partie de section constante de la buse rallongée (celle indiquée à 30 mm sur la figure 6). Au final, l'extension de 30 mm a été réduite à 2 mm (soit une diminution de 28 mm) afin de limiter les pertes thermiques dans le circuit primaire. En procédant à ce raccourcissement, une diminution des pertes thermiques de près de 20% a été notée, permettant de passer d'un rendement thermique de l'ordre de 35% à plus de 45% [12-13].

Dans ce même article, des tests ont également été réalisés en vue d'estimer la température du plasma en sortie. Ainsi, des échantillons de différents matériaux ont été placés en sortie de torche afin de constater ou non leur fusion. Toutefois, le problème de la fusion d'un matériau soumis à l'impact d'un jet est complexe. En particulier, vu la présence d'un point d'arrêt sur la surface de l'échantillon, c'est plus en terme de température totale qu'il faut raisonner.

Le dispositif a été testé pour la projection d'une poudre de type CuAgZr de granulométrie +10-63 μ m élaborée au LERMPS par atomisation. Des difficultés ont été rencontrées concernant la localisation du point d'injection de la poudre. En particulier, un colmatage partiel a été observé lorsque le point d'injection a été placé près du col. Au contraire, l'énergie thermique disponible dans le plasma n'est plus suffisante pour fondre les particules lorsque le point d'injection est placé près de la sortie de l'extension. Des travaux de modélisation ont donc été réalisés.

Les calculs CFD ont été réalisés à l'aide de FLUENT. Le domaine de calcul comprend l'extension de type contour cloche et l'injecteur de poudre. L'injecteur présente un diamètre interne de 3 mm, une partie verticale de 50 mm précédée d'un coude de rayon de courbure 6 mm et d'une partie horizontale de 30 mm tel qu'indiqué sur la figure 9. Le maillage réalisé est composé de prismes (triangles extrudés) dans l'injecteur et de tétraèdres dans le divergent. Par ailleurs trois points d'injection différents ont été considérés. Les principales grandeurs caractéristiques de l'écoulement ont été présentées [12-13].

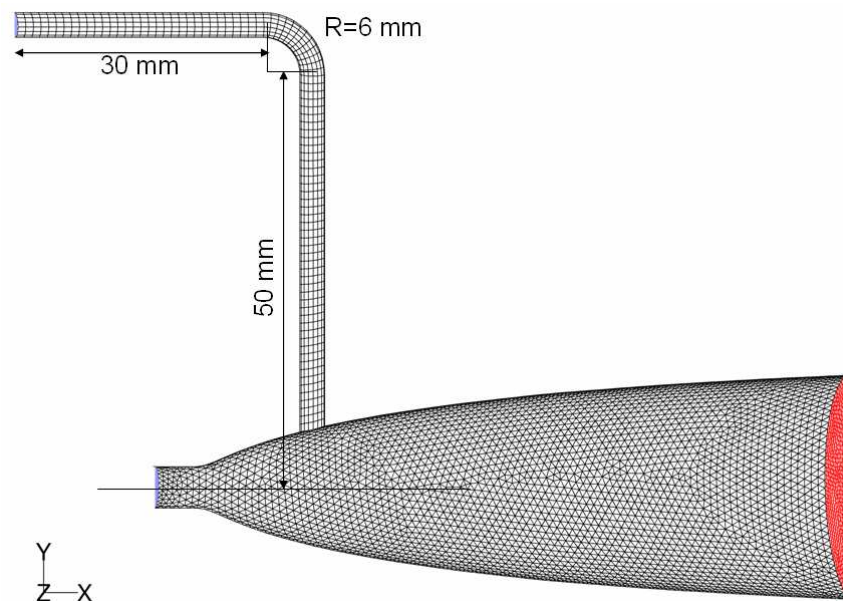


Figure IV.A.9 : Vue du maillage de type non structuré [12-13].

La figure 10 présente les trajectoires calculées dans le divergent et l'injecteur. Le code des couleurs est représentatif de la taille de particules (en m) pour laquelle une distribution de type Rosin-Rammler a été supposée. On note que les particules les plus petites (une dizaine de microns) se trouvent au niveau de l'axe de la torche en sortie du divergent. Au contraire, les particules les plus grosses (45 μ m et plus) viennent impacter la surface du divergent du côté opposé au point d'injection. L'utilisation d'un point d'injection situé 20 mm plus en aval n'a pas permis de supprimer le problème : les particules injectées étant moins bien déviées par l'écoulement du plasma [12-13]. Pour le troisième point d'injection, la température du plasma n'est plus suffisante pour permettre la fusion du matériau.

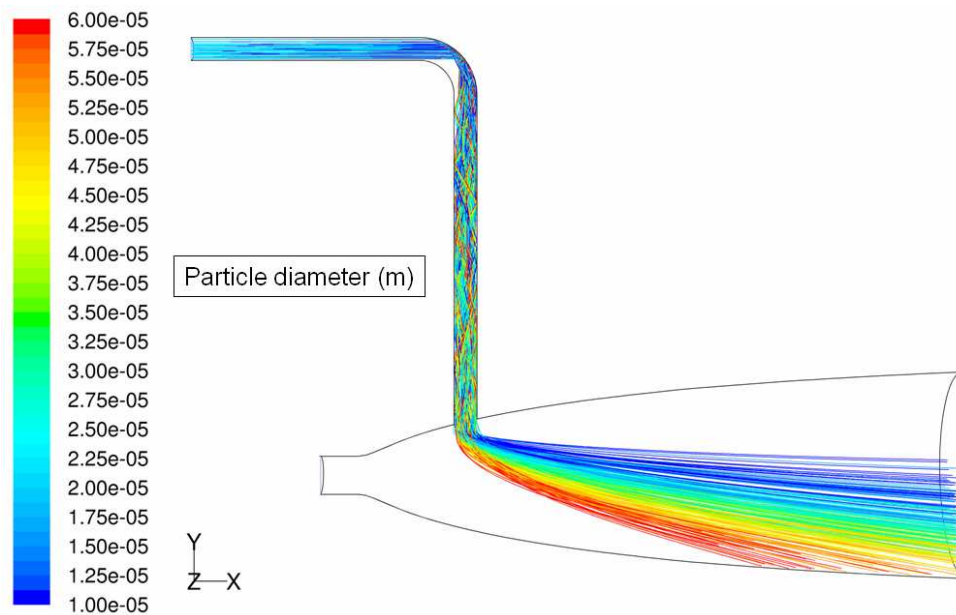


Figure IV.A.10 : Trajectoires de particules injectées radialement dans le divergent (injecteur placé à 14 mm en aval du col) [12-13].

Conclusions

Une synthèse de nos travaux portant sur le design et l'utilisation de tuyères divergentes profilées, a été présentée à travers les résultats publiés dans 7 articles dont 1 en revue internationale, correspondant aux développements réalisés dans le cadre de la thèse de Dmitry SOKOLOV que j'ai co-encadré avec le Professeur Didier KLEIN.

De par les premiers résultats expérimentaux obtenus avec une torche de type F4VB conventionnelle, il a été noté que ce type de tuyère (divergent conique court) n'est pas adapté à la projection thermique sous très faible pression : en particulier, le jet de plasma produit est sous détendu et fortement inhomogène. Ainsi, le principal objectif de nos travaux a été de concevoir une extension spécialement destinée à la projection thermique sous très faible pression. Il a été montré que le profil de la tuyère dépend de manière importante de l'hypothèse considérée pour l'écoulement : en particulier avec l'hypothèse de chimie figée (pas de réactions chimiques), la tuyère divergente présente une longueur et un diamètre inférieurs à ceux obtenus avec une hypothèse d'équilibre chimique (cinétiques chimiques infiniment rapides). Concernant le profil de type contour cloche, la méthode analytique décrite par Foelsch [5] a été étendue au cas d'un écoulement équilibré, ce qui peut s'appliquer aux écoulements de plasmas sous certaines conditions ainsi qu'aux procédés de type combustion.

Après les premières manipulations expérimentales, l'extension de diamètre constant de la buse support (longueur initiale 30 mm) a été raccourcie à 2 mm dans le but de réduire les pertes dans le circuit de refroidissement : une diminution de 20% de ces pertes a ainsi été obtenue. Un circuit de refroidissement additionnel a été conçu de sorte à refroidir l'extension au profil contour cloche (conduit enroulé et brasé autour de l'extension). Des modélisations ont été réalisées pour étudier l'effet du positionnement du point d'injection dans le divergent. Les trajectoires calculées peuvent expliquer le colmatage dans l'extension sur la face opposée au point d'injection. Une modification du système d'injection doit être envisagée si l'on souhaite éviter ce colmatage, et un tamisage permettant de resserrer la granulométrie de la poudre utilisée est souhaitable. Par ailleurs une injection axiale de la poudre serait certainement plus efficace pour le procédé développé, notamment si l'on souhaite toujours utiliser un contour spécial du divergent dans le but d'améliorer l'homogénéité du jet. Au final, dans le cas d'une injection radiale impérative, l'utilisation d'un divergent court est à privilégier.

Références :

- [1] R. Bolot, D. Klein and C. Coddet, *Visualization and Modeling of the structure of a plasma jet under very low pressure conditions*, article n° 4094 of "Proceedings of the 4th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing" (CDROM), Chamonix (France), June 3-5, 2003.
- [2] R. Bolot, D. Klein and C. Coddet, *Effect of the chamber pressure on the structure of a plasma jet*, pp. 1087-1092 of "Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology", Ed. C. Moreau and B. Marple, Pub. ASM Int., Materials Park, OH-USA, 2003, 1708+ pages.
- [3] R. Bolot, D. Klein, and C. Coddet, "Design of a nozzle extension for thermal spray under very low pressure conditions", Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application, May 10-12, 2004 (Osaka, Japan), ISBN 3-87155-792-7, DVS, 2004.
- [4] D. Klein, Z. Salhi, L. Dembinski, R. Bolot, P. Gougeon, T. Grosdidier, H. Aourag and C. Coddet, *Développement de dépôts par projection thermique à très faible pression*, Proceedings of "Matériaux 2002" (CDROM), Tours (France), October 21-25, 2002.
- [5] K. Foelsch, The Analytical design of an Axially Symmetric Laval Nozzle for a Parallel and Uniform Jet, J. Aeronaut. Sci., (1949) 161-166.
- [6] R. Henne, V. Bork, D. Siebold, W. Mayr, A. Reusch, M. Rahmane, G. Soucy and M.I. Boulos, *Converging-Diverging Nozzles for Improved Atmospheric Plasma Spraying*, VDI Report NR. 1166, proceeding of 3rd European Congress on Thermal Plasma Processes (TPP3), Aachen (Germany), pp. 247-266, 1995.
- [7] A. Schwenk, G. Nutsch and H. Gruner, *Modified Nozzle for the Atmospheric Plasma Spraying*, pp. 573-579 of "Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology", Ed. C. Moreau and B. Marple, Pub. ASM Int., Materials Park, OH-USA, 2003, 1708+ pages.
- [8] R. Bolot, D. Klein and C. Coddet, *Influence of the nozzle design on the structure of a plasma jet under vacuum conditions*, pp. 938-943 of "Tagungsband Conference Proceedings", Ed. E. Lugscheider, Pub. DVS Deutscher Verband für Schweißen, Germany, 2002, 1051+ pages.
- [9] M. Rahmane, G. Soucy, M.I. Boulos and R. Henne, *Diagnostics of DC Plasma Jets Generated with Laval Anodes*, pp. 157-162 of "Thermal Spray Science & Technology", Ed. C.C. Berndt and S. Sampath, Pub. ASM Int., Materials Park, OH-USA, 1995, 774+ pages.
- [10] M. Rahmane, G. Soucy, M.I. Boulos and R. Henne, *Fluid Dynamic Study of Direct Current Plasma Jets for Plasma Spraying Applications*, Journal of Thermal Spray Technology, **7** (3) (1998) 349-359.
- [11] M. Gindrat, J.L. Dorier, C. Hollenstein, M. Loch, A. Refke, A. Salito and G. Barbezat, *Effect of specific operating conditions on the properties of LPPS plasma jets expanding at low pressure*, pp. 459-464 of "Tagungsband Conference Proceedings", Ed. E. Lugscheider, Pub. DVS, Deutscher Verband für Schweißen, Germany, 2002, 1051+ pages.
- [12] R. Bolot, D. Sokolov, D. Klein, C. Coddet, "Nozzle developments for thermal spraying at very low pressure", Journal of Thermal Spray Technology, **15** (4) (2006), pp. 827-833.
- [13] R. Bolot, D. Sokolov, D. Klein, C. Coddet, "Nozzle developments for thermal spraying at very low pressure", dans *Thermal Spray 2006: Science, Innovation and Application* (proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference, 15-18 mai 2006, Seattle, Washington, USA), Eds. B.R. Marple, C. Moreau, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2006.

2. Optimisation du design d'un pistolet de type Arc fil destiné à la réalisation de revêtements dans des cylindres pour l'industrie automobile

L'abaissement du poids des moteurs thermiques destinés à l'industrie automobile a vu le remplacement des blocs fonte par des blocs en alliages légers. Toutefois, ce changement a impliqué l'apparition de nouvelles technologies destinées à améliorer la résistance insuffisante de ces alliages pour ce type d'applications. Une de ces technologies consiste à insérer des fourreaux en fonte de faible épaisseur, soit lors du coulage sous pression, soit par emmanchement dans le bloc en aluminium (chemises sèches sans contact direct avec l'eau de refroidissement). Plus récemment, différentes techniques de projection thermique ont été utilisées pour éviter d'avoir recours à ces fourreaux qui sont alors remplacés par des couches projetées thermiquement. La plupart des lignes de productions actuelles de ce type utilisent le procédé ROTAPLASMA [1-5] pour générer le revêtement. Néanmoins, le procédé Arc fil présente habituellement différents avantages sur la technologie de projection plasma : vitesse de déposition plus élevée et coût moindre. Ainsi, DAIMLER-CHRYSLER a développé la technologie LDS (LichtbogenDrahtSpritzen) [6] basée sur un procédé Arc fil. Cette technologie est aujourd'hui utilisée pour des productions en série. FLAME SPRAY INDUSTRIES et FORD ont quant à eux développé une autre méthode utilisant un seul fil : la technologie PTWA (soit Plasma Transferred Wire Arc) [7-8].

L'étude présente a été menée en partenariat avec le groupe PSA PEUGEOT-CITROËN et porte sur le développement d'une technologie de type Arc fil. Elle montre notamment comment l'apport de la CFD (Computational Fluid Dynamics) peut permettre de résoudre des problèmes industriels complexes. En particulier, le logiciel CFD FLUENT (version 6.2.16) a été utilisé pour concevoir des améliorations portant sur le design de la tête de déviation du flux de gouttelettes atomisées par Arc fil. Deux brevets ont été déposés sur le sujet [9-10], puis un article de type revue internationale a été publié après enregistrement des brevets [11].

Différentes techniques ont été brevetées dans la littérature pour élaborer des revêtements à l'intérieur d'un cylindre par une technologie de type Arc fil.

- La première a été proposée par TAFA en 1999 [12]. Elle consiste à atomiser les extrémités fondues des fils avec un gaz primaire injecté co-axialement relativement à l'axe du cylindre (direction d'accès) puis à réorienter le flux de gouttelettes atomisées sur la surface du cylindre par le biais d'un écoulement secondaire perpendiculaire.
- Une seconde méthode a été proposée par SULZER-METCO en 2000 [13]. Elle consiste en une atomisation directe des extrémités des fils à l'aide d'un écoulement gazeux perpendiculaire à l'axe de rotation du dispositif. Le système comprend un gaz primaire injecté à travers un orifice en forme de croix, juste sur la zone d'arc. De plus, un gaz secondaire est injecté à travers une série de trous cylindriques distribués le long d'un cercle centré autour de la croix. Cette injection secondaire est destinée à limiter l'étalement du jet qui n'est jamais bénéfique.
- Une troisième solution est utilisée par DAIMLER-CHRYSLER depuis 2003 [6]. Cette solution inclut des molettes permettant de redresser fortement les fils (entrant suivant la direction de l'axe du cylindre) perpendiculairement à la paroi interne du cylindre (soit un redressement à 90° sur une très courte distance). Le gaz d'atomisation est alors directement injecté suivant la direction de projection comme pour un Arc fil traditionnel.

Le principal défaut de l'ensemble de ces techniques est de nécessiter la rotation de l'ensemble du dispositif de projection. En Arc Fil, ce dispositif comprend notamment les bobines, etc. Une alternative serait de faire tourner le cylindre, ce qui n'est possible que dans le cadre de développements de type recherche. En effet, cette solution n'est pas envisageable en pratique au niveau industriel car elle reviendrait à faire tourner tout le bloc moteur à forte vitesse.

Dans l'outil que nous avons développé, seule une tête de déviation tourne autour de la zone d'arc, ce qui représente un avantage certain.

La figure 1 présente une vue schématique des deux premières solutions techniques décrites ci-dessus. Sur la figure 1a, l'orifice primaire en forme de croix est entouré d'une série de 8 trous de diamètre 1.6 mm régulièrement distribués le long d'un cercle centré autour de l'orifice primaire. Par ailleurs, tous les trous sont alimentés en gaz par une même chambre pressurisée.

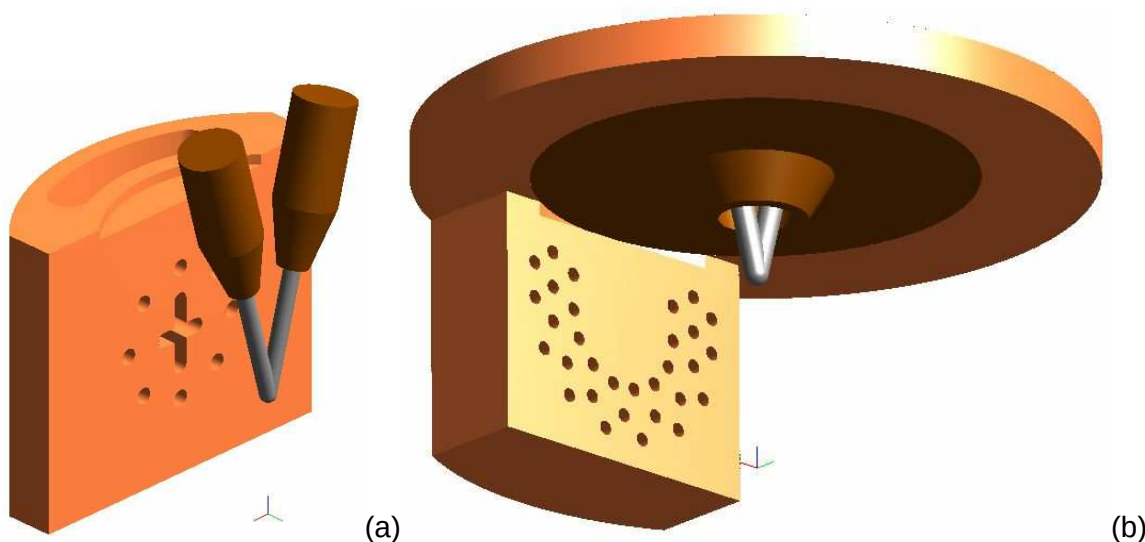


Figure IV.B.1 [11] : Représentation de deux solutions technologiques décrites ci-dessus :
 (a) atomisation perpendiculaire directe avec un orifice primaire de type croix [13]
 (b) atomisation verticale suivie d'un redressement radial à l'aide d'une buse de déviation composée de 31 trous présentant une distribution en U [12].

Dans la mesure où nous avons souhaité ne faire tourner que la tête de déviation de l'outil de projection, le dispositif utilisé dans cette étude est basé sur la figure 1b (à droite sur la figure 1). Il est constitué d'un pistolet standard de type TAFA 9000 équipé d'une rallonge de diamètre extérieur 44 mm. L'originalité première, vis-à-vis des travaux antérieurs, est que seule une couronne sur laquelle est fixée la tête de déviation, tourne au niveau de cet outil, le reste étant fixe. Ainsi la partie centrale (de couleur brune) du dispositif ne tourne pas de même que les fils, les bobines, etc. La tête de déviation telle qu'indiquée sur la figure 1b est la tête dite standard (TAFA 939ID) [12]. Elle est composée de trois séries de trous présentant une distribution semi-circulaire, et espacés régulièrement sur 3 rayons différents.

Des résultats préliminaires obtenus avec cette tête standard en conditions de torche fixe et cylindre tournant ont montré que la fonction de déviation n'était pas satisfaisante. Ainsi, la première tête de déviation testée dans cette étude est relativement similaire à celle représentée sur la figure 1b, excepté qu'elle comprend un plus grand nombre de trous (40 au lieu de 31). Cette modification a été opérée dans le but d'augmenter le débit d'air de déviation obtenu pour une pression d'alimentation donnée, en renforçant ainsi la fonction de déviation. Cette première tête est montrée sur la figure 2. Elle présente là encore trois séries de trous distribués sur trois rayons différents. La première série est composée de 10 trous seulement alors que les deux séries suivantes en comportent 15. Les deux épaulements permettent de visser la tête dans la couronne.

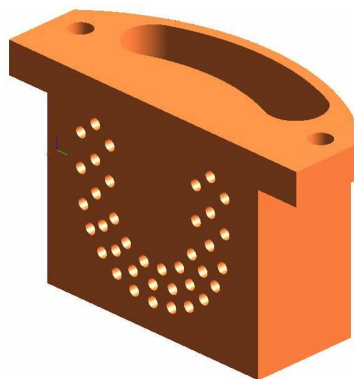


Figure IV.B.2 : Premier dispositif de déviation utilisé dans cette étude [11].

Une étude expérimentale a été menée avec du fil de type 38T (98% Fe, 1.6 mm de diamètre) fourni par TAFA [11]. Les résultats alors obtenus avec la buse de déviation représentée sur la figure 2 ont été considérés comme convenables, excepté sur un point essentiel :

Barbezat [5] a indiqué que la question de l'adhérence du dépôt représente le point clé pour la réalisation de revêtements à l'intérieur de cylindres destinés à l'industrie automobile. Ses estimations ont montré qu'une valeur minimale de 15 MPa est absolument requise et qu'une valeur de l'ordre de 30 MPa est préférable. Avec la buse de déviation représentée sur la figure 2, il ne nous a pas été possible de satisfaire les spécifications imposées par PSA (adhérence minimale de 20 MPa). En particulier, les adhérences que nous avons relevées sont de 12 MPa au maximum [11].

Pour concevoir un procédé et le rendre robuste, il est important que les liens entre paramètres opératoires et caractéristiques des particules en vol, soient bien compris et prévisibles. En considérant que la tête de déviation est certainement le plus important des paramètres pour la présente application, il est donc important de comprendre comment ce paramètre agit sur les caractéristiques des particules en vol.

Le but des études réalisées par CFD a donc été de tester différents types de tête de déviation dans le but d'atteindre les objectifs suivants :

- améliorer la fonction de déviation et obtenir une meilleure focalisation du jet de matière dans le but de limiter le phénomène d'overspray (particules partant à faible vitesse dans tous les sens) et d'améliorer la qualité des revêtements.
- supprimer quelques autres défauts parfois observés comme une agglomération de particules sur la face avant de la tête de déviation.
- augmenter l'adhérence des revêtements impliquant une amélioration de l'atomisation et une augmentation de la vitesse moyenne des particules à l'impact.

En 2003 et 2004, j'ai encadré plusieurs stagiaires de DEA dont le sujet de stage a porté sur la modélisation de l'écoulement pour différentes têtes de déviation et différentes formes d'orifices du gaz d'atomisation (stages de DEA de Messieurs M.I. CHAHIN et J. DENG). Tous les calculs CFD ont été réalisés en tridimensionnel sous FLUENT.

De nombreuses têtes de déviation ont été testées dans le cadre de ces travaux. Certaines ont permis des améliorations tant au niveau calculs qu'au niveau expérimental. Toutefois, une perturbation rédhitoire de l'arc a parfois été notée. Finalement, une des solutions testées a retenu notre attention : la tête en question a été spécialement conçue dans le but de redresser le jet de matière perpendiculairement à la surface intérieure du cylindre à revêtir. Elle est composée d'une fente inclinée d'un angle de 15° (qui remplace les trous les plus bas) et de 2 lignes de trous alignés verticalement tel qu'indiqué sur la figure 3. De plus, 3 trous ont également été ajoutés plus en haut dans le but d'empêcher tout colmatage sur la surface de la buse. Ces trous n'ont pas un effet suffisant pour perturber l'arc électrique mais ils compensent l'effet de la dépression observée au niveau du volume emprisonné entre les injections du gaz d'atomisation et du gaz de déviation. Cette zone de dépression avait en effet été considérée comme responsable de l'accumulation de particules sur la surface de la tête de déviation (observée sans pour autant provoquer de colmatage). La fente inclinée présente une épaisseur de 1.5 mm et une largeur de 14 mm. De plus, les 18 trous percés horizontalement (et perpendiculairement à la surface de la tête) permettent de limiter l'étalement latéral des gouttelettes atomisées et de les réorienter axialement.

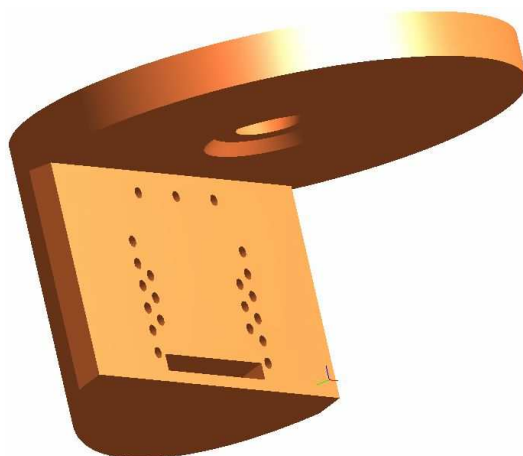


Figure IV.B.3 : Design de la nouvelle tête de déviation de type fente inclinée [11].

Les champs de pression et de vitesse calculés pour la tête de déviation initiale et celle de type fente ont été présentés [11]. Toutefois, le résultat principal concerne la déviation du flux de matière. Les figures 4 et 5 présentent la déviation du flux de gouttelettes atomisées à l'aide de la tête d'origine et de la tête de type fente inclinée. Dans les deux cas, la couleur est représentative de la vitesse des particules, dont la distribution granulométrique a été imposée suivant une loi de type Rosin-Rammler (distribution identique pour les deux têtes).

La vitesse maximale des gouttelettes obtenue pour la nouvelle tête est environ 20 m/s plus élevée que celle calculée pour la tête d'origine. De même, une différence similaire peut être observée pour la vitesse moyenne des gouttelettes qui est supérieure d'environ 50% relativement à la tête d'origine. De plus, la déviation du flux de gouttelettes est très accentuée avec la tête de type fente inclinée. En particulier, le positionnement vertical du flux de matière sur la surface du cylindre est approximativement aligné verticalement avec la position de la fente. De ce fait, l'angle d'impact des gouttelettes est quasi-perpendiculaire à la surface intérieure du cylindre à revêtir (flux de matière redressé horizontalement). La distribution granulométrique des particules collectées pour cette nouvelle tête de déviation indique par ailleurs un diamètre moyen plus faible relativement à la tête d'origine. Ce résultat indique que les différences entre les deux têtes pourraient être encore plus importantes : en particulier, plus le diamètre est faible, plus les particules sont déviées et accélérées de manière importante. Ainsi on aurait encore plus de différences entre les deux têtes en prenant en compte la diminution du diamètre moyen des gouttelettes avec la nouvelle tête. Ceci confirme toutefois qu'une atomisation secondaire liée au gaz d'atomisation a lieu : dans le cas contraire, on ne devrait pas avoir de différence au niveau des granulométries.

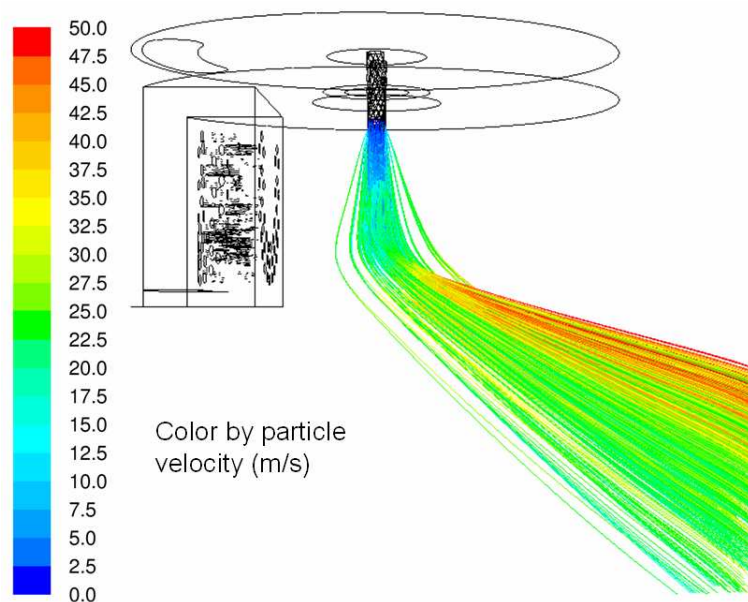


Figure IV.B.4 : Déviation du faisceau de gouttelettes à l'aide de la tête de déviation d'origine [11].

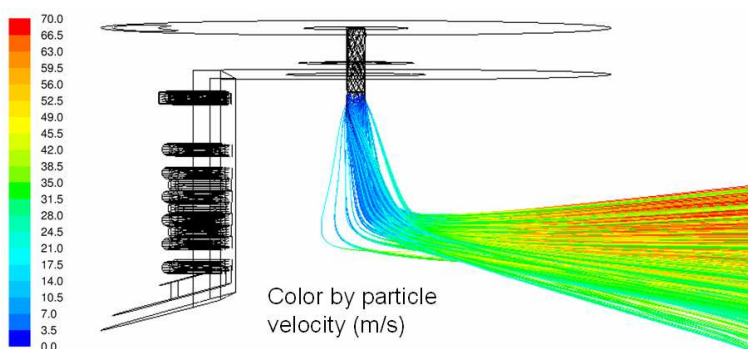


Figure IV.B.5 : Redressement du faisceau de gouttelettes produit à l'aide de la tête de déviation de type fente inclinée [11].

L'intérêt de cette nouvelle tête de déviation a été mentionné [9-11]. Par ailleurs, en sus des avantages déjà indiqués, la nouvelle tête de déviation a permis un resserrement de la

distribution granulométrique des particules collectées ainsi qu'une très nette augmentation de l'adhérence du dépôt (22 MPa au lieu de 10 MPa environ pour la tête d'origine). La valeur de 22 MPa est cette fois suffisante pour l'application. En particulier, elle est supérieure à celle obtenue avec la technologie LDS développée par DAIMLER-CHRYSLER et à celle obtenue par le procédé PTWA lorsque ces 2 technologies sont utilisées sans prétraitement (15 MPa environ). L'utilisation de technologies de préparation avancées comme le jet d'eau haute pression [7-8] pourrait par ailleurs permettre d'augmenter d'adhérence à 40 MPa voire plus.

La figure 6 présente une comparaison de photos de la déviation du flux de gouttelettes pour différentes têtes de déviation. La première photo concerne la tête d'origine, la seconde la tête de déviation de type fente inclinée alors que la troisième concerne une autre tête également étudiée. Cette dernière est composée de 3 séries de trous situées sur différents rayons mais tous les trous sont focalisés vers un même point approximativement situé verticalement à hauteur de l'arc sur la surface du cylindre à revêtir. La déviation du flux de gouttelettes est ici trop importante pour cette dernière tête. Néanmoins, elle a au départ été conçue pour fonctionner avec un orifice différent du gaz d'atomisation (de section plus faible et conduisant à une vitesse supérieure du gaz d'atomisation et des gouttelettes atomisées). Or sur ces photos, les conditions d'atomisation sont identiques pour les trois têtes.

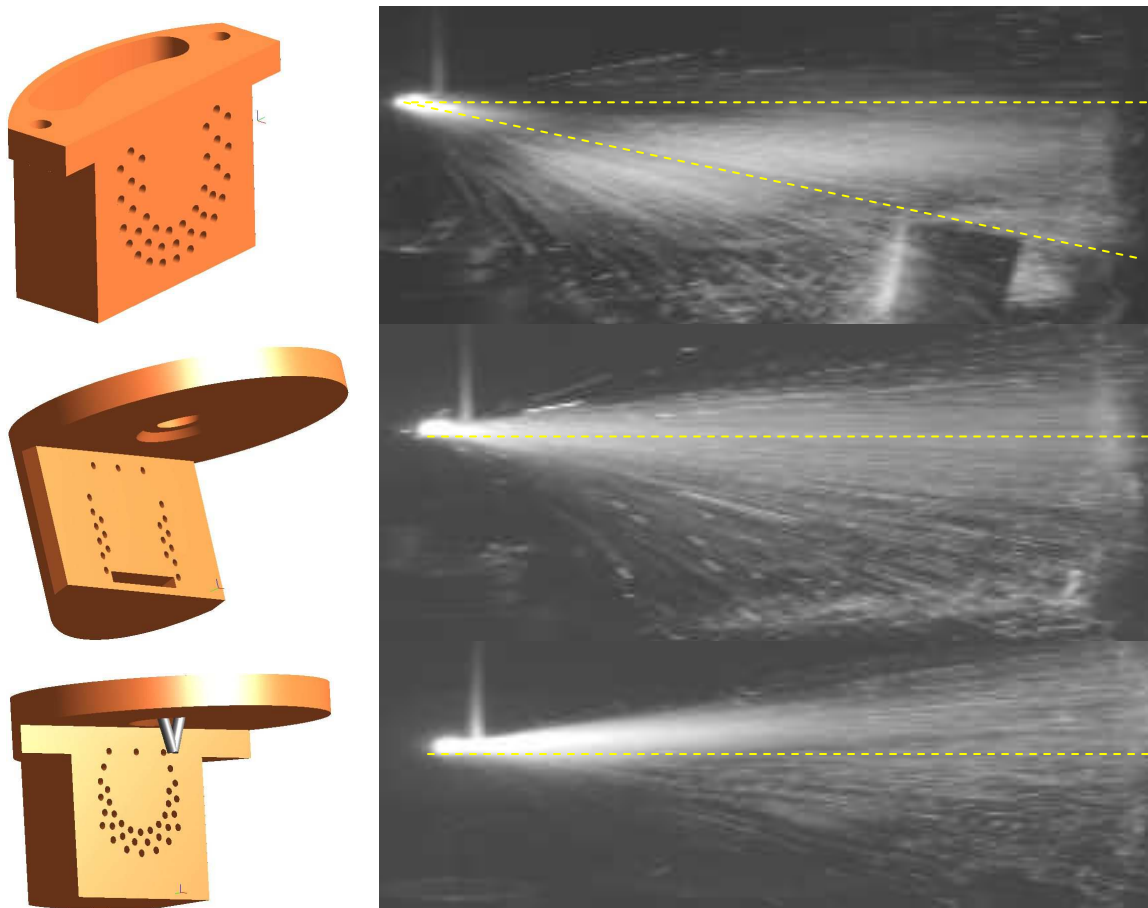


Figure IV.B.6 : Photos de la déviation du jet de gouttelettes atomisées pour 3 différentes têtes de déviation.

Conclusion

Cette étude a porté sur l'amélioration du design de la tête de déviation d'un outil de projection thermique de type Arc fil destiné à réaliser des dépôts protecteurs dans des cylindres destinés à l'industrie automobile. Le design initial de la tête de déviation équipant l'outil considéré était initialement basé sur l'extension de type TAFE 939ID. Toutefois, les résultats expérimentaux n'étaient pas satisfaisants principalement du fait d'une adhérence trop faible des revêtements élaborés. Les calculs CFD réalisés avec FLUENT ont permis de démontrer que la déviation du jet de matière était insuffisante avec la tête de déviation initiale. Une nouvelle tête de déviation

incorporant une fente inclinée a donc été conçue dans le but d'améliorer la fonction de déviation et de produire une réduction de l'étalement du flux de gouttelettes atomisées (constriction du jet). La nouvelle tête de déviation a permis d'augmenter la vitesse des gouttelettes d'environ 20 m/s sans considérer la diminution de taille associée par ailleurs. Un resserrement de la granulométrie des particules collectées a également été noté. L'élément le plus important concerne la très nette augmentation de l'adhérence des dépôts élaborés : typiquement 2 fois supérieure à celle des dépôts produits avec la tête initiale. Cette augmentation de l'adhérence a pu être obtenue en redressant l'angle d'impact des particules perpendiculairement à la surface du substrat à revêtir, en permettant une constriction du faisceau de gouttelettes atomisées ainsi qu'en augmentant la vitesse moyenne des gouttelettes au moment de leur impact. Le procédé développé présente par ailleurs différents avantages : à savoir une meilleure stabilité du procédé et un coût moindre relativement au procédé APS. De plus, de par sa simplicité (seule la tête de déviation tourne), il est plus facile à mettre en oeuvre relativement aux autres procédés basés sur la technologie Arc fil comme le LDS développé par DAIMLER-CHRYSLER (mise en rotation de l'ensemble du dispositif y compris bobines, etc.).

Le principe de l'utilisation de la tête de type fente inclinée a été breveté [9] puis un article a été publié en revue internationale sur le sujet [11] seulement après que tous les enregistrements nécessaires aient été effectifs.

Références

- [1] G. Barbezat, The State of the Art of the Internal Plasma Spraying on Cylinder Bore in AlSi Cast Alloys, *International Journal of Automotive Technology*, 2001, 2 (2), p. 47-52.
- [2] G. Barbezat, Advanced Thermal Spray Technology and Coating for Lightweight Engine Blocks for the Automotive Industry, *Surface & Coatings Technology*, 2005, 200, p. 1990-1993.
- [3] G. Barbezat, High Performance Coatings Produced by Internal Plasma Spraying on Engine Blocks of New Generation, in *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application*, Pub. DVS, Düsseldorf, Germany, 2004. ISBN 3-87155-792-7.
- [4] G. Barbezat, Coating Deposition of Bearing Materials on Connecting Rod by Thermal Spraying, in *Thermal Spray Connects: Explore its Surfacing Potential!* Ed. E. Lugscheider, Pub. DVS, Düsseldorf, Germany, 2005, 1574+ pages. ISBN 3-87155-793-5.
- [5] G. Barbezat, Importance of Surface Preparation Technology Prior to Coating Deposition on Cylinder Bores for High Performance Engines, in *Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions*, Ed. B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.-C. Lau, C.-J. Li, R.S. Lima, and G. Montavon, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2007.
- [6] D. Nowotni, C. Wanke, T. Haug, P. Izquierdo, Inner Torch, US Patent Number 6,667,460 B2, 2003.
- [7] K. Bobzin, E. Lugscheider, F. Ernst, J. Zwick, T. Schlaefer, C. Verpoort, A. Schwenk, F. Schreiber, T. Wenz, D. Cook, K. Kowalsky, J. Conti, Coating Bores of Light Metal Crankcases, in *Building on 100 Years of Success*, Ed. B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.C. Lau, R.S. Lima, and J. Voyer, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2006.
- [8] E. Lugscheider, R. Dicks, K. Kowalsky, D. Cook, K. Nassenstein, C. Verpoort, A Materials System and Method of its Application for the Wear Protection of Aluminium Engine Cylinder Bore Surfaces, in *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application*, Pub. DVS, Düsseldorf, Germany, 2004. ISBN 3-87155-792-7.
- [9] C. Coddet, R. Bolot, J.M. Bordes, C. Meekel, Dispositif de Projection de Particules Métalliques par Arc Electrique Entre Deux Fils, FR Patent Number 2 866 901, French Registration Number 04 02049, 2005 (in French).
- [10] C. Coddet, R. Bolot, J.M. Bordes, C. Meekel, Dispositif de Projection de Particules Métalliques par Arc Electrique Entre Deux Fils, FR Patent Number 2 866 902, French Registration Number 04 02050, 2005 (in French).
- [11] R. Bolot, H. Liao, C. Mateus, C. Coddet, J.M. Bordes, "Optimization of a Rotating Twin Wire-Arc Spray Gun", *Journal of Thermal Spray Technology*, **16** (5-6) (2007), pp. 783-790.
- [12] J.P. Dunkerley, T.A. Friedrich, G. Irons, Apparatus for Rotary Spraying a Metallic Coating, US Patent Number 5,908,670, 1999.
- [13] R. Benary, Arc Thermal Spray Gun Extension and Gas Jet Member Therefor, US Patent Number 6,091,042, 2000.

Thème V : Modélisation des écoulements de plasma d'induction haute fréquence destinés à la formation de nanoparticules.

De par leur petite taille, les nanomatériaux présentent des propriétés physico-chimiques différentes de celles des matériaux courants. Il existe donc aujourd'hui un intérêt croissant pour les nanomatériaux à l'échelle mondiale et les enjeux scientifiques et économiques sont importants.

Le procédé de production de nanoparticules par plasma d'induction s'avère des plus performants. Suivant ce procédé, le matériau précurseur est introduit sous forme de poudre dans la zone de formation du plasma. Il y est tout d'abord vaporisé puis la formation de nanoparticules se produit suite à la condensation du matériau lors du refroidissement du plasma plus en aval dans le réacteur. La croissance de ces nanoparticules est ensuite stoppée à l'aide d'un dispositif de trempe par injection de gaz froid. Si cette technologie est aujourd'hui au point, il n'en demeure par moins que la compréhension de l'ensemble des mécanismes intervenant, s'avère essentielle afin de mieux maîtriser l'influence des différents paramètres opératoires et d'optimiser le procédé. Dans cette optique, la modélisation numérique s'avère être un outil tout à fait adapté. En particulier, la CFD ("Computational Fluid Dynamics") peut aujourd'hui permettre d'évaluer les champs de température et de vitesse du plasma d'induction dans et à l'extérieur de la torche et de déterminer ainsi à partir de quel moment et à quel endroit l'évaporation puis la condensation du matériau sont sensées débiter.

Une équipe de l'EMPA (Thoune, Suisse), a mis en place des moyens de production de nanoparticules par plasma d'induction. Dirigée par Stephan SIEGMANN, cette équipe a recruté un thésard chargé de modéliser le système sous FLUENT. J'ai ainsi été contacté par Cornelis SCHREUDERS qui ne disposait pas en interne d'un interlocuteur susceptible de le guider sur ce sujet. Suite à ce contact, nous avons entamé une collaboration en marge de sa thèse.

Dans ce cadre, nous avons développé et utilisé un modèle bidimensionnel de la génération du plasma d'induction. Ce modèle traduit notamment le couplage entre les équations de Navier-Stokes régissant l'écoulement et les équations de l'électromagnétique formulées en termes de vecteur potentiel et dont le domaine d'étude a été étendu au plasma ainsi qu'à son environnement. Tous les développements nécessaires ont été réalisés par le biais de routines programmées en langage C, et implémentés dans le code de calculs CFD FLUENT. Afin de valider le modèle, nous avons tout d'abord comparé les résultats calculés à ceux obtenus par d'autres auteurs. Enfin, après cette étape de validation, nous l'avons utilisé pour modéliser le plasma dans des conditions représentatives de celles utilisées lors de la production de nanoparticules.

L'intérêt porté à la modélisation des plasmas d'induction date de plusieurs décennies déjà. Le modèle décrit par Boulos [1] en 1976 était basé sur le couplage entre les équations régissant l'écoulement avec un modèle électromagnétique monodimensionnel. L'utilisation de modèles exprimés en termes de vecteur potentiel a débuté il y a de ça une quinzaine d'années [2]. Suivant ce type de modèle, le couplage électromagnétique est modélisé par la résolution de deux équations de conservation pour les parties réelle et imaginaire de la composante tangentielle du vecteur potentiel. L'extension du domaine de calcul en dehors de la zone de confinement du plasma (tubes en quartz ou en céramique, inducteur, etc.) a été proposée beaucoup plus récemment [3] et permet de prendre en compte la géométrie de l'inducteur. Enfin, l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs facilite maintenant la réalisation d'études en 3D permettant d'appréhender la dissymétrie du plasma généré par l'inducteur hélicoïdal [4,5]. De plus, l'injection du gaz central étant réalisée avec une composante rotationnelle importante, il est nécessaire de la prendre en compte tel que Shigeta *et al.* l'ont suggéré [6-9].

Dans notre étude, nous avons choisi de développer un modèle peu différent de celui évoqué par Xue *et al.* [3] si bien que ce modèle demeure donc bidimensionnel. En fait, l'étude des effets de la dissymétrie du plasma n'est pas notre priorité pour l'heure et représente un perfectionnement éventuel ultérieur du modèle dans notre cas.

Concernant les équations de Navier-Stokes régissant l'écoulement, celles-ci ne demandent pas de traitement particulier puisqu'elles sont déjà intégrées dans FLUENT utilisé comme solveur dans notre étude. Par contre, deux équations de conservation ont été ajoutées pour les composantes réelle et imaginaire de la composante rotationnelle du vecteur potentiel. La

force de Lorentz (composantes axiale et radiale) ainsi que les termes de production de chaleur par effet Joule et de pertes radiatives, ont par ailleurs nécessité une prise en compte par le biais d'une programmation adéquate en langage C. De plus, la résolution de l'équation de conservation de l'énergie (formulée en terme de température dans FLUENT) a été désactivée et remplacée par un scalaire représentant l'enthalpie. Cette modification a été implémentée afin de passer outre les limitations proposées au sein du logiciel concernant la chaleur spécifique (qui doit être intégrable dans le cas d'une formulation en température).

Enfin concernant les propriétés thermodynamiques et coefficients de transport des plasmas thermiques, nous avons disposé du code de calcul développé dans [10] et réécrit depuis en FORTRAN. Ce code permet de traiter tous les mélanges plasmagènes formés à partir des gaz Ar/He/H₂/N₂/O₂. Il produit des fichiers contenant les propriétés tabulées en fonction de la température à intervalles réguliers et pouvant être facilement rechargés par programmation en langage C.

Le modèle a été validé en comparant les résultats produits à ceux obtenus par Xue *et al.* [3]. Nous avons donc choisi une torche et des conditions similaires. Concernant la torche, il s'agit d'un modèle de type PL50 (TEKNA, Sherbrooke, Canada) dont la géométrie est plus précisément décrite dans la référence en question. En particulier, elle possède un diamètre interne de 50 mm (d'où son nom), la longueur du tube de confinement du plasma est de 200 mm et l'inducteur hélicoïdal de diamètre 66 mm possède trois tours. Deux tubes en quartz insérés à l'intérieur du tube principal sur une distance de 50 mm permettent de définir trois zones d'entrées de gaz (ici argon). Le gaz porteur est injecté axialement à travers le tube central, le gaz dit central est injecté entre les deux tubes intérieurs et enfin le gaz de gainage est injecté le long du tube de confinement du plasma. Dans le cas considéré, les débits d'argon sont de 1, 3 et 31 NI/min pour le gaz porteur, le gaz central et le gaz de gainage respectivement. Une fréquence de courant de 3 MHz et un courant d'induction de 170 A permettant d'obtenir une puissance dissipée par effet Joule de 5 kW ont été considérés. Cette valeur de 170 A est comparable à la valeur indiquée par Xue *et al.* (161 A) et la légère différence provient certainement de l'utilisation de propriétés différentes (comme la conductibilité électrique par exemple). Précisons encore qu'une injection axiale à travers toute la section d'entrée a été supposée pour le gaz central (pas d'injection en vortex donc pas d'équation résolue pour ω supposée nulle). La figure 1 montre les champs des parties réelle et imaginaire de la composante rotationnelle du vecteur potentiel. Ces champs ainsi que les valeurs maximales sont très proches des résultats obtenus par Xue *et al.* [11-12].

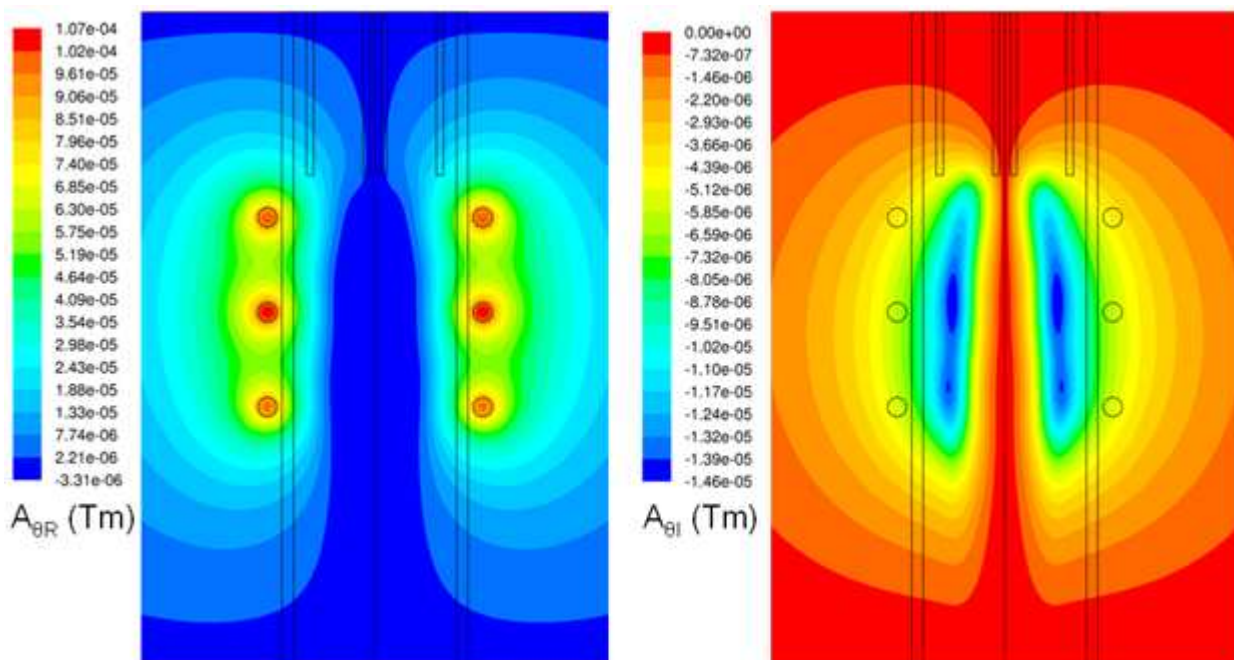


Figure V.1 : Parties réelle (gauche) et imaginaire (droite) de la composante rotationnelle du vecteur potentiel magnétique [11-12].

La figure 2 présente les champs de la composante axiale de la vitesse, de la température ainsi que du terme de production par effet Joule. La valeur maximale de la vitesse axiale est de 17,5 m/s et celle de la température est légèrement inférieure à 9900K. Là encore, nous avons noté une bonne adéquation relativement aux résultats de Xue *et al.* et il en va de même pour le terme de production par effet Joule (valeur maximale de 0.143 W/mm^3). L'ensemble des résultats obtenus nous a ainsi permis de confirmer la validité du modèle établi. On peut également insister sur la présence d'une zone dans laquelle la vitesse axiale est négative (flux inverse) juste en sortie du tube d'injection du gaz porteur de par les phénomènes électromagnétiques.

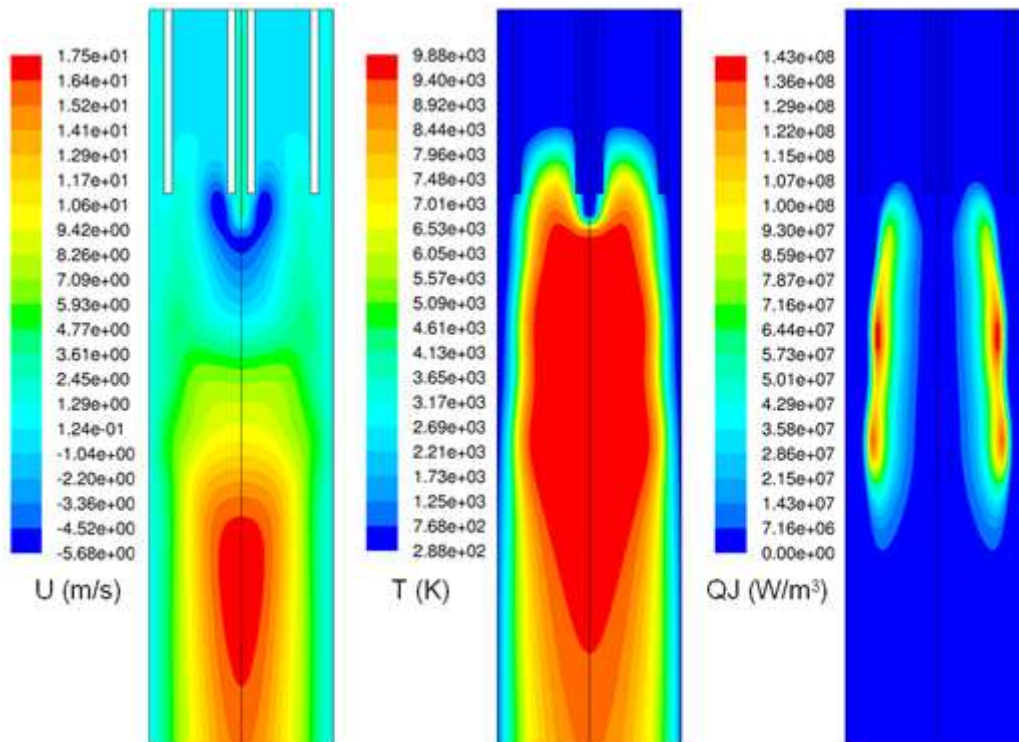


Figure V.2 : Champs de vitesse axiale, température et production par effet Joule [11-12].

Après validation du modèle, celui-ci a été utilisé pour étudier la formation du plasma dans des conditions plus spécifiques à l'élaboration de nanoparticules. A ce niveau, une torche de type PL35 a été considérée avec des débits de gaz et une puissance électrique bien supérieurs au cas précédent. Le rayon du tube de confinement est de 17.5 mm et sa longueur de 100 mm. Une zone supplémentaire de longueur 27 mm a été ajoutée en amont afin de prendre en compte le positionnement axial réel des points d'injection du gaz porteur et du gaz central et une zone de 13 mm a été ajoutée en aval de par la présence d'un convergent (rayon mini 15 mm). L'inducteur hélicoïdal de diamètre 52 mm possède quatre tours et s'étend sur une zone de longueur 45 mm. Bien entendu, il ne peut être représenté autrement que par des anneaux dans le cas d'un modèle bidimensionnel axisymétrique. Le premier tour commence juste au niveau de la sortie des deux tubes intérieurs et se termine 11.25 plus loin (pas hélicoïdal). Le premier anneau a donc été positionné axialement à 5.6 mm de la sortie des deux tubes (1 demi pas).

Dans la pratique, l'injection du gaz central est réalisée en vortex par le biais de huit orifices permettant de lui conférer une composante rotationnelle. Au niveau de notre modèle bidimensionnel axisymétrique, nous avons considéré que l'injection se fait à travers une section annulaire de hauteur radiale 1 mm affleurant le tube intérieur de plus gros diamètre. De plus nous avons conféré au gaz central une composante rotationnelle correspondant à sa vitesse réelle d'injection. Ceci permet d'avoir non seulement le bon débit de gaz mais aussi la bonne quantité de mouvement pour l'équation de ω .

Concernant les paramètres considérés dans les calculs suivants, les débits sont de 3 et 12 NI/min d'argon pour le gaz porteur et le gaz central respectivement alors que le gaz de gainage est maintenant constitué d'un mélange (80 NI/min d'argon + 6 NI/min d'hydrogène). Afin de prendre en compte la nature différente du gaz de gainage, une équation de conservation supplémentaire a donc été ajoutée pour la fraction massique de ce dernier. A ce sujet, le

coefficient de diffusion du gaz de gainage dans l'argon a été estimé en utilisant l'hypothèse d'un nombre de Lewis unitaire ($\rho D = \lambda / C_p$).

Concernant les paramètres électriques, le générateur utilisé à l'EMPA fournit un courant de fréquence 13.56 MHz au lieu des 3 MHz du cas précédent. L'intensité du courant d'induction a été ajustée à 118 A de sorte à fournir 12 kW de puissance ohmique (11.9 plus exactement). Sur ces 12 kW, 1.35 sont perdus par radiations, soit 11.3%. La fraction perdue par rayonnement diminue cependant avec la diminution de pression.

La figure 3 présente les champs des composantes rotationnelle et axiale de la vitesse ainsi que de la température. On remarque bien évidemment que les vitesses obtenues sont bien plus importantes du fait de plusieurs aspects :

- diminution du diamètre de torche de 50 à 35 mm
- présence du convergent en sortie de torche
- augmentation de l'ensemble des débits de gaz et de la puissance de 5 à 12 kW
- diminution de la pression à 0.04 MPa au lieu de 0.1

De par tous ces changements, la vitesse axiale présente donc une valeur maximale légèrement supérieure à 180 m/s (à comparer à la valeur de 17.5 m/s de la figure 2a). La composante rotationnelle de la vitesse présente une valeur maximale de 60 m/s. En fait, l'écoulement rotationnel permet de stabiliser le plasma à l'intérieur de la torche : sa prise en compte au niveau des calculs devient donc essentielle dans cette gamme de paramètres alors que ce n'était point le cas au niveau du cas initial ayant servi à la validation du modèle.

On note également que la zone de vitesse axiale négative située en sortie du tube d'injection du gaz porteur sur la figure 2 a disparu. Cet élément est important concernant l'injection du matériau précurseur qui sera donc entraîné axialement sans risque de recirculation notamment pour les particules les plus fines. Néanmoins, on note toujours la présence d'une zone de recirculation située entre les deux tubes internes.

Concernant le champ de température, la valeur maximale est légèrement inférieure à 11000K et le plasma présente une structure différente de celle de la figure 2. En effet, il semble être comme "perforé" par l'injection axiale du gaz porteur, formant ainsi un plasma annulaire. D'ailleurs cet effet s'amplifie avec l'augmentation du débit de gaz porteur.

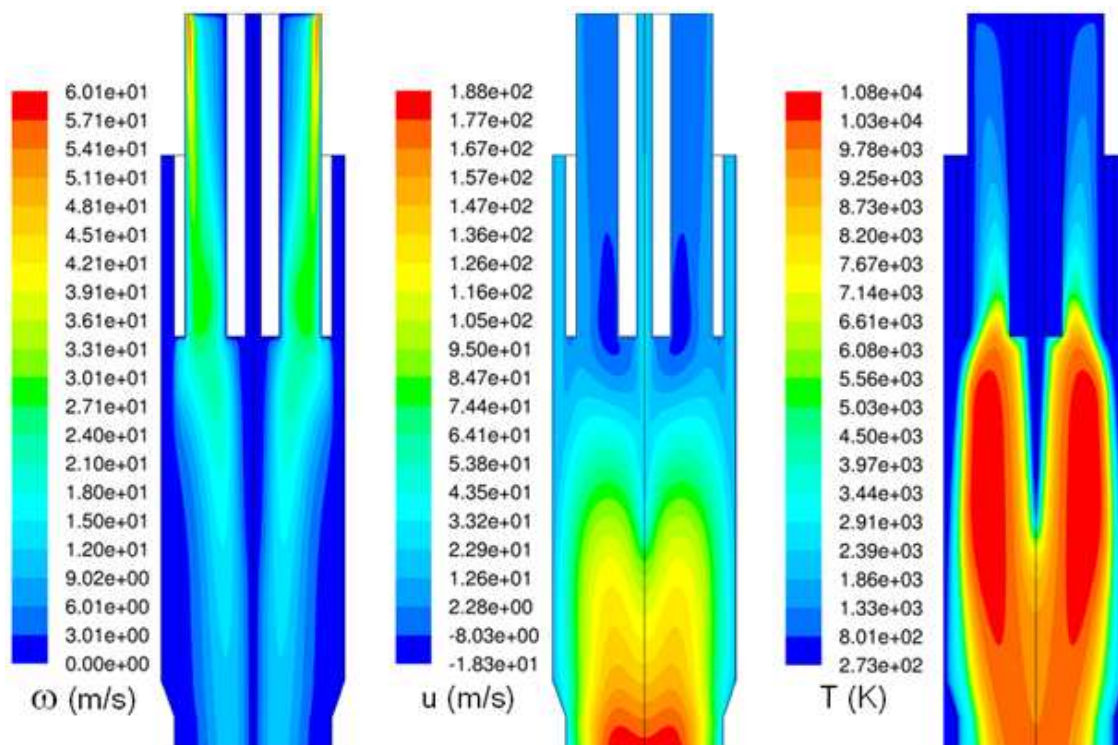


Figure V.3 : Champs des composantes rotationnelle (gauche) et axiale (centre) de la vitesse ainsi que de la température (droite) [11-12].

Dans la pratique, le jet de plasma produit en sortie de torche dans les conditions de la figure 3 subit alors deux élargissements brusques successifs (diamètre de 70 mm sur 23 mm de longueur puis diamètre de 85 mm sur 10 mm de longueur) avant d'être déchargé dans la chambre de synthèse (diamètre 320 mm) où les nanoparticules sont tout d'abord formées par nucléation puis grossissent par coagulation. Le processus est alors stoppé par un refroidissement brusque opéré à l'aide d'un dispositif d'injection de gaz froid à une position axiale adéquate (de l'ordre d'une centaine de mm par rapport à la sortie de la torche). La figure 4 présente le prototype de réacteur utilisé à l'EMPA pour la synthèse de nanoparticules (réacteur sur la gauche et filtre sur la droite). On note les dimensions importantes de l'installation relativement à celles de la zone de formation du plasma, la torche étant située dans la partie supérieure du réacteur.



Figure V.4 : Prototype de réacteur utilisé à l'EMPA pour la synthèse de nanoparticules [11-12].

La figure 5 présente deux vues du plasma observé par le dessous à l'aide d'un miroir. La couleur verte du plasma est causée par la présence d'un filtre permettant de réduire l'intensité lumineuse. L'image de gauche correspond à un faible débit de gaz porteur (débits de 1, 12 et 80/6 NI/min de gaz pour le gaz porteur, le gaz central et le gaz de gainage respectivement) alors que l'image de droite concerne un débit de gaz porteur de 10 NI/min au lieu de 1 (autres débits inchangés). La pression est ici de 0.6 bar au lieu de 0.4 pour le calcul précédant. On observe assez nettement que le gaz porteur perfore axialement le plasma et que cet effet augmente avec son débit.

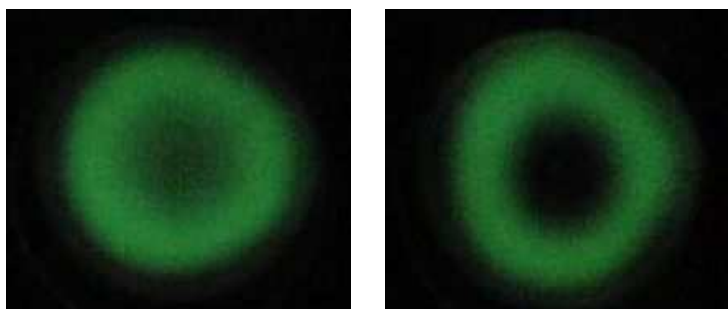


Figure V.5 : Vues du plasma observé par le dessous à l'aide d'un miroir. Paramètres 1-12-80/6 (gauche) et 10-12-80/6 (droite) – $P=0.6$ bar [11-12].

La figure 6 présente quelques nanoparticules de Si synthétisées dans l'installation avec les paramètres modélisés ci-dessus. La croissance des nanoparticules a été stoppée à l'aide d'un dispositif de trempe formé d'un anneau de 64 mm de diamètre possédant huit orifices de diamètre 1.5 mm légèrement orientés dans le sens d'écoulement du plasma (suivant un angle de 15°), placé à une position axiale de 122 mm par rapport à la sortie de la torche représentée sur la figure 3. Un débit de 56 NI/min d'argon a été utilisé. De plus, un entonnoir a été placé juste au dessus de ce dispositif afin d'éviter que le plasma ne le contourne. Les nanoparticules ont été

collectées proche du filtre. Pour information la granulométrie initiale de la poudre de Si injectée était +44-16 μm et le débit de poudre utilisé de 1.9 g/min.

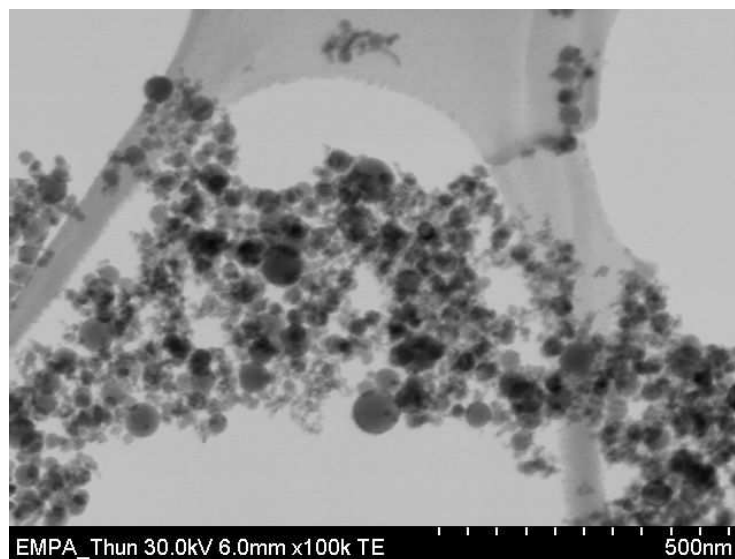


Figure V.6 : Nanoparticules (Si) collectées près du filtre – Paramètres 3-12-80/6 NI/min – P=0.4 bar [11-12].

Conclusion

J'ai ici présenté une synthèse des travaux réalisés avec Cornelis SCHREUDERS en marge de sa thèse réalisée à l'EMPA sur le sujet de la modélisation CFD d'un plasma d'induction HF utilisé pour la synthèse de nanoparticules. Ce modèle intègre notamment l'ensemble du couplage électromagnétique et a été implémenté dans le logiciel FLUENT à l'aide de fonctions utilisateur écrites en langage C. Il permet de quantifier l'influence des paramètres d'élaboration (débits, pression, fréquence et puissance du courant, etc.) sur la structure du plasma ainsi que sur ses champs de vitesse et de température. A l'avenir, le domaine de calcul pourrait être étendu à la zone de refroidissement du plasma dans laquelle les nanoparticules sont synthétisées. Au niveau expérimental, le procédé est bien au point comme en témoignent les quelques résultats présentés. Néanmoins, la modélisation pourra permettre de mieux comprendre l'influence de chaque paramètre.

Références :

- [1] M.I. Boulos, Flow Temperature Fields in the Fire-ball of an inductively coupled plasma, *IEEE Transactions on Plasma Science*, **4**, 28-39, 1976.
- [2] J. Mostaghimi, M.I. Boulos, Two-dimensional Electromagnetic Field Effects in Induction Plasma Modelling, *Plasma Chem. Plasma Process.*, **9**, 25-44, 1989.
- [3] S. Xue, P. Proulx, M.I. Boulos, Extended-field electromagnetic model for inductively coupled plasma, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **34**, 1897-1906, 2001.
- [4] D. Bernardi, V. Colombo, E. Ghedini, A. Mentrelli, Three-dimensional modelling of inductively coupled plasma torches, *Eur. Phys. J. D*, **22**, 119-125, 2003.
- [5] D. Bernardi, V. Colombo, E. Ghedini, A. Mentrelli, Three-dimensional effects in the modelling of ICPTs - Part I: Fluid Dynamics and electromagnetics, *Eur. Phys. J. D*, **25**, 271-277, 2003.
- [6] M. Shigeta, T. Sato, H. Nishiyama, Numerical simulation of potassium-seeded turbulent RF inductively coupled plasma with particles, *Thin Solid Films*, **435**, 5-12, 2003.
- [7] M. Shigeta, T. Sato, H. Nishiyama, Computational simulation of particle-laden RF inductively coupled plasma with seeded potassium, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **47**, 707-716, 2004.
- [8] M. Shigeta, T. Watanabe, H. Nishiyama, Numerical investigation of nanoparticle synthesis in an RF inductively coupled plasma, *Thin Solid Films*, **457**, 192-200, 2004.

- [9] M. Shigeta, H. Nishiyama, Numerical analysis of metallic nanoparticle synthesis using RF inductively coupled plasma flows, *J. Heat Transfer*, **127**, 1222-1230, 2005.
- [10] R. Bolot, Modélisation des plasmas d'arc soufflé : Application à la projection de matériaux pulvérulents, thèse, Université de Franche-Comté, France, 1999 (en français).
- [11] R. Bolot, C. Schreuders, M. Leparoux, S. Siegmann, C. Coddet, "Modélisation de la synthèse de nanoparticules par plasma d'induction haute fréquence", actes du colloque MATERIAUX 2006 (Dijon, 13-17 novembre), 2006.
- [12] R. Bolot, C. Coddet, C. Schreuders, M. Leparoux, S. Siegmann, "Modeling of an Inductively Coupled Plasma for the Synthesis of Nanoparticles", *Journal of Thermal Spray Technology*, 16 (5-6) 2007, pp. 690-697.

Note : Avertissement destiné aux utilisateurs de FLUENT de la communauté de la projection thermique

Beaucoup de logiciels CFD sont couramment utilisés pour modéliser les jets de plasma. Malheureusement, d'après des résultats récents rapportés dans la littérature, deux logiciels différents ne produisent pas toujours des résultats similaires pour un même cas. Par exemple, PHOENICS et FLUENT ont été récemment utilisés dans une étude comparative et des différences anormales ont été constatées [1]. Après des recherches intenses, les raisons ont enfin été identifiées et sont ici expliquées : il apparaît que l'ensemble des modèles de turbulence de type k- ϵ de FLUENT doivent inclure un correctif pour modéliser correctement les écoulements gazeux dans le cas de températures élevées. Dans la mesure où FLUENT est très intensément utilisé pour l'étude des jets de plasma, nous avons considéré utile de rapporter la correction nécessaire à la communauté de la projection thermique (d'autres communautés sont d'ailleurs également concernées).

Les logiciels CFD commerciaux comme PHOENICS [1-6] ou ESTET [7-11] sont utilisés depuis longtemps pour la modélisation des jets de plasma. Néanmoins, de par sa position de leader sur le marché de la CFD, FLUENT est maintenant largement utilisé dans les applications de projection thermique [12-24]. Ainsi pas moins de dix articles différents mentionnant l'utilisation de FLUENT figurent dans le recueil des articles de la conférence d'ITSC 2004 à Osaka. Parmi ces articles, Schwenk *et al.* [20] ont utilisé le modèle de turbulence k- ϵ standard pour modéliser les jets de plasma d'arc produits par un générateur de courant continu et Guenadou *et al.* [21] ont utilisé le modèle RSM pour modéliser un plasma inductif. Nylén *et al.* [18] ont utilisé le modèle k- ϵ standard pour modéliser le procédé LVOF et Han *et al.* [22] ont appliqué ce modèle au procédé cold spray. Parmi les papiers traitant des jets de plasma de type APS [1, 12-17], la plupart d'entre eux utilise le modèle de turbulence k- ϵ standard. Dans ce cas, il a souvent été remarqué que la longueur du cœur potentiel du jet de plasma calculée avec FLUENT est anormalement courte. C'est également ce que nous avons pu observer en la comparant aux résultats produits avec PHOENICS [1]. Ce comportement anormal a aussi été observé dans les résultats de Choquet *et al.* [17] et il doit aussi affecter les résultats proposés dans de nombreuses autres références.

D'après nos premiers résultats [1], il était clair que seuls les modèles de turbulence de type k- ϵ sont concernés. En particulier, le modèle RSM de FLUENT n'est pas concerné car il produit un cœur potentiel correct du jet. Toutefois, certaines études ont pu conclure que les modèles de type k- ϵ ne sont pas adaptés à l'étude des jets de plasma alors qu'il s'agit d'un problème d'implémentation. Suite à ces quelques remarques, plusieurs tests ont été réalisés dans le but d'identifier la cause du problème. Premièrement, nous avons montré qu'il n'y a pas de différence entre les résultats obtenus avec PHOENICS et FLUENT pour un jet à basse température [1]. Au contraire, une différence croissante est observée pour des températures croissantes. Deuxièmement, il a été noté qu'il n'y a pas de différence entre les résultats obtenus avec ces deux mêmes logiciels pour un écoulement laminaire quelle que soit la température. Ainsi, l'origine des différences notées a pu être attribuée à une implémentation différente des modèles de type k- ϵ .

Les équations résolues pour k et ϵ sont caractérisées par leurs termes source. Ainsi, on peut supposer que ces termes source sont différemment implémentés dans les deux logiciels. Concernant le modèle k- ϵ standard, ces termes source prennent la forme suivante :

$$S(k) = G - \rho\epsilon$$

$$S(\epsilon) = \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho\epsilon)$$

dans lesquelles ρ est la masse volumique, G est le taux de production de k et s'écrit $G = \mu_t S_R^2$,

où $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ représente la viscosité turbulente et S_R est l'amplitude des contraintes.

Concernant PHOENICS, tous les termes source implémentés par l'utilisateur sont écrits comme suit :

$$S(x) = C(V - x)$$

dans laquelle x représente la variable résolue et C et V sont spécifiés par l'utilisateur.

En pratique, avec cette méthode, le produit de C par V est maintenu en terme source (dans le membre de droite de l'équation linéaire écrite pour la variable x) alors que le produit de C par x est transféré dans le membre de gauche où il devient positif et contribue ainsi à améliorer la stabilité du système à résoudre pour x (augmentation du terme de la diagonale au sens matriciel).

En appliquant cette méthode à $S(k)$, il vient par exemple pour C et V :

$$C = \rho \frac{\varepsilon}{k} \quad \text{et} \quad V = \frac{G}{C}$$

Cette méthode est couramment utilisée depuis plusieurs années au laboratoire pour implémenter nos propres modèles de turbulence dans PHOENICS [3]. De plus, il n'y a pas de différence entre les résultats calculés en utilisant notre propre implémentation du modèle k - ε standard ou celle prédéfinie dans PHOENICS.

Concernant FLUENT, la méthode n'est pas très différente, excepté que les deux grandeurs à donner pour définir chaque terme source ne sont pas C et V mais S et dS/dx .

Ainsi, il est possible d'implémenter une version du modèle k - ε standard entièrement définie par l'utilisateur en utilisant :

$$dS/dk = -2C$$

pour spécifier $S(k)$,

dans laquelle C correspond à la valeur précédemment définie pour PHOENICS.

Il est donc relativement facile d'implémenter un modèle de turbulence quelconque défini par l'utilisateur aussi bien dans PHOENICS que dans FLUENT.

Après réalisation de ce travail sous FLUENT, nous avons observé que les résultats calculés avec notre propre implémentation du modèle k - ε standard étaient similaires à ceux obtenus avec PHOENICS et très différents de ceux obtenus avec la version implémentée dans FLUENT. Nous avons alors contacté le service des utilisateurs de FLUENT en France afin de les informer. Nous avons ensuite vérifié tout ça avec Benoit Post, alors chef de service chez FLUENT France, qui n'a pu que constater l'évidence. Après divers échanges avec les Etats-Unis, il nous a été répondu que le terme source implémenté pour k est en fait :

$$S(k) = \mu_{\text{eff}} S_R^2 - \rho \varepsilon$$

au lieu de :

$$S(k) = \mu_t S_R^2 - \rho \varepsilon$$

pour l'ensemble des modèles de turbulence de type k - ε de FLUENT.

Finalement, en implémentant la modification correspondante dans notre propre version du modèle k - ε , il nous a été facile de vérifier que ce point est à l'origine des différences observées.

En fait, comme $\mu_{\text{eff}} = \mu_t + \mu_l$, le terme $\mu_l S_R^2$ est ajouté en trop au niveau du terme source sur k . Comme la viscosité laminaire des plasmas thermiques augmente de manière importante à haute température, ce terme $\mu_l S_R^2$ devient lui aussi important pour notre application, bien qu'il n'ait qu'un faible effet pour les écoulements à basse température.

En considérant ce problème d'implémentation (qui nous a été justifié par une meilleure stabilité), il est possible de retrouver la forme normale (et correcte) des modèles de type k - ε en ôtant ce terme. Cette modification s'applique à tous les modèles de turbulence de type k - ε de FLUENT.

Suite à notre réclamation, une note a été ajoutée dans la documentation qui spécifie maintenant que le terme source implémenté pour k est $S(k) = \mu_{\text{eff}} S_R^2 - \rho \varepsilon$ au lieu de $S(k) = \mu_t S_R^2 - \rho \varepsilon$. Néanmoins, il est toujours de la responsabilité de l'utilisateur d'ôter le terme en trop. Ceci peut être fait par le biais des quelques lignes de programmation en C suivantes :

```
DEFINE_SOURCE(k_src_mu_lam, c, t, dS, eqn)
{
    real SQRS = C_STRAIN_RATE_MAG(c, t) * C_STRAIN_RATE_MAG(c, t);
    dS[eqn] = 0.;
    return -C_MU_L(c, t)*SQRS;
}
```

Le codage ci-dessus peut être utilisé aussi bien en simple précision qu'en double (options sous FLUENT). En effet, le type `real` est interprété par `float` dans le premier cas et `double` dans le second. Ce code source doit ensuite être compilé (ou interprété) depuis l'interface FLUENT dédiée (menu Define > User-Defined > Functions, etc.). Ensuite, la source doit être appliquée à l'équation de k (menu Define > Boundary conditions > Fluid) en sélectionnant `k_src_mu_lam` comme terme source sur l'énergie cinétique de turbulence.

En principe, ce terme n'a pas d'effet sur la plupart des écoulements à basse température, mais il doit être pris en compte pour tous les écoulements de gaz à haute température. En particulier, pour les plasmas, il contribue à diminuer comme il se doit le terme de production de k dans le cœur du jet, ce qui produit un cœur plus long.

A titre illustratif, les figures 1 et 2 présentent les profils axiaux de vitesse et de température pour un jet de plasma de type APS généré à l'aide d'une torche SULZER-METCO de type F4 et de diamètre de 7 mm alimentée avec un mélange plasmagène Ar/H₂ (45/15 NI/min) et une intensité de courant de 600A.

Les résultats obtenus avec deux modèles de type k - ϵ (modèle standard et modèle Realizable) sont représentés avec ou sans le terme correctif sur l'équation de k .

L'implémentation par défaut du modèle k - ϵ standard (ligne de type trait d'axe) et du modèle k - ϵ Realizable (ligne pointillée) mène à un cœur potentiel extrêmement court. Au contraire, la prise en compte du terme correctif produit un allongement significatif du jet de plasma pour les deux modèles. De plus, la différence entre modèles standard et Realizable est cette fois beaucoup plus importante, ce qui est tout à fait logique vu que le second est particulièrement adapté à l'étude des jets ronds alors que le premier ne l'est pas. Ainsi, le modèle Realizable devrait fournir des résultats bien meilleurs que le k - ϵ standard qui est connu pour surestimer l'étalement radial des jets axisymétriques (anomalie des jets ronds). Au contraire le modèle Realizable permet de supprimer cette déficience.

Le terme "Realizable" signifie que le modèle satisfait certaines contraintes mathématiques sur les contraintes normales, consistantes avec la physique des écoulements turbulents. Ce modèle a été validé pour une large gamme d'écoulements : en particulier il résout l'anomalie des jets ronds et prédit correctement la dissipation des jets ronds tout comme celle des jets plans. Toutefois, concernant les jets de plasma, nous avons donc pu observer que cet avantage disparaît si la version contenant $\mu_l S_R^2$ est conservée. Ainsi, ce terme doit absolument être ôté de l'équation de k .

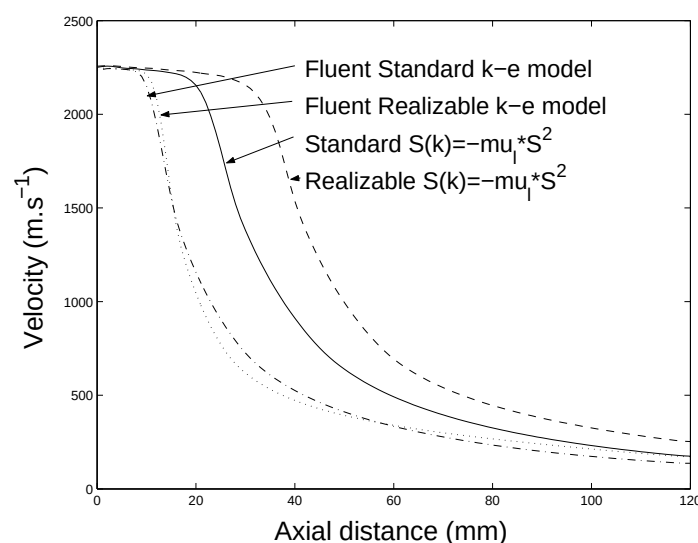


Figure N1: Comparaison des profils de vitesse axiaux du jet de plasma pour différents modèles de turbulence [25].

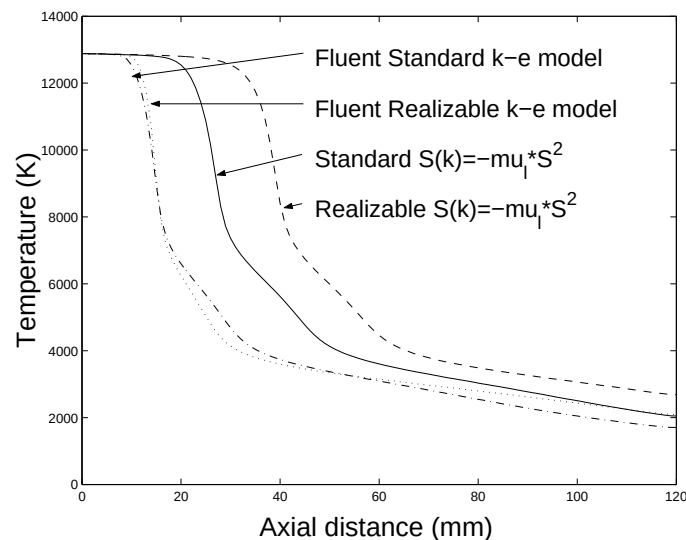


Figure N2 : Comparaison des profils axiaux de température du jet de plasma pour les deux modèles de turbulence de type k-ε utilisés avec ou sans correction [25].

Conclusion

D'après des études récentes rapportées dans la littérature, il avait été noté que l'utilisation de FLUENT produit des jets de plasma dont le cœur potentiel est anormalement court lorsqu'un modèle de turbulence de type k-ε est utilisé. Après différentes vérifications, il a finalement été démontré que FLUENT incorpore un terme source à l'équation de conservation de l'énergie cinétique de turbulence k , qui n'est pas en accord avec la théorie des écoulements turbulents. Ainsi, quelques lignes de programmation permettant le retrait de ce terme ont été proposées dans cette étude. Les résultats numériques montrent une nette amélioration des résultats CFD avec cette correction. Tous les modèles de turbulence de type k-ε disponibles sous FLUENT sont concernés par le problème. Suite à nos échanges avec chez FLUENT, une note a été ajoutée dans la documentation du logiciel : cette note précise clairement ce qui est utilisé dans FLUENT mais c'est toujours à l'utilisateur de réaliser les changements requis. Dans la mesure où le correctif présente une influence croissante avec l'augmentation de la température, son utilisation est essentielle pour les écoulements de plasma mais il est aussi recommandé pour modéliser les phénomènes de combustion en régime turbulent. Ces travaux ont par ailleurs été réalisés avec Jianfei LI en marge de sa thèse.

Références

- [1] R. Bolot, J. Li and C. Coddet, "Modeling of thermal plasma jets: a comparison between PHOENICS and FLUENT", in *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application*, Pub. DVS, Düsseldorf, DE, 2004.
- [2] R. Bolot, M. Imbert and C. Coddet, "Mathematical modeling of a free plasma jet discharging into air and comparison with probe measurements", pp. 549-555 of *Thermal Spray: A United Forum for Scientific and Technological Advances*, Ed. C.C. Berndt, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 1997.
- [3] R. Bolot, M. Imbert and C. Coddet, "On the use of a low-Reynolds extension to the Chen-Kim (k-ε) model to predict thermal exchanges in the case of an impinging plasma jet", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 1095-1106, **44** (6), 2001.
- [4] R. Bolot, M. Imbert and C. Coddet, "Three dimensional transient modeling of the substrate temperature evolution during the coating elaboration", pp. 979-984 of *ITSC'02 Tagungsband Conference Proceedings*, Ed. E. Lugscheider, Pub. DVS, Düsseldorf, DE, 2002.
- [5] R. Bolot, J. Li, R. Bonnet, C. Mateus and C. Coddet, "Modeling of the substrate temperature evolution during the APS thermal spray process", pp. 949-954 of *Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology*, Ed. B.R. Marple and C. Moreau, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2003.
- [6] M.P. Planche, R. Bolot and C. Coddet, "In-Flight Characteristics of Plasma Sprayed Alumina Particles: Measurements, Modeling, and comparison", *Journal of Thermal Spray Technology*, 101-111, **12** (1), 2003.

- [7] B. Dussoubs, P. Fauchais, A. Vardelle, M. Vardelle and N.J. Themelis, "Computational Analysis of a Three-Dimensional Plasma Spray Jet", pp. 557-565 of *Thermal Spray: A United Forum for Scientific and Technological Advances*, Ed. C.C. Berndt, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 1997.
- [8] M. Leylaverigne, A. Vardelle and B. Dussoubs, "Comparison of Plasma-Sprayed Coatings Produced in Argon or Nitrogen Atmosphere", pp. 459-465 of *Thermal Spray: A United Forum for Scientific and Technological Advances*, Ed. C.C. Berndt, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 1997.
- [9] B. Dussoubs, A. Vardelle and P. Fauchais, "Modeling of a Plasma Spray System", pp. 861-868 of *Progress in Plasma Processing of Materials*, Ed. P. Fauchais, Pub. Begell House, Inc. New York · Wallingford, UK, 1997.
- [10] B. Dussoubs, A. Vardelle, G. Mariaux, P. Fauchais and N.J. Themelis, "Modeling of simultaneous plasma spraying of two powders", pp. 793-798 of *UTSC'99 Tagungsband Conference Proceedings*, Ed. E. Lugscheider, P.A. Kammer, Pub. DVS, Düsseldorf, DE, 1999.
- [11] G. Mariaux, C. Baudry and A. Vardelle, "3-D modeling of gas flow and particle spray jet in plasma spraying", pp. 933-942 of *Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millenium*, Ed. C.C. Berndt, K.A. Khor and E.F. Lugscheider, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2001.
- [12] K. Remesh, S.C.M. Yu, H.W. Ng and C.C. Berndt, "Computational Study and Experimental Comparison of the In-Flight Particle Behavior for an External Injection Plasma Spray Process", *Journal of Thermal Spray Technology*, 508-522, **12** (4), 2003.
- [13] A. Schwenk, G. Nutsch and H. Gruner, "Modified Nozzle for the Atmospheric Plasma Spraying", *Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology*, pp. 573-579, (Ed.) C. Moreau and B. Marple, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2003.
- [14] A. Schwenk, H. Gruner, S. Zimmermann and G. Nutsch, "Improved Nozzle Design of de-Laval-type Nozzles for the Atmospheric Plasma Spraying", in *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application*, Pub. DVS, Düsseldorf, DE, 2004.
- [15] A. Boussagol and P. Nylén, "A comparative study between two different process models of atmospheric plasma spraying", pp. 710-715, *Tagungsband - Conference Proceedings*, (Ed.) E. Lugscheider, Pub. DVS, Düsseldorf, DE, 2002, 1051+pages.
- [16] M. Friis and P. Nylén, "A Numerical Study of the Sources of Variation in In-Flight Particle Characteristics in Atmospheric Plasma Spraying", *Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology*, pp. 1149-1155, (Ed.) C. Moreau and B. Marple, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2003.
- [17] I. Choquet, P. Nylén, J. Wigren, "Deposition rate increase in APS processes by means of multiple injection ports", in *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application*, Pub. DVS, Düsseldorf, DE, 2004.
- [18] R. Bandyopadhyay, P. Nylén and J. Wigren, "A CFD Analysis of the Relationships between Process Parameters and Particle In-flight Characteristics in Flame Spraying", in *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application*, Pub. DVS, Düsseldorf, DE, 2004.
- [19] S. Xue, P. Proulx and M. I. Boulos, "Turbulence Modeling of Inductively Coupled Plasma Flows", *Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology*, pp. 993-999, (Ed.) C. Moreau and B. Marple, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2003.
- [20] S. Xue, S. Mihm and M.I. Boulos, "Substrate temperature control during supersonic induction plasma spraying", in *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application*, Pub. DVS, Düsseldorf, DE, 2004.
- [21] D. Guénadou, E. Meillot, "Modeling of Inductively Coupled Plasma Flows in a Reactor: Comparison with Experimental Results", in *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application*, Pub. DVS, Düsseldorf, DE, 2004.
- [22] T. Han, Z. Zhao, B.A. Gillispie and J.R. Smith, "A fundamental study of the kinetic spray process", in *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application*, Pub. DVS, Düsseldorf, DE, 2004.
- [23] E. Lugscheider, N. Papenfuss-Janzen and W. Varava, "Simulation of the layer composition in thermal sprayed functionally graded coatings in terms of numerical optimization", in *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application*, Pub. DVS, Düsseldorf, DE, 2004.
- [24] C. Bartuli, T.Valente, F.Cipri, E. Bemporad and M. Tului, "A Parametric Study of an HVOF Process for the Deposition of Nanostructured WC-Co Coatings", *Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology*, pp. 283-289, (Ed.) C. Moreau and B. Marple, Pub. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2003.
- [25] R. Bolot, J. Li, C. Coddet, "Some key advices for the modeling of plasma jets using FLUENT", pp. 1367-1371 de *Thermal Spray connects: Explore its surfacing potential* (proceedings de International Thermal Spray Conference, 2-4 mai 2005, Bâle, CH), Ed. E. Lugscheider, Pub. DVS, DE, 2005.

Conclusion générale et perspectives

Ce dossier comporte mon dossier d'inscription soumis à l'école doctorale SPIM au format imposé (20 pages) et une seconde partie portant sur le détail de mes activités de recherche d'après thèse (soutenance en mai 1999). Dans cette seconde partie, le plan du dossier d'inscription a été conservé. Les thèmes 1 et 2 concernent les principaux éléments influençant la qualité des dépôts élaborés par projection thermique, à savoir l'état des particules au moment de leur impact sur le substrat ou les couches précédemment élaborées, et l'état thermique du substrat pouvant fortement influencer les contraintes générées. Le thème 3 concerne cette fois la caractérisation du dépôt : en particulier j'ai développé un logiciel dédié à l'estimation de leur conductivité thermique effective, ce qui est notamment très utile pour les dépôts de type barrières thermiques. Dans le thème 4, j'ai présenté des travaux permettant d'illustrer ma contribution à l'amélioration des outils de projection thermique et deux exemples ont été considérés. Enfin, le cinquième thème abordé concerne une collaboration internationale mise en place avec l'EMPA (Thoune, Suisse) en marge de la thèse de Monsieur Cornelis Schreuders qui a porté sur la modélisation des plasmas d'induction haute fréquence pour la production de nanoparticules. De plus, une note a été ajoutée concernant l'utilisation de FLUENT pour la modélisation des jets de plasma.

La première thématique abordée concerne donc la modélisation des interactions jet/particules. Il est évident que leur état (vitesse, température, taux de fusion) est un paramètre essentiel concernant la qualité des dépôts élaborés. Cette thématique a été détaillée à travers la synthèse de trois articles en revues internationales. Dans les modèles élaborés pour le procédé APS, les particules sont considérées individuellement et incluent un maillage interne permettant la prise en compte de la progression du front de fusion au sein même d'une particule isolée. Cet élément est en effet important notamment au niveau de la projection de matériaux réfractaires. Il a ainsi été montré, dans le cas de la projection d'une poudre d'alumine avec un jet de plasma composé d'un mélange argon/hydrogène, que le front de fusion des particules les plus grosses n'atteint pas le centre de la particule à la distance de projection, ce qui permet notamment d'expliquer la présence de particules partiellement fondues dans le dépôt. Néanmoins la prise en compte de l'effet de charge (effet des particules sur le jet) n'est pas possible avec ce type de modèle. Dans un second temps, un modèle incluant un couplage dans les deux sens a été utilisé pour prendre en compte l'effet de charge dans le cas du procédé Arc Fil. Il s'avère que suivant la charge en particules, celles-ci peuvent contribuer à diminuer la vitesse du jet d'une cinquantaine de m/s pour le cas considéré. Par ailleurs, il a aussi été montré que le jet issu d'une buse Arc fil conventionnelle (TAFA 9000) ne peut être représenté convenablement qu'avec un modèle tridimensionnel. En effet, des étalements différents ont par exemple été notés dans le plan des fils et dans le plan perpendiculaire.

La seconde thématique abordée concerne les effets thermiques au niveau du substrat et la formation des contraintes résiduelles dans le dépôt. C'est dans ce cadre que j'ai co-encadré Monsieur Jianfei LI durant sa thèse (directeur Professeur Christian CODDET). Ce thème a donc été abordé à travers une synthèse des nombreux articles publiés conjointement avec Jianfei LI. Les flux thermiques mis en jeu ont tout d'abord été estimés soit par calcul CFD pour la contribution de l'impact du jet de plasma sur le substrat, soit déduits de mesures expérimentales (réalisation de cordons de matière) concernant la contribution liée à la matière déposée (impact, étalement, solidification et refroidissement quasi-instantané des gouttelettes projetées). Un modèle tridimensionnel transitoire permettant le calcul de la dissipation des flux dans le substrat a ensuite été élaboré. Ce modèle permet de considérer l'effet des flux mis en jeu sur l'échauffement du substrat lors du passage du jet. Le cas d'un matériau homogène et épais a tout d'abord été étudié. Par la suite, les effets de différents paramètres (vitesse de déplacement des sources, épaisseur et nature du substrat, etc.) ont été présentés. Enfin, le cas d'un substrat composite constitué de plusieurs couches de différents matériaux a été abordé. La suite des travaux réalisés par Jianfei LI dans le cadre de sa thèse a porté sur l'utilisation de SYSWELD pour deux applications principales :

- Etude du préchauffage de pièces géométriquement plus complexes
- Modélisation de la formation des contraintes dans les dépôts

Concernant la deuxième application, le modèle de génération des contraintes développé dans le cadre de sa thèse, inclut l'activation progressive des cellules au cours de l'élaboration de chaque couche. Le cas d'un dépôt d'alumine élaboré en 10 passes a notamment été considéré et la déformée calculée sous SYSWELD est en bon accord avec celle observée expérimentalement.

La troisième thématique abordée porte sur le développement et l'utilisation d'un code de calcul destiné à l'estimation de la conductivité thermique de structures poreuses tels que les dépôts élaborés par projection thermique. Ce thème est abordé à travers la synthèse de trois articles en revues internationales et d'autres articles de type conférences internationales. Le code est basé sur l'utilisation d'une méthode de type différences finies, permettant l'analyse de coupes micrographiques de dépôts obtenues par microscopie électronique à balayage. L'image de la coupe est tout d'abord binarisée puis les pixels sont interprétés comme des cellules d'intégration de l'équation de conduction de la chaleur en régime stationnaire. Un système d'équations dont la taille correspond au nombre de pixels de l'image est ainsi généré. Les temps de calcul initialement importants ont ensuite été diminués de façon spectaculaire par le biais de l'utilisation de solveurs mieux appropriés au problème. En particulier, les méthodes SOR et LSOR ont permis de passer d'un temps de calcul de l'ordre de la journée à un temps de quelques minutes pour une même image. Le logiciel (nommé TS2C) a été utilisé dans le cadre de plusieurs applications.

Tout d'abord, dans le cas des barrières thermiques de type zircone partiellement stabilisée à l'yttria, il a été mis en évidence que l'utilisation d'un procédé connexe (refusion LASER *in situ*) peut permettre de réduire significativement la conductivité effective du dépôt en favorisant la création de fissures orientées perpendiculairement au flux imposé.

Dans un second temps, concernant les dépôts d'alumine élaborés à l'aide de différents procédés, nous avons mis en évidence que les revêtements élaborés à l'aide des procédés ROKIDE® et MATER JET® (procédés de type flammes/baguettes développés par SAINT-GOBAIN COATING SOLUTIONS, Avignon, France) présentent une conductivité thermique environ deux fois inférieure à ceux élaborés en APS.

Encore plus récemment, nous avons utilisé le logiciel pour l'étude de la conductivité thermique de matériaux composites abrasables de type AISi/polyester. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du programme européen NEWAC (New Aero Engine Core Concept).

Notre logiciel pourrait de plus continuer à être utilisé dans le cadre d'autres contrats européens. En particulier, une extension tridimensionnelle est prévue dans le cadre du futur projet RISE (Rub-In tolerant material design for Improved Seal Efficiency) et il pourrait encore être utilisé dans un troisième projet européen portant cette fois sur les barrières thermiques : ARAGON (Advanced theRmal barrier coAtinGs for IOw emissioN flight turbines).

Concernant le développement d'un modèle tridimensionnel dans le cadre de RISE, un premier pas a d'ores et déjà été réalisé et porte sur un outil permettant de générer des structures poreuses tridimensionnelles. Cet outil est basé sur un générateur d'ellipses aléatoires. Au départ, on part d'un matériau 100% poreux. On génère ensuite des ellipses (représentant les lamelles) positionnées aléatoirement et de taille et de ratio largeur/hauteur également aléatoires. On génère ainsi des ellipses jusqu'à obtention du taux de porosité désiré : plus on génère d'ellipses, plus le taux de porosité diminue. Nous avons par ailleurs inclus la possibilité de générer des ellipses présentant une coque afin de représenter la porosité interlamellaire. De plus, ces ellipses peuvent également être fissurées afin de représenter la relaxation des contraintes de trempe par formation de microfissures.

La figure 1 présente un exemple de champ de porosité généré avec ce programme (ici sans coques ni fissures). Le but est pour l'heure de pouvoir tester le futur programme TS2C3D sur des images volumiques avant même de disposer d'images volumiques réelles obtenues par tomographie. Par ailleurs, la critique principale de nos travaux sur des coupes micrographiques portant sur la question de la représentativité des calculs 2D, il est envisagé de vérifier si la considération de quelques plans de coupe pour réaliser des calculs de conductivité en 2D avec prise en compte de la valeur moyenne obtenue sur ces différents plans, est cohérente avec les résultats obtenus en 3D complet : une réponse à cette question sera donc prochainement donnée.

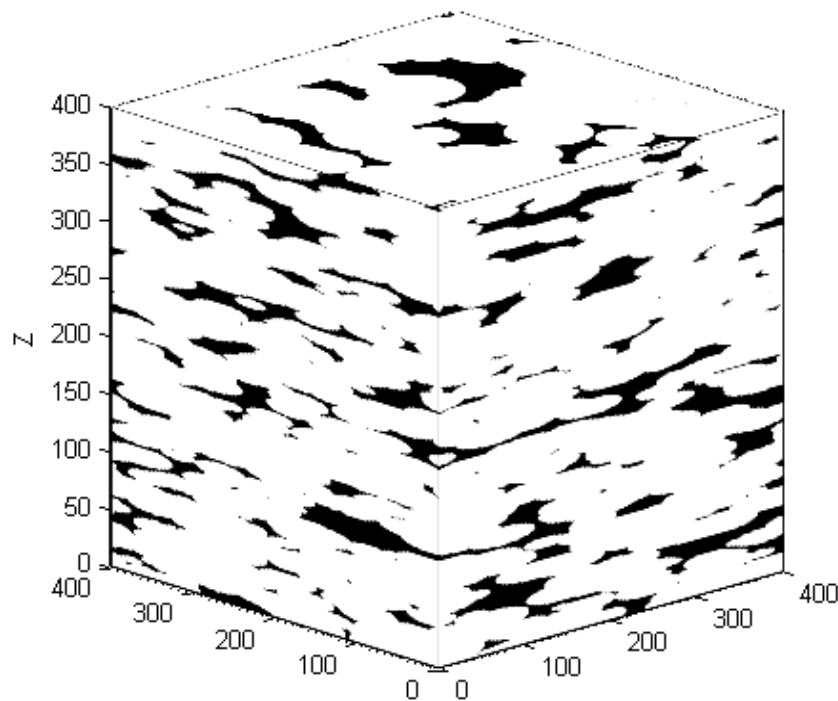


Figure C1 : Champ de porosité tridimensionnel obtenu à l'aide du générateur d'ellipses.

Concernant cette thématique, j'ai récemment reçu l'appui d'un nouveau thésard que je co-encadre depuis octobre 2008 avec Hanlin LIAO (professeur à l'UTBM) sur le sujet de la modélisation des propriétés de dépôts. Les objectifs de thèse de Monsieur Jiang-Hao QIAO seront de passer à la 3D en thermique et de réaliser des calculs 2D d'estimation du module d'élasticité effectif de structures poreuses.

La quatrième thématique abordée porte sur l'amélioration d'outils de projection. En effet, en tant que laboratoire, le LERMPS se doit d'être porteur quant au développement de nouvelles technologies ou l'amélioration d'outils existants pour des utilisations spécifiques ou hors normes. J'ai ainsi participé à de nombreux contrats industriels portant quasi-systématiquement sur du développement de procédés (17 rapports industriels depuis la fin de ma thèse dont 10 en tant que premier auteur). Concernant cette partie, il m'a semblé bon de détailler plus spécifiquement deux contributions. La première concerne le développement de tuyères divergentes destinées à la projection plasma sous très faible pression et la seconde porte sur l'amélioration d'un procédé permettant de revêtir l'intérieur de cylindres destinés à l'industrie automobile (collaboration avec PSA PEUGEOT-CITROËN).

Concernant l'aspect design de divergents pour le procédé de projection plasma sous très faible pression, j'ai co-encadré Monsieur Dmitry SOKOLOV sur ce sujet dans le cadre de sa thèse (directeur Professeur Didier KLEIN). Cette activité a été détaillée à travers la synthèse de 7 articles dont 1 en revue internationale. Une méthode de calcul du profil de divergent susceptible de produire un jet de plasma homogène et unidirectionnel a tout d'abord été présentée. Cette méthode est basée sur une extension de celle décrite par Foelsch dès 1949. Un prototype a ensuite été fabriqué et utilisé dans le cadre de la thèse de Dmitry SOKOLOV. L'augmentation des pertes thermiques occasionnées par l'utilisation d'une tuyère longue équipée d'un divergent rajouté, a tout d'abord pu être partiellement corrigée en réduisant la longueur de la partie de section constante de la tuyère. Une diminution des pertes thermiques de l'ordre de 20% a ainsi été obtenue. Lors de manipulations expérimentales réalisées avec une poudre de type CuAgZr élaborée au LERMPS par atomisation, un colmatage partiel de la buse a été obtenu en injectant près du col. Au contraire, en injectant près de la sortie, le jet de plasma ne semble plus disposer de l'énergie nécessaire pour fondre la poudre. Un travail de modélisation a donc ensuite été consacré à la localisation du point d'injection de la poudre dans le divergent profilé. Ces modélisations ont confirmé le possible colmatage de la buse pour les deux points d'injection situés en amont. Ainsi, ces résultats nous ont suggéré que l'utilisation d'une tuyère courte est préférable dans le cas d'une injection radiale de la poudre.

Un dossier ANR portant sur la projection plasma sous très faible pression est par ailleurs en cours de rédaction : le but du projet serait de réaliser des dépôts de barrière thermique de type zircone stabilisée, dont la structure serait hybride entre EBPVD (condensation de vapeur) et projection thermique conventionnelle (lamelles écrasées). Nous interviendrions en partenariat avec le laboratoire SPCTS (Limoges) mais aussi SNECMA et SAINT-GOBAIN Coating-Solutions notamment.

Des travaux de modélisation conséquents sont notamment prévus dans le cadre du projet. L'acquisition d'une torche tricathodes (ou d'un système de torches) à injection axiale est notamment envisagée. Dans la mesure où le matériau est habituellement injecté en sortie de torche (APS) où dans le divergent (LPPS), seul le jet de plasma externe (ou pris à partir du col) a été étudié jusqu'à présent au laboratoire, ce qui a toujours permis d'éviter la modélisation de l'arc électrique. Dans le cadre de ce projet, la prise en compte d'une injection très en amont (qui devrait permettre de vaporiser partiellement le matériau), ne pourra être étudiée autrement qu'en modélisant la formation de l'arc électrique, ce qui nécessitera un couplage entre les équations de Navier-Stokes et les équations de l'électromagnétique, dans le même ordre d'idées que celui réalisé pour les plasmas d'induction haute fréquence. Ces travaux seraient alors réalisés sous FLUENT par le biais d'UDF (User Defined Functions) codées en langage C. Les résultats escomptés concernent l'estimation des champs de vitesse et de température à l'intérieur de la torche afin de pouvoir ensuite quantifier l'accélération, l'échauffement, la fusion et la vaporisation du matériau par le biais de la modélisation des interactions jet/particules tel qu'abordé au niveau du thème 1.

Sur le sujet du procédé Arc fil destiné à réaliser des revêtements dans des cylindres pour l'industrie automobile, nous avons tout d'abord analysé les différentes solutions technologiques susceptibles de convenir au procédé. Notre choix s'est alors porté sur une solution initiale proche de celle de chez TAFE : à savoir une atomisation suivant l'axe du cylindre suivie d'un redressement du flux de matière à l'aide d'une tête de déviation.

Nous avons ensuite mis en évidence que la déviation du jet de matière était insuffisante avec la tête d'origine. Une nouvelle tête de déviation équipée d'une fente inclinée a donc été conçue puis testée. Cette nouvelle tête permet tout d'abord de redresser le flux de gouttelettes métalliques perpendiculairement à la surface à revêtir. De plus, les modélisations ont montré un gain de l'ordre de 50% sur la vitesse moyenne des gouttelettes au moment de leur impact sur le substrat (ceci sans prendre en compte la diminution de la taille moyenne des gouttes). Au final, l'adhérence des revêtements (point critique dans le cadre de cette étude) a pu être portée à 22 MPa au lieu d'une dizaine pour la tête d'origine. Cette valeur de 22 MPa est suffisante et entre dans les spécificités imposées par PSA. De plus, elle pourrait être encore significativement augmentée par utilisation d'une technologie de préparation de surface de type jet d'eau haute pression.

Le principe de l'utilisation de cette tête a été breveté (je suis co-auteur du brevet d'invention en question) puis nous avons communiqué sur le sujet à travers un article en revue internationale.

L'autre avantage du procédé développé concerne sa facilité de mise en œuvre : contrairement aux autres procédés utilisés, notre technique n'impose pas de rotation de l'ensemble de l'outil de projection (incluant bobines, etc.). Au contraire, seule une couronne sur laquelle est fixée la tête de déviation tourne.

La cinquième thématique abordée porte sur la modélisation des plasmas d'induction haute fréquence, destinés à la production de nanoparticules. Elle a été réalisée dans le cadre d'une collaboration internationale avec une équipe de l'EMPA (Thoune, Suisse) en marge de la thèse de Cornelis SCHREUDERS. Nous avons développé un modèle complet incluant le couplage électromagnétique formulé en terme de vecteur potentiel. Ce modèle a été validé dans le cas de conditions de fonctionnement pour lesquelles nous disposons de données modélisées par ailleurs. Après validation, la géométrie et les paramètres ont été ajustés de sorte à correspondre aux conditions réelles utilisées lors de l'élaboration de nanoparticules. La présence d'une zone de vitesse négative juste en sortie de l'injecteur axial est notamment supprimée dans ces conditions et la vitesse du plasma est très nettement supérieure. De par une injection axiale avec un débit conséquent, le jet de plasma présente par ailleurs une structure annulaire qui a également pu être observée expérimentalement. Il avait été envisagé d'étendre le domaine de

calcul en aval de la sortie de la torche, c'est-à-dire dans la zone de refroidissement du plasma. Néanmoins, suite à la dissolution récente de l'équipe de Stephan SIEGMANN, nous sommes à la recherche d'autres partenaires pour continuer le travail initié sur ce sujet.

Dans une dernière partie, j'ai tenu à rédiger une note portant sur l'utilisation de FLUENT pour la modélisation des écoulements de plasma. Il s'avère que la formulation interne au logiciel des modèles de turbulence de type $k-\varepsilon$ inclut un terme supplémentaire qui n'a pas lieu d'être au niveau du terme source sur l'équation de k , l'énergie cinétique de turbulence. Si ce terme n'a pas d'influence pour les écoulements froids ou à température modérée, il n'en est pas de même pour les plasmas du fait de l'augmentation importante de leur viscosité avec la température. De ce fait, il est impératif de soustraire ce terme si l'on souhaite utiliser un modèle de type $k-\varepsilon$ pour modéliser les jets de plasma sous FLUENT, sans quoi la longueur du cœur potentiel du jet est assez nettement sous-estimée.

Nous avons donc fourni à l'ensemble des chercheurs concernés, les quelques lignes de programmation permettant de soustraire ce terme.

Concernant un autre projet pas encore mentionné, un second dossier ANR est en cours de rédaction (porteur Mademoiselle Marie-Pierre PLANCHE). En cas d'acceptation, il porterait sur l'utilisation du procédé cold-spray pour la réalisation de revêtements en Titane pour des applications dans le domaine du biomédical. Suivant ce procédé, le matériau projeté n'est pas porté jusqu'à sa température de fusion mais les particules sont très fortement accélérées. De par leur forte vitesse au moment de leur impact, les particules s'écrasent, se déforment plastiquement et adhèrent ainsi au substrat ou à la couche précédemment déposée. Il sera envisagé dans un premier temps de définir une buse idéale pour déposer des particules de Ti (phase 0 du projet). Cette buse sera notamment étudiée de sorte à permettre d'atteindre la vitesse critique nécessaire à l'adhérence des particules de Ti sur le substrat et les couches de Ti déjà déposées lors des passes précédentes. Dans un deuxième temps, afin de comprendre les phénomènes physiques qui interviennent au cours d'une projection à froid, les paramètres opératoires du système de projection seront modifiés et l'influence des facteurs les plus critiques sera mise en évidence par modélisation des écoulements. Ainsi, des éléments tels que nature, débit et préchauffage des gaz de projection seront notamment étudiés par modélisation afin d'optimiser les paramètres. La nature effective du matériau à projeter sera également prise en compte. En effet, la granulométrie et la structure (nano ou pas) de la poudre sont autant d'autres facteurs pouvant agir à la fois sur la vitesse critique à obtenir mais aussi sur l'accélération des particules dans le jet de gaz (influence de la densité apparente du matériau notamment). Il n'est pas impossible que je co-encadre un thésard sur ce sujet si le projet venait à voir le jour.

Toujours concernant le procédé cold-spray, j'ai entamé durant l'été 2008, une collaboration avec l'équipe de Monsieur Michel JEANDIN (Ecole des Mines de Paris, Evry) dans le cadre de la thèse de Monsieur Gilles Rolland, étudiant à l'école des Mines en deuxième année. Dans ce cadre, la modélisation de l'écoulement et des interactions jet/particules est utilisée pour tenter de comprendre certaines observations difficiles à interpréter. Ces travaux portent sur l'élaboration de dépôts composites de type Ag-SnO_2 et Ag-Cu . Un dossier ANR blanc intitulé PORODYN portant sur l'utilisation du procédé cold-spray pour la réalisation de dépôts abrasables d'alliages métalliques a par ailleurs été déposé en partenariat avec l'équipe de Michel Jeandin. Nos partenaires seraient le Centre des Matériaux (Mines ParisTech - ARMINES, Evry), le laboratoire MATEIS (INSA Lyon) et le CRITT M2T (Nancy).