

La **projection thermique** se projette maintenant dans l'art et les métiers d'art

M. Jeandin ^{1a}, M. Ducos ², C. Briquet ³, D. Billières ³, S. Leprizé ⁴, A. Fontes ⁵, G. Lehoux ⁵, L. Vogelgesang ⁶

¹ MINES ParisTech, Université PSL, MAT-Centre des Matériaux P.M. Fourt- CNRS UMR 7633, BP 87, 91003, Evry, France., a CmemPAMAL, 17, Rue du Colonel Oudot, 75012 Paris, ² MD Consultant, 2125 Route d'Urchaux-D74, 84550 Mornas., ³ Saint-Gobain Coating Solutions, 50, Rue du Mourelet, BP 90966, 84400 Avignon, ⁴ ARCA, 12-14, Rue Graham Bell, 77600 Bussy-Saint-Georges, ⁵ Noir Vif, 20, Rue Primo Levi, 75013 Paris, ⁶ Atelier Ludwig & Dominique, 2 ter, Passage Ramey, 75018 Paris

La projection thermique est un procédé de dépôt de matière dont les auteurs montrent pourquoi il a été pratiquement totalement ignoré jusqu'alors du monde de l'art et des métiers d'art et pourquoi il devrait, maintenant, s'imposer comme un vecteur majeur de création dans ces mêmes domaines. De nombreux exemples résultant de premiers travaux, notamment en ébénisterie d'art, illustrent le propos.

Recouvrir la surface d'une pièce industrielle, de ce que l'on appelle un revêtement, permet d'en améliorer les propriétés, par exemple, sa résistance à l'usure ou à la corrosion. Parmi les techniques les plus employées industriellement, la projection thermique occupe une place de choix pour déposer la matière formant le revêtement.

Si la projection est fortement répandue dans l'industrie, depuis des décennies, elle reste plus que confidentielle dans l'art et les métiers d'art. La raison en est liée au principe même du procédé qui, de prime abord, semble difficilement exploitable dans ces domaines, compte tenu, notamment, des matériaux qui y sont utilisés. Une analyse plus poussée du procédé conduit, cependant, à penser que celui-ci devrait l'être jusqu'à même être jugé comme hautement innovant pour l'art, l'artisanat d'art et le design.

Cet article propose d'aborder cette analyse, grâce à la description du principe de la projection thermique suivi d'un état de l'art sur la projection thermique appliqué à l'art et aux métiers d'art. La discussion distingue l'aspect esthétique de l'aspect fonctionnel, tous les deux étant à considérer pour le dépôt projeté thermiquement à la surface de la pièce qui le reçoit. L'aspect esthétique intervenant dans tous les cas, c'est-à-dire tant pour l'art

que pour l'artisanat et le design, il sera privilégié dans cet article. La fonctionnalisation de surface résultant du dépôt y sera traitée aussi mais seulement dans la mesure où elle se démarquera de ce qui est rencontré dans les applications industrielles classiques maintes fois traitées déjà dans la bibliographie ^[1].

Principe de la projection thermique

Comme de nombreuses découvertes scientifiques, la projection thermique fut le fruit de la sérendipité ou, pour être plus français, de la zadjagité. C'est, en effet, l'observation, par hasard, de balles de fusil écrasées après leur impact sur les chars d'assaut, pendant la première guerre mondiale, qui donna l'idée à Max Ulrich SCHOOP de cette technologie. Il déduisit de son observation que du métal (projectile) pouvait adhérer spontanément à du métal (substrat) à condition qu'il fût projeté à une vitesse suffisamment élevée pour s'y trouver collé. Pour créer une couche de métal, c'est-à-dire un revêtement, il suffisait de répéter l'opération pour un ensemble d'objets (balles de fusil initialement puis particules plus petites par la suite) qui s'accumuleraient en un empilement volontaire.

Sur cette idée, la technique prit un essor industriel rapide, initialement dans le secteur de l'aéronautique, pour la réalisation de

revêtements protecteurs de pièces. Cet essor s'est fondé sur celui de différentes technologies pour mettre en vitesse (et chauffer, par la même occasion) de projectiles. Ces technologies reposent toutes (**figure 1**) sur l'emploi d'une source d'énergie (flamme, arc électrique, plasma, etc.) appliquée à de la matière, initialement apportée sous forme de fil, baguette ou poudres.

L'énergie est transférée à la matière dans des conditions opératoires telles qu'elle se transforme en un flux de microparticules portées à température et à une certaine vitesse. Selon la température et la vitesse, les particules sont plus ou moins visqueuses et déformables. Leur accumulation conduit à la construction d'un dépôt ou revêtement, sur la cible (substrat) sur laquelle elles sont projetées. Un tel procédé est très séduisant, surtout en ces temps de protection de l'environnement, car il opère par voie sèche, à la différence de nombreux traitements de surface qui le font par voie humide, avec souvent l'emploi de produits chimiques, la peinture en étant l'un des exemples les plus courants.

Si le procédé est très simple dans son principe, son application est tout autre, du fait de la complexité du mécanisme de construction par accumulation déjà mentionné (**figure 2a**). Il dépend, en effet, éminemment des conditions/paramètres de projection : nature des matériaux employés (projectile(s) et substrat), ainsi que taille, vitesse, température... des particules projetées. En fonction de ces conditions, l'écrasement des particules élémentaires (dites « splats »), peut varier (**figures 2b et 2c**) et le rendu superficiel du dépôt s'en trouver

modifié, sur l'exemple de ce que pouvaient en montrer, à une autre échelle et pour d'autres revêtements, les artistes Yves Klein et Georges Mathieu dans respectivement « Le silence est d'or » (1960), et « Larmes Douces » (1991). La connaissance des conditions de projection est donc primordiale et constitue la recette d'utilisation de la technique. Posséder un équipement ne suffit pas pour l'exploiter directement au mieux et cette connaissance des conditions de projection constitue même une garantie de protection et d'avance vis-à-vis de la concurrence pouvant le posséder aussi. Compte tenu du nombre de paramètres de projection et leur influence sur la modification de la surface (schématisée en **figure 2**), la projection se présente ainsi comme une technique très riche pour produire des effets esthétiques propres à la rendre très attractive pour une application artistique. Le domaine de l'art lui est, en effet, encore à ce jour, étranger comme la suite immédiate le montre.

Projection thermique, art et métiers d'art

Pour ce qui est de ses perspectives de développement dans les domaines de l'art, des métiers d'art et du design, la projection thermique doit être considérée sous ses deux aspects : esthétique et fonctionnel. Incidemment, le design n'est-il pas, dans sa définition classique, qualifié de modernisme fonctionnel sur le plan esthétique ? Si le premier intéresse tous les domaines ou presque, le second intéresse plus ceux de l'artisanat et du design où le dépôt a aussi la « fonction » de conférer à l'objet certaines propriétés d'usage.

État de l'art

• Esthétique et projection thermique

C'est, bien entendu, dans les arts plastiques qu'il faut aller chercher les racines esthétiques de la projection thermique telle qu'elle est présentée dans cet article. Cette technique est innovante car elle conjugue la projection de matière à celle d'énergie mais bien au-delà de ce qu'avaient pu expérimenter déjà certains artistes majeurs, à savoir : Hartung, au pulvérisateur pour peindre sans contact, dans sa phase dite « des nuages » par exemple ; Klein, au lance-flamme pour ses « Peintures de feu » ; Pollock et autres Ernst (son « inspireur »), Masson et Picabia, par « dripping », à la boîte de conserve percée par exemple ; et même Toulouse-Lautrec, par crachotis à la brosse à dents. À ces illustres noms, il convient

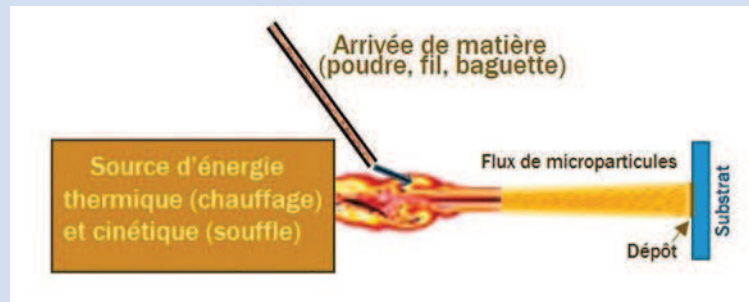


FIGURE 1 : Schéma de principe de la projection thermique.

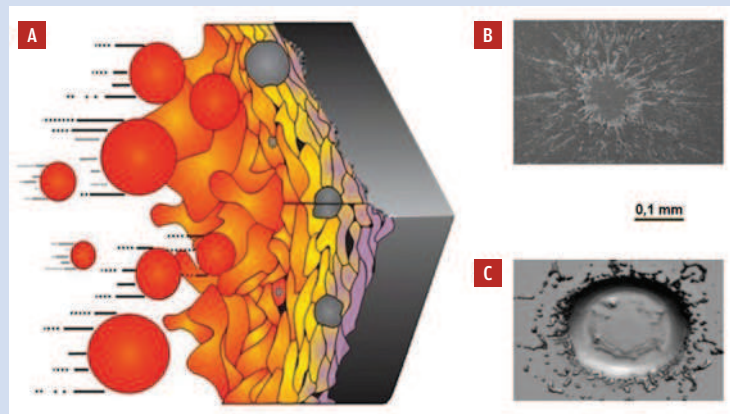


FIGURE 2 : Construction du dépôt, a) schéma de principe pour une projection horizontale, à partir de la gauche, b) et c) vues de dessus d'une particule élémentaire écrasée (« splat ») sur le substrat (schématisé en gris en a) dans deux conditions de projection différentes : cas d'une céramique (zircone) sur acier [2].

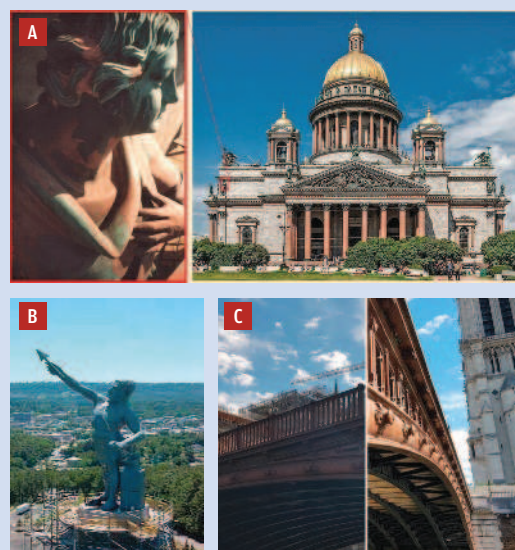


FIGURE 3 : Projection thermique pour la restauration de monuments, a) Anges de la Cathédrale Saint-Isaac à Saint-Pétersbourg (Russie), restaurés par projection de cuivre et/ou de plomb-étain, b) Statue de Vulcain par G. Moretti au Vulcan Park de Birmingham/AL, fonte restaurée par projection de zinc, c) Pont au Double vers Notre-Dame de Paris, restauré par projection de cuivre (clichés MJ, juin 2020).

d'ajouter celui de Salvador Dali, pour l'anecdote et parce qu'il se situait bien dans la lignée de Schoop, quand il utilisa la projection au fusil pour couvrir de clous la couverture de son « *Apocalypse selon Saint Jean* » dans son édition unique (dans tous les sens du terme) publiée en 1961 [3].

Cependant, au-delà de ces références prestigieuses, la projection thermique dans sa version technique actuelle, c'est-à-dire telle qu'elle a été présentée précédemment, n'a été, jusqu'à présent, considérée dans l'art, que comme une technique de restauration d'œuvres monumentales. Il s'agit principalement de statues sur lesquelles, la corrosion ayant fait son œuvre, il convenait d'apporter de la matière neuve (souvent du cuivre, du zinc ou du bronze) là où la dégradation devenait trop marquée : faire peau neuve en quelque sorte. Certaines constructions de génie civil comme des ponts et écluses, à Paris notamment, entrent dans cette même catégorie de rénovation artistique. Si l'aspect fonctionnel intervient dans le traitement de dépôt appliqué, principalement pour affronter la dégradation liée à l'environnement, c'est la restauration de l'esthétique qui prime. La **figure 3**

en montre les exemples les plus marquants, à l'échelon international.

Dans le champ purement artistique, les applications de la projection thermique, à la connaissance des auteurs, sont, à ce jour, quasiment nulles : d'aucuns diraient dans tous les sens du terme. Seules, en effet, quelques créations figuratives ont été tentées par l'artiste Russe, Kirill Kasatkin (**figure 4**) qui s'est, de plus, limité à l'emploi d'une seule et même technologie de projection thermique : le dépôt sur verre par projection « cold spray » à basse pression.

Le manque d'exploitation du potentiel de la projection thermique pour l'art ne devrait pas durer. Ce potentiel s'est, en effet, révélé, riche, à l'examen des résultats préliminaires originaux [4, 5] dans le domaine de l'artisanat d'art, à l'École des Mines de Paris, ces dernières années. Cette partie d'activité a montré les possibilités d'associations pionnières de matériaux par projection thermique et les effets esthétiques associés. Certaines associations de matériaux ont ouvert la voie à des créations plus abouties, présentées plus loin dans la partie « Résultats » de cet article.

• Fonctionnalité et projection thermique

Même si le terme de fonctionnalisation est assez laid, surtout dans un contexte artistique, la fonctionnalisation des surfaces par projection thermique fait intervenir les propriétés du matériau déposé ainsi et la façon dont il adhère au substrat dont il est revêtu. Il ne sera pas fait état ici des questions liées aux propriétés du dépôt qui ne diffèrent pas de celles obtenues dans les applications industrielles classiques de la projection thermique et sont, en outre, abondamment traitées dans la bibliographie, en synthèse [1] par exemple. En revanche, la liaison entre le dépôt (revêtement) et son substrat présente des caractères particuliers, quand il s'agit d'applications appartenant au monde des arts, du design et de l'artisanat. La raison en est que le système substrat revêtement y est le plus souvent très hétérogène, c'est-à-dire constitué de matériaux très différents. Cette caractéristique est la conséquence de la recherche d'effets esthétiques voulus par les créateurs et/ou la conséquence du nécessaire emploi de matériaux traditionnels dans les métiers d'art (bois, textiles, peaux, papiers...). Les effets esthétiques en question sont, d'une part, des effets de surface (topographiques en particulier) et, d'autre part des effets de contraste de propriétés entre substrat et dépôt.

Dans les domaines d'applications couverts par cet article, les associations de matériaux « substrat-revêtement » peuvent donc être qualifiées d'originales par rapport à celles rencontrées depuis des lustres dans l'industrie classique. Les pièces industrielles sont, en effet, la plupart du temps, métalliques, à revêtir de métal voire de céramique pour la protection anti-usure, anticorrosion ou thermique (barrière thermique). Ces cas industriels sont représentés par les 2 systèmes en partie gauche de la **figure 5** tandis que tous les autres systèmes sont aussi à envisager, souvent prioritairement d'ailleurs, dans les métiers d'art.

L'intérêt de la projection thermique est que de telles associations soient rendues possibles, sans recours à des techniques de collage, classiques dans le domaine artistique. Pour cela, cependant, dans le cas de matériaux très dissemblables et/ou à propriétés singulières - non métalliques, thermosensibles et/ou fragiles notamment -, l'établissement de la liaison entre le dépôt et le substrat exigera, éventuellement, le développement de conditions de projection adaptées. Le temps de mise en place du savoir-faire en la matière,



FIGURE 4 : « Russian wolfhound pack at coursing », peinture d'aluminium, plomb et cuivre projetés sur verre, date et dimensions non fournies, par K. Kasatkin.



FIGURE 5 : Principaux systèmes de matériaux susceptibles d'être employés en projection thermique (notation : Matériau de dépôt/Matériau substrat).

Nos produits, on aurait pu les rêver...



Christophe
Responsable Bureau d'Études

Guillaume
Responsable Laboratoire

Charles
Responsable
Production et SAV

Lionel
Responsable
Qualité et Marketing

On a préféré les créer

60 ans d'innovation
dans les métiers de la métallographie.
Toujours la même vitalité,
la même inventivité
et la même énergie !

est, d'ailleurs probablement l'une des raisons majeures à l'essor tardif de la projection thermique dans les milieux de l'art et des métiers d'art. Dans les secteurs industriels classiques, l'adhérence entre dépôt projeté et son substrat résulte de l'un des trois mécanismes suivants : accrochage (ancrage) mécanique sur la rugosité du substrat, liaison métallurgique par diffusion entre éléments du substrat et des particules à l'impact, adhésion due à des forces physiques (de type van der Waals) lors du contact intime entre les surfaces en jeu. Les deux premiers mécanismes sont largement majoritaires.

Résultats

■ Esthétisation par projection thermique

La perception sensorielle de la surface des dépôts projetés, pour des applications industrielles n'est quasiment jamais prise en compte, priorité étant donnée aux propriétés de fonctionnalisation visées. La prendre en compte, comme les applications artistiques (au sens large) l'appellent, demande beaucoup de travail que cet article reflète en partie.

Topographie et couleur sont considérées comme les caractéristiques essentielles nourrissant la perception sensorielle. Celles-ci ne sont pas indépendantes puisque le relief de surface (topographie superficielle) régit les lois de diffusion, diffraction et absorption de la lumière. Elles dépendent toutes deux des matériaux utilisés et du processus de construction du dépôt (**figure 2**). Ce dernier sécrète un fort potentiel de création d'effets esthétiques superficiels résultant de l'accumulation, « à la Arman » dira-t-on pour lui donner un qualificatif artistique, susceptible d'aboutir à un relief qui est karstique à la base.

Un certain nombre d'effets esthétiques ont pu être mis au jour, à l'occasion d'essais préliminaires visant à les révéler. Ces essais ont conduit à de nombreux échantillons qui ont servi, pour partie, aux illustrations de la **figure 6**. Ces échantillons constituent une sorte de catalogue de rendus superficiels où l'artiste ou l'artisan trouvera l'inspiration pour sa création, éventuellement à une autre échelle et/ou pour des formes particulières. Il pourra être aidé en cela par la robotisation possible du procédé.

• Effets de couleur

-selon la nature du matériau (ou d'un mélange de matériaux) déposé (avec cuivre et aluminium par exemple en **6a**, et **figure 6j** avec le

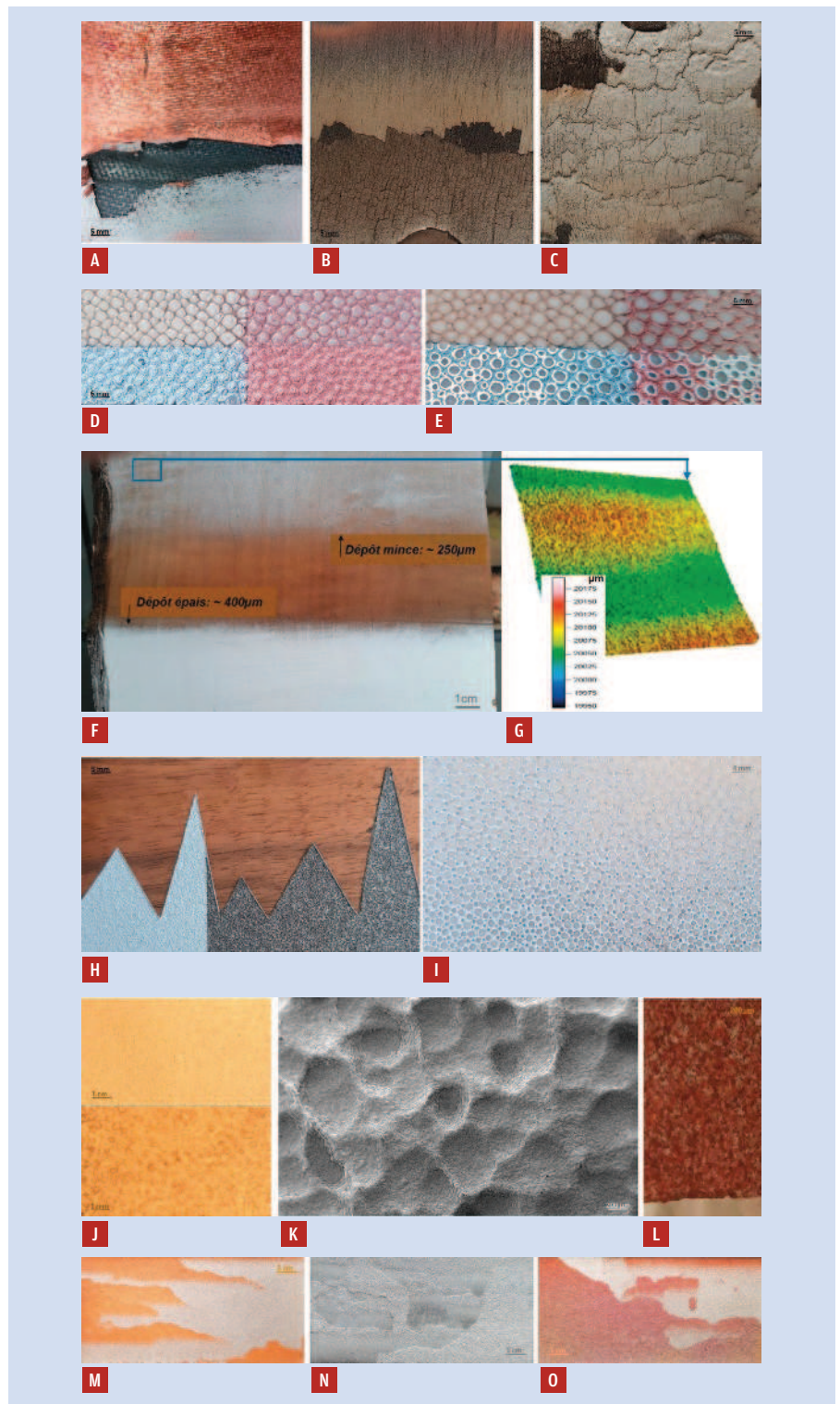


FIGURE 6 : Exemples (vues de dessus) d'effets superficiels obtenus par projection thermique, a) cuivre (haut) et aluminium (bas) sur carbone (milieu), b) et c) aluminium déposé sous différentes conditions, d) zinc et cuivre sur peau (1 type d'essai par quart de photo), e) zinc et cuivre sur peau après polissage (en bas), f) et g) alumine sur poirier avec image topographique 3D (en g) sur vague d'ondage, h) aluminium (à gauche) et alliage Zn-Al (à droite en plus foncé) déposés au pochoir sur du bois, i) zinc et cuivre déposés en ombrage sur peau, j) revêtements de laiton (haut) et or (bas), k) agrandissement sur revêtement d'or, l) dépôt de cuivre (haut) sur verre (révélé en partie inférieure), m) dépôt hétérogène de cuivre sur aluminium, n) dépôt hétérogène d'aluminium sur aluminium, o) dépôt de cuivre hétérogène en épaisseur et en degré d'oxydation.

jaune du laiton et celui de l'or en comparaison);
 -selon le degré d'oxydation, pendant et après le dépôt (**figures 6b et 6k** par exemple);
 -selon la fissuration, la fragmentation, et l'épaisseur du dépôt qui laissent apparaître plus ou moins le substrat (**figures 6d, 6i**).

• **Effets de forme**, par dépôt au pochoir (**figure 6h**);

• **Effets de relief/rugosité** (**figures 6j, 6k, 6l** en particulier) et d'ombrage (**figure 6i**), la rugosité superficielle pouvant présenter un caractère fractal mettant en jeu différentes échelles (celle de la particule projetée, celle du relief initial du substrat, **figure 6d**, et celle des « cordons » correspondant au passage de la buse de projection, **figure 6k**);

• **Effet de contraste** (de couleur et topographique) par rapport au substrat, par superposition (par exemple cuivre sur verre en **figure 6j** ou cuivre sur sous-couche de zinc en **figure 6e**) ou mis au jour par délaminage, **figures 6a et 6c**). Cet effet de contraste combiné, c'est-à-dire de couleur et de relief, peut être extrêmement sensible et révélateur de caractéristiques du substrat. Certaines comme le veinage ou, plus rare, l'ondage (effet de vagues perpendiculaire au veinage) du bois, peuvent être souhaitées ardemment être mises en valeur en ébénisterie d'art. La projection thermique y parvient parfaitement (**figure 6f**), par l'optimisation de l'épaisseur du dépôt et le choix du matériau le constituant. L'œil est le meilleur « capteur » de ces effets, en même temps qu'il est attendu comme le meilleur capteur de clientèle pour l'ébéniste, sachant, cependant que ces effets peuvent être révélés par des techniques fines de métrologie comme la rugosimétrie superficielle 3D (**figure 6g**). Les propriétés optiques et haptiques de la surface ayant reçu la projection seront donc les critères de sélection des paramètres opératoires ayant permis de l'obtenir et satisfaire ainsi les désirs du créateur : qu'il soit, artiste, artisan ou designer. Ce stade requiert un dialogue poussé entre le créateur et -s'il y a- l'opérateur de projection, pour atteindre au mieux son objectif : voir et toucher pour être touché.

■ Fonctionnalisation par projection thermique

Comme déjà dit plus haut, pour des applications à l'art, aux métiers de l'art et au design,

la projection thermique tire sa force de sa capacité à associer des matériaux très dissemblables (**figure 5**). Cependant, tout cela ne tient que si, sans jeu de mots, le revêtement projeté tient, c'est-à-dire que les conditions de projection soient telles que l'adhérence entre substrat et dépôt soit suffisante pour l'application visée. La difficulté pour assurer une bonne adhérence peut venir du fait que le matériau recevant la matière projetée soit thermiquement et/ou mécaniquement peu résistant comme peut l'être le bois ou le tissu. En projection thermique, le salut repose sur le principe même du procédé qui consiste en un dépôt de matière « petit à petit » par empilement de particules projetées (**figure 2**). La projection thermique est donc, certes, très énergétique mais, contrairement aux autres procédés d'élaboration classiques (placage, laminage, frittage, coulée, enduction, etc.) les transferts d'énergie, au substrat notamment, s'effectuent progressivement. Ils interviennent au fur et à mesure de l'impact des particules projetées dans des zones locales (de la taille de ces mêmes particules). Cette stratégie de

dépôt s'apparentant à un « diviser pour mieux régner » permet de préserver de l'endommagement (thermique et par érosion) de substrats comme les bois. L'ébénisterie d'art peut en profiter, sur la foi de créations comme « Kapnos » (**figure 7**) et « Argo » (**figure 9**) qui furent exposées au Grand Palais (Salon « Révélation 2019 »)^[6], l'une d'entre elles (« Argo »)^[7] ayant été récompensée, par la suite, du prestigieux Prix Liliane Bettencourt pour l'intelligence de la main.

Dans le cas du fumoir, l'intérêt de la stratégie de dépôt « incrémentale » a été avantageusement éprouvé et prouvé par l'obtention d'un revêtement interne de qualité, malgré le confinement thermique inhérent à l'endroit où il fallait déposer le métal. En plus du caractère progressif, du dépôt d'énergie, l'opérateur peut jouer sur la trajectoire de la buse de projection (et la flamme associée) pour limiter le confinement thermique (**figure 8**).

Outre son esthétique, la fonctionnalité du dépôt métallique obtenu par projection thermique est double : d'une part, la protection vis-à-vis de l'humidité et de la chaleur comme



FIGURE 7 : Fumoir « Kapnos » en merisier après projection d'alliage Zn-Al, a) en cerclage extérieur de la sphère et b) en revêtement de paroi interne jusqu'à mi-hauteur. Diamètre extérieur du fumoir : 25 cm.



FIGURE 8 : Dispositif expérimental pour la projection sur le fumoir « Kapnos » enserré dans un montage adapté, sur tour mécanique.

« Au sein d'un même bois, en fonction de la dureté locale, le processus d'ancrage sera plus ou moins marqué, faisant de l'adhérence une propriété dont la sensibilité pourra être exploitée. »

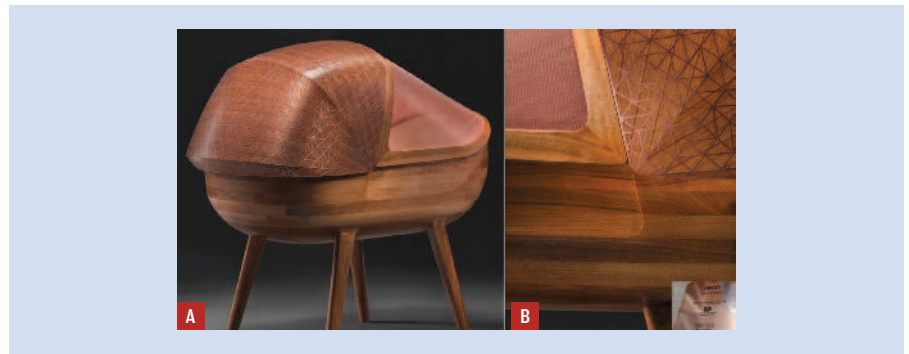


FIGURE 9 : Lit de bébé « Argo » en noyer, a) Vue générale montrant, au premier plan, en tête de lit, la coque au réseau de cuivre projeté, b) Agrandissement sur la jonction entre le berceau du lit et les parties mobiles, avec insert, en bas à droite, de la plaque d'identification, fixée au fond du lit, avec les logos des participants au projet. Dimensions du lit : 115x62x108 cm³.

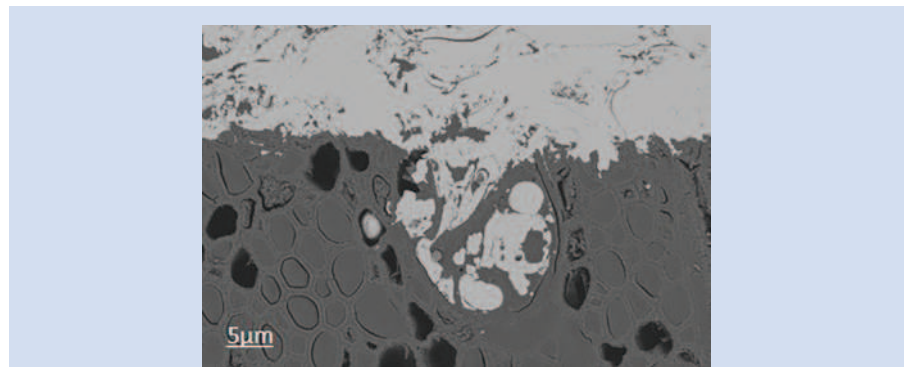


FIGURE 10 : Image au microscope électronique à balayage (MEB) de l'interface cuivre (en clair) - noyer sur coupe transversale d'un cordon de motif « Argo ». Cuivre attaqué chimiquement pour la métallographie.

son bois peut en rencontrer lors de fumages et lavages en laboratoire alimentaire ou en cuisine de grand restaurant et, d'autre part, le renfort mécanique grâce à la bande de cerclage externe. Incidemment, la gravure, franche et nette, du logo sur cette dernière, a montré la qualité du dépôt effectué, tant pour son homogénéité que pour son adhérence au bois support.

Dans le cas d'« Argo », le dépôt, grâce à sa nature (cuivre) et les caractéristiques géométriques de son motif (épaisseur et taille des mailles), a permis d'assurer une protection, par effet de cage de Faraday mesurée à 90 % environ, vis-à-vis des ondes environnantes de type « wifi ». Le nouveau-né n'y est ainsi plus noyé dans sa coque de noyer cuivré.

Que ce soit pour « Argo » comme pour « Kapnos », la liaison entre le revêtement projeté est assurée par accrochage mécanique du métal sur les fibres du bois (**figure 10**), retrouvant, en cela, un mode d'ancrage relevé par P. Lomonaco *et al.* [8] dans le cas d'un autre procédé pionnier pour le bois, la projection à

froid (« cold spray ») et par M. Nejad *et al.*, par projection à l'arc -différente de la projection employée dans cet article donc- pour la protection bactériologique de certains bois [9]. Les autres modes classiques concourant à l'adhérence sont, bien sûr, inopérants, compte tenu de la nature du substrat. Les points d'ancrage sont plus ou moins nombreux et marqués selon les caractéristiques du bois (nature, âge, taille des fibres et des cellules...) et les conditions de projection. Ces dernières (débit, distance, intensité de source énergétique...) ont été choisies pour éviter en premier lieu toute carbonisation. Ce principe d'ancrage est le même dans les deux exemples déjà cités. Au sein d'un même bois, en fonction de la dureté locale, le processus d'ancrage sera plus ou moins marqué, faisant de l'adhérence une propriété dont la sensibilité pourra être exploitée: pour l'augmenter, par exemple, par un prétraitement d'adoucissement du substrat ou, plutôt dans le chapitre esthétique alors, pour mettre en évidence le veinage du bois qui correspond à des variations de dureté (**figures 6g et 6h**).

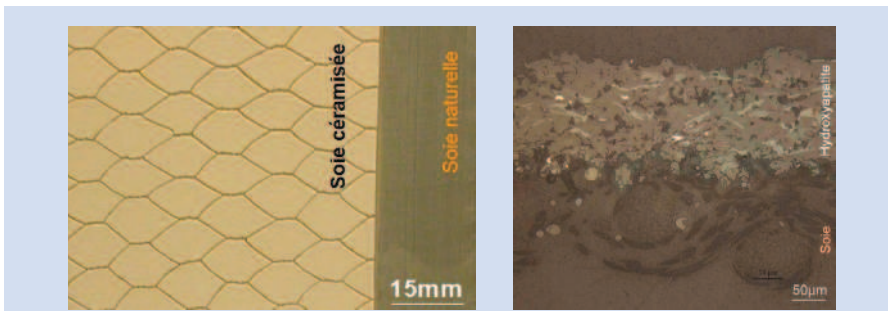


FIGURE 11: Soie naturelle de haute couture revêtue de céramique par projection thermique, a) Image optique en vue de dessus de la soie pour partie céramisée, b) Image au microscope électronique à balayage (MEB) de l'interface céramique (en clair) - soie sur coupe métallographique.

Les résultats obtenus ont montré que la projection thermique était bien un procédé suffisamment souple pour pouvoir être adapté à des bois aussi différents que le noyer (pour « Argo ») et le merisier (pour « Kapnos ») et à des métaux à points de fusion éloignés comme le cuivre (1 096 °C, pour « Argo ») ou les alliages Zn-Al (380-450 °C, pour « Kapnos »).

Cette souplesse de procédé et les caractéristiques de liaison par accrochage mécanique se retrouvent, portées à leur maximum, dans le cas du dépôt de céramique sur soie (**figure 11**), la projection thermique sur tissu n'ayant, en effet, jusqu'alors fait l'objet que de tentatives marginales^[10]. Ici, la céramique déposée, en l'occurrence l'hydroxyapatite, arrivait sous forme de gouttelettes (le liquide étant à une température supérieure à la température de fusion, soit 1 650 °C) sur la soie pour s'ancrer sur ses fibres (**figure 11b**).

Dans cet exemple, la fonctionnalité recherchée par le styliste est celle propre à la céramique pour que le tissu présente les qualités de l'os, l'hydroxyapatite étant une céramique à la composition proche de celle de l'os humain, faisant d'elle, d'ailleurs, le matériau maintenant classiquement utilisé pour les prothèses de hanche, par exemple. Le mannequin portant une robe ainsi « céramisée » n'aurait plus la peau sur les os (pour ne pas dire que la peau sur les os, bien souvent d'ailleurs) mais bien les os sur la peau. Pour pouvoir être portée, malgré la rigidité de la matière céramique (la céramique restant de la céramique), une certaine souplesse a dû être conférée au tissu grâce à une structure en écailles obtenue par projection thermique au travers d'un pochoir (-grille), suivant un concept de haute couture

dans la veine de celui des robes métalliques de Paco Rabanne dans son inventaire 66. Les dépôts présentés le furent à l'état brut de projection. Il reste que des post-traitements, chimiques, mécaniques voire thermiques (locaux pour ces derniers) comme il en est pratiqué souvent dans l'industrie, peuvent être appliqués au dépôt pour en modifier l'aspect et/ou les propriétés d'usage.

Les exemples montrés préalablement préfigurent la large gamme de matériaux susceptibles d'être associés par projection thermique pour répondre aux objectifs d'esthétisation et de fonctionnalisation superficielle voulus par les artistes, artisans d'art ou designers touchant à des secteurs très variés. Le champ est donc maintenant ouvert à de nombreux métiers d'art et applications comme le montre la partie « Perspectives » qui suit.

Perspectives

Au vu des premiers travaux dans le domaine rapportés dans ce qui précède, les tenants de la projection thermique devraient être satisfaits des belles perspectives offertes par ce procédé. Ils peuvent l'être d'autant plus que les équipements associés ne sont plus l'apanage des riches industriels des secteurs de la haute technologie où la projection est née et s'est trouvée trop longtemps confinée, sans raison toujours.

• Applications

Les résultats présentés dans cet article ont révélé de fortes perspectives de développement de la projection thermique en ébénisterie et pour l'ennoblement de matières souples comme les tissus et les peaux voire le papier. À ces applications quasiment non abordées jusqu'alors, s'ajoutent, sur la base de l'expérience acquise dans l'industrie, de multiples autres ressortant du domaine de l'art, de l'artisanat et du design, utilisant des

matériaux (tant pour le substrat que le dépôt) comme les plastiques, les verres et céramiques, sans oublier les métaux.

Un des intérêts de la projection thermique est aussi de pouvoir utiliser de la matière recyclée, pour le dépôt en particulier puisque la matière à projeter peut l'être sous forme de poudre, par exemple, obtenue à partir de rebuts de production ou de récupérations diverses. Ont été ou peuvent être envisagés, par exemple : du verre ou du cristal concassé, de la coquille d'animaux marins broyée, de la peau (cuir et autres dont leurs succédanés) déchiquetée, des copeaux divers (bois et/ou métal) divers, ces produits pouvant être utilisés bruts ou en mélange entre eux ou avec un liant.

Outre pour les arts plastiques et le design, la projection doit donc être attendue comme un outil d'avenir pour de nombreux métiers d'art comme l'ébénisterie, la cristallerie, l'art verrier et celui du vitrail, la reliure, la céramique fine, la passementerie, et la mode. Les travaux touchent à la création directe mais aussi à la restauration ; de même que dans l'industrie, la projection thermique est employée pour la production de pièces neuves comme pour leur réparation. L'analogie avec le vécu de la projection dans l'industrie traditionnelle (mécanique, électrique...), porte à souligner l'essor des applications 3D. Dans le domaine de l'art et des métiers d'art, il s'agit de faire croître la matière à partir de la surface d'un substrat, selon une forme donnée grâce au pilotage de la trajectoire de la buse de projection. Cette possibilité ouvre le champ à une création prolifique en artisanat et design sans oublier l'art urbain qui pourrait y trouver une voie de création grâce à l'emploi d'équipements de projection portatifs, maintenant disponibles.

• Atelier CPAMAL

Pour contribuer à la réalisation des riches perspectives annoncées ci-dessus, un atelier spécialisé a été créé en 2021 pour être au service des métiers d'art et du design, comme son nom l'indique, à savoir CPAMAL (Centre de Projection pour l'Art, les Métiers d'Art et le Luxe), www.cpamal.com (site en construction). Luxe est explicitement mentionné dans l'acronyme de l'atelier en question pour deux raisons. D'une part, l'industrie du luxe est l'une des plus intéressées par les innovations liées à l'emploi de la projection

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier chaleureusement l'Institut Carnot M.I.N.E.S/Filière CARATS, pour son soutien financier.

thermique, d'autre part, le mot luxe contient « lux », qui traduit l'éclairement d'une surface recevant un flux énergétique dans des conditions données, en une sorte de symbolique de la projection thermique que le luxe porte en lui donc.

L'initiative est originale en France et probablement aussi en Europe voire dans le monde, où, à la connaissance des auteurs, pareille entité n'existe pas encore. Il est, cependant, normal qu'elle naisse, tout d'abord, en France, pays des arts, des métiers d'art, de la tradition et du luxe. CPAMAL devrait en enrichir la carte, même s'il est su que, pour reprendre la célèbre formule de Korybski-Lévy devenue houelbéquienne, « la carte n'est pas le territoire ».

En plus de prestations de projection thermique, CPAMAL est prévu pour mener des développements pour les artistes, artisans et autres professionnels des domaines connexes, jusqu'à, éventuellement, ce qu'ils puissent se doter en propre, dans leur atelier, d'un équipement de projection. Ce dernier aura été conçu et dimensionné pour répondre à leurs besoins particuliers, CPAMAL n'intervenant plus alors qu'en soutien technique et pour la formation.

Conclusion

Dans le cadre des travaux présentés ici, de nombreux dépôts/revêtements conduisant à des effets superficiels originaux susceptibles d'intéresser les milieux de l'art, de l'artisanat et du design, et ce tant pour l'esthétique que pour les fonctions apportées, ont été développés par projection thermique. Ce développement est passé par l'étude de leur aspect et leurs propriétés. Il en a été déduit que la projection thermique pouvait être revendiquée comme un procédé d'avenir pour ces mêmes milieux grâce à son application maintenant possible à des matériaux qui lui étaient jusqu'alors étrangers. La projection thermique, pour employer le vocabulaire un peu pompeux de l'histoire de l'art, contribue ainsi à rendre les matériaux plus signifiants, comme le dit Romain Thomas^[11], en faisant intervenir les techniques les utilisant dans le contexte de la « Materialikonologie »^[12].

La projection thermique dans l'industrie, depuis des décennies, était devenue une tradition dans l'innovation. Elle semble se présenter maintenant comme une innovation dans la tradition, au service de la création, cependant, qui doit prévaloir. De nombreux métiers d'art devraient en bénéficier et les travaux associés se multiplier comme le détail en a été donné.

Bibliographie

- [1] P. FAUCHAIS, J. HEBERLEIN, M. BOULOS, "Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part", 1566 p., Springer, ISBN 978-0-387-68991-3, (2014).
- [2] P. WEI, Z. WEI, S. LI, C. TAN, J. DU, "Splat formation during plasma spraying for 8 mol% yttria-stabilized zirconia droplets impacting on stainless steel substrate", Applied Surface Science 321(2014)538-547.
- [3] SAINT JEAN, « L'APOCALYPSE », Joseph Foret ed., 1961
- [4] M. JEANDIN, F. BORIT, N. FABREGUE, G. ROLLAND, F. DELLORO, "An Artistic Approach to Thermal Spray, Materials Science Forum, 878(2016)15-28.
- [5] M. JEANDIN, F. BORIT, N. FABREGUE, G. ROLLAND, F. DELLORO, « Approche artistique de la projection thermique », Traitements & Matériaux 436(2015)25-32.
- [6] R. LE BAUD, « L'Ebéniste et les ingénieurs », Connaissance des Arts, n° 17/mai (2019), in : <https://www.connaissancedesarts.com/metiers-dart/steven-leprize%e2%80%89-lebeniste-et-les-ingenieurs-11120962/>
- [7] V. Lorelle, « Un berceau en bois et cuivre pour repousser les ondes magnétiques », M le Mag, <https://www.lemonde.fr/>, 4 oct. (2019).
- [8] P. LOMONACO, F. GASLAIN, F. DELLORO, M. JEANDIN, B. FAVINI, S. LEPRIZE, "Cold spray coatings of wood for cabinet making applications", Proc. of the Int. Thermal Spray Conf. and Exposition (ITSC '2019)), Yokohama, Japan, 26-29 May, 2019, F. Azarmi et al. eds., DVS Media GmbH, Düsseldorf, Germany, (2019)824-830.
- [9] M. NEJAD et al., "Thermal Spray Coating: A New Way of Protecting Wood", BioResources 12(2017)143-156.
- [10] 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.
- [11] R. THOMAS, « Les matériaux de l'art. Perspectives de la recherche actuelle en histoire de l'art moderne », in Circé, Revue en ligne, (2016)9p.
- [12] T. RAFF, "Die Sprache der Materialien. Anleitung zu einer ikonologie der Werkstoffe", Munich Deutscher Kunstverlag, 2008(1994).