

# Revêtements tribologiques PVD et CVD pour applications automobiles : vision industrielle du DLC comparé à de nouvelles solutions

Dr Astrid Gies, project manager R&D Automotive, Oerlikon Surface Solutions AG / Oerlikon Balzers

Les contraintes inhérentes aux constructeurs automobiles les poussent à trouver des solutions pour réduire le frottement et l'usure des composants moteur. Les procédés de traitements de surfaces doivent évoluer pour s'adapter aux contraintes de densité de puissance et d'efficacité énergétique.

Depuis plusieurs années, des revêtements à base de carbone amorphe (plus généralement appelés DLC pour Diamond Like Carbon) sont utilisés par l'industrie automobile afin de protéger les différents composants mécaniques dans les contacts tribologiques fortement sollicités<sup>[1, 2]</sup>. Il s'agit notamment des composants moteurs comme les axes de pistons ou les poussoirs ou alors des pièces d'injection directe pour moteur diesel ou, plus récemment, aussi pour moteur essence.

Cette tendance s'accroît encore plus de nos jours par des directives et des législations toujours plus strictes qui visent à réduire la consommation et l'émission aussi bien des voitures particulières que des poids lourds. C'est pourquoi, les constructeurs automobiles, contraints d'augmenter l'efficacité de leurs moteurs à combustion, misent entre autres sur la réduction de la cylindrée de ces derniers tout en gardant le même niveau de puissance. L'augmentation conséquente de la densité de puissance dans le moteur et par conséquent des sollicitations mécaniques et thermiques dans les contacts tribologiques nécessite une protection des différents composants contre l'usure dans un premier temps, accompagnée, idéalement, d'une réduction du frottement dans le contact. C'est ainsi que les procédés de traitements de surfaces jouent un rôle de plus en plus important et qu'ils doivent évoluer pour s'adapter à ses contraintes de densité de puissance et d'efficacité énergétique.

## Le système tribologique

Lorsqu'un revêtement est appliqué dans un système tribologique, il ne suffit pas de se concentrer sur le matériau à revêtir et le revêtement à déposer. Bien au contraire, si l'on veut explorer pleinement tous les bénéfices d'un revêtement il faut impérativement comprendre le système tribologique qui est constitué dans un premier temps du substrat à revêtir (métallurgie, état de surface...) du revêtement lui-même, de la pièce antagoniste ainsi que, si présent, du lubrifiant. Un bon revêtement est supposé protéger le substrat revêtu ainsi que la pièce antagoniste de l'usure et de réduire aussi le frottement dans le contact, et ceci sur un large domaine de conditions tribologiques. Ces dernières sont

décrites par la courbe de Stribeck (figure 1) qui montre l'évolution du coefficient de frottement en fonction notamment de la vitesse relative des deux surfaces en contact lubrifié et qui permet une classification en trois différents régimes de lubrification :

- limite : les deux surfaces sont en plein contact puisque le film de lubrifiant n'est pas encore assez épais pour les séparer, le coefficient de frottement est donc élevé ;
- mixte : le film de lubrifiant commence à séparer les deux surfaces, mais les aspérités restent encore en contact ; le coefficient de frottement commence à baisser ;
- hydrodynamique : les deux surfaces sont complètement séparées par le film de lubrifiant ; le coefficient de frottement est bas et déterminé par le frottement interne du lubrifiant.

L'évolution de la courbe de Stribeck peut être influencée par différents paramètres. Le point de transition entre lubrification mixte

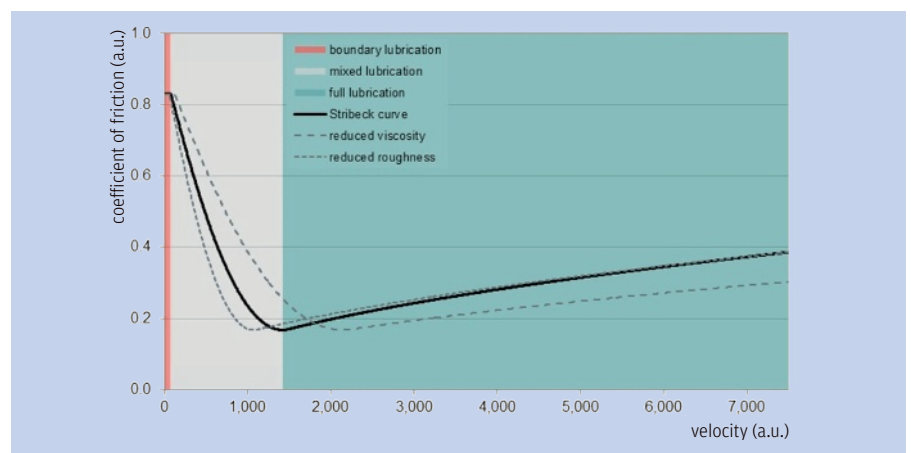


FIGURE 1 : La courbe de Stribeck avec les trois régimes de lubrification (limite, mixte et hydrodynamique).

et hydrodynamique peut être décalé vers des vitesses plus basses en réduisant la rugosité des deux contacts, alors qu'une réduction de la viscosité du lubrifiant le décale vers des vitesses plus élevées, accompagnée d'un abaissement du frottement dans le régime hydrodynamique.

Il est généralement admis que l'application d'un revêtement a une influence directe sur le contact tribologique lorsque les deux surfaces sont encore en contact, c'est-à-dire dans la partie gauche de la courbe de Stribeck. Néanmoins, différentes études récentes [3] et d'autres en cours montrent également une influence du revêtement (et plus

particulièrement des couches à base de carbone amorphe) sur les contacts tribologiques en régime hydrodynamique, lorsque les deux surfaces sont complètement séparées par le film lubrifiant. En collaboration avec l'institut IFAS de l'Université d'Aix-la-Chapelle en Allemagne, nous avons entrepris une étude de l'influence de différents revêtements sur le coefficient de frottement en régime hydrodynamique [4]. Pour cela, un tribomètre bi-disque a été utilisé permettant d'analyser le coefficient de frottement en fonction de différents paramètres comme la vitesse relative des deux surfaces en contact, de la charge appliquée et donc de la pression de contact

et du type et de la température du lubrifiant utilisé (figure 2).

Pour ce test, les deux surfaces en contact étaient revêtues. Nous avons ainsi comparé le contact non revêtu avec différents dépôts : DLC (couche à base de carbone amorphe hydrogéné a-C:H, commercialisé par Oerlikon Balzers sous le nom de Balinit DLC Star), MoN (couche à base de nitrure de molybdène, commercialisé par Oerlikon Balzers sous le nom de Balifor M) et CrC/a-C:H (couche à base de carbone amorphe hydrogéné, fortement dopé en chrome). Une huile automobile standard additivée a été utilisée comme lubrifiant. La figure 3 montre les coefficients de frottement obtenus pour les trois dépôts testés en comparaison avec le contact non revêtu en fonction de la vitesse de rotation.

Comme attendu, le DLC donne un certain bénéfice en lubrification limite et mixte, lorsque les deux surfaces sont, du moins partiellement, en contact. Contre toute attente du fait de l'absence de contact physique entre les surfaces solides, ce revêtement conduit également à une diminution du coefficient de frottement en régime hydrodynamique d'environ 40 % par rapport aux surfaces non revêtues. Le même effet est observé pour le CrC/a-C:H, qui est une couche développée afin d'optimiser l'interaction avec différents additifs de l'huile et de renforcer la résistance des DLC purs vis-à-vis des forts taux de MoDTC. En plus de réduire le coefficient de frottement en lubrification hydrodynamique, ce revêtement conduit à un décalage très prononcé du point de transition entre régimes mixte et hydrodynamique vers la gauche de la courbe de Stribeck, c'est-à-dire vers des vitesses relatives plus faibles. Contrairement à ces deux dépôts à base de carbone amorphe DLC, le MoN (Nitrure de Molybdène) ne montre dans ce test aucun effet en régime hydrodynamique.

Plusieurs hypothèses comme une amélioration de la mouillabilité des surfaces par le DLC ou encore un meilleur glissement du lubrifiant sur les surfaces revêtues sont actuellement discutées par les scientifiques pour expliquer l'influence des revêtements en carbone amorphe sur le contact tribologique en lubrification hydrodynamique. Une autre explication toute aussi envisageable consiste à prendre en compte l'influence de la conductivité thermique qui est beaucoup plus faible pour le DLC (~1,4 W/mK) que pour l'acier (~42,6 W/mK dans notre cas) voire pour une surface revêtue d'un nitrure tel que le Balifor M (~7,0 W/mK).

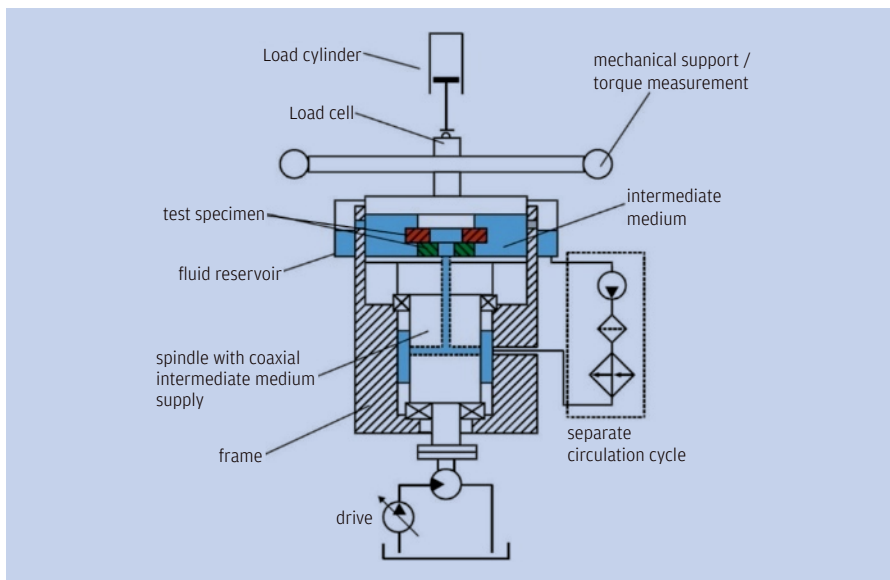


FIGURE 2 : Schéma du tribomètre bi-disque (IFAS, RWTH Aix-la-Chapelle, Allemagne) utilisé pour investiguer l'influence de différents dépôts sur la courbe de Stribeck.

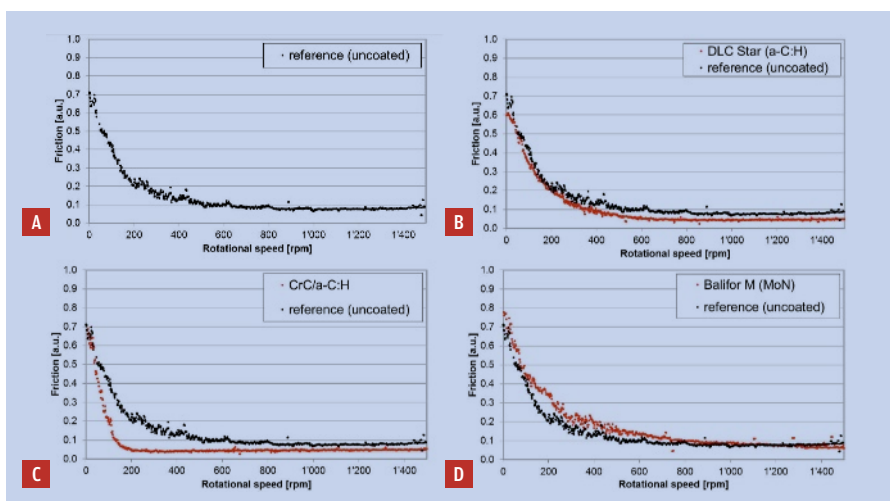


FIGURE 3 : Courbes de Stribeck obtenues pour les différents dépôts testés sur le tribomètre bi-disque a) contact non-revêtu, b) Balinit DLC Star (a-C:H), c) CrC/a-C:H, d) Balifor M (MoN).

La température générée dans le contact tribologique est généralement évacuée par les deux surfaces en contact vers l'intérieur des deux pièces. Cette évacuation de température fonctionne d'autant mieux lorsque la conductivité thermique des deux surfaces est élevée. Lorsque l'on rajoute un dépôt de DLC quasiment isolant thermiquement, ce dernier agit comme une barrière thermique. La chaleur tend à être confinée dans le contact tribologique (« flash température ») au lieu d'être évacuée vers la partie massive des deux pièces, conduisant à une réduction de la viscosité du lubrifiant qui ensuite se traduit par un coefficient de frottement plus faible en régime hydrodynamique, dans lequel, rappelons-le, le coefficient de frottement est en grande partie déterminé par le cisaillement interne du film lubrifiant [5-8]. Le concept du confinement de la température dans le contact a été proposé pour la première fois par H. Blok [9, 10]. Néanmoins, pour l'instant il n'y a aucune affirmation possible pour définir le mécanisme à l'origine de la réduction de frottement en régime EHL pour des surfaces revêtues de ces

couches minces PVD/CVD. On peut tout aussi bien imaginer une superposition de plusieurs effets. Différentes investigations couramment entreprises par des scientifiques en collaboration avec des industriels visent à élucider et optimiser l'influence d'un revêtement sur le contact tribologique lors de la lubrification hydrodynamique et donc ainsi sur tous les domaines de la courbe de Stribeck.

### Dégradation des revêtements à base de carbone amorphe

La plupart des contacts tribologiques notamment dans la distribution d'un moteur thermique d'un véhicule sont lubrifiés. Néanmoins, l'application de pressions de contact toujours plus élevées et l'utilisation croissante de lubrifiants à faible viscosité peuvent conduire à des conditions dans lesquelles le contact tribologique se retrouve en manque de lubrification et dans lesquelles les deux surfaces sont donc en contact direct. Ceci peut entraîner une très forte et rapide augmentation de la température dans la zone de contact qui est ensuite, à beaucoup plus faible vitesse, évacuée vers

la partie massive des deux pièces. La température dans la zone de contact (« flash température ») peut ainsi atteindre des valeurs très élevées de plusieurs centaines de degrés et ainsi directement modifier les propriétés mécaniques et métallurgiques des deux substrats en frottement. Dans le cas des revêtements à base de carbone amorphe, cette température de contact élevée peut aller jusqu'à la dégradation thermique du dépôt par graphitisation [4, 11]. Il est généralement admis que le DLC et plus particulièrement les dépôts hydrogénés a-C:H sont thermiquement stables jusqu'à environ 350 °C (en continu) et commencent à se graphitiser à des températures au-delà de cette température limite. Néanmoins, à l'échelle d'un contact tribologique, la graphitisation du DLC ne dépend non pas uniquement de la température, mais aussi de la pression. La graphitisation du DLC, si la pression de contact est trop élevée, peut ainsi commencer à des températures bien inférieures à 350 °C, ce qui est en général le cas dans les contacts tribologiques. Les dépôts a-C:H sont caractérisés par la coexistence de deux types de liaisons chimiques du carbone : les liaisons sp<sup>3</sup>



**FIGURE 4 :** Axes de pistons revêtus en Balinit DLC Star après test moteur. Dans les zones les plus sollicitées thermiquement et mécaniquement (proches du piston et arêtes de la bielle), la couche a-C:H est localement usée. La performance antigrippage du revêtement reste toute même assurée par les sous-couches du revêtement.

(proche du diamant) et les liaisons sp<sup>2</sup> (caractéristiques du graphite). La graphitisation du DLC sous l'influence de la température et de la pression se traduit par une conversion prononcée des liaisons sp<sup>3</sup> (de type C-C diamant) en liaison C-C hybridées sp<sup>2</sup> ce qui conduit à une perte des propriétés mécaniques du dépôt. Cette graphitisation peut être une limite à l'utilisation du DLC sous des couples températures/pression de contact trop élevés, mais en même temps, ce phénomène peut être vu sous l'angle d'une propriété avantageuse du DLC. En effet, il facilite la phase de rodage à l'échelle micro-métrique en réduisant les pics de rugosité où siègent les couples température/pression élevés. Cet effet de « polissage/rodage » sur la surface revêtue contribue à réduire le coefficient de frottement et constitue un des points forts des couches DLC. Cette augmentation très locale de l'usure du DLC contribue aussi à la formation d'une couche de transfert de carbone sur la surface antagoniste [12-16].

Prenons comme exemple les axes de pistons utilisés dans les moteurs thermiques afin de solidariser la bielle au piston. Dans les nouveaux moteurs à faible cylindrée et haute densité de puissance (« down-sizing »), la pression de contact sur l'axe de piston est suffisamment sévère pour engendrer un grippage entre ce dernier et son antagoniste. Afin d'éviter le grippage, un dépôt de DLC est souvent appliqué sur l'axe de piston. Ce type de revêtement peut de nos jours montrer des limites sur des moteurs série de plus en plus sollicités en se dégradant sous l'influence de la température de contact élevée. Ceci est particulièrement vrai dans les zones avec peu de lubrification (proche du piston) ou soumises aux pressions de contact les plus élevées (arêtes de la bielle) (**figure 4**).

Pour certains « designs » moteurs, la couche de DLC est très localement graphitisée et donc usée. Le dépôt Balinit DLC Star proposé par Oerlikon Balzers est alors optimisé pour ce type d'évolution localisée du système tribologique. En effet, il comprend en plus de la couche de fonction a-C:H plusieurs sous-couches (Cr/CrN/Cr-C) qui assurent, outre l'adhérence et le support mécanique de la couche a-C:H, la protection usure/grippage du substrat en acier

### Interaction avec les additifs d'huile

Afin de protéger les composants mécaniques de l'usure et de réduire le frottement, l'application d'un revêtement sur au moins une des

deux surfaces en contact est une voie envisageable. De l'autre côté, beaucoup de développements sont actuellement entrepris pour améliorer les huiles à travers les différents additifs. Les deux solutions peuvent être en compétition, et donc aujourd'hui, l'optimisation du système tribologique se mène à travers le revêtement et le lubrifiant. Le DLC montre une bonne performance tribologique à sec et en régime lubrifié. Néanmoins, certains additifs d'huile très performants sur les alliages métalliques couramment utilisés, démontrent une influence négative sur le DLC.

En particulier, le MoDTC (pour « Molybdenum-Dithio-Carbamate ») est reconnu pour avoir des effets néfastes sur les dépôts à base de carbone amorphe hydrogéné purs [17-20]. Ceci reste également vrai pour les DLC faiblement dopés. Cet additif MoDTC a été développé initialement pour réduire le frottement (« friction modifier ») en contact avec des surfaces métalliques type acier ; il est par exemple utilisé dans des concentrations élevées sur le marché asiatique. En contact avec une surface revêtue en DLC, le MoDTC à forte concentration dans l'huile conduit à une usure rapide de la couche à base de carbone. Ce phénomène se trouve exacerbé dans les zones de fortes charges et en lubrification mixte.

Afin d'optimiser l'interaction MoDTC-DLC, nous avons développé un DLC fortement dopé en chrome, le CrC/a-C:H [21]. Ce dépôt est dit fortement dopé car contenant environ 50 at% de chrome. Cette forte concentration en atomes métalliques favorise les réactions tribochimiques du MoDTC avec le métal et démontre une excellente performance en termes de frottement et résistance à l'usure de ce DLC en comparaison d'un DLC non-dopé (ou faiblement dopé) en présence de MoDTC.

D'autres types de matériaux, comme les nitrures de chrome ou de molybdène sont également très intéressants pour tirer le maximum de profit de l'interaction entre le revêtement et ce type de lubrifiant.

### Revêtements alternatifs aux dépôts de carbone amorphes : MoN Description de l'approche

Dans l'industrie automobile, les revêtements DLC sont aujourd'hui (et le seront certainement encore dans un avenir proche) le premier « réflexe logique » pour résoudre bon nombre des problèmes tribologiques. Néanmoins, l'actuelle tendance ou plutôt « obligation » des

constructeurs à augmenter l'efficacité des moteurs thermiques conduit à des systèmes tribologiques de plus en plus sévères et ainsi à une toujours plus forte sollicitation des pièces mécaniques. C'est pourquoi déjà aujourd'hui les dépôts de DLC ne peuvent plus toujours satisfaire entièrement les exigences de certaines nouvelles applications ou évolutions de dessin de composants. Ceci est particulièrement vrai si la stabilité thermique est une limite. La modification du DLC en le dopant modérément avec certains éléments comme le silicium ou l'oxygène ou encore l'utilisation d'un DLC non-hydrogéné (a-C ou ta-C) peuvent remédier au problème, mais que dans une certaine limite.

Une autre approche consiste à évaluer les revêtements à base d'oxydes ou de nitrures. L'utilisation d'oxydes dans des systèmes tribologiques se retrouve encore dans un stade peu avancé et convient surtout à des applications à très haute température comme dans les compresseurs turbo. La plupart des nitrures par contre sont matures industriellement (souvent déjà connus pour revêtir les outils de coupe) mais ils conduisent pour la plupart à une usure sévère de la pièce antagoniste. Le nitrure de chrome utilisé en sous-couche dans le dépôt Balinit DLC Star possède une très bonne résistance au grippage; le coefficient de frottement surtout en lubrification limite ou mixte est par contre plus élevé par rapport au DLC.

L'idéal serait donc un revêtement qui combine une très bonne stabilité thermique avec l'excellente performance du DLC en termes de frottement et de résistance à l'usure. Un candidat très intéressant comme « point de départ » pour une nouvelle catégorie de couche mince est le nitrure de molybdène (MoN). Ce matériau purement céramique possède une dureté très élevée de l'ordre de 35GPa (elle est ajustable suivant les paramètres de dépôt, mais typiquement, ce dépôt est d'environ 10 GPa plus dur que les DLC hydrogénés pour applications en grande série). Le nitrure de molybdène présente aussi une très bonne résistance à l'usure. Il est intéressant de noter qu'il forme facilement des oxydes de structure lamellaire qui offrent de très bonnes propriétés lubrifiantes à haute température [22].

### Dépôt par voie PVD du MoN

Le nitrure de molybdène MoN (Balifor M) développé récemment chez Oerlikon Balzers pour les applications automobiles est déposé par évaporation par arc cathodique [23]. Cette

technologie de dépôt offre une plus large variation de paramètres de dépôt par rapport à la pulvérisation cathodique magnétron souvent utilisée pour la déposition de couches tribologiques. Il est ainsi possible, en modifiant l'énergie apportée pendant la déposition, de faire varier la phase cristallographique des couches obtenues, les propriétés mécaniques associées ou encore la morphologie de la couche (de très dense à colonnaire). De plus, il est relativement facile de déposer des couches de MoN dopées avec différents éléments ou de produire des systèmes plus complexes de sous-couches et/ou multicouches. On peut prendre pour exemple des combinaisons de MoN avec d'autres matériaux comme le CrN. La seule contrainte de la déposition par arc est la nécessité d'un post-traitement après dépôt. En effet, cette technologie de dépôt conduit à la formation de gouttelettes du matériau évaporé qui sont

ensuite déposées sur les substrats à revêtir et augmentent ainsi la rugosité de la surface revêtue. Un post-traitement mécanique est donc nécessaire pour diminuer la rugosité après dépôt. Ce dernier fait partie intégrante du savoir-faire industriel de ces couches et est également réalisé sur des composants revêtus en DLC en grande série comme les axes de piston.

Lorsque le MoN est déposé sur des composants automobiles, la maîtrise de la température de dépôt est très importante puisqu'elle ne doit surtout pas dépasser la température de revenu des pièces à traiter (températures souvent assez basses pour des productions en grande série) afin de préserver l'intégrité des propriétés mécaniques. Nous avons donc développé pour un procédé de dépôt par arc à très « basse température » (< 200 °C) conduisant à la déposition de la phase hexagonale appelée δ-MoN.

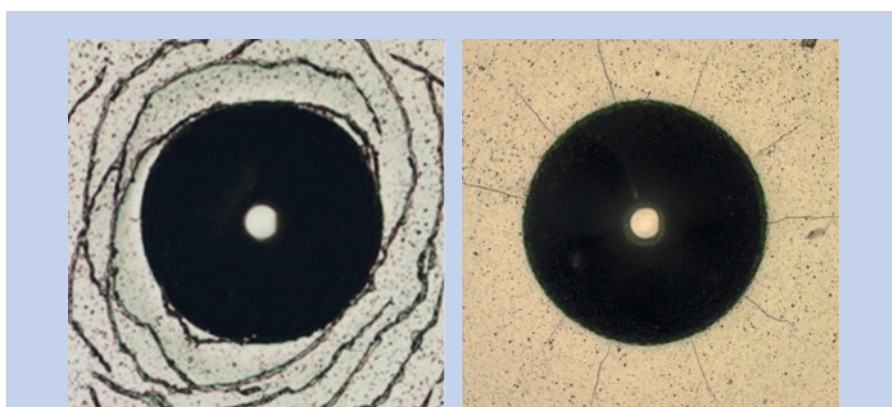


FIGURE 5 : Indentations Rockwell (HRC) pour deux dépôts à base du nitrure de molybdène a) MoN mono-couche, b) MoN/CrN multicouches.

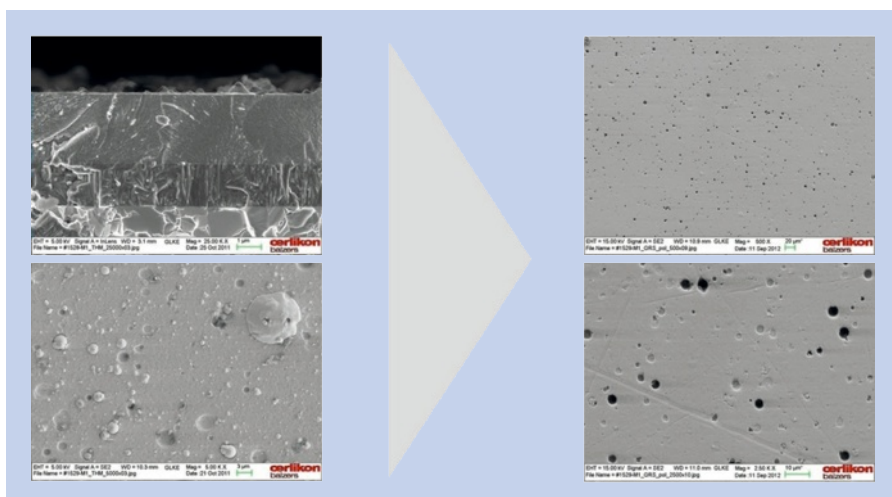


FIGURE 6 : Morphologie et topographie du MoN après dépôt (partie gauche) et après post-traitement (à droite).

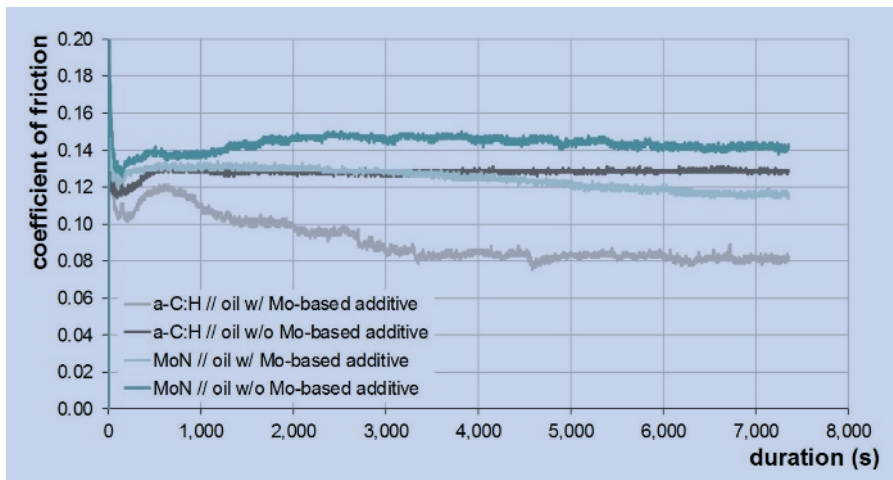


FIGURE 7 : Coefficient de frottement en fonction de la durée du test pour deux dépôts a-C:H et MoN, testés en régime lubrifié en utilisant une huile 10W20 sans et avec MoDTC.

Une augmentation de la température de dépôt par contre entraîne la formation de la phase cubique appelée  $\delta$ -MoN.

Les couches de MoN ainsi déposées montrent des duretés élevées de l'ordre de 35GPa et des modules de Young d'environ 400 GPa (environ 220 GPa pour un DLC). Les contraintes intrinsèques compressives sont d'environ -8 GPa. Lorsque ce dépôt dur est appliqué sur un substrat en acier comparativement plus « mou », il y a un gradient prononcé des propriétés mécaniques. Ceci explique pourquoi l'on observe l'apparition de fissures circulaires quand une couche simple est soumise à des tests d'adhérence de type indentation Rockwell. Néanmoins, une modification des propriétés mécaniques globale du revêtement est possible en déposant un système multicouches MoN/CrN

ou bien encore en dopant le MoN. La **figure 5** illustre l'aspect très positif de cette approche sur le comportement global du dépôt.

En utilisation moteur, un point fort du MoN est son bon comportement en termes de rodage, comparable à celui du DLC. Alors que le DLC doit ses bonnes propriétés « d'auto-rodage » à la graphitisation sous l'effet de pression et de la température, le mécanisme pour le MoN est différent. En effet, le MoN subit une légère oxydation de la surface sous l'effet de la température flash qui conduit à la formation de l'oxyde  $\text{MoO}_3$ . Ce dernier agit ensuite comme un lubrifiant solide dans le contact. Pour des températures supérieures à 500 °C, cette oxydation est encore plus prononcée et commence à pénétrer le revêtement. La température maximale de service se situe alors quelque part entre 400 °C et 500 °C, ce qui donne un bénéfice de l'ordre de presque 200 °C par rapport au DLC. Le MoN a donc une stabilité thermique tout à fait comparable à celle des couches à base de carbone amorphe non-hydrogéné (a-C et surtout ta-C).

## Applications très hautes températures

Le MoN peut servir aussi de base pour un revêtement à très hautes températures de l'ordre de 800°C, comme pour exemple pour les compresseurs turbo ou encore dans les systèmes de recirculation des gaz d'échappement. Pour ces applications, nous avons développé spécifiquement un système de multicouches à base de MoN/TiAlN dans lequel le MoN forme à ces hautes températures un oxyde de type  $\text{MoO}_3$  qui agit comme lubrifiant solide.

## Post-traitement après dépôt

Comme mentionné auparavant, le corolaire de la déposition par évaporation par arc cathodique consiste en la formation de gouttelettes qui sont ensuite déposées sur le substrat et augmentent la rugosité. Il est donc impératif d'appliquer un post-traitement afin d'éliminer les gouttelettes et de réduire la rugosité après dépôt (**figure 6**). Un brossage industrialisé fait partie du procédé, comme pour certains DLC en grande série.

Pour garantir la reproductibilité, le matériau des brosses ainsi que la vitesse et la pression de brossage sont primordiales et doivent être contrôlées et maîtrisées. D'autres types de post-traitements industriels dépendant de la géométrie des pièces sont également envisageables. L'efficacité du post-traitement peut être qualifiée et spécifiée par la mesure de

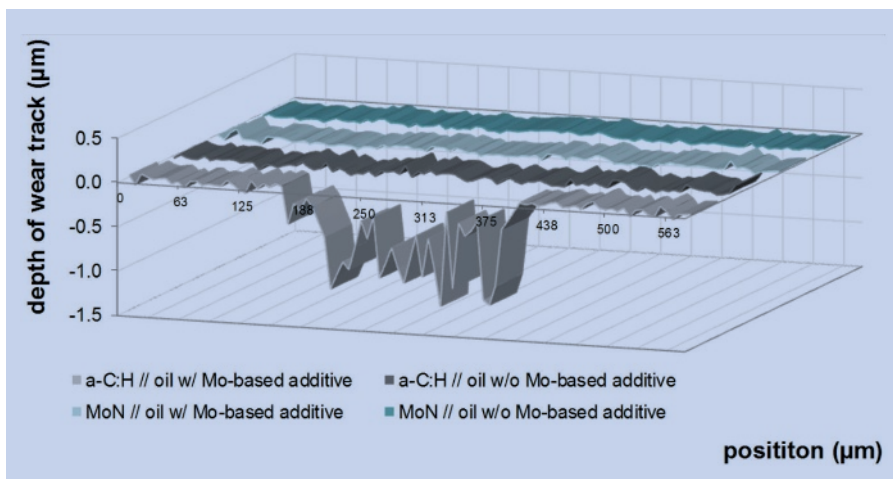


FIGURE 8 : Profils des traces d'usure obtenues pour deux dépôts a-C:H et MoN, testés en régime lubrifié en utilisant une huile 10W20 sans et avec MoDTC.

critères ciblés de rugosité, notamment les valeurs Rpk et Rpkx. Ces dernières reflètent bien les pics positifs de rugosité en corrélation directe avec l'usure abrasive de la pièce antagoniste dans le contact tribologique.

### Compatibilité avec les lubrifiants

Comme nous l'avons vu auparavant à travers l'exemple du MoDTC, l'interaction des couches DLC avec certains additifs d'huiles est limitée, voire même néfaste pour leur performance tribologique. Le MoN par contre, comme d'ailleurs d'autres matériaux à base de nitrures, démontre une très bonne compatibilité avec différents lubrifiants. Nous avons ainsi conduit une étude sur un tribomètre SRV (reciprocating sliding wear test) de type bille (non-revêtue, 100Cr6) sur plan (revêtu en MoN ou a-C:H) en régime lubrifié (10W20 avec et sans MoDTC) afin d'analyser les coefficients de frottement et les traces d'usure pour les

différentes combinaisons. La **figure 7** montre les résultats obtenus pour le coefficient de frottement.

Pour les deux dépôts, l'utilisation du MoDTC conduit à une réduction du frottement qui est plus prononcée dans le cas du DLC. Concernant les traces d'usure, ces dernières sont presque invisibles pour le MoN (avec et sans MoDTC) et pour le DLC sans MoDTC. Le DLC en combinaison avec le MoDTC montre par contre une trace d'usure très prononcée, ce qui est confirmé par des mesures de la profondeur des traces d'usure sur un profilomètre (**figure 8**). Le MoN quant à lui ne montre aucune dégradation sous l'influence du MoDTC.

### Production en grande série du MoN

Tout comme pour le DLC, la production du MoN de façon industrielle en grande série nécessite la mise au point et la validation d'une machine

de dépôt appropriée à la déposition du MoN à basse température par évaporation par arc cathodique. Le MoN est actuellement disponible chez Oerlikon Balzers sur deux types de machines de production : la « Oerlikon Balzers Domino XL » (**figure 9**) et la « Oerlikon Balzers Innova ». Il est ainsi possible de produire le Balifor M à des tarifs compétitifs et comparables à celui des DLC grande série.

### Application du MoN sur des composants automobiles

Le MoN est actuellement appliqué en grande série avec succès sur différents nouveaux composants automobiles. La toute première application en grande série était réalisée sur des axes de piston dans un moteur de haute performance dans lequel les différentes pièces mécaniques subissaient de trop fortes sollicitations et un dépôt de DLC ne suffisait plus. Le MoN a été retenu et validé car il apporte plus

## Bibliographie

- [1] Gåhlin, R., Larsson, M., Hedenquist, P. : Me-C:H coatings in motor vehicles, *Wear* 249/3-4, pp 302-309 (2001).
- [2] Merlo, A.M. : The contribution of surface engineering to the product performance in the automotive industry, *Surface and Coatings Technology* 174-175, pp 21-26 (2003).
- [3] Kalin, M. : Influence of flash temperatures on the tribological behavior in low-speed sliding: a review, *Materials Science and Engineering A* 374, pp 390-397 (2004).
- [4] Becker, J., Colas, M., Gies, A., Hessel, S., Karner, J., Seibert, F., Stelzig, T. : Thermal effects influencing stability and performance of coatings in automotive applications, *Surface and Coatings Technology* 284, pp 166-172 (2015).
- [5] Habchi, W., Eyheramendy, D., Bair, S., Vergne, P., Morales-Espejel, G. : Thermal elastohydrodynamic lubrication of point contacts using a new-tonian/generalized newtonian lubricant. *Tribol. Lett.* 30(1), pp 41-52 (2008).
- [6] Habchi, W., Eyheramendy, D., Vergne, P., Morales-Espejel, G. : A full-system approach of the elastohydrodynamic line/point contact problem. *ASME J. Tribol.* 130,021501, pp 1-10 (2008).
- [7] Habchi, W., Vergne, P., Bair, S., Andersson, O., Eyheramendy, D., Morales-Espejel, G. : Influence of pressure and temperature dependence of thermal properties of a lubricant on the behavior of circular TEHD contacts. *Tribol. Int.* 43(10), pp 1842-1850 (2010).
- [8] Björling, M., Habchi, W., Bair, S., Larsson, R., Marklund, P. : Friction reduction in elastohydrodynamic contacts by thin-layer thermal insulation, *Tribology Letters* 53, pp 477-486 (2014).
- [9] Blok, H. : A theoretical study of temperature rise at surfaces of actual contact under oiliness lubricating conditions, *Gen. Disn. Lubn. Inst. Mech. Eng.* 2, pp. 222 - 235 (1937).
- [10] Blok, H. : The flash temperature concept, *Wear*, Volume 6, Issue 6, November-December 1963, pp 483-494, ISSN 0043-1648, 10.1016/0043-1648(63)90283-7.
- [11] Ronkainen, H., Holmberg, K. : The graphitization of the hydrogenated DLC film structure, in tribology of diamond-like carbon films - fundamentals and applications, Donnet, C., Erdemir, A. (eds.) New York, Springer Science + Business Media, 2008, pp. 171 - 177.
- [12] Robertson, J. : Diamond-like amorphous carbon, *Materials Science and Engineering: R: Reports* 37 (4-6), pp 129-281 (2002).
- [13] Erdemir, A. and Donnet, C. : Tribology of diamond-like carbon films: an overview in Stachowiak, G. W. (ed.): *Wear: Materials, Mechanisms and Practice*, Wiley 2005.
- [14] Le Huu, T., Zaidi, H., Paulmier, D., Voumard, P. : Transformation of sp3 to sp2 sites of diamond like carbon coatings during friction in vacuum and un-der water vapour environment, *Thin Solid Films* 290-291, pp 126-130 (1996).
- [15] Abdollah, M.F.B., Yamaguchi, Y., Akao, T., Inayoshi, N., Umehara, N., Tokoroyama, T. : Phase transformation studies on the a-C coating under repetitive impacts, *Surface and Coatings Technology*, 205 (2), pp 625-631 (2010).
- [16] Liu, Y.; Erdemir, A.; Meletis, E.I. : An investigation of the relationship between graphitization and frictional behavior of DLC coatings, *Surface and Coatings Technology* 86-87, pp 564-568 (1996).
- [17] Haque, T., Morina, A., Neville, A. : Influence of friction modifier and antiwear additives on the tribological performance of non-hydrogenated DLC coating, *Surface and Coatings Technology* 204, pp 4001-4011 (2010).
- [18] Haque, T., Morina, A., Neville, A., Kapadia, R., Arrowsmith, S. : Effect of oil additives on the durability of hydrogenated DLC coating under boundary lubrication conditions, *Wear* 266, pp 147-157 (2009).
- [19] Topolovec-Miklozica, K., Lockwood, F., Spikes, H. : Behaviour of boundary lubricating additives on DLC coatings, *Wear* 265, pp 1893-1901 (2008).
- [20] de Barros'Bouchet, M.I., Martin, J.M., Le Mogne, T., Vacher, B. : Boundary lubrication mechanisms of carbon coatings by MoDTC and ZDDP additives, *Tribology International* 38, pp 257-264 (2005).
- [21] Keunecke, M., Bewilogua, K., Becker, J., Gies, A., Grischke, M. : CrC/a-C:H coatings for highly loaded, low friction applications under formulated oil lubrication, *Surface and Coatings Technology* 207, pp 270-278 (2012).
- [22] Jauberteau, I., Jauberteau, J.L., Touimi, S., Merle-Méjean, T., Weber, S., Bessaudou, A. : A thermo-chemical process using expanding plasma for nitriding thin molybdenum films at low temperature, *Engineering* 4 (12), pp 857-868 (2012).
- [23] Seibert, F., Döbeli, M., Fopp-Spori, D.M., Glaentz, K., Rudigier, H., Schwarzer, N., Widrig, B., Ramm, J. : Comparison of arc evaporated Mo-based coatings versus CrN and ta-C coatings by reciprocating wear test, *Wear* 298-299, pp 14-22, (2013).

de flexibilité et sécurité en termes de stabilité thermique par rapport au DLC. Après 500 heures de tests, le MoN avec une épaisseur initiale de 1,85 µm montre seulement un léger « glaçage » de sa surface, seule la rugosité en termes de Rz est réduite de 0,3 µm. Uniquement dans la zone de pression de contact la plus élevée (arêtes de la bielle), une usure de 0,6 µm du revêtement est observée. Le dépôt de DLC (Balinit DLC Star), testé sous les mêmes conditions avec une épaisseur initiale de 2,75 µm, affiche une usure beaucoup

plus importante, et cela à différents endroits de l'axe de piston (proche du piston et sur les arêtes de la bielle).

Un revêtement à base de MoN a aussi été testé sur les linguets d'un moteur de moto série. Ici, les sollicitations tribologiques diffèrent largement de celles des axes de piston. En effet, en plus du pur glissement, les linguets subissent une sollicitation cyclique sous la forme de chocs; ce point est dimensionnant lors du choix du revêtement. Le MoN « standard » avec sa grande dureté et sa plus

faible ductilité ne convient pas directement à ce type d'applications. Nous avons donc adapté les propriétés du dépôt en ajustant le système de multicouches MoN/CrN. Testée avec succès par notre client, la solution nouvelle s'est montrée plus performante qu'un dépôt de DLC. Nous préparons donc actuellement le départ en production grande série pour cette nouvelle pièce très sollicitée.

## Conclusions

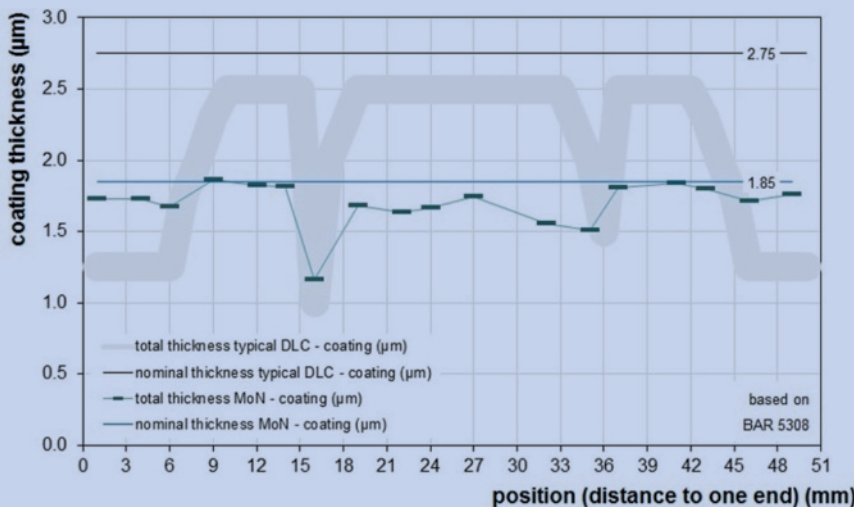
Les couches minces obtenues par dépôt sous vide et plus particulièrement les dépôts à base de carbone amorphe (DLC) sont utilisés depuis des années par l'industrie automobile afin de réduire le frottement et augmenter la résistance à l'usure sur des pièces mécaniques. Cette tendance s'accroît encore plus actuellement à cause des législations toujours plus strictes visant à réduire la consommation de carburant et à réduire l'émission de voitures et poids lourds. Le DLC reste et restera certainement la solution « logique » et « légitime » en termes de premier choix technique évalué dans les phases de validation constructeur. Cependant, les sollicitations mécaniques et thermiques ont atteint pour certains nouveaux composants la limite de la stabilité thermique du DLC. De plus, les lubrifiants toujours plus complexes et parfois exotiques, notamment en termes d'additifs utilisés, peuvent impacter le potentiel de résistance à l'usure du DLC via la stabilité chimique du DLC.

C'est pourquoi chez Oerlikon Balzers nous poursuivons actuellement différentes voies de développement afin d'affronter ces futurs défis. D'un côté, nous misons sur une amélioration des revêtements à base de carbone amorphe afin d'augmenter leur compatibilité avec les huiles additivées et leur stabilité thermique. Ceci peut se faire par un dopage avec différents éléments (a-C:H:X, X étant un élément métallique comme le chrome, ou un élément non métallique) et/ou encore par la réduction voire l'élimination de la teneur en hydrogène (couches de type a-C et ta-C).

Nous poursuivons tout autant nos efforts de développement concernant les dépôts à base de nitrures, comme le Balifor M qui est déjà introduit en production série. Dans le même esprit, les bases oxydes, pour les applications à hautes et très hautes températures comme les compresseurs turbo ou les systèmes de recirculation des gaz d'échappement, peuvent contribuer aux efforts de réductions des émissions des nouveaux véhicules.



**FIGURE 9 :** Exemples de machines de dépôt Oerlikon Balzers utilisés pour la déposition des revêtements Balifor M. A gauche : « Oerlikon Balzers Domino XL » utilisé pour la production du MoN en grande série, comme par exemple pour les axes de piston. À droite : « Oerlikon Balzers Innova » utilisé pour la production du MoN en petite et moyenne série ainsi que pour le développement de nouveaux dépôts à base de MoN.



**FIGURE 10 :** Distribution de l'épaisseur du MoN (épaisseur au départ : 1,85 µm) sur un axe de piston après 500 heures de test moteur. On observe un léger polissage du dépôt sur la longueur de l'axe et une faible usure (~0,6 µm) au niveau des arêtes de la bielle. Le DLC testé sous les mêmes conditions (épaisseur au départ : 2,75 µm) montre une usure beaucoup plus prononcée, surtout proche du piston et sur les arêtes de la bielle.