

## Du côté des études : Le Cold Spray

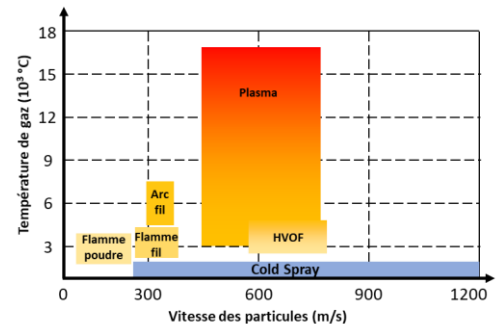
L'outillage en industrie s'expose, en règle générale, à des environnements extrêmes en termes de chaleur, corrosion, sollicitation mécanique... Afin de prolonger la durée de vie de ces outils, il peut être alors intéressant d'avoir recours à des couches de protection qui peuvent être mises en œuvre par dépôt Cold Spray, d'entrevoir des réparations, voire de la fabrication additive par cette même technologie.

Dans ce numéro, cet équipement de projection thermique employé par ICAR-CM2T va être traité avec tous les aspects qui l'entourent. Le Cold Spray ou projection à froid est une technique de revêtement par projection de particules froides de petite taille (5-40  $\mu\text{m}$ ) à haute vitesse (300-1500 m/s) sur un substrat, par l'intermédiaire d'un gaz supersonique (He, N<sub>2</sub>, Ar, Air). Le dépôt est formé alors de particules ayant impacté le substrat à l'état solide.

### Principe

Le principe du Cold Spray repose sur le maintien à l'état solide des particules pendant leur projection. Leur densification résulte de leur vitesse très élevée à l'impact (largement supersonique) et leur capacité à se déformer plastiquement. C'est le gaz de projection qui est chauffé, ce qui permet d'augmenter la vitesse des particules, par diminution de la viscosité, sans atteindre les températures de fusion.

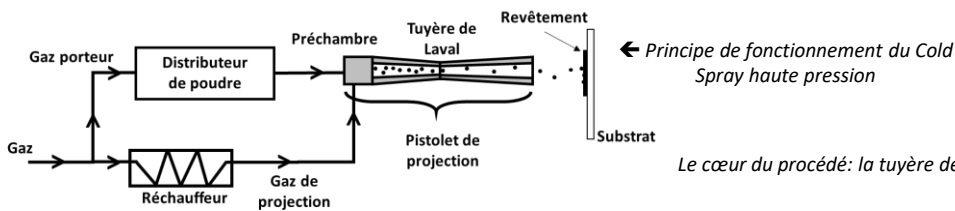
Le Cold Spray privilégie l'énergie cinétique par rapport à l'énergie thermique.



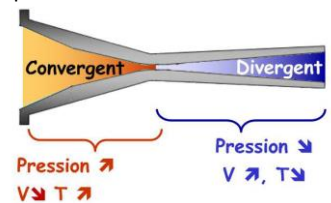
Le procédé Cold Spray dans l'ensemble des procédés de projection thermique (d'après les Techniques de l'ingénieur)

### Fonctionnement

La poudre de projection, qui provient du distributeur de poudre, est amenée par le gaz porteur jusqu'à une tuyère de type convergent-divergent (tuyère de Laval). La buse va accélérer le gaz de projection, qui a été préalablement chauffé et comprimé, jusqu'à une vitesse supersonique. Une fois propulsées hors de la buse, par le pistolet de projection, les particules entrent en collision avec le substrat, qui est situé à une certaine distance de la buse. Le revêtement résulte alors de l'empilement des particules qui se déforment plastiquement lors de l'impact. Les couches inférieures, qui se situent proches de la surface du substrat seront les plus denses par l'effet du martelage des particules qui se déposent au fur et à mesure.

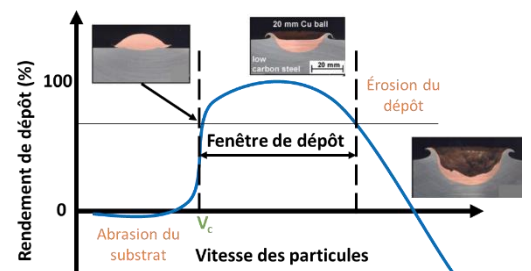


Le cœur du procédé: la tuyère de Laval



### Vitesse critique et fenêtre de tir

Pour obtenir un revêtement dense, les particules doivent atteindre, lors de l'impact, une vitesse supérieure à une vitesse dite critique «  $v_c$  ». Cette vitesse dépend de la nature de la poudre, sa morphologie mais également sa taille. Plus les particules sont fines, plus la vitesse est importante. Si la vitesse est inférieure à cette  $v_c$ , les particules vont éroder le substrat par abrasion, sans adhésion. Un second phénomène d'érosion est quant à lui rencontré lorsque la vitesse est largement supérieure à la  $v_c$  (survitesse).



Fenêtre de tir définie par rapport à la vitesse critique des particules

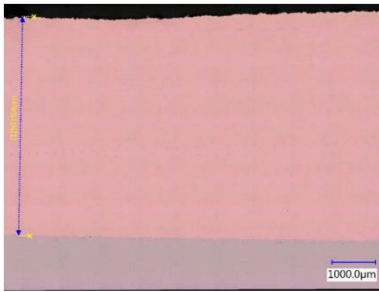
### Paramètres de projection à optimiser

La projection par Cold Spray n'est pas une mince affaire, de nombreux paramètres entrent en jeu et vont conditionner l'adhérence des particules sur le substrat et l'augmentation de l'épaisseur de revêtement. Il est donc important de maîtriser chacun de ces paramètres afin d'éviter toute surprise lors des essais de projection. La vitesse des particules est le principal paramètre à maîtriser, comme cela a été vu dans le paragraphe précédent. Elle peut être ajustée avec la température, la pression et la nature de gaz utilisé mais également avec la géométrie de la buse. La distance et l'angle de projection influent également sur l'adhérence des particules au substrat et entre elles, un angle de tir de 90° sera souvent préféré. Par ailleurs, les propriétés de la poudre (composition, granulométrie, morphologie, prétraitement, ...) et celles du substrat (nature, dureté, préparation de surface ...) jouent un rôle important.

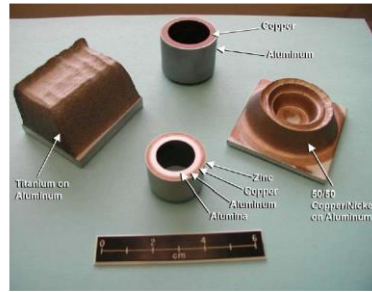
### Quels sont les matériaux projetables et sur quels substrats ?

La liste des matériaux déposables par Cold Spray est très grande et passe par des métaux (Al, Cu, Zn, Ni, Ta, Ti, Cr, Nb, Zr, Ag, Sn, ...), des alliages (cuivreux, MCrAlY's, Hastelloy, Inconel, Inox austénitiques, acier, ...), des composites (WC/Co, WC/NiCr, Al/SiC, Cu/W, Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ...) ou même des polymères (PA, PEEK).

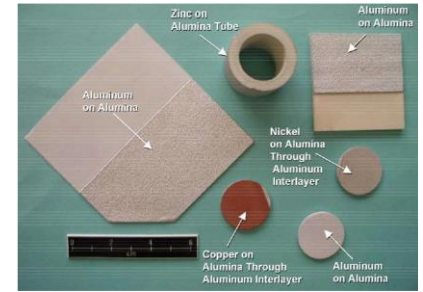
Les substrats utilisables sont également nombreux et bien différents les uns des autres, passant par des métaux (aciers, fontes, ...) et alliages, des polymères massifs et composites, certaines céramiques (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, ...) ou verres.



Dépôt de cuivre dense avec une épaisseur >5 mm et un rendement de projection >99%



Exemples de couples substrats/dépôts  
(Source: Key Tech)



### Avantages du Cold Spray

Le procédé de revêtement par Cold Spray possède de nombreux avantages de par son fonctionnement singulier, dont les principaux sont :

- Un faible échauffement du substrat (80 à 150°C): possibilité de réaliser des revêtements sur des matériaux thermosensibles sans modification de la structure des matériaux.
- Une largeur de jet ajustable: en fonction de la géométrie de la buse.
- Une large gamme d'épaisseur de revêtement pour certains matériaux: de quelques dizaines de micromètres à plusieurs dizaines de millimètres (possibilité d'utilisation du Cold Spray en fabrication additive).
- Une absence de fusion et d'oxydation des particules en vol: possibilité de déposer des matériaux sensibles à l'oxydation (Zr, Ti, Ta, Al).
- Des rendements de projection importants (>80% pour certains matériaux (Cu, Ti, Zr, inox, ...)) avec un taux de porosité souvent très faible (<1%).
- Une dureté du revêtement élevée: liée à l'écroûissage des particules.

### Applications du Cold Spray

Le Cold Spray est utilisé dans de nombreuses applications qui peuvent être divisées en trois catégories: les traitements de surface, la réparation de pièce et la fabrication additive.

Les **traitements de surface** concernent tout d'abord l'anti-corrosion qui consiste à déposer un revêtement sur un substrat afin de le protéger de la corrosion dans son environnement. Les poudres les plus fréquemment utilisées pour cette application sont les aluminiums et alliages, les aciers inoxydables, les nickels et alliages, le tantale ou zirconium. Des traitements de surface sont également utilisés pour métalliser des substrats diélectriques (composites, polymères, ...) dans le but de les rendre conducteur, ou pour métalliser des substrats conducteurs afin d'améliorer leur conduction. Dans ces deux cas les revêtements sont principalement du cuivre de quelques dixièmes d'épaisseur. Les revêtements de surface peuvent aussi être utilisés afin d'améliorer la conduction de la chaleur ou les échanges thermiques, dans ce cas du cuivre ou de l'aluminium est projeté entre 100µm et quelques millimètres. D'autres fonctionnalisations de surface peuvent être mises en œuvre comme des dépôts anti-usure avec des revêtements en carbure ou même des dépôts bactéricides par pulvérisation d'hydroxyapatite alliée à de l'argent ou des laitons. De plus, des post-traitements peuvent être menés afin de rectifier chimiquement la couche déposée. Par ailleurs, des dépôts de brasure et la création d'interface brasable peuvent être réalisés pour l'élaboration d'assemblage céramique/métal.

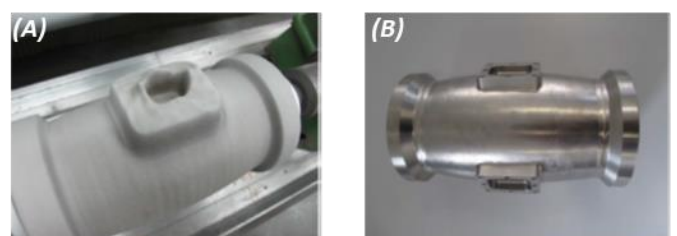
Le Cold Spray peut également être utilisé dans le cadre de **réparation de pièce**. En effet, le procédé de projection a l'intérêt de proposer peu d'échauffement et de déformation au niveau de la pièce. Il est également possible d'effectuer des réparations importantes, jusqu'à plusieurs kilogrammes. De plus, les propriétés mécaniques au niveau des zones réparées sont comparables à celles du métal de base. La réparation de pièce par Cold Spray permet de remettre des pièces dans l'état d'origine d'un point de vue dimensionnel et géométrique. Cette réparation permet également d'améliorer la durée de vie des pièces en service ou même de permettre l'ajout de fonctionnalité (bride, fixation, tenon, raidisseur, ...). Les pièces réparées peuvent subir un traitement thermique si nécessaire et être réusinées.



Dépôt de carbures pour une application anti-usure (source: ICAR-CM2T)

Pour finir, la **fabrication additive** est la nouvelle application qui se démocratise avec l'utilisation du Cold Spray. Son emploi permet l'élaboration de dépôt très épais (plusieurs centimètres) ou même la possibilité d'assembler différents matériaux entre eux, avec une projection très précise et localisée de la poudre. Les grands intérêts de l'utilisation du Cold Spray par rapport à notamment la fusion sélective par laser sont la productivité (quelques kilogrammes par heure) et l'obtention de propriétés mécaniques des dépôts intéressantes et sensiblement similaires à celles du matériau élaboré de manière conventionnelle après traitement thermique. Cependant cette technologie se heurte encore à certaines limitations, comme l'élaboration de formes complexes et la nécessité de reprise des pièces.

L'utilisation du Cold Spray pour la fabrication additive implique une optimisation accrue des poudres (dureté, morphologie, microstructure, ...), l'utilisation de nouvelles buses spécifiques.



Fabrication additive par Cold Spray (A) d'une préforme brute en titane et (B) pièce finie après traitement thermique (source: Impact innovation)



Robot KUKA avec pistolet de projection Impact 5/11 et les vireurs et positionneurs dans la cabine de projection

### Installation Cold Spray

L'équipement Cold Spray, auquel ICAR-CM2T a accès, est un système haute pression Impact 5/11 (Impact Innovations GmbH) qui permet de travailler à une température maximale de 1100°C et une pression de 50 bars. L'installation est également associée à un panneau de contrôle qui permet de gérer les paramètres de tir.

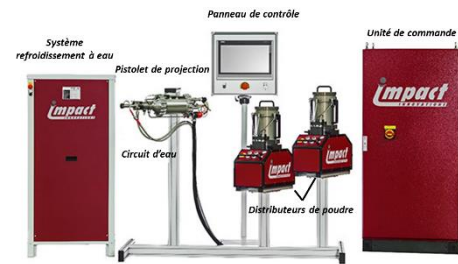
Le système Cold Spray est monté sur un robot KUKA KR 60-2 JET qui est installé sur un portique et possède 6 axes lui permettant de grands déplacements et la possibilité de revêtir des pièces de grandes dimensions. Deux vireurs et un positionneur double axes peuvent également être utilisés, afin de revêtir des pièces de révolution.

### Le savoir faire ICAR-CM2T en Cold Spray

ICAR-CM2T est fort d'une expérience de projection de nombreuses poudres métalliques et composites, acquise depuis 2003 :

- Ti et Ta6V dense et poreux
- Bases nickel et cobalt (Thèse de F. Raletz): Inco 625 et 718, MCRAIY
- Cu et bronzes
- ZnAl (brasures et anti corrosion, blindages EMI)
- Base Al (série 2000, 6000 et 7000)
- Composites (Al/SiC, Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, WC/FeNiCr, WC/Ti, Al/CNT, WC/Co, WC/NiCr, ...)
- Inox (ferritiques et austénitiques (304, 316L))
- Zn, Sn, Ag, Ta, Zr
- Kovar, Invar 36 ...

Installation Cold Spray Impact 5/11 (source: Impact Innovations) →



← Pistolet de projection Impact 5/11 refroidit par eau (source: Impact Innovations)

L'expérience autour de ces différentes poudres a été acquise au cours de différents projets de R&D et de ressourcements, dont le projet **Bebest** qui concerne le revêtement métallique de polymères, verre et CFRP (polymères renforcés de fibres de carbone), revêtements de polymères sur métal, fabrication additive et hybridation de procédés; le projet **Clean Sky CO3** qui concerne la métallisation de polymères thermoplastiques et thermodurcissables et CFRP pour des applications aéronautiques (antifoudre, conduction électrique) ou encore le projet **Costhedi** qui concerne l'hybridation Cold Spray et nitruration pour former des couches TiAlN et des revêtements riches en phases MAX. D'autres projets ont également employé le Cold Spray, comme par exemple **Soprosyde** (hybridation Cold Spray et traitement MAO), **Zircospray**, **Protector**, **Promapal** ou **Nicolhass** (dépôt de brasures par Cold Spray).

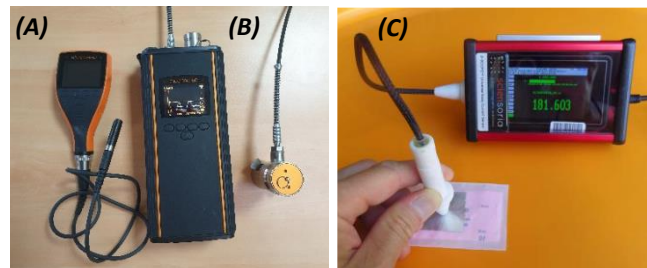
ICAR-CM2T a également valorisé le Cold Spray au travers de collaborations industrielles dans différents domaines d'application: des conceptions électriques et thermiques (Busbars and contacts), l'automobile (revêtement de cylindres moteur, anti corrosion), l'aéronautique (réparation de pièces en alliage d'aluminium et magnésium, réparation d'aubes de turbines et blindage EMI), l'anti-corrosion (milieux aqueux et haute température: incinération), chimie et pharmacie, et tribologie (anti-usure et frottement).

### Contrôles et caractérisations des revêtements

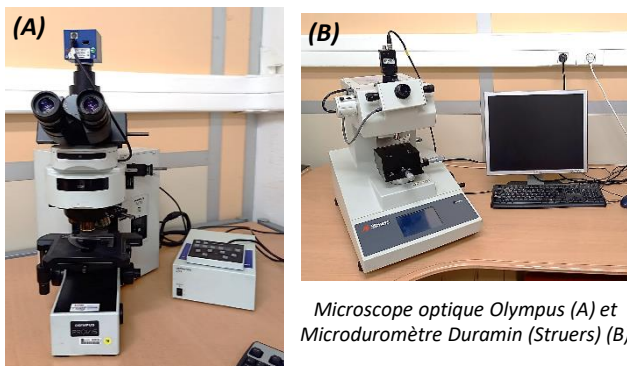
Une fois que le revêtement a été effectué par Cold Spray, il est important de vérifier la qualité du dépôt et son épaisseur ainsi que l'intégrité de l'interface. Pour ce faire, différentes méthodes de caractérisation sont disponibles chez ICAR-CM2T.

Le niveau d'adhérence entre le revêtement et le substrat est mesuré par un dispositif de traction portatif Elcometer 510. Il permet de déterminer la charge de rupture du revêtement après collage d'un pion à sa surface. Plus la charge de rupture est importante, plus le revêtement adhère au substrat.

Dans le cadre d'un traitement pour métalliser une surface et la rendre conductrice, il est important d'apprécier la conduction électrique du revêtement. Elle est alors mesurée par un dispositif de Sciensoxia qui utilise les courants de Foucault.



Dispositifs portatifs de mesure de l'épaisseur (A), d'adhérence (B) et de conduction électrique (C) des dépôts.



Microscope optique Olympus (A) et Microduremètre Duramin (Struers) (B)

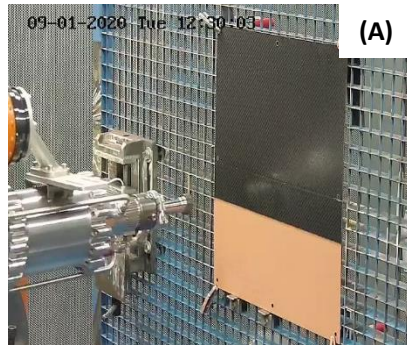
Les épaisseurs de revêtement peuvent être quant à elles mesurées par une jauge d'épaisseur de revêtement Elcometer 456. Cet appareil utilise le principe de l'induction électromagnétique pour les revêtements non magnétiques et la méthode par courant de Foucault pour les revêtements non conducteurs appliqués sur des supports métalliques non ferreux. Les mesures d'épaisseur peuvent également être mesurées de façon plus précise par observation au microscope optique (Olympus) après une étape de polissage d'une coupe du couple revêtement/substrat. L'observation au microscope permet également d'apprécier la qualité du revêtement d'un point de vue microstructural et l'absence de porosité.

Le dernier aspect de caractérisation concerne des mesures mécaniques, et notamment de microdureté par indentation Vickers qui peuvent être menées sur les revêtements ou même au niveau des interfaces afin d'apprécier la ténacité.

Exemples de réalisation ICAR-CM2T

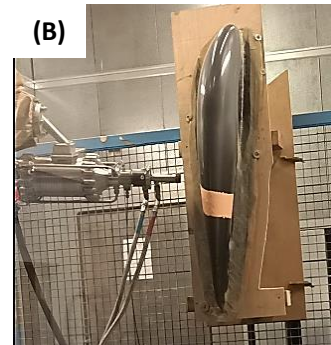


Revêtement interne Al2024+Cu pur sur tube inox diamètre 95 mm

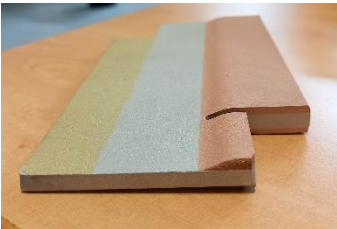


(A)

Dépôt de cuivre pur sur une plaque CFRP Carbone/époxy (600x600mm) (A) et sur un démonstrateur en CFRP Carbone/époxy (B) (Projet Clean Sky CO3 [1])



(B)



← Revêtements épais de laiton et cuivre sur un substrat aluminium

Revêtement épais de cuivre sur un substrat acier →



← Buse pour réalisation de murs verticaux

[1] Delloro, F., Chebbi, A., Perrin, H., Ezo'o, G., Bastien, A., Ascani, J., & Tazibt, A. (2021, June). Cold Spray of Metallic Coatings on Polymer Based Composites for the Lightning Strike Protection of Airplane Structures. In ITSC2021 (pp. 87-95). ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2021p0087>

Si des études de faisabilité ou de dépôt Cold Spray vous intéressent ou si vous voulez en savoir plus... CONTACTEZ-NOUS...

**Bibliographie :**

Cette sélection de publications est issue de la Veille Technologique exercée par le Service Documentation de la SFC (Société Française de Céramique). Pour plus d'information sur ces produits documentaires de Veille Scientifique, Technique ou Concurrentielle : bulletin de Veille Mensuel, Veilles spécifiques ciblées, accès à la base de données de Veille "CeramBase", contacter la SFC à l'adresse : [soc.fr.ceram@ceramique.fr](mailto:soc.fr.ceram@ceramique.fr)

• KIMURA T., ISHIHARA S., NISHIDA K, et AL.

**Influence de plaques acier sur les réfractaires dans des fours rotatifs à ciment (The influence of steel plates on refractory in cement rotary kilns)** Journal of the Technical Association of Refractories, Japan, Vol. 41, n°02, 06/21, pp. 64-69, 10 fig., 4 tab., bibliographie (3 réf.), ANG.

Les déchets de mauvaises qualités qui alimentent les fours rotatifs peuvent être variés et introduits en grande quantité. La charge subie par les briques réfractaires est ainsi importante, provoquant des dommages considérables. Cet article présente le cas d'un four dont la durée de vie est affectée par des plaques d'acier placées à certains joints. Le cas d'un four dont la durée de vie est améliorée par l'usage de mortier est présenté en comparaison.

Mots clé : FOUR ROTATIF. CIMENT. MORTIER. PLAQUES METALLIQUES. DUREE DE VIE – ROTARY KILN. CEMENT. MORTAR. METALLIC PLATES. SERVICE LIFE.



**Prévisionnel des formations à venir**

- Le 5 octobre 2021 à Moncel-les-Lunéville : (STR4) Calcul thermique – (7h)
- Du 2 au 4 novembre 2021 à la SFC (Les Ulis) pour le CTIF : Produits réfractaires dans l'industrie (17h)

- Du 22 au 26 novembre 2021 à Moncel-les-Lunéville : (STR3) Tenue en service et traitement des réfractaires usagés – 1<sup>ère</sup> part 18h, 2<sup>nde</sup> part 14h
- Du 23 au 25 mars 2022 à Moncel-les-Lunéville : (STR1) Généralités sur les Réfractaires – (18h)

Et toujours la possibilité de réaliser des stages intra-entreprises tout au long de l'année sur tous les matériaux métalliques et matériaux réfractaires... Vous souhaitez avoir de plus amples informations... CONTACTEZ-NOUS...

Les formations ICAR-CM2T sont référencées au Datadock sous le numéro 0024865, ce qui vous garantit leur prise en charge financière par les organisations paritaires.

