



# MINES ParisTech – CENTRE DES MATÉRIAUX

## Pôle de recherche

### Surfaces, Interfaces et Procédés.

**Responsables scientifiques:** Y. Bienvenu, A. Chesnaud, J.-F. Hocheplied, M. Jeandin, S. Joannès, J. Renard, A. Thorel.

**Conseiller scientifique:** F. Willot.

**Responsables techniques:** F. Borit, A. Debray, V. Gantchenko, J. Heurtel, J.-Ch. Teissedre.

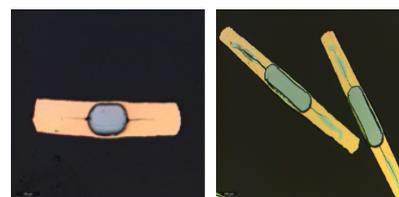
Le pôle Surfaces, Interfaces, Procédés cherche à élaborer de nouveaux matériaux fonctionnels en établissant les relations entre les paramètres des procédés, les structures à différentes échelles (du nano au macro) et les propriétés physiques des matériaux mis en forme incluant évidemment leurs propriétés mécaniques. Cette approche, qui s'appuie en grande partie sur les importants moyens de caractérisation des microstructures disponibles au centre, marie des compétences et savoir-faire d'expérimentateurs et modélisateurs, et permet aussi bien de revisiter des procédés industriels en amenant un éclairage nouveau et une compréhension plus fine des phénomènes en jeu, que de concevoir des procédés, des matériaux et même des pièces totalement nouveaux exploitant notre vision multi-matériaux et/ou multi-échelles. Les activités sont donc prioritairement tournées vers des partenariats industriels, jusqu'au transfert de technologie.

#### SECTEURS CONCERNES

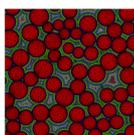
- **Composants pour l'automobile et l'aéronautique**
- **Connectique**
- **Filière hydrogène et dispositifs pour l'énergie**
- **Santé et environnement**
- **Luxe, art et design**

#### Procédés "traditionnels" (métallurgie des poudres) :

Les procédés d'élaboration « traditionnels » font appel soit au passage en phase liquide (moulage...) de matériaux prêts à l'utilisation après les opérations de finition de surface ou de traitements thermomécaniques, soit à la diffusion en phase solide. On peut rassembler les procédés afférents sous le vocable de Métallurgie des Poudres, ce qui inclut aussi les matériaux céramiques. Le raisonnement dans les études de solidification s'appuie sur la thermodynamique, et peut être guidé par des calculs simples à l'équilibre (Calphad, Thermocalc) et par les résultats d'analyses chimique et thermique, en tenant compte des phénomènes interfaciaux et de la cinétique (écoulements et diffusion accompagnant le changement d'état liquide-solide).



*Fil rond bimétallique Cu/W ou trimétallique Cu/Ni/W mis en forme avec un endommagement par fissuration réduit par colaminage en plusieurs passes (projet européen ERFTM)*



SIP



Centre des Matériaux, 63-65 rue Desbruères, BP 87, 91003, Évry Cedex  
Tél : 33 1 60 76 30 00 Fax : 33 1 60 76 31 50 <http://www.mat.mines-paristech.fr>



# MINES ParisTech – CENTRE DES MATÉRIAUX

## Pôle de recherche Surfaces, Interfaces et Procédés.

### Procédés hors équilibre :

Ces procédés couvrent dans le pôle la projection plasma et la projection cold spray. L'apport d'énergie (thermique ou cinétique) en un temps très court conduit à des interfaces ou structures hors équilibre. Des matériaux très différents, et a priori peu compatibles, peuvent se combiner pour constituer de nombreux couples substrat-revêtement, notamment en métallisation ou céramisation de polymères ou de tissus, démultipliant les possibilités de nouveaux matériaux fonctionnels. La compréhension et l'amélioration de ces procédés s'appuient sur des caractérisations spécifiques (choc laser LASAT pour l'adhésion) et la modélisation, par exemple par éléments finis pour la collision particule-substrat dans le cold-spray.

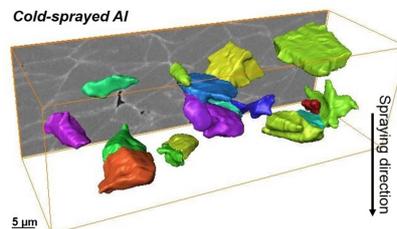


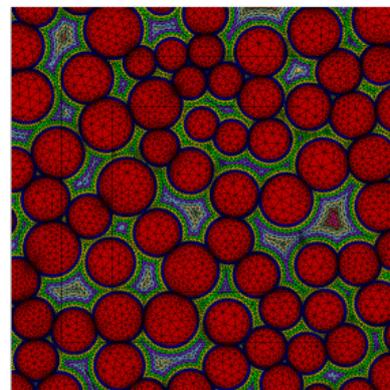
Image 3D de la structure interne d'un dépôt d'Al obtenu par cold spray montrant une sélection des particules écrasées le constituant.



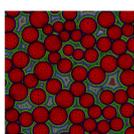
Coupe d'un dépôt Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sur bois obtenu par projection plasma.

### Procédés d'assemblage :

Cet axe de recherche couvre les assemblages mécaniques multi-matériaux comme le rivetage, le collage ou encore le soudage des structures composites avec des sous-ensembles polymères ou métalliques. La notion d'assemblage s'étend aux assemblages multifonctionnels en répondant à l'évolution des marchés. En effet, pour relever les challenges économiques, les matériaux composites sont de plus en plus amenés à intégrer des fonctionnalités qui vont au delà des propriétés mécaniques: les composites de demain seront "intelligents et hybrides" multipliant les interfaces et les assemblages. Les fonctionnalités recherchées sont multiples: il peut par exemple s'agir de capter de l'information (détection de défauts) ou réagir à un environnement spécifique. Les matériaux composites doivent pour cela intégrer des éléments sensibles (électroniques notamment) et cette hybridation/fonctionnalisation doit s'opérer à l'échelle même des constituants. Des fonctions peuvent aujourd'hui être apportées sur les fibres elles-mêmes par l'incorporation de charges et d'additifs avant extrusion et filage. Il convient de correctement appréhender la complexité des nouvelles interfaces créées pour ne pas détériorer les fonctionnalités primaires comme la tenue mécanique et notamment la durabilité.



Maillage d'un composite (coupe perpendiculaire à la direction des fibres) en vue de modélisation des effets d'interphase et de contacts.



SIP





# MINES ParisTech – CENTRE DES MATÉRIAUX

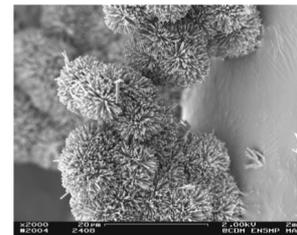
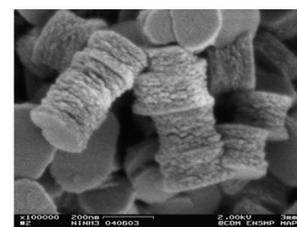
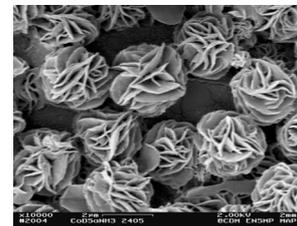
## Pôle de recherche

### Surfaces, Interfaces et Procédés.

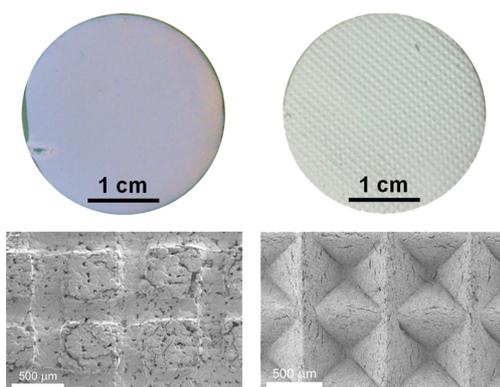
#### Procédés voie humide:

Ces procédés font à la fois référence à la synthèse de particules par précipitation et à la mise en forme de poudre pour l'élaboration de céramiques, par exemple le coulage en bande pour les piles à combustible. La précipitation contrôlée en solutions aqueuses dans des réacteurs adaptés, essentiellement appliquée aux oxydes métalliques, permet d'obtenir un bon compromis entre contrôle des caractéristiques physico-chimiques des particules (pureté, taille, forme...) et procédé acceptable industriellement, ce qui distingue nos travaux des approches de chimie douce développées dans le milieu académique, présentant souvent un meilleur contrôle des particules mais irréalistes à l'échelle industrielle (notamment en termes de coûts), et les approches purement génie des procédés qui ne prennent que grossièrement en compte la caractérisation et le contrôle de taille ou morphologie des particules.

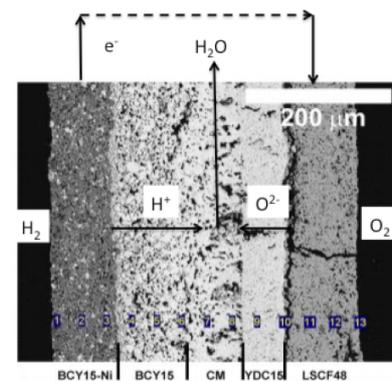
Le coulage en bande (tape casting), la sérigraphie (screen printing) ou la filmographie (bar coating), développés au laboratoire, sont des procédés « voie humide » faisant intervenir une mise en forme à froid à l'aide d'une barbotine, suivie du frittage de la pièce séchée. Le point le plus délicat est la stabilisation des barbotines (contre la floculation et la sédimentation), demandant de réajuster leur formulation en fonction des caractéristiques des poudres (taille de grains, charge de surface, morphologie et nature cristalochimique). Dominer la formulation des barbotines permet par exemple de bien contrôler et donc d'optimiser les microstructures poreuses de coeur de piles à combustible, associant des matériaux différents.



de haut en bas: microparticules d'hydroxyde de cobalt, d'hydroxyde de nickel et d'oxyde de zinc obtenues par précipitation homogène.

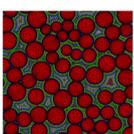


(En haut) Couples anode/électrolyte de piles de type SOFC à interfaces plane et architecturée. (En bas) Intégration de motifs périodiques de géométrie parallélépipédique et pyramidale sur la surface d'une anode support



Membrane duale de la pile à combustible IDEAL CELL obtenue par coulage en bande (5 couches)

Centre des Matériaux, 63-65 rue Desbruères, BP 87, 91003, Évry Cedex  
 Tél : 33 1 60 76 30 00 Fax : 33 1 60 76 31 50 <http://www.mat.mines-paristech.fr>



SIP





# MINES ParisTech – CENTRE DES MATÉRIAUX

## Pôle de recherche

### Surfaces, Interfaces et Procédés.

#### SAVOIR-FAIRE

#### Procédés d'élaboration de matériaux

- Synthèse de particules du nano au micro par chimie douce
- Métallurgie des poudres
- Céramiques
- projection plasma et cold-spray
- assemblages multimatériaux



*réacteurs de précipitation*

#### Caractérisation des matériaux

- structures aux échelles nano et micro par microscopie électronique en transmission et à balayage, tomographie...
- Mesures de propriétés physiques (mécaniques, électriques, piézoélectriques.. sur fibres, films, pièces...)



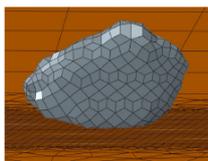
*mini-extrudeuse*

#### Modélisation des propriétés d'intérêt.

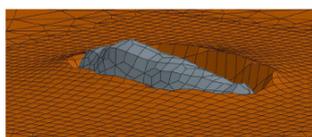
- analyse d'images et simulation des microstructures par morphologie mathématique.
- Relations microstructure – propriétés physiques
- Relations paramètres du procédé – microstructure.



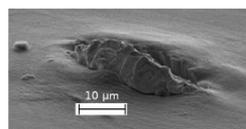
*bar coating*



(a)



(b)



(c)

*Simulation par éléments finis de l'impact d'une particule de tantale sur un substrat de cuivre: (a) état initial avant impact (b) état final après impact en fin de déformation (c) observation MEB*

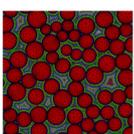


*plasma spraying*

- **contrôle des paramètres des procédés = contrôle des caractéristiques structurales et dimensionnelles de l'échelle des grains à celle des objets finis.**
- **Surfaces et interfaces originales en termes de morphologies et combinaisons de matériaux.**
- **amélioration de propriétés d'usage.**



*cold spray*



SIP



Centre des Matériaux, 63-65 rue Desbruères, BP 87, 91003, Évry Cedex  
Tél : 33 1 60 76 30 00 Fax : 33 1 60 76 31 50 <http://www.mat.mines-paristech.fr>