

Approche artistique de la **projection thermique**

M. Jeandin, F. Borit, N. Fabrègue, G. Rolland, F. Delloro, MINES ParisTech, Centre des Matériaux/C2P (Competence Center for spray Processing)

Si « l'art est partout » comme le dit Ben, l'artiste niçois, il est des domaines où il est, quand même, plus présent. Celui de la projection thermique est l'un d'entre eux comme s'efforce de le montrer cet article.

« L'art est partout » y compris en projection thermique donc où il tient une place de choix puisque toutes ses facettes y sont représentées. On les reprendra dans l'ordre du classement le plus récent, reconnue, des différents arts, sur la base de ce que proposait Hegel au 19^e siècle [1] : l'architecture (1^{er} art), la sculpture (2^e art), la peinture et le dessin (3^e art), la musique (4^e art), la littérature (5^e art), les arts de la scène (6^e art), le cinéma (7^e art), la photographie (8^e art), la bande dessinée (9^e art), et les arts de la mode que l'on privilégiera dans la liste de ceux pouvant prétendre au titre de 10^e art non encore décerné. Si la projection thermique n'est pas (encore) considérée comme un art à part entière, elle en présente, par certains côtés, les caractéristiques. Salvador Dali ne voulait-il pas l'exprimer quand il utilisa la projection (au fusil), pour recouvrir de clous la couverture de « L'Apocalypse de Saint Jean » dans son édition unique (dans tous les sens du terme) de 1959 [2] ? Ne serait-ce que pour cela, il serait bon de considérer Dali comme un pionnier, au même titre (ou presque) donc que M.U. Shoop [3] et A. Papyrin [4], reconnus comme les inventeurs respectifs de la projection thermique à chaud et de la projection thermique à froid. Dans les 3 cas, la projection thermique fut le fruit de la sérendipité (ou plutôt fortuité pour utiliser un néologisme plus français que l'anglicisme « sérendipité »), à la suite de l'observation d'impacts de projectiles sur un substrat.

Le contexte en fut, à chaque fois, un événement destructeur : la guerre de 14 pour M.U. Shoop, la guerre froide (la bien-nommée) pour A. Papyrin, et l'Apocalypse pour Dali. Les nombreux exemples réunis dans cet article doivent permettre de se rendre compte que la projection thermique peut jouer un rôle significatif dans le rapprochement entre arts et science. Ce rapprochement dans le domaine des matériaux est manifeste comme plusieurs manifestations l'ont souligné : par exemple, en France la conférence SMT 18 (« Surface Modification Technologies » à Paris en 2000, première conférence sur les matériaux intégrant une session « Arts » [5] jusqu'à l'exposition récente « E=mc215. Dialogues entre science et art » au musée des arts et métiers /Paris, en janvier-avril 2015 [6].

Projection thermique et architecture (1^{er} art)

Construire un dépôt grâce à l'empilement des briques élémentaires que sont les particules

projetées, est le principe de base de la projection thermique. La projection participe donc, par essence même, de l'architecture, placée en tête des arts : la tête de l'art en quelque sorte. La construction d'un dépôt par projection peut, souvent, sembler tout aussi extraordinaire et source de questions que la maçonnerie à pierres sèches (ou essuytes), autrement dit « La pierre sèche » utilisant ni liant ni mortier. On peut se demander, à juste titre, par quel mystère tout cela peut tenir. On parlera de « soudage à froid » pour un dépôt projeté par cold spray (N.B. Dans tout l'article, on utilisera cette forme ramassée et anglicisée pour désigner la projection dynamique par gaz froid) par exemple et on fera référence au génie romain pour le mur d'Hadrien, chef-d'œuvre exemplaire de la pierre sèche [7], si l'on ne veut pas s'embarrasser d'explications, difficiles à trouver d'ailleurs. Pour expliquer ces miracles de construction, il faut se référer au processus d'empilement : des particules projetées dans le cas du cold spray et des pierres sèches dans le cas du mur d'Hadrien. Si pour Hadrien, ce processus relève du savoir-faire, de la tradition et

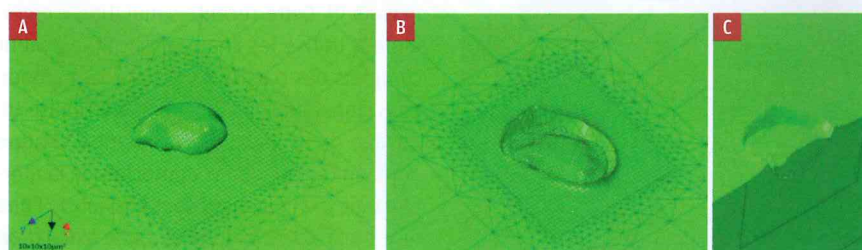


FIGURE 1 : Simulation 2D par éléments finis du dépôt par cold spray d'une particule irrégulière de tantale sur du cuivre, a) Vue de dessus juste avant impact, b) et c) en fin d'impact ((c) en coupe).

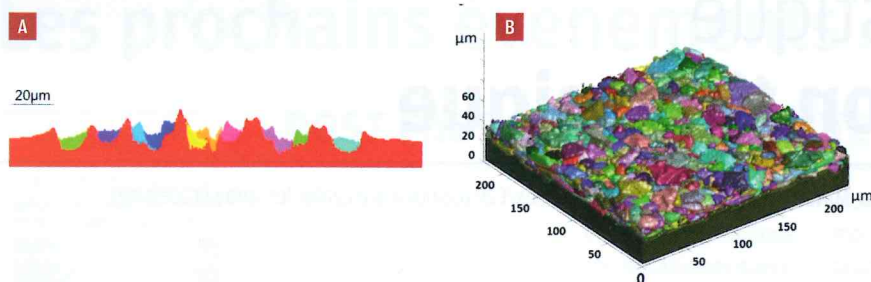


FIGURE 2 : Simulation d'empilement de particules projetées, utilisant, a) une approche discrète en 2D et b) une approche phénoménologique en 3D [11].

de l'empirisme, pour ce qui est du cold spray, il se trouve (en grande partie) élucidé par la simulation numérique.

Les développements les plus récents en simulation numérique d'empilement appliquée au cold spray, reposent sur la combinaison de la simulation par éléments finis de l'impact des particules et de la modélisation morphologique de leur empilement. Le principe est d'injecter, dans la modélisation morphologique de l'empilement des particules, l'état de déformation de chacune des particules issu du calcul par éléments finis.

L'analyse par éléments finis la plus en pointe s'applique à des particules irrégulières, en trois dimensions, utilisant le code Abaqus dans l'exemple de la figure 1 [8] : les simulations les plus classiques ne s'appliquant qu'en 2D et/ou à des particules sphériques.

La simulation de l'empilement est ensuite possible. Elle s'effectue de manière itérative, les particules étant déposées l'une après l'autre, en un nombre pouvant être illimité, chacune utilisant les résultats de la simulation par éléments finis exposée ci-dessus, pour y inclure donc des bases physiques. Celles-ci étaient, jusque-là, absentes de modèle morphologiques, pourtant déjà bien évolués et/ou purement statistiques comme ceux de gaz-sur-réseau déjà employés en projection plasma [9]. Cette récente simulation d'empilement utilise les champs de déplacement complets des particules grâce à la méthode de triangulation de Delaunay qui réalise un pavage de l'espace en assignant à chaque point un triangle. Deux approches de la morphologie d'empilement sont possibles : l'une discrète, l'autre vectorielle. Cette simulation d'empilement, en développement à l'heure actuelle, doit aboutir prochainement à la simulation globale d'un dépôt par cold spray [10]. Les résultats actuels se limitent, cependant,

à une représentation 2D perfectible mais déjà encourageante (figure 2a). Les bases calculatoires pour l'amélioration de la modélisation ont, cependant, été jetées et les travaux sont en cours dans la perspective de résultats 3D comparables, dans leur présentation, à ceux déjà produits par des modèles phénoménologiques, certes évolués mais dénués de bases physiques solides (figure 2b).

Projection thermique et sculpture (2^e art)

Si autrefois, la connaissance de l'architecture bénéficiait à la sculpture, en la personne d'artistes, qualifiés de totaux, comme Le Bernin, Pisano, Raphaël ou Brunelleschi qui excellaient dans les 2 arts, aujourd'hui, il n'en est pas de même. La projection thermique devrait permettre, cependant, de renouer avec cette tradition, étant donné que la connaissance de la construction des dépôts aide considérablement à la capacité de réalisation de pièces directement construites par projection thermique. La fabrication additive par projection thermique s'en trouve ainsi apparentée à de l'art. Elle le sera d'autant plus que les pièces en question constitueront des œuvres de création.

Après le plasma-formage, développé depuis des lustres pour la production de pièces autoportantes par projection plasma [12], le cold spray commence de poindre le bout de sa buse pour devenir l'un des procédés de fabrication additive d'avenir, dans le sillage, au moins rhétoriquement parlant, de la fabrication additive par laser [13]. Les premiers résultats diffusés par General Electric (figure 3) semblent l'annoncer [14]. Ils montrent le chemin parcouru depuis les travaux pionniers de J. Pattison *et al.* en 2007 [15], mais aussi tout celui restant à effectuer. Aucun résultat de recherche sur les propriétés des matériaux obtenus et/ou sur la capacité à prédire les géométries réalisables en fonction des conditions de projection à ce jour, n'a été, en effet, jusqu'alors publié. Ceux relatifs à la construction du dépôt constituent, cependant, une bonne base de développement dans le domaine.

Projection thermique et peinture/dessin (3^e art)

L'artiste total, dans l'acception qui en est donnée classiquement et dont d'illustres exemples ont déjà été cités plus haut, ajoute à ses talents d'architecte et de sculpteur, celui de peintre. La projection thermique peut l'y accompagner grâce à certaines applications récentes qui en

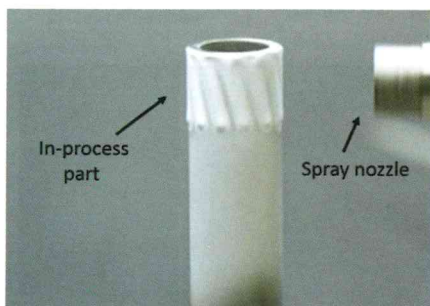


FIGURE 3 : Fabrication additive, par cold spray, d'un pignon hélicoïdal (diamètre extérieur d'environ 3,5cm), d'après [14].

exploitent sa souplesse d'utilisation. Il en est ainsi du dépôt sur verre pour la réalisation de graphismes comme un vitrailiste pourrait les réaliser par méthode traditionnelle.

La difficulté dans le dépôt sur substrat verre tient, bien sûr, en la fragilité du verre qui traduit sa faible résistance aux chocs mécanique et thermique. La maîtrise des conditions de projection, permet, cependant, de déposer du métal sur du verre courant. Au début de son développement, la projection se cantonnait à des cordons rectilignes et homogènes pour son application à la conduction de courant à la surface de verre : pour cellules photovoltaïques ou vitrages chauffants, notamment [16, 17]. Aujourd'hui, la projection sur verre peut s'apparenter à un travail d'artisan par sa capacité à réaliser des ombrages et des dessins. Le projeteur se pose ainsi en pochoiriste ou vitrailiste, d'autant plus qu'il peut déposer non seulement du métal mais aussi du verre de différentes couleurs. Pour la réalisation d'un vitrail, l'intérêt de la projection thermique, par rapport aux méthodes traditionnelles, est d'éviter l'emploi de baguettes de plomb, de rubans de cuivre ou de résines pour assurer la liaison entre les différentes pièces de verre le constituant.

L'obtention de logos comme celui du Matériaupôle Seine-Amont (www.materiaupole.org) a été possible par exemple, grâce au dépôt par projection plasma d'aluminium sur verre « float » classique (figure 4).

La projection a été effectuée avec masquage, le masque ayant été conçu pour assurer volontairement un estompage des contours du dessin pour en améliorer l'esthétique (figure 4a). L'adhérence, la microstructure et les propriétés du dépôt sont largement satisfaisantes pour l'utilisation envisagée (fonction d'enseigne) (figure 4b).

Le dépôt de verre par projection plasma de verres colorés est en cours de développement. Les études portent sur la détermination de conditions de projection évitant la dépigmentation du verre. On a recours, en particulier, à des gaz plasmagènes évitant la réduction des pigments colorés contenus dans la poudre de projection initiale. On évite ainsi l'emploi d'hydrogène, au profit d'argon et/ou hélium dans le mélange plasmagène employé, selon le type de poudre retenu. Les conditions opératoires sont décrites dans un article en cours de préparation. On peut faire varier la rugosité (et, au deuxième ordre, la couleur ainsi que la translucidité) du dépôt par simple recuit au

four après projection (figure 5).

Le dépôt sur verre est concevable aussi dans le domaine de l'art et du design pour la décoration, le marquage et/ou l'emballage. Le cuivrage et la céramisation (alumine) de flacons de parfum ont pu être ainsi réalisés et présentés, sur place, à Tricoat IV-Finishair/ Besançon.

Projection thermique, musique et arts de la scène (4^e et 6^e arts)

« Qui dit verre dit bois », selon la devise des limonadiers, il est donc normal que le 3^e art, illustré par la projection sur verre, voie les arts qui lui succèdent être illustrés par la projection sur bois. Quand on pratique les arts de la scène (6^e art), au théâtre par exemple, on souhaite, en effet, brûler les planches (en bois, bien évidemment). À l'inverse, le projeteur devra éviter de le faire, quand il voudra revêtir du bois, par exemple, pour faire varier l'acoustique d'instruments de musique (4^e art), des bois en l'occurrence, pour explorer de nouvelles sonorités, à l'instar de la guitare « Dobro », immortalisée par Taj Mahal ou Ry Cooder *et al.* La métallisation ou la céramisation d'un violon ne sont plus considérés par les luthiers comme des actes hérétiques. On évitera, cependant, celle de stradivarius.

La lutherie s'ouvre donc aux techniques de projection, au même titre que l'ébénisterie. Cette dernière devrait y voir un moyen de fonctionnaliser et/ou d'esthétiser le bois. Pour peu que l'on adapte les conditions de projection à sa nature, un bois peut être revêtu de céramique comme de métal. Cette application est très innovante, même si le matériau substrat n'est pas très « high tech », sauf à l'écrire avec un k comme dans le cas de bois du même nom (teck). De récents essais ont montré la possibilité de dépôts d'épaisseur maîtrisée, tant continus que discontinus (mouchetage), de cuivre, d'aluminium, et d'alumine, en particulier (figure 6). Les études ont porté sur la projection plasma sur bois aussi divers que l'olivier, le poirier ou l'ébène, sans préparation de surface préalable, de type sablage par exemple. Le mécanisme d'adhérence (adhésion) du dépôt est celui d'ancrage mécanique. Les particules projetées, à l'état de gouttelettes, pénètrent dans le bois, pour se solidifier en s'y enchâssant et entourant les fibres qui le composent (figure 6b). Les conditions de projection doivent avoir été déterminées telles que l'échauffement dû au dépôt de matière chaude, ne brûle pas le bois de manière domageable. Deux paramètres sont essentiels :

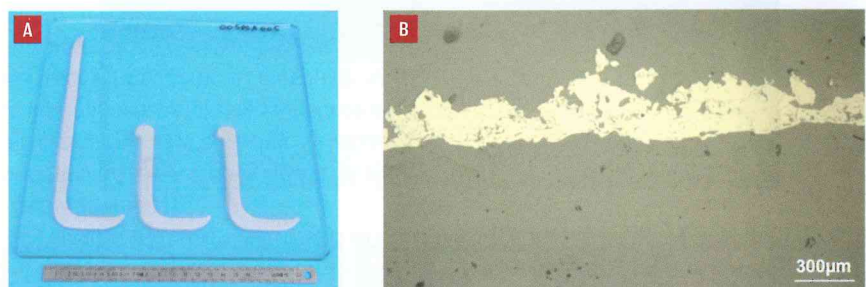


FIGURE 4 : Dessin par projection plasma d'Al sur verre, a) Logo du Matériaupôle, b) Image optique d'une coupe métallographique du dépôt (couche claire entre le substrat de verre « float » et la résine d'enrobage).

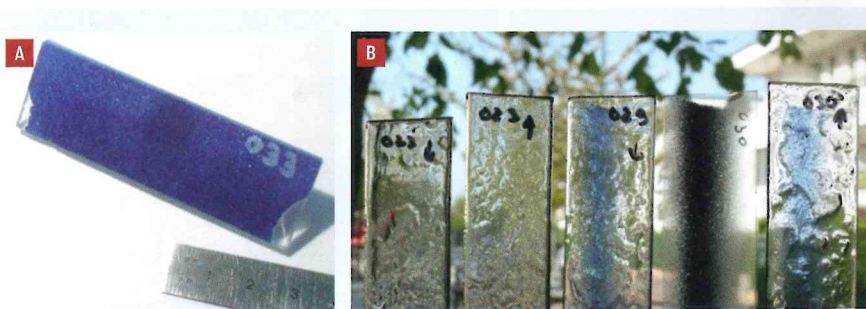


FIGURE 5 : Dépôt de verre sur verre (de type « float »), a) Bleu brut de projection plasma, b) Orange pâle, jaune, bleu, noir et bleu (respectivement de gauche à droite de la photo) après recuit.

d'une part, le degré d'humidité du bois, d'autre part, la dureté du bois selon qu'il aura crû lentement (bois d'hiver) ou rapidement (bois d'été) [18]. Ces deux paramètres ne sont, d'ailleurs, pas indépendants. Un bois susceptible de désorber beaucoup d'eau ou d'huile (cas de

bois huileux comme l'ébène), pourra nécessiter un prétraitement par chauffage avant dépôt pour faciliter l'adhérence.

La croissance lente donne un bois peu poreux aux fibres très rapprochées donc dur, tandis que la croissance rapide multiplie les pores et diminue la dureté du bois. Cette variation

de croissance selon les saisons notamment conduit aux veines respectivement sombres et claires du bois (figure 6a). Leur différence de dureté (respectivement 17HV20 environ en veine sombre et largement moins de (car mesure hors échelle) 8HV20 en veine claire, mesurés expérimentalement, en Vickers, à défaut d'avoir pu appliquer la dureté Monnin) conduit à un accrochage différent des particules projetées à la surface du bois. On trouve en cela un moyen, par projection, de souligner le veinage du bois (figure 6a). Différents effets peuvent être obtenus en fonction de l'épaisseur déposée et la nature du revêtement. Cette esthétisation de surface peut être exploitée en ébénisterie de luxe ou par les artistes travaillant le bois. Outre le veinage, elle intéresse aussi l'ondage de ce même bois, en en modifiant le rendu superficiel. Un bois moyennement dur comme le poirier et ondulé pourra bénéficier avec bonheur d'un traitement par projection plasma (figure 7).

L'ondage est un défaut de structure ou contre-fil du bois, rare et dont l'origine est mal établie bien que, probablement, génétique. Il se traduit par une ondulation révélée par effet d'incidence de la lumière par rapport à l'orientation des fibres (figures 7 et 8) : cette dernière, par définition même de l'ondage, n'étant pas constante. Esthétiser l'ondage du bois par projection thermique, revient à en accentuer le relief grâce au revêtement. Ce relief, suivant le profil de l'onde (ondage) a pu être mis en évidence par profilométrie 3D (figure 8).

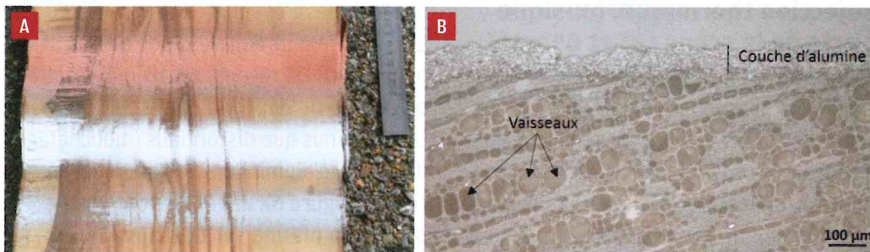


FIGURE 6 : Images optiques d'olivier, a) Vue de dessus de cordons de dépôt plasma (de bas en haut) d'aluminium, d'alumine et de cuivre, b) Coupe métallographique du dépôt d'alumine, dans sa partie la plus épaisse, parallèlement au veinage du bois.

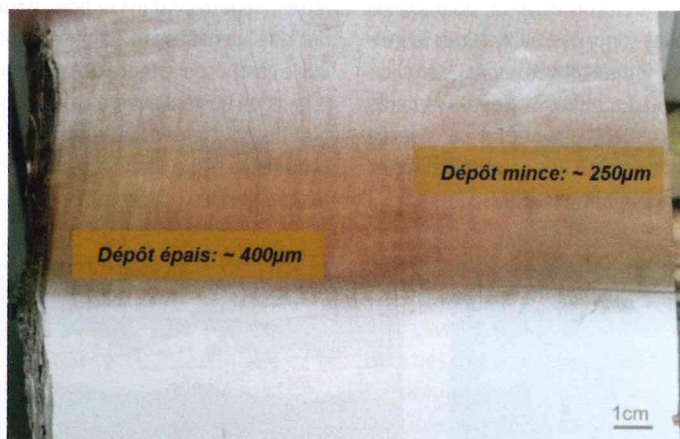


FIGURE 7 : Vue de dessus d'une planche de poirier ondulé revêtu d'alumine par projection plasma. Dépôts de 250µm (partie haute de la photo) et de 400µm (partie basse) d'épaisseur.

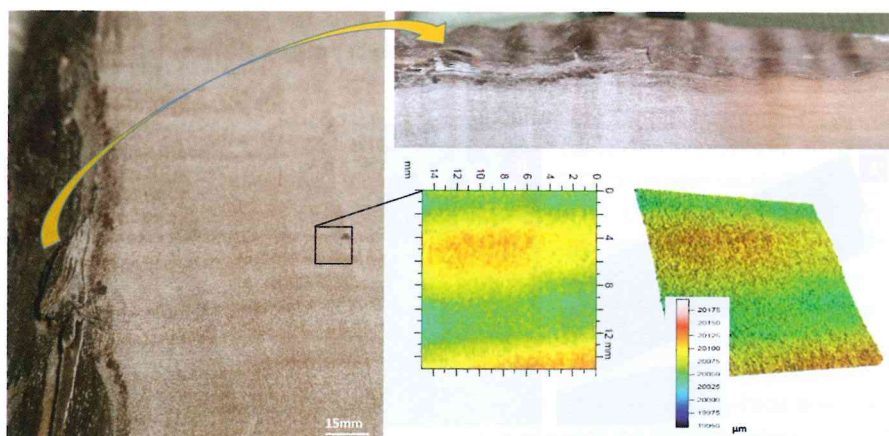


FIGURE 8 : Vues optiques (selon 2 orientations) d'une planche de poirier ondulé, revêtu d'une mince couche d'alumine projetée par plasma et images (brute et redressée) topographiques 3D superficielles correspondantes.

Projection thermique et cinéma (7^e art)

La poudre de départ, en projection thermique, comme on peut s'en douter, joue donc un rôle majeur et même le premier quand il s'agit de cold spray. La relation avec le cinéma est donc facile puisque le 7^e art et la poudre ont, aussi, en commun des questions de distribution : un peu trop facile pourrait s'entendre dire l'auteur de cet article. Elle est pourtant moins facile, quand même, que s'il s'était contenté de dire que le cinéma était l'art de la projection. Si une reprise (pour ne pas dire « remake ») de « The Artist » (en français dans le texte) venait, d'ailleurs, à être réalisée, nul doute que la poudre en serait la vedette et ce, d'autant plus que le film est muet et que, comme chacun sait, il ne faut jamais faire parler la poudre. On peut même pousser l'analogie plus loin. Le film raconte l'histoire d'une vedette du muet qui refuse d'évoluer et n'accepte pas le cinéma parlant.

On pourrait en dire autant des poudres à projeter en cold spray. Jusqu'alors, ou presque, on a utilisé pour le cold spray des poudres de projection thermique classiques : plasma ou « flamme rapide », au mieux dans une granulométrie plus fine. Il est temps, aujourd'hui de penser à évoluer, comme Dujardin/Valentin s'y résout dans le film, en développant des poudres adaptées au procédé : à condition, toutefois, d'en connaître les caractéristiques souhaitables.

Caractéristiques morphologiques de poudre

Des développements parmi les plus à la pointe, portent sur l'étude morphologique des particules constituant le lot de poudre de projection. On sait, en effet, que la morphologie régit, pour une grande partie, la déformation de la particule et les mécanismes d'adhésion au substrat en résultant. Des résultats récents montrent la possibilité d'une classification complète des morphologies de particules constituant le lot de poudre utilisé. Une fois cette classification établie, l'injection de la morphologie dans des modèles de dépôt permet d'accéder à une simulation générale du dépôt. Un outil puissant pour accéder à une description des particules de la poudre de projection, est la microtomographie X. Plusieurs dizaines de milliers de particules peuvent être visualisées ainsi et leur image numérisée en 3 dimensions. La constitution d'une bibliothèque de particules peut en résulter grâce à l'emploi de procédures algorithmiques comme celles développées dans SMIL « Simple Morphological Image Libraries » [8,10] pour le traitement des images et la séparation des agrégats. La classification au sein de la bibliothèque fait appel à la prise en compte d'un ensemble de paramètres morphologiques quantifiant la forme de tous les objets (particules) : le volume, la surface, le rapport surface/volume, le rayon moyen, le rayon équivalent, la sphéricité, l'imbrication, les moments d'inertie principaux, et les dimensions de boîte englobante. Ces deux derniers paramètres sont issus du tenseur d'inertie, I, faisant intervenir masse et coordonnées des points et des axes principaux d'inertie en résultant. Les axes d'inertie, λ_1 et λ_2 , permettent la représentation des moments d'inertie qui placent chaque objet dans leur espace en fonction de leur forme (figure 9).

$$I = \begin{pmatrix} \sum_i m_i (y_i^2 + z_i^2) & -\sum_i m_i x_i y_i & -\sum_i m_i x_i z_i \\ -\sum_i m_i x_i y_i & \sum_i m_i (x_i^2 + z_i^2) & -\sum_i m_i (x_i^2 + z_i^2) \\ -\sum_i m_i x_i z_i & -\sum_i m_i y_i z_i & \sum_i m_i (x_i^2 + y_i^2) \end{pmatrix} \text{ eq.1}$$

Le tri des particules s'effectue, ensuite, par corrélation entre les mesures et analyse des composantes principales. Le partitionnement des données (« Cluster analysis »), par exemple par la méthode dite des K-means conduit, dans une dernière étape, à la classification des particules de poudre. L'exemple d'un lot de poudre de tantale est donné en figure 10.

Les images tomographiques des particules types de chacune des classes (au nombre de sept dans l'exemple de la poudre de tantale donné) (figure 10b) peuvent être injectées en entrée de simulation numérique d'un dépôt.

Caractéristiques métallurgiques de poudre

En plus de ses caractéristiques morphologiques, la poudre doit être connue pour ses caractéristiques métallurgiques. C'est encore en cold spray que cette connaissance importe le plus, vu son influence sur la microstructure du revêtement projeté final. Celle-ci en présente, en effet, une forte hérédité puisque la particule reste à l'état solide (sauf, éventuellement, seulement localement) pendant tout le procédé. La prise en compte encore peu répandue aujourd'hui malheureusement, de critères métallurgiques doit donc intervenir dans le choix de la poudre avant projection. Cette question est détaillée, par l'auteur, dans un récent article [11]. On se contentera, ici, de donner une illustration de l'influence de la microstructure de la particule sur sa transformation à l'impact, par cold spray, sur le substrat (figure 11).

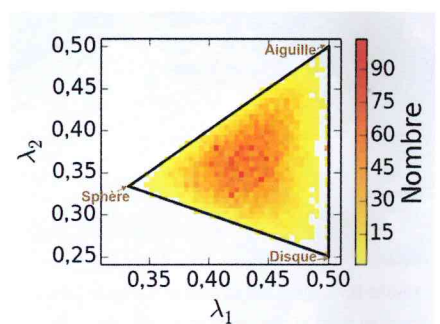


FIGURE 9 : Forme des objets dans leur bibliothèque selon leurs moments d'inertie principaux (λ_1, λ_2).

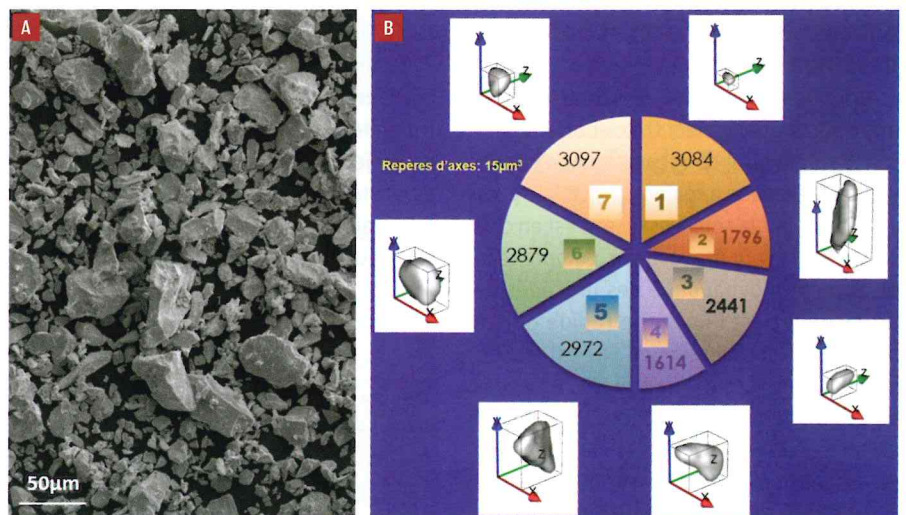


FIGURE 10 : Classification des particules d'un lot de poudre de tantale, a) Image MEB du lot de poudre, b) Répartition en 7 classes (nombre des particules dans chacun des 7 secteurs et images tomographiques des particules types correspondantes).

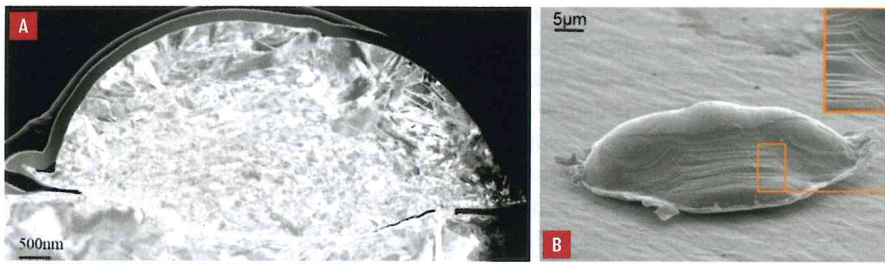


FIGURE 11 : Images d'une particule de Ti projetée par cold spray et écrasée sur son substrat de TA6V, a) Image MET d'une lame mince en coupe à l'interface, b) Image MEB « Dark Vador ».

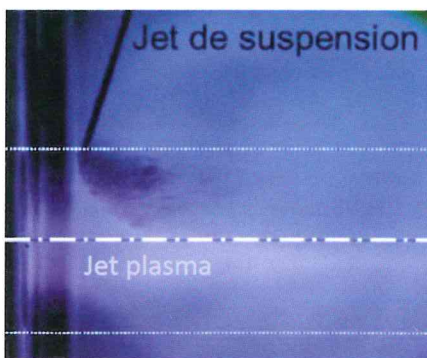


FIGURE 12 : Observation par caméra rapide de l'insertion d'une suspension liquide dans un jet plasma, dans le procédé SPS, d'après [19].

La microstructure de la particule peut être soumise aux phénomènes suivants : recristallisation dynamique, maclage, restauration, jet de matière (voire amorphisation pour certains matériaux comme l'aluminium) (figure 11a), et glissement de plans cristallographiques (visibles à la surface de la particule écrasée (« splat »), (figure 11b).

Projection thermique, photographie (8^e art) et bande dessinée (9^e art)

La prise de vues comme celles de la figure 11 que d'aucuns pourraient trouver artistiques, constitue un outil de recherche que la projection thermique a toujours privilégié pour en développer la connaissance. C'est en cela que le 8^e art peut être évoqué. Compte tenu du caractère dynamique des procédés de projection, c'est l'imagerie rapide qui en constitue le socle essentiel. Elle est au service des plus récents progrès des procédés de la famille de la projection. On pourrait en privilégier deux exemples : la projection de suspension [19] dont l'essor ne saurait se démentir et la projection à froid par choc laser dont les premières bases ont été jetées en 2010 [20]. La première permet d'illustrer l'intérêt de l'observation in situ par caméra

rapide d'un procédé de projection. Ce type d'observation a fortement contribué à la mise au point des procédés, plasma en particulier. En projection de suspension (« Suspension Plasma Spray »), l'évolution de l'injection de la suspension de poudre dans la torche plasma peut ainsi être suivie en continu et optimisée par là même (figure 12).

Le second exemple, celui de la projection par choc laser (« Cold LASER Shock Spray » (CLASS) souligne le rôle de l'ombroscopie pour la visualisation de la projection de particules créées par écaillage de matière quand elle est soumise à un choc laser (figure 13) [20]. Le choc laser (par impulsion de quelques ns) provoque ce que l'on peut appeler une atomisation mécanique, d'autant mieux adaptée que le matériau cible initial est un substrat recouvert d'un revêtement projeté : les particules atomisées étant constituées d'écaillures correspondant aux splats du revêtement initial. Ce type de « re-projection », au stade de la recherche encore, permet de produire des dépôts par un procédé s'apparentant, par les vitesses de projection, évaluées par ombroscopie, au cold spray.

Il est donc certain que les techniques d'imagerie ont aidé et aident toujours considérablement à l'amélioration des procédés de projection thermique. L'imagerie a toujours été présente en projection thermique, ne serait-ce que pour en exprimer le principe : sur l'exemple de la projection plasma

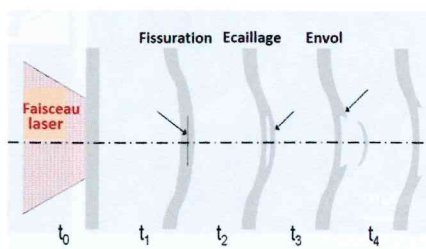


FIGURE 13 : Observation par ombroscopie de l'envol de particules en projection à froid par choc laser (procédé CLASS).

qui s'apparente à la projection « lama », y compris par son nom (figure 14). C'est en cela que la projection rejoint le 9^e art, celui de la bande dessinée.

Projection thermique et arts de la mode (10^e art)

La proximité de la projection thermique avec le 10^e art pose plus question car plusieurs disciplines revendiquent le titre de 10^e art. La haute couture et la cuisine tiennent la corde : en France, en particulier, comme cela se comprend. On emploie alors les nobles vocables d'arts de la mode et d'art culinaire. Même s'il aurait été facile d'assimiler la projection thermique à de la cuisine, on préférera considérer, dans cet article, que la projection thermique se rapproche des arts de la mode par la possibilité qu'elle leur offre de revêtir des textiles, parmi lesquels la soie de haute couture. Certains travaux l'ont démontré récemment. Jusqu'alors, la projection sur tissu n'avait été l'objet que de rares travaux, un seul ayant pu être répertorié par les auteurs [22] : et encore ne s'agissait-il pas de soie de haute couture. La projection thermique a toujours été reconnue comme capable de revêtir des matériaux thermosensibles comme le papier qui comme, on le sait depuis Bradbury et Truffaut (autres références artistiques, cela dit en passant), brûle à 451 degrés Fahrenheit. Jusqu'alors, il fallait recourir à des moyens de refroidissement sévères (cryogéniques par exemple) ou à des procédés de projection à basse température (à l'arc électrique par exemple). Aujourd'hui, cependant, on peut les éviter et maîtriser un procédé très « chaud » comme la projection plasma pour céramiser des matériaux encore plus sensibles : de la soie de haute couture, par exemple (figure 15). Le revêtement est alors vêtement, re-vêtement. Des dépôts de grande qualité, d'hydroxyapatite (HA), ont pu être obtenus ainsi (sans cryogénie donc), l'adhérence étant assurée par accrochage des particules de céramique sur la fibre

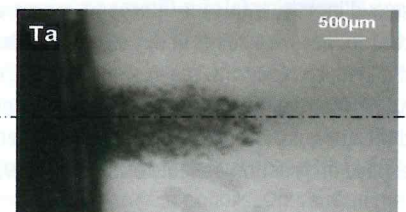




FIGURE 14 : Projection lama pour principe de la projection plasma, d'après Hergé, 1949, [21].

de soie, sans cependant, la brûler (figure 15c). Pour donner une certaine souplesse au revêtement céramique, la projection aura pu être appliquée au travers d'un pochoir, de type grillage par exemple pour la réalisation d'une structure en écailles de poisson, articulées entre elles par construction (figures 15a et 15b). L'hydroxyapatite utilisée est du type de celle projetée pour revêtir les prothèses de hanche, par exemple. Sa composition, voisine de celle de l'os permet une rapide reconstruction tissulaire autour de l'implant. Elle pourra donc faire dire au créateur de haute couture, qu'avec une robe ainsi céramisée, il habille d'un exosquelette son mannequin (pourtant déjà souvent squelettique). On peut donc déposer de la matière portée à haute température sur du matériau qui normalement, dans des conditions d'équilibre, ne le supporterait pas. Cela laisse entrevoir de belles applications pour le revêtement de textiles et tissus. Tout le reste n'est que littérature (cf paragraphe suivant).

Projection thermique et littérature (5^e art)

Où est la littérature en projection thermique ? Pour répondre, on considérera l'acception du pernicious anglicisme « littérature », c'est-à-dire celle de bibliographie ou documentation. L'analyse bibliométrique associée est très

instructive en projection thermique. Elle permet d'en définir la carte et le territoire, si l'on veut user d'une référence littéraire. L'analyse la plus récente porte sur le cold spray, présentée par K.A. Khor (NTU/Singapour) au Club Cold Spray en mars 2015 [23]. Cette approche originale, par l'examen du nombre des publications s'y rapportant et les domaines couverts (figure 16), permet de confirmer que le cold spray peut être considérée comme la révolution froide (« De koude revolutie » pour rester dans les références littéraires houellebecquiennes, qui ne manquent d'ailleurs pas en projection thermique : « Les particules élémentaires », « Plateforme »...) dans la famille des procédés de projection thermique. Un engouement industriel, qui ne se dément pas aujourd'hui, en a résulté. La très forte augmentation du nombre d'articles sur le cold spray, jusqu'en 2003 où il présente un pic, souligne la période de mise au point du procédé, tandis que la croissance continue du nombre de citations, jusqu'aux années 2010 où elle se stabilise, concurremment avec une diminution du nombre de publications, indique bien le développement du procédé puis sa diffusion dans l'industrie (figure 16). Le cocardier ne manquera pas de relever que la France se situe dans une position de chef de file dans la production d'articles scientifiques dans le domaine (figure 16b).



FIGURE 15 : Dépôt d'hydroxyapatite sur soie de haute couture, a) Grille pochoir en perspective, b) Vue de dessus du dépôt, c) Image optique de la couche céramique sur la soie.

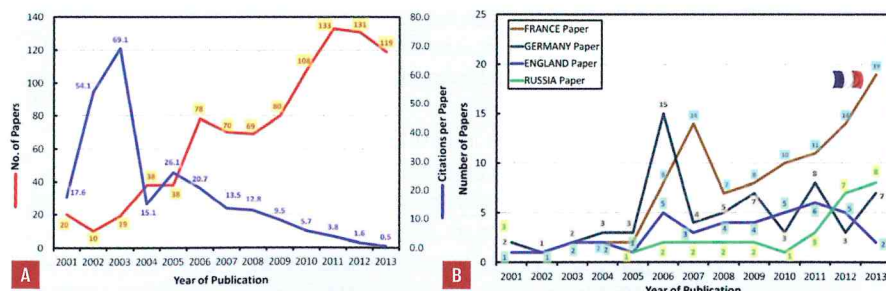


FIGURE 16 : Analyse bibliométrique du cold spray par l'évolution annuelle du, a) Nombre de publications et nombre de citations, b) Nombre de publications par pays, d'après K.A. Khor, 2015 [23].

Un besoin de TS localisé ? Pensez DALIC !

Une zone critique exposée,
Un défaut sur pièce assemblée,
OAD, OAC, OAS, Nickel, Or, Ag...
En production ou en maintenance
Réparez plutôt que remplacer
Limitez vos consommations
d'eau et d'énergie
Gagnez en CO₂ et en Euros
En étudiant avec nous l'option
de la sélectivité DALIC !
service@dalicworld.com
Tél : +33.2.99.75.53.80

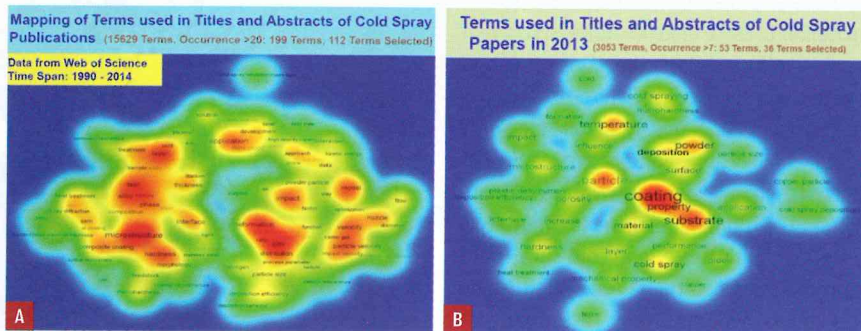


FIGURE 17 : Cartographie des thèmes des articles publiés dans le domaine du cold spray, a) sur la période 1990-2014, b) en 2013. Couleurs de plus en plus chaudes avec le nombre croissant des publications, d'après K.A. Khor, 2015, [23].

Les thèmes abordés dans les articles traitent ces mêmes évolutions. Très diversifiés (de la mécanique des fluides aux propriétés des matériaux en passant par la technologie) quand on couvre la période s'étant écoulé depuis la découverte du cold spray (figure 17a), ils se concentrent sur quelques thèmes majeurs, ces dernières années (figure 17b), touchant aux matériaux et propriétés obtenus. Le thème poudre (l'un des volcans centraux sur l'île des thèmes,

en figure 17b) comme cet article a essayé de l'illustrer (au travers des 1^{er} et 7^e arts) s'y détache pour des raisons tant techniques qu'économiques.

Conclusion

La projection thermique entre en résonance avec tous les arts comme les exemples présentés dans cet article tendent à le montrer. Cette universalité, caractéristique première de l'art, souligne, s'il en était besoin, le caractère

pluridisciplinaire des études s'y rapportant. Il serait tentant (et un peu facile) de dire que la projection thermique est un art, en elle-même, et pourrait très bien prétendre à être choisie comme 11^e art dans la liste non exhaustive les récapitulants. Cependant, même si la projection thermique n'entre pas dans le panthéon des arts, il est certain que les matériaux de sa production seront toujours loin d'être distingués par l'Académie des Lais-Arts de Plouzac (Dordogne) qui décerne son prix d'anes-thétique toutes les années impaires.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier chaleureusement, pour leur soutien financier et techniques les partenaires industriels suivants : METALOR/Courville, CEA/Le-Ripault, Renault, 2PS/Montbazens, et Effets de Verre/ Marly-le-Roi.

Merci mille fois aussi pour leur aide, aux personnes suivantes : D. Jeulin, V. Guipont, M. Faessel, F. N'Guyen, D. Giraud, L.L. Descurninges, E. Darque-Ceretti et F.Georgi, tous de MINES ParisTech, L. Prenel de l'EnsAD Paris, ainsi que A. Bousquet et J.F. Bassereau du Matériaupôle/Vitry-sur-Seine.

Bibliographie

- [1] G.W.F. HEGEL, « Esthétique ou philosophie de l'art », Hotho ed., (1832).
- [2] SAINT JEAN, « L'Apocalypse », Joseph Forêt ed., (1959).
- [3] S. SIEGMANN, « 100 years of thermal spray :About the inventor Max Ulrich Schoop », Surface and Coatings Technology 220(2013)3-13.
- [4] A. PAPYRIN et al., « Cold Spray Technology », Elsevier Pub., ISBN: 978-0-08-045155-8, (2006).
- [5] L. ESPIE, « Quelques aspects de la science des surfaces appliquée aux objets d'art », Revue de Métallurgie N°9(2001)750.
- [6] « Exposition, E=mc215 », [http://www.arts-et-metiers.net/musee/emc215-dialogues-entre-sciences-et-art-0_27janvier au 19 avril, \(2015\).](http://www.arts-et-metiers.net/musee/emc215-dialogues-entre-sciences-et-art-0_27janvier%20au%2019%20avril,%20(2015).)
- [7] C. O'NEILL, « Découverte du système britannique de formation et d'évaluation des techniques de construction en pierres sèches », Compte rendu, ABPS, Mai(2007).
- [8] F. DELORO, M. FAESSEL, D. JEULIN, E. MEILLOT, L. BIANCHI, "A Morphological Approach to the Modeling of the Cold Spray Process», Proc. of the Int. Thermal Spray Conf. and Exposition (ITSC '14)), Barcelona, Spain, 21-23 May, 2014, J. Jerzembeck et al. eds., DVS Media GmbH, Düsseldorf, Germany, ISBN 978-3-87155-574-9, (2014) 221-225.
- [9] E. COHELIN, F. BORIT, G. FROT, M. JEANDIN, L. DECKER, D. JEULIN, B. AL TAWHEEL, V. MICHAUD and P. NOËL, «Oxidation and Particle Deposition Modeling in Plasma Spraying of Ti-6Al-4V/SiC Fiber Composites », Journal of Thermal Spray Technology 8(1999)117.
- [10] F. DELORO, « Approche combinée morphologique et par éléments finis pour une modélisation globale en 3D du dépôt par projection dynamique par gaz froid (« cold spray »), Thèse de doctorat, MINES ParisTech, à soutenir, Juin(2015).
- [11] M. JEANDIN, G. ROLLAND, L.L. DESCURNINGES, M.H. BERGER, "Which Powders for Cold Spray?", Surface Engineering 30(2014)291-298.
- [12] A. GEIBEL, L. FROYEN, L. DELAEY, K.U. LEUVEN, « Plasma spray forming: An alternate route for manufacturing free-standing components », Journal of Thermal Spray Technology 5(1996)419.
- [13] R. WICKER, « Introduction to the inaugural issue », Additive Manufacturing, 1(2014)1.
- [14] T. HALTERMAN, "General electric developing cold spray 3D painting technology", Available via <http://www.3dprinterworld.com/article/general-electric-developing-cold-spray-3d-painting-technology>. Accessed 4 Sept. (2014)
- [15] J. PATTISON, J. CELOTTO, R. MORGAN et al, « Cold gas dynamic manufacturing : A non thermal approach to freedom fabrication », Int. J. Machine Tools Manufacture, 47(2007)627-634.
- [16] J. VILLAFUERTE, « Cold Spray : A Solution for Architectural Glass », Welding Journal 87(2008)40.
- [17] J. VILLAFUERTE, « Cold spray for additive manufacturing », Proc. of the Cold Spray Club meeting, 13 March, (2015), www.mat.ensmp.fr/clubcoldspray, (2015)4.
- [18] J.Y. CHARCOSSET, « L'arbre, une fabrique de bois massif », Le BOUVET n°157(2012)15.
- [19] A. RAVAUD, « Réalisation et étude de dépôts composites multi-échelle élaborés par projection plasma pour applications tribologiques à hautes températures », Thèse de doctorat de l'Université de Limoges, 4 décembre(2014).
- [20] M. JEANDIN, "A Socratic Approach to Surface Modification: the Example of Thermal Spray", Plenary talk, Proc. of the 24th Int. Conf. on Surface Modification Technologies (SMT 24), 7-9 Sept. 2010, Dresden, Germany, E. Beyer et al. eds., Valardocs, ISBN 978-81-910571-2-6, (2011)3-20.
- [21] HERGE, « Tintin et le Temple du Soleil », Casterman, (1949).
- [22] K.V. NIESSEN and D. GADOW, "Thermally-sprayed ceramic coatings on flexible woven fabrics", Proc. of the «3rd Int. Thermal Spray Conf. (ITSC 2002) », Essen, Germany, 4-6 March, 2002, E. Lugscheider et al. eds., ASM-Int., Materials Park, OH, U.S.A., (2002)b044.
- [23] K.A. KHOR, « A Bibliometrics Study on Global Cold Spray Research Publications », Proc. of the Cold Spray Club meeting, 13 March, (2015), www.mat.ensmp.fr/clubcoldspray, (2015)1.