

Procédé propre par jet d'azote liquide sous très hautes pressions

Projeter sur un revêtement un jet d'azote liquide sous 3 000 à 3 800 bar à grande vitesse et à -140°C est un procédé propre faisant l'objet d'un programme de recherche lancé par le CRITT TJFU. Ce travail de recherche a pour objet de modéliser et d'optimiser le jet d'azote liquide sous très hautes pressions en adéquation avec les caractéristiques physico-chimiques du substrat.

A. Tazibt,
Critt TJFU
P. Brenot, A. Bastien,
CM2T-LORUIS

Face à l'objectif de développer et transférer industriellement un nouveau procédé de préparation des pièces métalliques, le CRITT TJFU de Bar-le-Duc, spécialiste français des technologies jets fluides à hautes pressions et en particulier des procédés mettant en œuvre les écotecnologies Jet fluide pour la préparation des surfaces, a identifié aux USA dès 2005, au sein de la PME Nitrocision, un générateur utilisant de l'azote liquide sous très haute pression (jusqu'à 3 800 bar). Conscient du potentiel de la technologie nitrogénique liquide sous THP ainsi que la valeur ajoutée attendue pour les industries françaises, le CRITT TJFU, en s'appuyant sur ses partenaires de recherche et industriels dont CM2T Ingénierie, développe dans le cadre du projet une plate-forme expérimentale unique en Europe autour de la technologie américaine Nitrojet.

Si l'innovation du procédé n'est pas à démontrer, son caractère émergent pose de nombreux problèmes : méconnaissance, à la fois, du comportement thermodynamique (fluidique) du jet d'azote hypercritique et des mécanismes d'interaction avec le dépôt (mécanique des solides, métallurgie de surface). Dans ce contexte, le CRITT TJFU a lancé un programme de recherche (JAZOLTHOP) permettant de modéliser et d'optimiser le jet d'azote liquide sous très hautes pressions en adéquation avec les caractéristiques physico-chimiques du substrat. Ce travail engagé depuis un an dans le cadre du pôle de compétitivité MIPI (Lorraine) bénéficie du label ADEME grâce au programme PRECODD-2006.

Le procédé consiste à projeter sur le revêtement un jet d'azote liquide sous 3 000 à 3 800 bar à grande vitesse (500-800m/s) et à -140°C, sans générer de déchets additionnels par recyclage naturel du gaz

“neutre” dans l'atmosphère. Le travail de recherche consiste à développer des modèles analytiques et numériques capables de décrire et d'optimiser, l'écoulement du jet bi-phasique supercritique avec changement de phase à l'intérieur de la buse et à l'air libre et le processus d'enlèvement de matière des couches constitutives du revêtement. Ces modèles sont corrélés et validés par des tests de décapage sur échantillons représentatifs d'applications réelles, avec une installation nitrogénique industrielle très haute pression.

L'objectif est de contrôler les phénomènes caractéristiques du procédé afin d'améliorer ses performances, ce qui minimisera l'énergie consommée par le process, notamment pour la production de l'azote liquide. Le procédé présente des avantages environnementaux et techniques qui rendent ses utilisations pertinentes pour un marché étendu où les systèmes chimiques, jet d'eau et sablage sont peu efficaces, contraignants ou non autorisés. Le marché porteur est constitué des industries de métallurgie, pétrochimie, aéronautique, automobile, nucléaire, naval. Les applications de préparation concernées sont amonts aux traitements de surface, l'assemblage multimatériaux, les revêtements époxy et de peintures en milieux sensibles et inflammables. Le marché couvre aussi le démantèlement pour le recyclage dans le nucléaire, l'automobile, le désarmement sans risque de détonation.

La réglementation et les normes en vigueur sont celles relatives à la qualité de préparation de surfaces pour les applications visées, le stockage de l'azote et la protection des opérateurs dans les utilisations de fluides cryogéniques (voir préconisation INRS relative aux risques liés au travail en froid).

L'enjeu du projet est à la fois environnemental, scientifique, technologique et concurrentiel, tels que :

1. Minimiser l'énergie consommée, du fait de l'utilisation de l'azote liquide, par l'optimisation du procédé, et par le développement d'outils de décapage plus performants.
2. Réduire la pollution par la suppression, à la source, des déchets additionnels grâce au recyclage naturel de l'azote dans l'air. Ces déchets sont traditionnellement générés par les systèmes chimiques, mécaniques et les systèmes utilisant le sablage et le jet d'eau.
3. Réaliser des gains de productivité par la suppression d'opérations sans valeur ajoutée : rinçage, traitement d'effluents générés par les systèmes traditionnels qui sont parfois peu efficaces, contraignants et non autorisés.
4. Supprimer les risques chimiques et ceux liés aux projections étincelantes.
5. Acquérir une notoriété dans un domaine scientifique et technologique non encore abordé à l'échelle internationale et promouvoir le transfert de technologie en entreprises.

Situation actuelle du procédé par rapport aux autres technologies

Les procédés actuels de préparation de surface, sont :

- Les jets fluides tels que le jet d'eau (3 800 bar), le jet de CO₂ (-78°C, 6-10 bar) et le sablage.
- Les systèmes thermiques.
- Les systèmes chimiques tels que l'utilisation de bains acides ou de solvants.
- Les systèmes mécaniques.
- Le CO₂ supercritique.

Ces techniques de préparation ont pour inconvénient de créer des défauts à l'interface et de modifier les caractéristiques des substrats. Cela peut être dommageable lorsque le nettoyage est suivi d'un traitement de surface (dépôt électrolytique, projection thermique) ou s'il précède une opération d'assemblage (soudage, brasage). Avec la technique de projection cold spray, il est par exemple difficile d'obtenir un niveau d'adhésion satisfaisant du dépôt (de l'ordre de 100 MPa) si des inclusions d'oxydes liées au sablage polluent l'interface.

Dans le cas du brasage « fort » tel qu'il est pratiqué au CM2T-MATBRAZ, la qualité des liai-

sons métalliques est largement conditionnée par la tension de surface entre la brasure et les métaux. La présence de pollutions (graisses, oxydes...) empêche la montée capillaire des alliages de brasage et rend l'assemblage inutilisable. En dépit des développements scientifiques dont bénéficient les technologies conventionnelles de nettoyages, des limitations diverses ont été relevées par les spécialistes concernant notamment leur efficacité, leurs rejets polluants et leur dangerosité pour l'opérateur. Les travaux existants sur le même thème sont ceux conduits par la société Nitrocision qui a mis au point le concept en 2001 et déposé deux brevets. L'un revendique la description des éléments techniques de la source de génération du jet d'azote, l'autre revendique les éléments de description de la buse rotative générant un jet de diamètre 25mm à l'impact. Bien que la méthodologie de contrôle du procédé reste empirique et non optimisée, l'entreprise a reçu le prix NASA pour les avancées obtenues dans le décapage de l'isolant thermique des Boosters de la Navette spatiale, un matériau à très hautes caractéristiques thermomécaniques.

Synthèse des principales phases de R&D

Les travaux programmés sur trois années sont les suivants :

- Comprendre le comportement du jet d'azote liquide supercritique avec changement de phase, par la modélisation analytique et numérique corrélée expérimentalement.
- Décrire par les lois de conservation les équations du mouvement non linéaires du fluide bi-phasique (liquide-gaz) et déterminer l'énergie du jet à la sortie de la buse.
- Déterminer les paramètres influents du jet fluide supercritique.
- Comprendre et expliquer par les lois physiques et la visualisation du processus d'interaction du jet avec la matière à enlever. Etablir les modèles d'interaction.
- Visualiser le processus d'interaction jet - matériau.
- Définir les mécanismes physiques en jeu lors de ce processus et établir les modèles d'interaction.
- Identifier les paramètres critiques et leurs influences sur l'enlèvement de matière.
- Caractériser le substrat sous l'action cryogénique et mécanique du jet.
- Etudier les états de surface du point de vue métallurgique et tribologique.

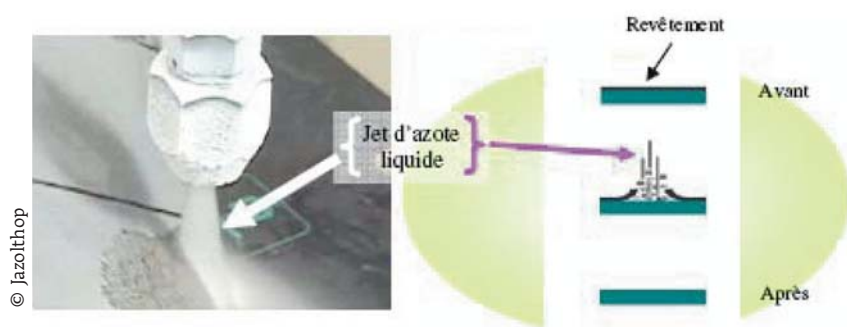


Figure 1

*Principe du procédé
nitrogénique hypercritique
sous très haute pression.*

La principale problématique à résoudre concerne le caractère supercritique, instable et à changement de phase du fluide considéré. En effet, l'efficacité du procédé est fortement influencée par la prépondérance de la phase liquide en présence au point d'impact.

L'étude de l'interaction du jet supersonique (l'outil mécanique équivalent) et du revêtement a pour objectif de déterminer les mécanismes d'enlèvement de matière : mécanisme d'érosion, d'endommagement du matériau à l'impact, de décollement ou de cisaillement du revêtement. Un mécanisme d'érosion pourrait être le micro-cisaillement du revêtement par l'impact de l'outil équivalent. Le revêtement est fragilisé par le jet d'azote à -140°C . Sa contraction thermo-élastique entraîne une micro-fissuration qui pourrait être à l'origine d'un second mécanisme. En prenant appui sur le substrat résistant, l'outil équivalent agit au niveau de l'interface et décolle le revêtement par cisaillement et extension de la fissure ou par écartement des lèvres de la fissure. Les modèles envisagés pour rendre compte des mécanismes d'enlèvement de matière devront permettre de les simuler et de les contrôler en vue de leur optimisation.

Ces mécanismes d'enlèvement de matière peuvent intervenir à différents degrés et selon différentes modalités, selon la nature du jet au contact (liquide, gazeux) et selon la nature du substrat et de la couche de matière à enlever. Des visualisations du processus par caméra rapide sur des échantillons idéalisés de différentes natures seront effectuées pour mettre en évidence et comprendre ces mécanismes dans plusieurs cas typiques.

Applications industrielles visées

La technologie proposée est en adéquation avec les besoins des marchés des applications qui intègrent les opérations de préparation de surface pour le traitement, l'assemblage multi-matériaux, les revêtements spéciaux (peinture, résine époxy), la réparation d'outillages, le décochage (fonderie). Ces opérations sont réalisées sans génération de la pollution.

Les applications visées sont :

- Fonderie : décochage de carapaces céramiques, nettoyage de moules...
- Préparation de surfaces pour assemblages.
- Décapage de peinture et de revêtement époxy (coque de bateaux, cuves à pétrole...).
- Mines : décapage et réparation d'échangeurs thermiques.
- Nucléaire : enlèvement de couches contaminantes.
- Aéronautique, aérospatial et automobile : traitement des matériaux à très hautes caractéristiques mécaniques, ébavurage.



Figure 2

*Action du jet d'azote hypercritique
sur un dépôt d'oxyde.*

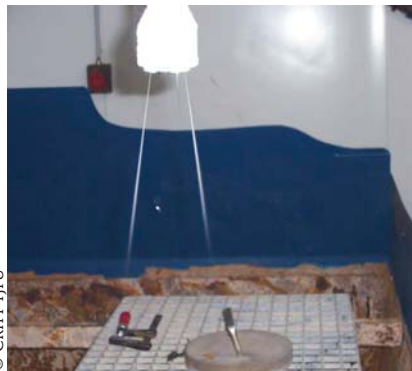


Figure 3

*Le jet d'azote hypercritique
sous 3500 bar.*



Figure 4

*Mise en œuvre automatisée du procédé
(robot 6 axes polyarticulé).*

Figure 5

*Application en Fonderie
(décochage sec de carapace
céramique sur noyau).*



© NitroCision

Les adéquations aux autres besoins du marché :

- Démantèlement multimatériaux : séparation des matériaux organiques des matériaux métalliques (pneus, pièces plastiques métallisées) sans modifications des propriétés des matériaux, démantèlement des ogives sans détonation...

- Décontamination : enlèvement des couches radioactives des pièces métalliques pour la récupération sélective des ensembles contaminés.

Enfin, le marché potentiel de remplacement est formé par les applications où les systèmes actuels sont peu efficaces, contraignants ou non autorisés.

Remerciements

Le programme JAZOLTHOP (Procédé Propre et Innovant de Préparation de Surface par jet d'azote liquide sous très hautes pressions) coordonné par A. TAZIBT (CRITT TJFU Bar-le-Duc 55) a été, labellisé par le pôle de compétitivité MIP1 et a obtenu le soutien de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), volet PRECODD Ecotechnologies 2006, avec les cofinancements de la Région Lorraine, les Conseils Généraux de Meurthe & Moselle (54), Meuse (55) et Moselle (57).

Nous tenons à remercier les partenaires du programme, à savoir : LPMM, Université de Metz (57), LEMTA, UHP Nancy (54), les entreprises TECHNILOR (Hagondange - 57), PROCER (Saint-Louis - 68) et NITROCISION (Idaho Falls - USA), ainsi que le CRT : CM2T - LORUIS (Longwy - 54).