

## DIAGNOSTIC OPTIQUE DANS LE PROCÉDE DE PROJECTION THERMIQUE

La projection thermique est le domaine de l'ingénierie des matériaux qui connaît une croissance rapide grâce à ses produits hautement performants, qui trouvent leur application dans plus de 35 secteurs de l'industrie moderne. La gamme de matériaux de projection innovants et de différents substrats s'élargissant sans cesse ouvrira à la projection thermique de nouveaux secteurs d'applications, si les strictes exigences pour la stabilité, la reproductibilité et l'efficacité du procédé sont satisfaites.

Un nouveau système diagnostique a été développé pour le contrôle en temps réel des diamètres, des vitesses et des températures des particules en vol. Le système est basé sur le capteur d'image CCD non intensifié assurant une haute sensibilité dans la région spectrale proche de l'infrarouge. Un logiciel original pour le calibrage, le traitement d'images de jets de poudre et l'analyse statistique des paramètres de particules est la partie essentielle de ce système.

Le système de diagnostic a été testé dans des conditions industrielles réelles en vue de trois modes de visualisation: (a) visualisation du jet (image réelle de la structure du jet et son évolution, en appliquant les différentes échelles spatiales et temporelles); (b) interaction particule-substrat (adhérence de la particule, éclaboussement de la particule), visualisation de la zone proche du substrat pour contrôler le rebond de la poudre; (c) dynamique de croissance du revêtement, y compris des évaluations quantitatives de son épaisseur en temps réel. Des expériences ont été réalisées pour un éventail d'équipement industriel et pour les géométries différentes des pièces à pulvériser (cylindrique, plate, etc.). Des combinaisons typiques de poudre ont été étudiés pour les revêtements thermiques ( $ZrO_2$  et  $Al_2O_3$ ) et anti-usure (WC-Co, Mo, CuSn, etc.).

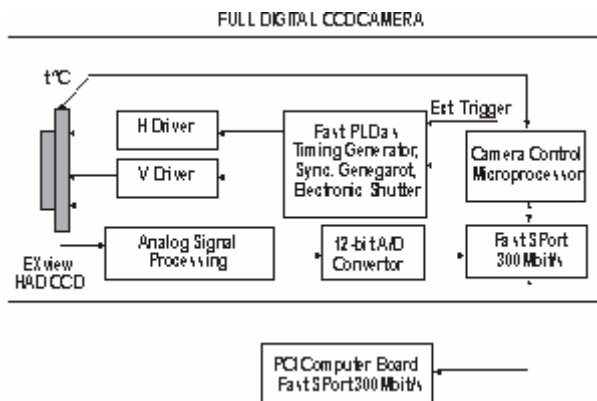
Le traitement statistique des données recueillies sur la taille, la vitesse et la température des particules a été effectué pour déterminer l'influence des variables du procédé (courant d'arc, débit des gaz plasmagènes, débit de l'oxygène et du fioul, débit de la poudre, débit du gaz porteur, distance de projection, vitesse de dépôt, etc.) sur les paramètres du jet de poudre.

Le flux de particules est visualisé en temps réel, ce qui peut être utilisé pour contrôler sa position, sa direction, sa densité et son homogénéité. Visée à une zone proche du substrat, la caméra distingue facilement les particules rebondies de celles déposées régulièrement, ce qui permet d'évaluer les pertes de poudre. Le système diagnostique est doté d'une haute capacité de détection: la limite de détection de particules est de  $2 \mu m$ , la gamme de températures détectable est de  $1200$  à  $3500$  °C et la gamme de vitesses est de  $1$  m/s à  $900$  m/s. Les performances de la caméra CCD ont été comparées à celle du système commercial DPV 2000.

### Design du système de diagnostic: matériel

Le module de la caméra comporte un nombre de composants électroniques (Fig.13), y compris un obturateur (la gamme de temps d'exposition est de  $1 \mu s$  à  $1$  s) et une carte de traitement de signal 12 bits. L'information de chaque pixel est transmise à l'ordinateur sous forme numérique par l'interface PCI, permettant une capacité de lecture jusqu'à 5 images par seconde. Une matrice logique programmable (vitesse de  $4ns$ ) est utilisée pour générer les signaux numériques permettant de contrôler l'obturateur et de lire les données à une vitesse de  $30$  MHz. La numérisation de chaque pixel avec une résolution de 12 bits est réalisée pour effectuer le transfert complet de la trame de la matrice de CCD et assurer une mesure précise des paramètres énergétiques des particules chaudes. Le débit de transfert de données du port rapide est de  $300$  Mbit/s.

Une vue générale du design du système avec sa boîte de protection est présentée sur la Fig.14.



**Fig. 13.** Diagramme du module de la caméra avec des cartes électroniques.

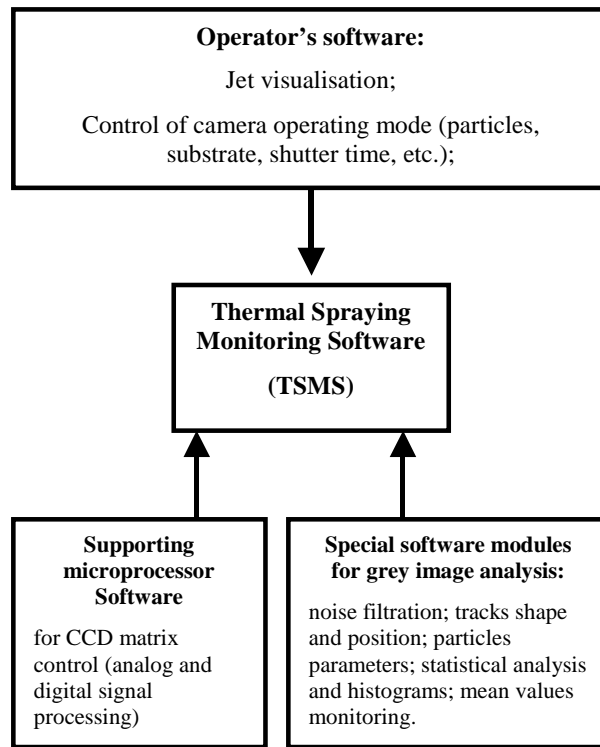


**Fig. 14.** Vue générale du nouveau système de diagnostic.

Le changement des filtres à bande étroite pour une meilleure adaptation aux différentes technologies de projection peut changer la gamme spectrale. Une base de données sur les propriétés optiques des matériaux en poudre permet une véritable restauration de la température.

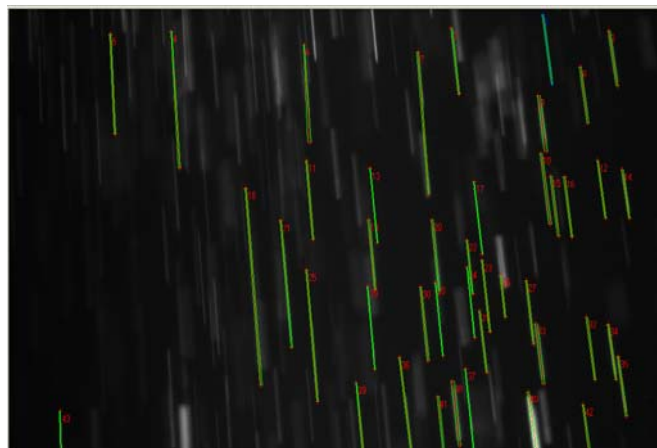
### Design du système de diagnostic: logiciel

Le logiciel comporte deux fenêtres incorporées pour: (1) histogrammes de vitesse, de température, et de diamètre de particules, (2) contrôle en temps réel des valeurs moyennes du jet de poudre.



**Fig. 15.** Principaux éléments du logiciel pour le contrôle du procédé de projection thermique.

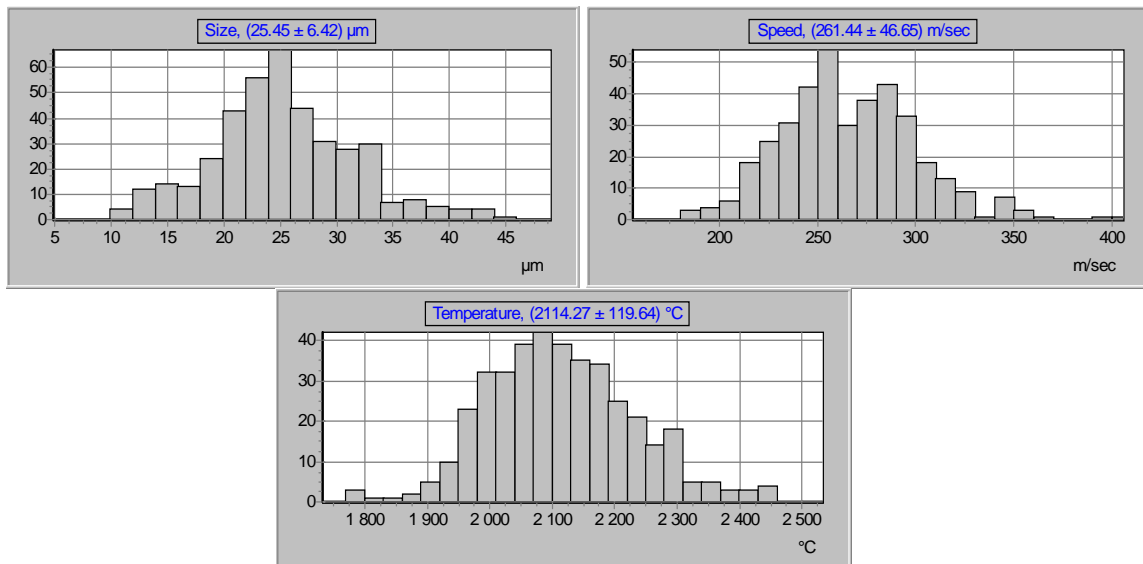
Les particules en vol sont présentées sur l'image comme les traits légers de différentes largeurs, longueurs et intensités (Fig.16). La longueur d'un trait est proportionnelle au temps d'exposition. La largeur est proportionnelle au diamètre de la particule. Un algorithme spécial (dénommé «la résolution sub-pixel» et appliqué pour le traitement d'image grise) en combinaison avec un procédé d'élimination de la déformation optique et de l'irrégularité de la matrice CCD permettent d'atteindre une résolutions de 2  $\mu\text{m}$  dans la mesure du diamètre de particules.



**Fig. 16.** Moniteur d'opérateur utilisé pour visualiser le jet.

### Résultats obtenus en utilisant le nouveau système de diagnostic

Le système diagnostique développé a été testé en vue d'application dans les différentes technologies industrielles: projection plasma, HVOF, projection par flamme (Flame Spraying) et Wire Spraying.



**Fig. 17.** Histogrammes de vitesse, de température, et de diamètre de particules dans les conditions normales de projection thermique. Projection de poudre de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (taille de particules -53+5 μm) par le système Plasma Technik.

Un large éventail de poudres métalliques et d'équipements de projection bien connus (Plasma Technik, Sulzer Metco, TAFa, CDS, etc.) a été utilisé dans les expériences. Les données de la nouvelle caméra CCD sur le procédé de projection thermique en utilisant le système TAFa ont été employées dans les essais. La projection de la poudre Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (taille de particules -45+22μm) a été analysée. La caméra CCD a été visée au centre du jet de plasma à une distance de projection typique de la buse du canon plasma. Une image typique des histogrammes de vitesse, de température, et de diamètre de particules dans les conditions normales de projection thermique est présentée sur la Fig.17.