

L'INGÉNIERIE À L'ASSAUT DES FROTTEMENTS ! Quand la formule 1 ne peut pas se passer de la chimie

Patrice Bray, Andrée Harari, Jean-Claude Bernier

D'après l'article *Revêtements complexes antifriction pour les composants moteurs automobiles* de Claude Lory publié dans l'ouvrage « La chimie et le sport » EDP Sciences, 2011, ISBN : 978-2-7598-0596-9

Un peu curieusement peut-être, la F1 est une discipline sportive qui fascine le public (Figure 1). Les professionnels ont bien su emboîter le pas à cet enthousiasme : ils utilisent la F1 pour tester et valider les nouvelles solutions techniques (1) qui, peut-être (en fait, assez souvent), viendront « moderniser » les véhicules d'usage quotidien, une génération plus tard (2).

COMMENT FONCTIONNE UN MOTEUR DE VOITURE ?

Le moteur comporte deux parties : la partie basse (pistons, vilebrequins) et la partie haute (distribution) (Figure 2).



Figure 1 – La F1 offre un spectacle qui fascine le public tant par la vitesse que par la technique qui y est liée.

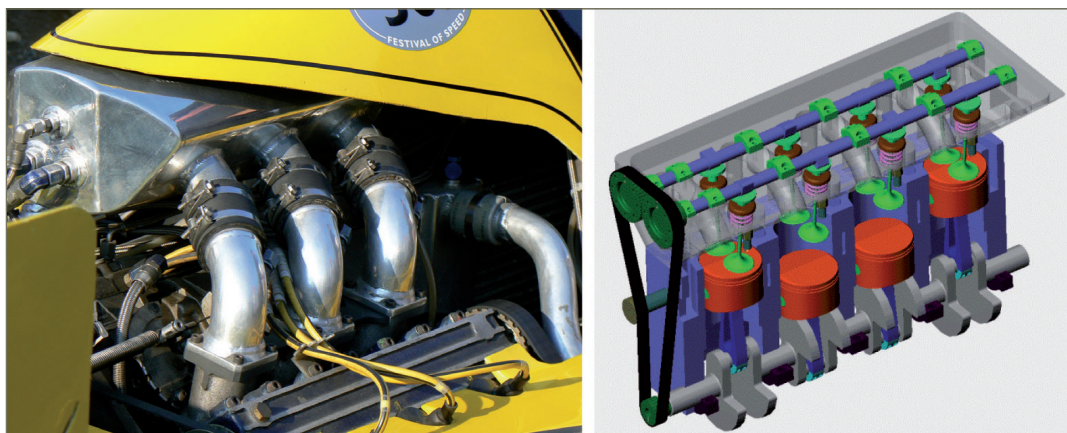


Figure 2 – Le moteur F1 comporte une partie haute (la distribution) et une partie basse (pistons, vilebrequins).

La partie basse du moteur est composée de pistons qui glissent à l'intérieur de cylindres selon un mouvement rectiligne non uniforme. Ces pistons sont reliés au vilebrequin qui permet la transformation du mouvement linéaire rectiligne non uniforme des pistons en un mouvement uniforme de rotation [3].

La partie « distribution » du moteur correspond à tout ce qui commande l'ouverture ou la fermeture des soupapes. Elle est logée dans la culasse, la partie qui ferme le haut des cylindres. Elle permet l'admission de l'essence dans le cylindre, où elle explose. Plus exactement, c'est un mélange d'air et d'essence qui entre dans le cylindre grâce à la soupape. Une étincelle fait exploser ce mélange, repoussant le piston et mettant en mouvement le vilebrequin.

Lorsque le moteur fonctionne, les pièces métalliques du moteur frottent les unes contre les autres, ces frottements entraînent un échauffement, donc une perte d'énergie thermique.

COMMENT AMÉLIORER LES PERFORMANCES D'UN MOTEUR ?

Depuis de nombreuses années, la technologie des traitements de surface associe les propriétés d'un support (le substrat) et d'un revêtement afin d'améliorer les performances des pièces finies. Pour les moteurs de compétition automobile, l'objectif principal est de réduire les pertes de puissance par frottement de manière à augmenter le rendement du moteur et à limiter l'usure des pièces en contact.

Un autre objectif de ces traitements, dans d'autres domaines d'application, peut-être de décorer la pièce ou de la protéger contre la corrosion.

Les scientifiques effectuent donc des recherches sur les mécanismes de la lubrification [4] et sur la tribologie (science du frottement) pour améliorer les moteurs.

Dans ce qui suit, on s'intéresse à l'une des solutions techniques utilisées : le DLC, *Diamond Like Carbon*, un des matériaux qui a considérablement amélioré les performances des moteurs.

TRAITEMENT DE SURFACE À L'AIDE DU DLC

Qu'est-ce qu'un traitement de surface au DLC ?

La figure 3 schématise la structure de l'interface pièce/revêtement. À la manière de la peinture appliquée sur un mur ou une carrosserie de voiture, des couches de finition sont associées à des couches d'adhésion (sous-couches).

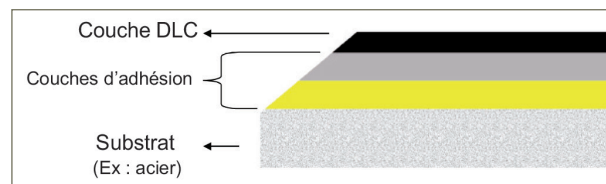
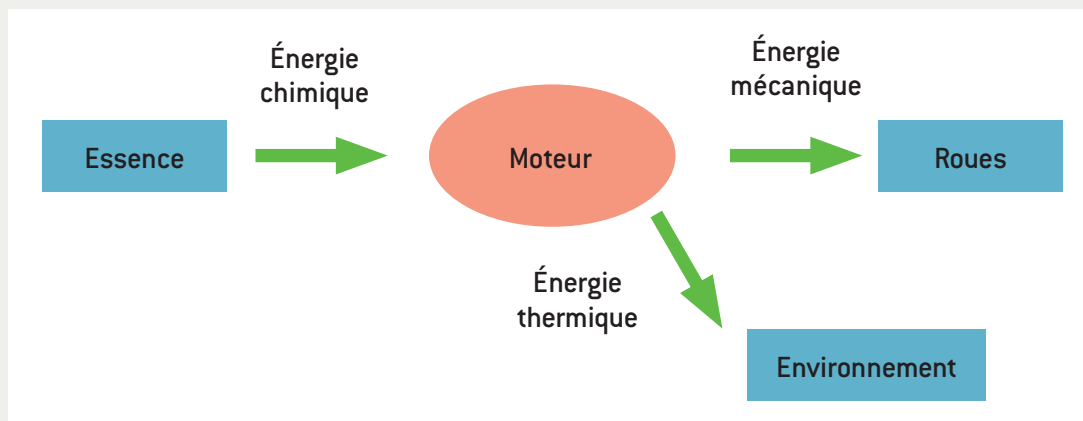


Figure 3 – Un revêtement est une superposition d'une ou plusieurs couches sur un substrat.

Le DLC est obtenu à partir d'hydrocarbures (carbone et hydrogène sont les constituants des dépôts organiques fossiles, comme les pétroles ou les

Le moteur thermique : un convertisseur d'énergie

Au court du cycle de fonctionnement d'un moteur, l'énergie chimique contenue dans l'essence est convertie en énergie mécanique grâce au moteur. Cette transformation n'a pas un rendement de 100 % : une partie de l'énergie chimique est convertie en énergie thermique.



charbons). DLC est l'abréviation anglaise de *Diamond Like Carbon*, la traduction française est carbone pseudo-diamant. Pour aller plus loin sur la structure chimique du DLC, vous pouvez vous référer à l'encart « Le DLC, entre le diamant et le graphite ».

Propriétés du DLC

Comme l'indique son nom, le DLC combine les propriétés de deux formes minérales du carbone :

la grande dureté du diamant (matériau le plus dur connu) et des qualités lubrifiantes proches de celles du graphite (6).

L'intérêt du DLC apparaît clairement sur les données 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 (7), associée à une valeur particulièrement faible du coefficient de frottement.

Le DLC, entre le diamant et le graphite

Pour décrire le DLC, il faut entrer au cœur de la structure atomique de ce matériau. Il 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 jusqu'à quatre atomes voisins.

Dans le carbone pur (en tant que matériau), on peut avoir, pour tous les atomes de carbone liés avec quatre atomes de carbone voisins, c'est le cas du diamant (Figure 4, 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 atomes de carbone liés avec trois atomes de carbone voisins. Les liaisons constituent alors un réseau bi-dimensionnel, ces plans vont s'empiler : c'est le cas du graphite (Figure 4, à droite). Ces plans faiblement liés les uns aux autres, peuvent facilement glisser les uns sur les autres, nous avons affaire à un corps mou.

Diamant et graphite sont des formes cristallines du carbone : elles présentent des arrangements atomiques réguliers à longue distance (on dit « périodiques »).

Il existe aussi des formes non cristallines du carbone pur, qu'on appelle amorphes (Figure 4, au milieu). Elles contiennent des atomes liés à trois autres ou quatre autres atomes (elles n'ont pas l'organisation strictement périodique des cristaux). Les couches DLC appartiennent à cette dernière catégorie, elles contiennent aussi une quantité importante d'atomes d'hydrogène, apportés par la matière de départ, un hydrocarbure. Elles ont la dureté apportée par les atomes liés à quatre autres comme dans le diamant et les qualités de glissement, apportée par les liaisons à trois autres atomes comme dans le graphite (5).

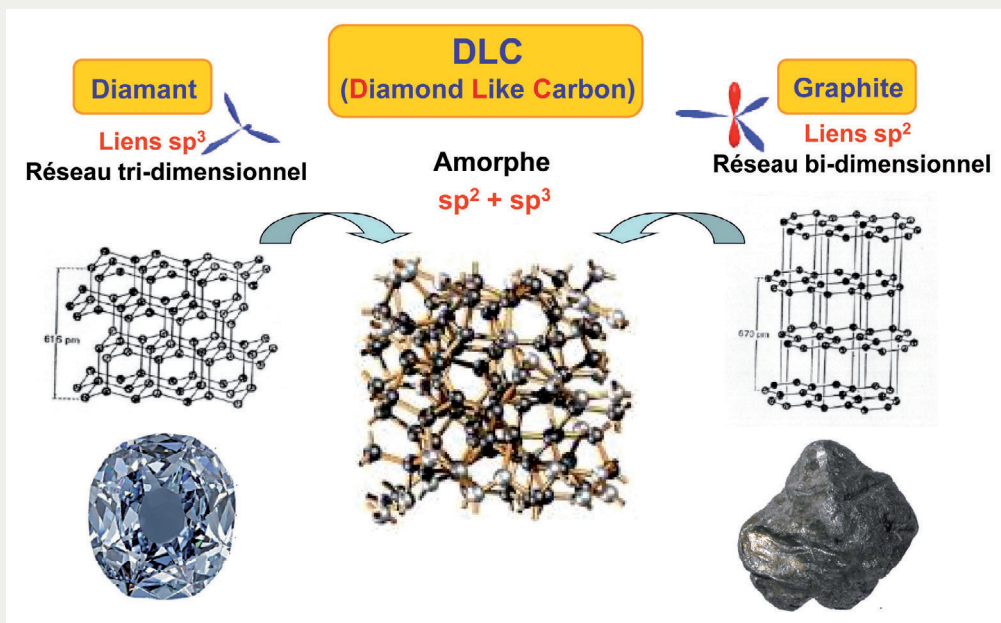


Figure 4 – Le DLC est un matériau dont les propriétés combinent la dureté du diamant et la souplesse du graphite.

	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 - 0,5
Diamant	100	0,2 - 0,4
DLC	20 - 35	0,05 - 0,10



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

Tableau 1 – Le DLC possède une dureté importante et un coefficient de frottement faible, ce qui conduit à de faibles pertes par frottements et à une usure limitée du matériau antagoniste (celui en contact avec le DLC : l'acier, dans notre cas).

Ces caractéristiques exceptionnelles du DLC rendent son utilisation, comme revêtement, extrêmement favorable dans les moteurs automobiles de compétition.

Quels composants du moteur recouvre-t-on de DLC ? Quel est le gain apporté par ce traitement ?

Afin de limiter les frottements internes à un moteur, il semble donc intéressant de déposer du DLC sur la surface des différentes parties qui le constituent.

Une des pièces à recouvrir dans le moteur est le piston. Si on leur apporte un traitement de surface au DLC, cela augmente la puissance du moteur, surtout pour des vitesses de rotation élevées : dans ce cas, le gain de puissance peut atteindre 2 % par rapport à un moteur dont les pistons ne sont pas traités (voir Figure 5).

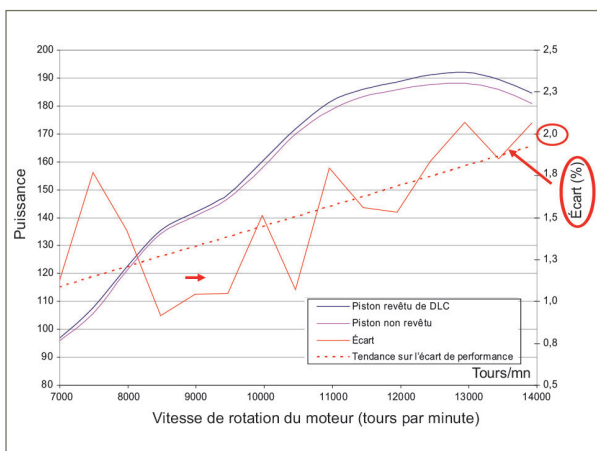


Figure 5 – Les tests réalisés sur les pistons montrent que le recours à des pistons recouverts de DLC améliore la puissance du moteur.

Le traitement d'autres parties du moteur (arbre à cames, linguets) diminue lui aussi les frottements et améliore également les performances du moteur.

DE LA F1 À LA VOITURE DE SÉRIE

Si le DLC a un impact intéressant en formule 1, qu'en est-il des voitures de série dont les moteurs tournent 5 à 6 fois moins vite ?

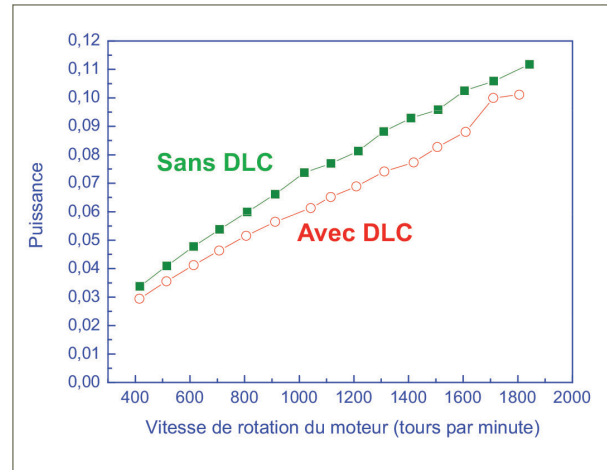


Figure 6 – Tests réalisés sur les poussoirs des moteurs de série.

La figure 6 donne un exemple de l'amélioration de performance apportée par une couche de DLC sur des poussoirs (une autre pièce à l'interface piston-vilebrequin) et confirme l'utilité du traitement des surfaces avec du DLC. Elle met en évidence l'effet du revêtement sur la puissance absorbée (et donc perdue) par les phénomènes de frottements, même pour des vitesses de rotation de moteur moins élevées qu'en F1.

Ainsi, le recours au DLC pourrait contribuer à rendre les voitures grand public moins énergivores. Porsche et Ferrari (Figure 7) envisagent déjà l'emploi de DLC à court terme dans leurs véhicules. Cela constituerait une étape signifiante avant que cette technologie ne passe au « vraiment grand public » !



Figure 7 – Porsche et Ferrari envisagent déjà l'emploi de DLC à court terme dans leurs véhicules.

POUR EN SAVOIR PLUS

(1) Chimie et voitures de formule 1 (Chimie et... junior)

<http://www.mediachimie.org/node/1063>

(2) Le salon de l'auto, c'est aussi de la chimie

<http://www.mediachimie.org/node/867>

(3) Le moteur électrique comparé au moteur thermique : enjeux et contraintes

<http://www.mediachimie.org/node/569>

(4) Les lubrifiants - « Un point sur... »

<http://www.mediachimie.org/node/491>

(5) Le diamant et ses ressources

<http://www.mediachimie.org/node/236>

(6) L'incubateur à carbone

<http://www.mediachimie.org/node/393>

(7) Les matériaux ultra durs : généralités et démarche prospective

<http://www.mediachimie.org/node/234>

Jean-Claude Bernier, professeur émérite de l'Université de Strasbourg, ancien directeur scientifique des sciences chimiques du CNRS

Patrice Bray, professeur de physique chimie

Andrée Harari, ingénieur ENSCP, directeur de recherches honoraire au CNRS, spécialité de recherches : science des matériaux

Grégory Syoën, professeur agrégé, chef de projet Mediachimie-Fondation de la maison de la chimie