

Revêtements complexes antifriction

pour les composants moteurs automobiles.

De la F1 à la grande série

Claude Lory a créé une start-up innovante où sont réalisés des revêtements pour la protection anti-usure, anti-friction de pièces mécaniques, SOREVI, qui est devenue leader mondial dans le domaine des composants moteurs pour la compétition automobile (F1, NASCAR, WRC, Moto GP...). Depuis juillet 2008, il dirige le département Incubateur de l'Agence pour la valorisation de la recherche universitaire du Limousin (AVRUL), où son objectif est de mettre son expérience au service de la création d'entreprises innovantes.

Un peu curieusement peut-être, la F1 est une discipline sportive qui fascine le public. L'engouement, toutes proportions gardées, se comparerait à celui que déclenche le football. Il faut dire que le public (en particulier le public masculin) y trouve à la fois la fascination de la performance et celle de la technique (**Figure 1**). Les professionnels ont bien su emboîter le pas à ces enthousiasmes : ils utilisent la F1 pour tester et valider les nouvelles solutions techniques qui peut-être (en fait assez souvent) viendront

Claude Lory Revêtements complexes antifriction pour les composants moteurs automobiles.
De la F1 à la grande série

Figure 1

La F1 offre un spectacle qui fascine le public tant par la vitesse que par la technique qui y est liée.



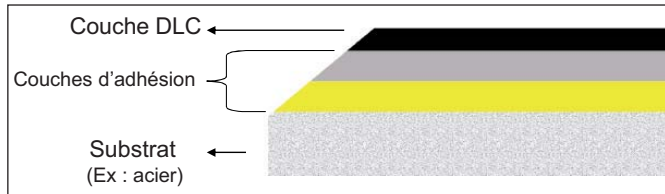


Figure 2

Un revêtement est une superposition d'une ou plusieurs couches sur un substrat (par exemple la peinture d'une carrosserie de voiture).

« moderniser » leurs véhicules d'usage quotidien, une génération plus tard.

Ce chapitre est centré sur l'une de ces solutions techniques : l'emploi du DLC (*Diamond Like Carbon*), matériau de revêtement des pièces métalliques dont l'utilisation s'est affirmée récemment comme l'un des facteurs importants d'accroissement des performances des moteurs de compétition, d'abord bien sûr pour la Formule 1 – la F1 ! Les travaux qui sont derrière ces progrès sont de recherche scientifique sur les structures des surfaces, sur les mécanismes de la lubrification et sur la tribologie (science du frottement). Voir aussi le [Chapitre de N. Puget](#) ainsi que de mise au point de techniques de réalisation des revêtements et de caractérisation des performances des moteurs. Ils se font au sein d'équipes d'ingénieurs et de chercheurs animés de l'enthousiasme et de l'esprit de compétition de bon aloi que l'on attribue généralement à la F1.

1 Le revêtement de DLC pour améliorer les rendements moteurs

1.1. Matériau composé : revêtement sur support

Depuis de nombreuses années, la technologie des traitements de surface associe les propriétés de différents

matériaux, en l'occurrence un support (le substrat) et un revêtement pour obtenir les meilleures performances des pièces finies pour la décoration, l'anticorrosion ou, plus spécifiquement dans le cas traité ici pour la réduction des efforts de frottement. Attention, l'expression « matériau composé » désigne ici l'assemblage substrat/couche de revêtement ; elle ne doit pas être confondue avec l'expression « matériau composite » traitée dans le [Chapitre d'Y. Rémond et J.-F. Caron](#).

La [Figure 2](#) schématise la structure de l'interface. Elle rappelle aussi le principe de la technique de dépôt – soit par PVD (*Physical Vapour Deposition*) ou par PACVD (*Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition*). Les couches DLC sont obtenues à partir d'hydrocarbures (qui sont, on le rappelle, les constituants des dépôts organiques fossiles, comme les pétroles ou, ce qui est moins connu, les charbons). Les couches obtenues sont en réalité des familles de revêtements dits métastables⁶⁹, qui peuvent différer par leurs propriétés et leur composition et non un « matériau unique » en tant que tel.

1.2. Structure du DLC

Comme le désigne son nom, le DLC, « *Diamond Like Carbon* », ou carbone pseudo-diamant, combine les propriétés de

⁶⁹. Un système métastable est cinétiquement stable mais pas thermodynamiquement. Il se situe dans un « creux d'énergie », et un apport d'énergie peut le faire basculer vers un état stable (ou un autre état métastable d'énergie plus faible).

deux formes minérales du carbone : le graphite et le diamant. Il possède à la fois une grande dureté (principale qualité du diamant) et des qualités de glissement proches de celles du graphite (pour aller plus loin sur la structure chimique du DLC, voir l'**Encart : « Le DLC, entre le diamant et le graphite »**).

1.3. Quelques propriétés du DLC

L'intérêt de l'emploi du DLC apparaît clairement sur les données mécaniques reportées dans le **Tableau 1** : le DLC possède une valeur de dureté (indiquée sans mention d'unité, pour comparaison) très élevée qui dépasse celle de la plupart des céramiques associée à une valeur de coefficient de frottement⁷⁰ particulièrement faible. À noter : le frottement se faisant entre deux surfaces, le coefficient de frottement dépend de chacune des deux surfaces ; les chiffres du tableau correspondent au frottement du DLC sur un acier.

L'objectif de l'optimisation des moteurs dans la compétition automobile est de réduire les pertes par frottement de manière à augmenter les performances – ce qui va aussi permettre de limiter l'usure à la fois des pièces antagonistes (voir le paragraphe 1.4) et des pièces revêtues. Les caractéristiques exceptionnelles du DLC rendent évidemment son utilisation comme revête-

70. Le frottement est la mesure de la résistance au mouvement (qui constitue une perte d'énergie) de deux surfaces en contact. Il est mesuré par le coefficient de frottement.

	Nano dureté	Coefficient de frottement*
Bronze	1,5 - 3	0,10 - 0,15
Acier à outil	8	0,5 - 0,7
Céramique	15 à 25	0,4 - 0,6
Diamant	100	0,2 - 0,4
DLC	20 - 35	0,05 - 0,10

* Tests réalisés à sec, contre un acier, test "bille sur disque"

ment extrêmement favorable sous ce rapport.

1.4. Sur les mécanismes d'action du DLC

La propriété qu'a le DLC d'établir des conditions de frottement particulièrement douces et peu agressives résulte de mécanismes physico-chimiques qui font l'objet d'études scientifiques poussées ; très complexes, ils sont encore loin d'être bien compris. On a mis en avant l'hypothèse du rôle d'un « troisième corps » intervenant dans un mécanisme de transfert partiel de couches superficielles du revêtement de carbone sur la contrepièce (ou pièce antagoniste) et qui resterait emprisonné dans le contact ; rien de suffisamment concluant ne vient corroborer cette hypothèse.

En fait, la solution passe certainement par l'étude des phénomènes d'échauffement. Actuellement, aucun moteur de F1 ne tourne plus d'une minute sans DLC, sauf à vitesse de rotation très faible :

Tableau 1

Le DLC possède une dureté importante et un coefficient de frottement faible, ce qui conduit à de faibles pertes par frottement et une usure limitée du matériau antagoniste (celui en contact avec le DLC : l'acier, dans notre cas).

LE DLC, ENTRE LE DIAMANT ET LE GRAPHITE

Pour décrire le DLC, il faut entrer au cœur de la structure moléculaire de ce matériau, examiner les liaisons chimiques qui la charpentent. Le DLC comporte des atomes de carbone qui forment différents types de liaisons possibles avec d'autres atomes (carbone ou hydrogène). Rappelons que le carbone peut se lier à quatre atomes voisins : il est alors tétravalent, c'est-à-dire qu'il forme, avec ces quatre voisins, un tétraèdre dont il est le centre. En chimie quantique, on dit que l'atome de carbone entre en liaison chimique par son *orbitale atomique* 2s et ses trois orbitales 2p (p_x , p_y , p_z). Ces orbitales se combinent entre elles (on dit « s'hybrident ») pour former des liaisons chimiques carbone-carbone plus stables. Les combinaisons (hybridations) les plus fréquentes sont la formation par combinaison des quatre orbitales d'origine, de quatre orbitales équivalentes orientées vers les sommets d'un tétraèdre régulier – c'est l'hybridation sp^3 . Mais le carbone peut aussi se lier à seulement trois voisins : il est dans ce cas trivalent et forme trois combinaisons à partir de s, p_x , p_y en conservant p_z inchangée – c'est l'hybridation sp^2 .

Dans le carbone pur (en tant que matériau), on peut avoir, pour tous les atomes de carbone, l'hybridation sp^3 : c'est le cas du diamant (**Figure 3** à gauche) ; les liaisons constituent alors un réseau tridimensionnel aussi fortement connecté dans toutes les directions – la rupture du solide est très difficile : sa dureté est maximale. Il existe aussi des solides où tous les atomes de carbone sont en hybridation sp^2 ; les orbitales p_z sont toutes parallèles entre elles et les atomes forment des plans d'assemblages en hexagones. Ces plans pouvant relativement facilement glisser les uns sur les autres, nous avons affaire à faire à un corps mou : c'est le graphite (**Figure 3** à droite). Diamant et graphite sont des cristaux : ils présentent des arrangements atomiques réguliers (on dit « périodiques »). Il existe aussi des formes non cristallines du carbone pur, qu'on appelle amorphes. Elles contiennent des atomes dans les

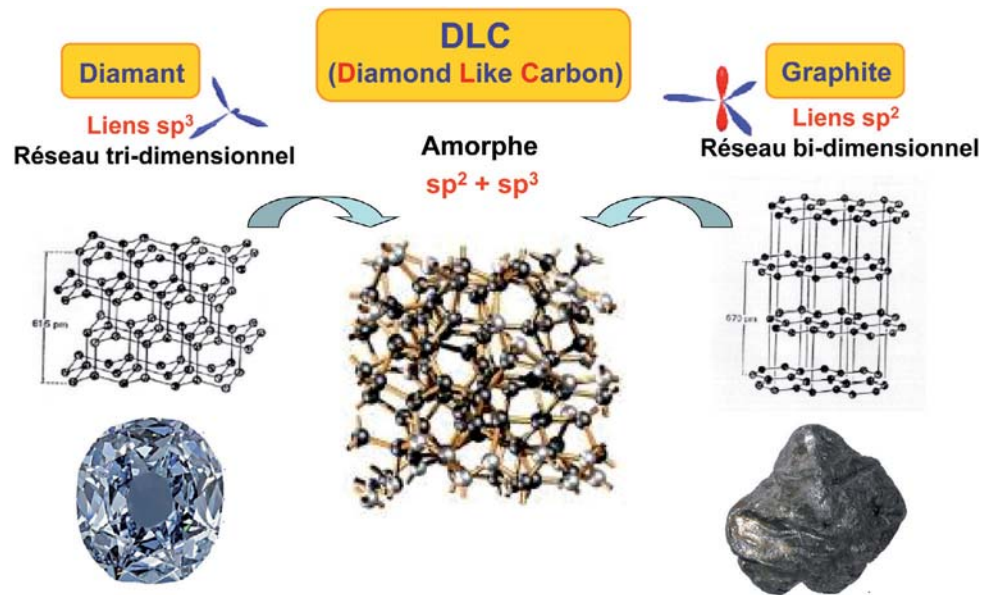


Figure 3

Le DLC est un matériau dont les propriétés combinent la dureté du diamant et la souplesse du graphite.

deux états d'hybridation sp^2 et sp^3 et présentent de très nombreux défauts (liaisons orphelines, impuretés). Les couches DLC appartiennent à cette dernière catégorie, elles contiennent ainsi une quantité importante d'atomes d'hydrogène, apportés par la matière de départ, un hydrocarbure. Elles ont la dureté apportée par les liaisons sp^3 du diamant et les qualités de glissement, apportée par les liaisons sp^2 graphitiques.

*La chimie quantique est une branche de la chimie théorique qui applique la mécanique quantique aux systèmes moléculaires pour étudier les propriétés chimiques. Le comportement électronique et nucléaire des molécules étant responsable des propriétés chimiques est décrit à partir de l'équation du mouvement quantique, appelée équation de Schrödinger. Sur cette base sont construits les concepts d'orbitales atomiques (orbitales s, p, d, f...) et orbitales moléculaires.

en réduisant considérablement les efforts de frottement, le DLC permet d'abaisser les échauffements générés au sein du contact. Sans DLC, les échauffements sont tels que, très rapidement, l'acier (qui fait 800 Vickers⁷¹ de dureté) perd ses caractéristiques mécaniques entraînant une destruction complète des pièces. Cet effet est amplifié par le fait qu'afin de réduire les pertes liées au cisaillement du lubrifiant lui-même,

le lubrifiant utilisé dans les moteurs de F1 est plus proche de l'eau que de l'huile, ce qui limite ses capacités à séparer les surfaces en contact.

2 De quels types de composants moteurs revêt-on le DLC ?

Le moteur comporte deux parties : la partie haute (la distribution) et la partie basse (pistons, vilebrequins) (Figure 4).

2.1. La partie haute du moteur

La partie « distribution » du moteur, c'est tout ce qui va commander l'ouverture ou la

71. L'échelle Vickers caractérise la dureté d'un matériau à partir d'un test qui consiste à créer une empreinte sur une pièce par un pénétrateur de forme pyramidale soumis à une force déterminée.

Figure 4

Le moteur F1 comporte une partie haute (la distribution) et une partie basse (pistons, vilebrequins).

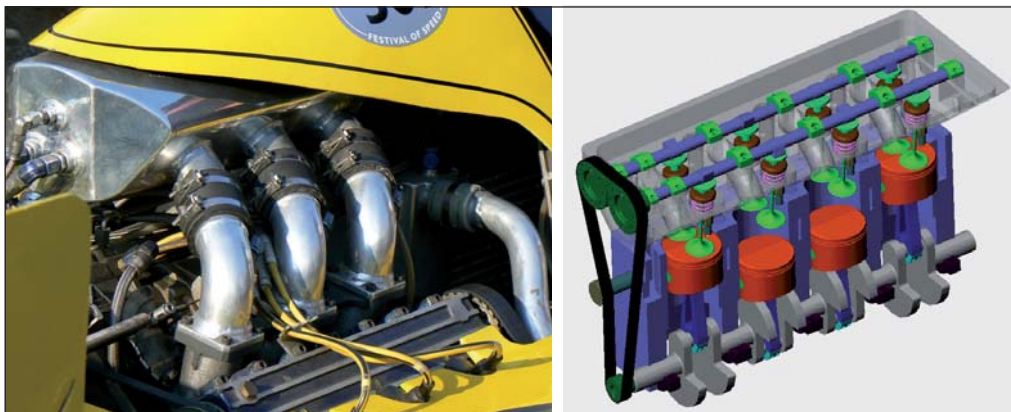




Figure 5

Pièces de la partie haute du moteur F1 : arbre à cames à gauche, poussoirs et linguets.

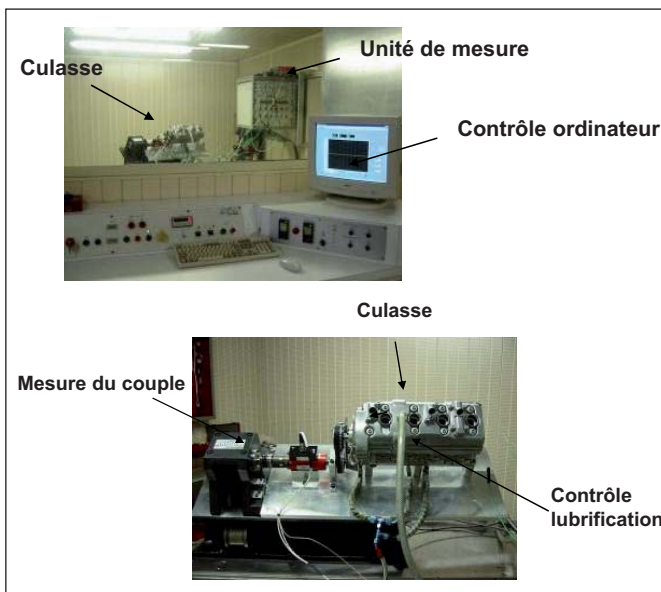
fermeture des soupapes ; elle est logée dans la culasse, la partie qui ferme le haut des cylindres. Ce sont des composants où l'on peut perdre de la puissance par frottement et donc qu'il est important de traiter. Plus précisément, on va traiter les arbres à cames, pièce métallique qui commande l'ouverture des soupapes en transformant le mouvement rotatif issu du moteur en mouvement longitudinal ; les cames viennent frotter contre des pièces intermédiaires qui, selon

la technologie du moteur, sont des poussoirs ou des linguets (Figure 5). Les gains apportés par le traitement au DLC sont très significatifs : de 8 à 10 chevaux ; sur un moteur de F1 qui fait environ 800 chevaux, cela ne représente que 1 %, mais correspond tout de même à un gain relatif très important.

Afin d'étudier les meilleures configurations, des essais sont conduits avec la partie haute du moteur qui est entraînée électriquement sur des bancs de tests (Figure 6). On mesure le couple de frottement, dans différentes conditions de lubrification ou de température. On compare les résultats obtenus avec ou sans présence de revêtement. Ces tests sont mis en œuvre en suivant des cycles précis au cours desquels on fait varier le régime de rotation. Fréquemment, il s'agit de cycles d'une heure répétés huit fois. Sur les diagrammes de la Figure 7, les résultats sont présentés en diagrammes de variation de la puissance absorbée ou du couple mesuré en fonction de la vitesse de rotation du moteur exprimée en tours par minute. L'effet « rodage » apparaît : il faut deux cycles de rodage pour

Figure 6

La partie haute du moteur est testée sur des bancs d'essai.



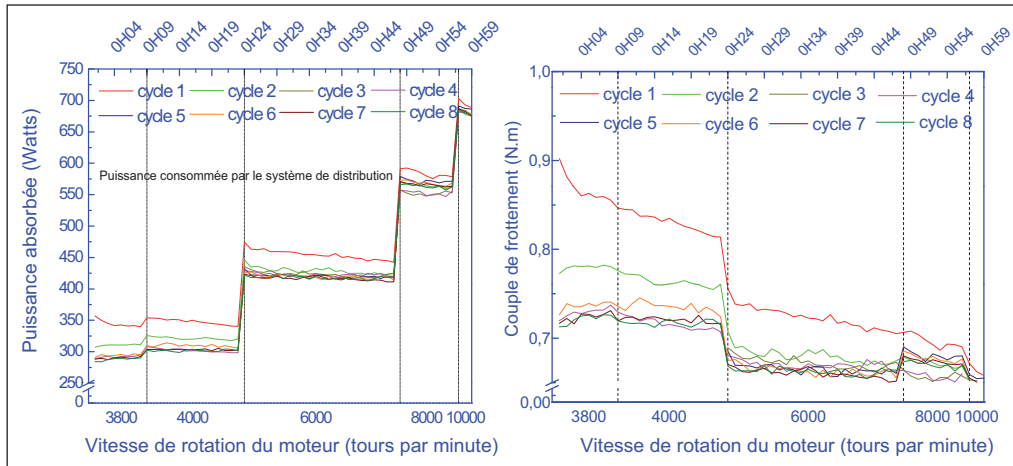


Figure 7

Deux cycles de rodage sont nécessaires pour obtenir un système stabilisé.

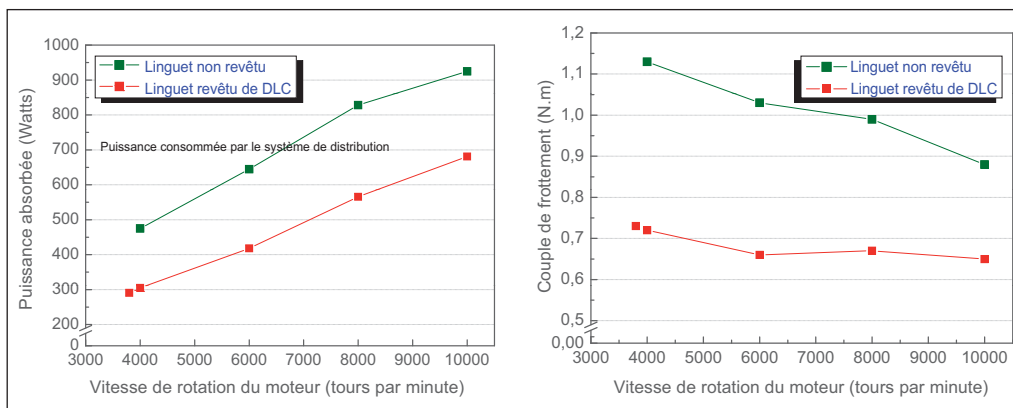


Figure 8

Comparaison entre linguets revêtus (en rouge) et non revêtus (en bleu) de DLC (Cavidur®).

obtenir un système stabilisé. La **Figure 8** met en évidence l'effet du revêtement, la puissance absorbée et le couple apparaissant comme significativement réduits grâce à l'application du revêtement sur les linguets. Des diagrammes analogues sont obtenus pour le revêtement de l'arbre à cames seul. Pour le revêtement complet (linguets et arbre à cames), on obtient les résultats reportés sur la **Figure 9**, résumés sur le **Tableau 2**. Au

niveau de la distribution, les gains sont très importants, correspondant à 35 % environ à 10 000 tours par minute.

2.2. La partie basse du moteur

Pour les tests de la partie basse du moteur (où se produit l'explosion), les tests exigent une mise en allumage du moteur. Il faut noter qu'un développement technologique important a eu lieu, le piston et sa jupe étant maintenant

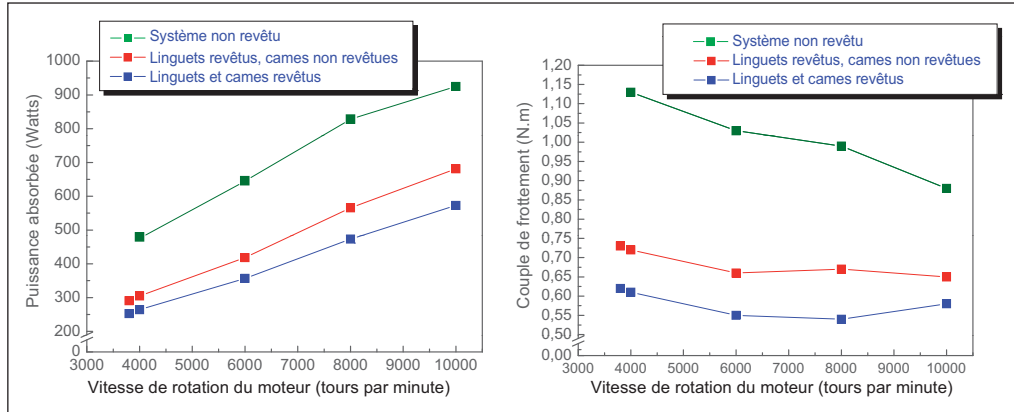


Figure 9

Comparaison avec ou sans revêtement DLC (Cavidur®) des cames et/ou des linguets.

Tableau 2

Gains obtenus au niveau de la distribution en fonction du régime de rotation moteur pour les deux configurations : linguet revêtu seul et couple arbre à cames/linguet revêtu.

Régime moteur	DLC appliqué sur :	
	Linguets	Linguets + Arbre à cames
4000	35,8 %	45,8 %
6000	35,2 %	46,3 %
8000	31,7 %	44,9 %
10000	26,4 %	34,5 %

complètement lisses. Ce développement a imposé une remise en cause des pratiques habituelles dans des conditions antérieures où l'on voulait assurer la présence de rainures afin de favoriser l'action du lubrifiant.

Les pièces qu'on peut d'abord vouloir revêtir sont les pistons (Figure 10) et le vilebrequin (le vilebrequin assure la transmission de l'effort généré par l'explosion des gaz vers la

boîte de vitesses ; il permet la transformation du mouvement linéaire rectiligne non uniforme des pistons en un mouvement continu de rotation). La Figure 11 indique les résultats de tests faits sur les pistons. Le gain en performance apporté par le revêtement (mesuré par la puissance absorbée en fonction de la vitesse de rotation du moteur) est avéré – et se chiffre à environ 2 %. Par ailleurs, on observe que le gain en puissance obtenu est stable sur la durée. Cette caractéristique est très appréciable, comme on le réalise en quittant le domaine de la F1 et en se rappelant que les performances des moteurs à deux temps, importantes au

Figure 10

Exemples de différents types de pistons revêtus de DLC.



début, peuvent s'effondrer rapidement. Cet apport est tout à fait fondamental.

3 De la F1 à la grande série

Les acquis apportés par l'utilisation des revêtements de DLC au cours de la mise au point de moteurs de F1 ont conduit à les tester sur les moteurs de série (Figure 12). Il s'agissait de voir si les effets de réduction des frottements, observés à des vitesses de rotation de 20 000 tours par minute ou plus sur les moteurs de F1 – la vitesse de rotation est maintenant limitée réglementairement à 19 000 tours par minute – se conservent aux vitesses des moteurs des voitures de série, qui sont de l'ordre de 1 500 ou 3 000 tours par minute.

La Figure 13 donne un exemple de l'amélioration de performance apportée par le revêtement par une couche de DLC sur des poussoirs et confirme l'utilité du traitement des surfaces avec du DLC.

Les recherches en cours actuellement visent à mieux comprendre les interactions entre lubrifiant et DLC au-delà

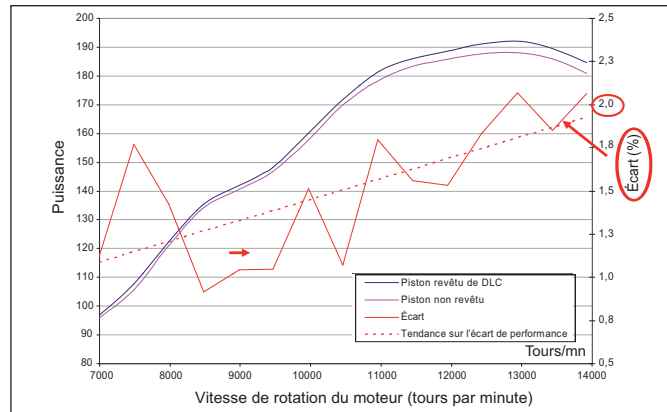


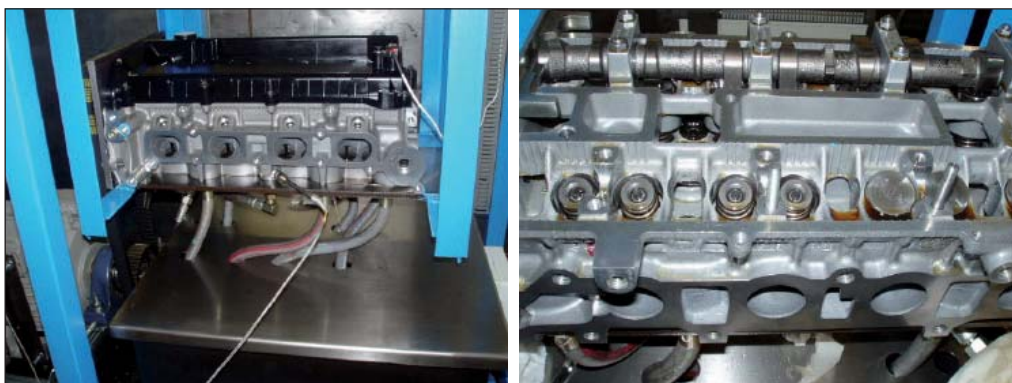
Figure 11

Tests réalisés sur les pistons.

de notre connaissance actuelle des interactions lubrifiant-métal. On observe ainsi l'importance clé du paramètre température : l'amélioration apportée par le revêtement est beaucoup plus intéressante si la température est plus haute (le couple est ainsi divisé par deux à 100 °C et 1000 tours/minute) là où le lubrifiant commence à trouver ses limites en termes de réduction des efforts de séparation des corps entre eux. Ces recherches, qui touchent l'hydrodynamique et la mécanique comme la physico-chimie, permettront l'optimisation du DLC en fonction des combinaisons que l'on peut avoir avec le lubrifiant.

Figure 12

Les acquis apportés par l'utilisation des revêtements de DLC au cours de la mise au point de moteurs de F1 ont conduit à les tester sur les moteurs de série.



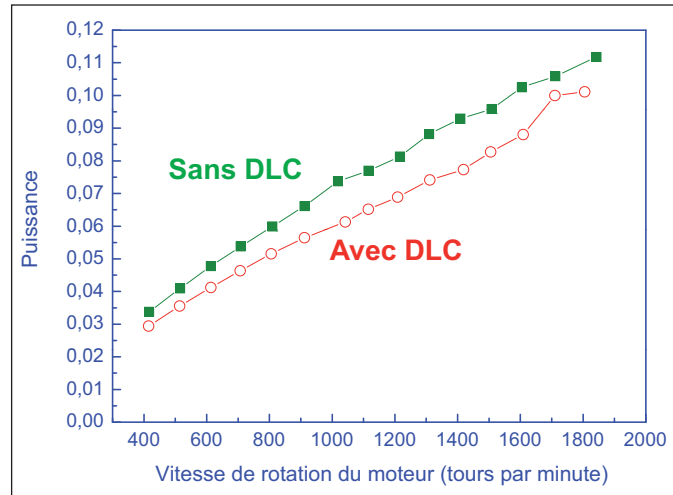


Figure 13

Tests réalisés sur les poussoirs des moteurs de série.

Conclusion

Au moment de conclure sur l'utilisation du DLC (*Diamond Like Carbon*) pour réduire les frottements dans les moteurs, il faut le remettre à sa place : le DLC ne serait rien sans son compère, le substrat. Celui-ci doit être soigneusement préparé en termes de propreté et de rugosité, les creux et bosses doivent rester inférieurs à l'épaisseur du revêtement ; ceci n'est pas trivial car l'épaisseur du revêtement n'est que de un à deux microns.

Si, comme le montre ce chapitre, le revêtement DLC est un facteur indéniable de l'amélioration des performances des moteurs de F1, cette dernière est aussi un acteur prépondérant dans le développement de ces revêtements. Les coûts de la F1 peuvent être qualifiés de « productifs » car les progrès technologiques qu'ils permettent diffusent dans la voiture de série : les BMW K1300 KTM possèdent déjà des moteurs munis de linguets revêtus sur

des productions de un à un et demi millions de pièces par an.

L'évolution de l'automobile grand public va certainement généraliser l'utilisation du DLC dans les années qui viennent, tant il est vrai que la voiture électrique est loin de rendre les moteurs à explosion caducs avant longtemps. Les normes de consommation de carburant, partout en baisse, vont y obliger. Déjà Porsche et Ferrari (**Figure 14**) envisagent l'emploi de DLC à court terme dans leurs véhicules, étape signifiante avant que cette technologie ne passe au « vraiment grand public » !



Figure 14

Porsche et Ferrari envisagent déjà l'emploi de DLC à court terme dans leurs véhicules, avant que cette technologie ne passe au « vraiment grand public ».