

Revêtements anti-adhérent/easy-to-clean comme solution anti-encrassement pour la préservation du flux laminaire et réduction d'impact CO₂

M. Poelman¹, M.E. Druart¹, T. Sénéchal¹, A.L. Dechief¹, M. Fenero², J. Ochoa², G. Glabeke³, S. Gonzalez Ruiz³, A. Laurent⁴, B. Martinet⁵, C. Decroo⁵, R. Wattiez⁵, F. Bougard⁶, J. Bico⁷, A. Lechantre⁷, B. Abou⁸, D. Ghysselinckx⁹, C. Mengdehl¹⁰, T. Fol¹¹

1 Materia Nova ASBL, Av Copernic 3, 7000 Mons (Belgium) ; 2 CIDETEC, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Donostia-San Sebastián, Spain; 3 Von Karman Institute, St Genesius Rode (Belgium); 4 LMSM, Aix en Provence (France); 5 UMONS-IBS, Place du Parc, 7000 Mons (Belgium); 6 SOPURA, Corcelles (Belgium); 7 ESPCI, Paris (France); 8 CNRS Laboratoire Matière et Systèmes Complexes, Paris (France); 9 SONACA, Gosselies (Belgium) - 10 SONAIR, Gosselies (Belgium); 11 Airbus SAS, Toulouse (France)

Mots-clés: Sol gel, anti-adhérence, laminarité.

Particulièrement concernée par la réduction de consommation de fuel et d'émissions de CO₂, l'industrie aéronautique conçoit des structures et des matériaux permettant de préserver au maximum le régime laminaire et réduire la traînée. Le contrôle du flux laminaire est un moyen de garantir que l'air circule autour de certaines parties de l'avion en couches parallèles et permet de réduire de 5 à 10% la consommation de carburant. L'obtention d'un écoulement laminaire naturel nécessite une qualité de surface élevée. De minuscules perturbations de l'écoulement de l'air à la surface peuvent en effet provoquer une transition précoce d'un écoulement laminaire à un écoulement turbulent. Au niveau des bords d'attaque des ailes d'avion, les insectes qui frappent et se collent à la surface agissent comme des perturbations de la couche limite qui entraînent une perte de laminarité. L'accumulation de débris d'insectes sur le bord d'attaque des ailes laminaires a été reconnue comme l'un des problèmes opérationnels les plus importants associés à l'écoulement laminaire. Les nombreux insectes qui rencontrent les bords d'attaque des ailes empêchent le développement de grandes zones d'écoulement laminaire à faible frottement sur l'aile, rendant inefficace l'effort d'économie de carburant par l'utilisation de l'écoulement laminaire. Des résidus de moins de 150 µm de hauteur résiduelle sont suffisants pour générer des turbulences et ainsi réduire à néant le bénéfice du design développé, dans le cône de sillage turbulent du résidu.

Au fil des ans, différentes approches ont été proposées, notamment l'utilisation de revêtements pour atténuer la contamination par les insectes et préserver le flux laminaire. L'efficacité anti-contamination et la durabilité des revêtements constituent des enjeux auxquels le monde du traitement de surface doit répondre. C'est à ce type de défi que le projet CLEANSKY STELLAR tente de répondre.

Le projet STELLAR (Horizon 2020 Grant Agreement n°864769) propose une approche pluridisciplinaire qui s'appuie sur la complémentarité de 8 partenaires scientifiques et industriels de 3 pays européens (Belgique, France, Espagne) : 6 instituts de recherche (MANO, CIDETEC, UMONS-IBS, VKI, ESPCI et CNRS), avec une expertise reconnue dans les technologies de surface, la physico-chimie de surface, la biochimie et les tests spécifiques à l'aéronautique, développeront les connaissances de base et l'évaluation pour développer des produits et protocoles innovants qui seront ensuite évalués et validés par les entreprises industrielles impliquées dans le consortium : SOPURA et SONACA (et SONACA AIRCRAFT) avec le support technologique de La Mesure Sur Mesure (LMSM). Le topic manager du projet est AIRBUS SAS TOULOUSE.

L'objectif principal du projet STELLAR est de développer des solutions anticontamination efficaces et durables, conçues sur base d'une compréhension approfondie des propriétés biochimiques et physico-chimiques de l'hémolymphes et son interaction avec la surface. Les solutions optimisées sont testées à l'échelle laboratoire afin d'évaluer leur efficacité en termes d'anti-contamination et leur durabilité selon le cahier des charges de l'application (bords d'attaque). Des tests simulant les conditions de vol sont

ensuite réalisés en soufflerie en utilisant le réservoir d'un avion de test de SONACA AIRCRAFT (fixed leading edge). Un système d'injection d'insectes, mis au point par VKI, permettra de comparer l'efficacité anti-contamination des revêtements dans des conditions proches des conditions de vol (décollage – atterrissage). Les essais seront ensuite corrélés avec ceux réalisés sur l'avion de test en conditions réelles. A l'issue de ces tests, le revêtement le plus efficace et durable sera sélectionné pour être testé appliqué sur un élément mobile qui sera installé sur un avion commercial A320.

Différentes technologies de revêtement sont envisagées dans STELLAR pour atteindre les objectifs visés en termes d'anti-contamination et durabilité. Ces technologies sont illustrées dans le schéma de la figure 1.

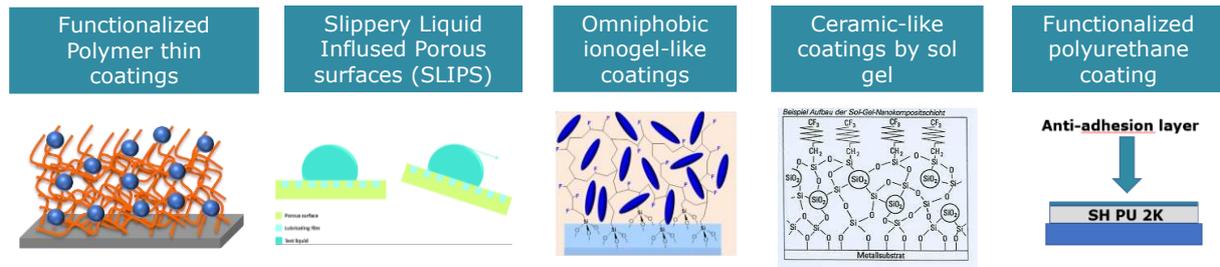


Figure 1. Technologies de revêtement de surface envisagées dans STELLAR

Parmi les technologies développées dans STELLAR, on focalisera la présentation sur les revêtements hybride obtenus par procédé sol gel.

Les procédés sol-gels (pour solution-gélification) permettent par polymérisation la formation de revêtements vitreux, durables, à base d'oxydes métalliques. Applicables comme une peinture, les sol-gels nécessitent souvent un traitement thermique pour atteindre leurs propriétés finales même si d'autres voies sont aujourd'hui explorées, comme la réticulation sous UV. Le mot « sol-gel » est l'abréviation de « solution-gélification ». La recherche sur ce type de matériaux est motivée par la pureté des réactifs et la faible température de traitement. La synthèse de verres, de céramiques et de composés hybrides organo-minéraux peut être élaborée grâce à cette technique, à partir de précurseurs en solution. Le procédé sol gel appliqué à la formulation de revêtement est souvent basé sur des réactions d'hydrolyse et condensation de précurseurs organométalliques de type $M(OR)_n$. De nombreux métaux (M) peuvent être utilisés dans le procédé sol-gel, toutefois, les plus fréquents sont le silicium, le zirconium ou encore le titane. R représente un groupement alkyle $-C_nH_{2n+1}$. En général, le procédé sol-gel s'effectue à température ambiante et donc nettement plus basse que celles utilisées pour les voies classiques de synthèse. Les réactions d'hydrolyse et de condensation sont généralement catalysées par un acide ou une base suivant le précurseur utilisé.

Un des avantages principaux des revêtements sol-gel est leur excellente adhérence sur des surfaces métalliques. Celle-ci est due à la formation de liaisons covalentes entre les alcoxy métalliques du sol et les groupements hydroxyles présents à la surface du métal comme illustré dans le schéma de la figure 2 (en jaune). Les fonctions non hydrolysables (groupements entourés en rouge et en vert) contribuent à la flexibilité du réseau (augmentation du caractère organique), à lui conférer des fonctionnalités spécifiques (longues chaînes hydrophobes) ou à favoriser l'accroche d'un top-coat.

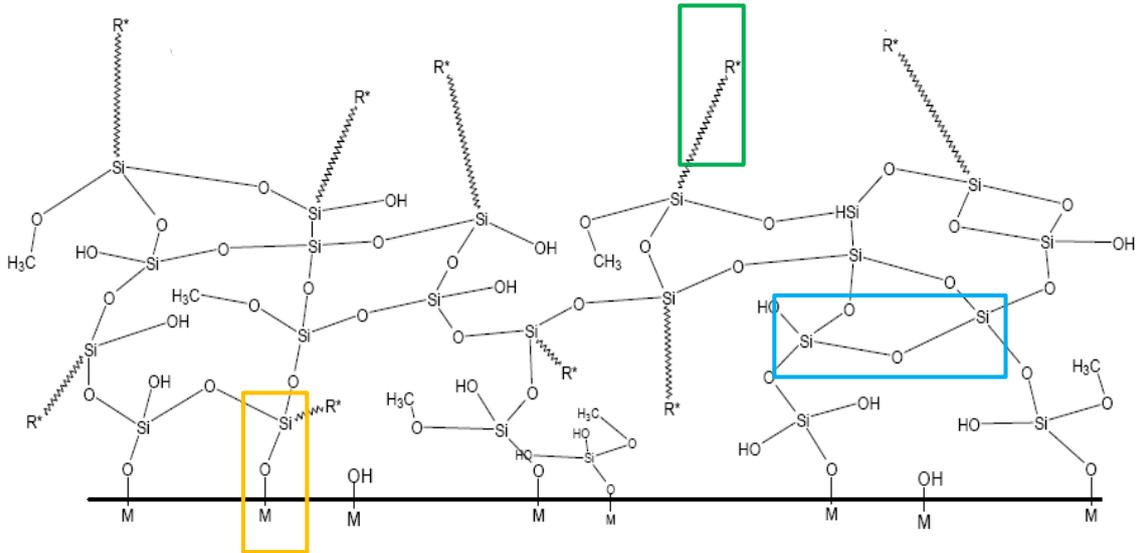
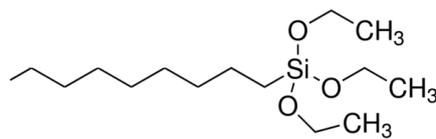


Figure 2. Représentation schématique d'un revêtement sol gel appliqué sur substrat métallique

Suivant les propriétés finales désirées (propriétés barrières, mécaniques, conductivité, ...), il est possible d'adapter et/ou de combiner différents précurseurs. Les revêtements sol-gels hybrides organiques-inorganiques à base de siloxanes ont été largement étudiés dans la littérature démontrant une efficacité en termes de protection anti-corrosion sur différents métaux. L'ajout d'additifs, de charges et de pigments est également envisagé pour moduler les propriétés des revêtements en termes de performances ou de structure.

En particulier, la recherche sur les propriétés d'anti-adhérence a montré que les surfaces à mouillabilité contrôlée présentait une accroche moindre vis-à-vis des salissures et une nettoyabilité facilitée. C'est cette approche qui a été envisagée dans le projet STELLAR.

Différentes voies peuvent être envisagées pour conférer les propriétés hydrophobes aux revêtements sol-gel : jouer sur la structuration, texturation de la couche ou sur ses propriétés chimiques. Suivant l'application visée il est préférable d'utiliser une voie plutôt qu'une autre. Les propriétés chimiques du revêtement peuvent être modulée via l'utilisation de précurseurs contenant de longues chaînes alkyles ou de type $-(CF_2)_n$.



Dans ce cas les angles de contact à l'eau sont généralement supérieurs à 110° mais ne peuvent égaler ceux présentés par les revêtements superhydrophobes. L'avantage principal de ces précurseurs réside dans la formation d'un réseau dense et barrière présentant d'excellentes propriétés de durabilité : thermique, en atmosphère humide, etc.

Différentes voies ont ainsi été envisagées pour obtenir des revêtements sol gel anti-salissures. Le critère d'évaluation à l'échelle laboratoire de la propriété anti-salissure est basé sur trois informations :

- Energie de surface : caractère hydrophobe/oléophile (illustration figure 3)

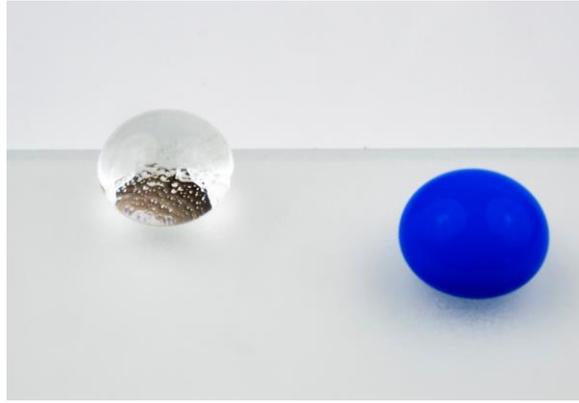


Figure 3. Démonstration du caractère hydrophobe d'une surface revêtue par sol gel additive

- Angle de glissance : Une goutte (10 μ L ou 50 μ L d'eau) est appliquée sur les échantillons testés. Le substrat avec les différentes gouttes est incliné de l'horizontale à la verticale. L'angle de glissement correspond à l'angle pour lequel la goutte commence à tomber/glisser. Un faible angle de glissance est souvent corrélé à l'effet anti-adhérent et une nettoyabilité facilitée.

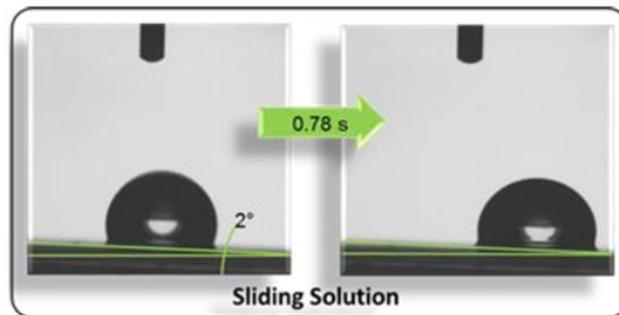


Figure 4 – Mesure de l'angle de glissance

- Test à l'hémolymphe artificielle : Les tests sont effectués en déposant une goutte de la solution de milieu de Schneider (hémolymphe artificielle) sur les surfaces. Les échantillons imprégnés sont séchés à l'étuve pendant 60 min à 37°C. Après le séchage, les échantillons sont nettoyés à l'eau (essuyage) et séchés à la température ambiante. Un examen visuel des traces et de l'intégrité du revêtement est effectué.

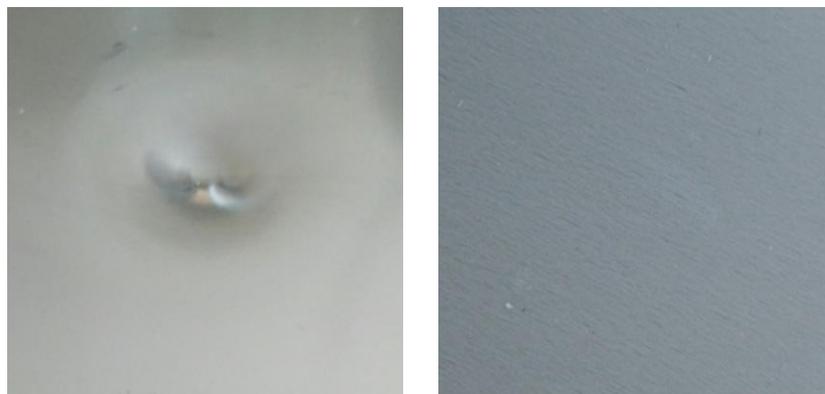


Figure 5 – Test Schneider sur substrat non traité (à gauche) et substrat traité par sol gel anti-adhérent (à droite)

Différentes solutions sol gel ont ainsi été sélectionnées sur base de leurs propriétés anti-adhérentes pour être évaluées selon des tests de résistance mécanique, chimique, durabilité, etc issus des requis de l'industrie aéronautique.

Les revêtements hybrides de type céramique obtenus par sol gel présentent donc des propriétés prometteuses :

- Fonctionnalité (propriétés de mouillage et nettoyabilité),
- Résistance mécanique (flexibilité, résistance aux rayures, résistance aux chocs et dureté).
- Durabilité dans des conditions d'utilisation simulées (résistance chimique, écaillage, vieillissement accéléré, érosion par le sable et l'eau, résistance à la corrosion et cycles thermiques).

La résistance aux UV est un point faible actuellement observé. Bien que le vieillissement UV n'affecte pas l'aspect des revêtements les propriétés de nettoyabilité diminuent avec les UV. Certaines pistes d'amélioration ont été identifiées et seront développées plus avant. Certains candidats ont cependant été sélectionnés pour des tests supplémentaires : essais en soufflerie et en vol avec l'avion de test de SONACA AIRCRAFT.

This project has received funding from the European Union's **Horizon 2020** research and innovation programme under Grant Agreement n° 864769

