

**UNIVERSITE DE LIMOGES**  
**COLLEGE DOCTORAL de SITE**  
**Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie pour l'Information**  
**FACULTE de Sciences et Techniques**  
**Laboratoire SPCTS**

## **HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES**

**Discipline / Spécialité : Matériaux Céramiques et Traitements de surface**

présentée par

**Alain DENOIRJEAN**

le 10 Décembre 2009  
à 14h30 Amphi Michel Billy

### **Procédé de Projection par Plasma d'Arc**

**Interaction Plasma / Particules et Plasma / Substrat**  
**Influence sur la Construction du Dépôt**  
**Réalisation de Dépôts Nanostructurés**

devant le jury composé de

**rapporteurs**

**M. Dominique GOBIN**  
**M. Jean Pierre LARPIN**  
**M. Daniel MORVAN**

**Directeur de Recherche CNRS**  
**Professeur des Universités**  
**Professeur des Universités**

**Orsay**  
**Dijon**  
**Paris**

**examineurs**

**M. Pierre FAUCHAIS**  
**M. Rainer GADOW**  
**M. Alain GLEIZES**  
**Mme Béatrice HANNOYER**  
**M. Pierre LEFORT**  
**Mme Armelle VARDELLE**

**Professeur des Universités**  
**Professeur docteur**  
**Directeur de Recherche CNRS**  
**Professeur des Universités**  
**Professeur des Universités**  
**Professeur des Universités**

**Limoges**  
**Stuttgart**  
**Toulouse**  
**Rouen**  
**Limoges**  
**Limoges**

**Invités**

**M. Denis GIRARDIN**  
**M. Gérard LELIEVRE**

**Ingénieur R&D Saint-Gobain**  
**Astronome hors classe**

**Pont à Mousson**  
**Orsay**

# RÉSUMÉ

Les travaux exposés dans ce mémoire correspondent à une synthèse de l'activité de chercheur CNRS de Alain Denoirjean depuis son doctorat d'Université obtenu en 1993. Ils ont été développés dans le domaine des procédés de traitements de surface par projection plasma. Ces procédés consistent à déposer un revêtement sur un substrat, à partir d'un précurseur de matériau solide ou liquide (poudre micrométrique, suspension de poudre nanométrique, solution de sels métalliques dissous). Ce précurseur est injecté dans un plasma thermique en extinction généré par injection d'un gaz dans arc électrique. Le substrat est préalablement préparé et sa température peut être contrôlée indépendamment.

Deux parties principales sont développées : les travaux en projection conventionnelle de poudre micrométrique et les travaux en projection de suspension de poudre nanométrique ou de sels métalliques.

Dans la première partie, on a cherché à déterminer les mécanismes et les conséquences de l'interaction plasma/matériaux (à la surface des poudres, des substrats et des dépôts en cours de formation). L'ensemble des différentes étapes mises en œuvre dans la génération du dépôt ont été abordées : **Interaction** du jet avec l'atmosphère ambiante ; **Interaction** entre la surface de la poudre et le plasma ; **Interaction** du plasma avec la surface du substrat avant injection de la poudre, puis du dépôt en cours de formation ; **Influence** sur la formation des premières lamelles de l'état de surface du substrat ; **Mécanismes d'adhésion** du dépôt sur substrat oxydé ; **Construction** de dépôts céramiques, métalliques, composites céramique/métal monocouche, multicouche ou à gradient de composition.

Dans la seconde partie, les travaux font le bilan des résultats obtenus en projection de suspension SPS (Acronyme anglais : Suspension Plasma Spraying), travaux essentiellement orientés vers l'optimisation du procédé et la production de dépôt pour des applications industrielles potentielles : **Optimisation** de la cinématique de projection ; **Caractérisation** d'une torche tri-cathode ; **Développement** de dépôt pour des applications dans le domaine des énergies : Electrolyseur Haute Température, Barrière Thermique.

# ABSTRACT

The works presented in this manuscript summarize the activity of Alain Denoirjean as CNRS researcher since his PhD defended in 1993. The addressed science field is the surface treatment processes by plasma spraying. These processes are based on the thermo-kinetic treatment of precursors (solid or liquid) by an enthalpy source. The high enthalpy jet, where precursors are injected, is produced by the interaction between plasma forming gases and the direct current arc, the coating being formed onto prepared substrate, which surface temperature can be monitored.

Two main topics are followed: Conventional plasma spraying with micrometric powders as precursor and suspension or solution plasma spraying with the liquid precursor feeded with nanoparticles or solutions of metallic salts.

For the first topic, the aim was to determine the different mechanisms and the influences of the interaction between the plasma jet and the exposed surface of the powder, of the substrate and of the coating during its growth. All sequences occurring during the spray process are studied: **Interaction** between the plasma jet and surrounding atmosphere; **Interaction** between plasma and then after it the particle surface; **Interaction** between plasma and substrate surface first before powder injection and after with the growing coating surface; **Influence** of the substrate surface state on the splat flattening; **Adhesion mechanisms** of the coating on oxidized substrates; **Generation** of coatings based on ceramic, metal, composite ceramic/metal materials, with either monolayer or multilayer or functionally-graded structures.

In the second topic, the work consisted in the summary results obtained on suspension and solution plasma spraying, works mainly for optimizing the process in order to produce coatings and evaluate their properties in regard to potential industrial applications: **Optimization** of the spray kinematic; **Characterization** of a tri-cathode plasma torch; **Development** of coatings devoted to applications in the field of energy: High Temperature Electrolysers, Thermal Barrier Coatings.