

Alternatives pour les applications aéronautiques : enjeux et opportunités

Depuis plusieurs décennies, l'évolution de la réglementation européenne REACH visant à restreindre l'usage de certaines substances oblige de nombreux secteurs, dont l'industrie aéronautique, à opérer une transition majeure dans ses pratiques industrielles. Dans le domaine des traitements de surface tout particulièrement, de nombreux procédés historiques sont concernés et nécessitent d'être substitués. C'est dans ce contexte d'obligation de conduite du changement que toute une filière doit désormais évoluer pour transformer cette contrainte réglementaire en opportunité.

Jérémie Cotinot,
expert traitements
de surface, CCMPTS,
Safran Aircraft Engines

Le chrome hexavalent, également connu sous le nom de chrome 6 ou encore CrVI, est un constitué de chrome à l'état d'oxydation «+6». Dans cet état particulier, il se présente sous forme de complexes de chrome tels que les ions chromates ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) ou dichromates (CrO_4^{2-}) qui permettent à la fois de conférer des propriétés anticorrosion remarquables aux surfaces qu'ils recouvrent (ex : procédés dits de «chromatation») mais également de servir de vecteur pour former des revêtements épais de chrome métallique (ex : procédés dits de «chromage»).

Bien que connu depuis la fin du XIX^{ème} siècle, ce sont dans les années 1920 à 1950 que le chrome hexavalent trouve son réel essor industriel, en lien avec l'expansion de la galvanoplastie et la production de masse, dans le but de protéger de la corrosion des pièces en acier galvanisé pour un nombre varié d'applications et de domaines avec des requis sévères, comme le domaine aéronautique, militaire ou encore nucléaire (figure 1).



Figure 1.
Atelier de traitements
de surface, Snecma,
site de Billancourt, 1976
(©Safran Heritage Center)

Il faudra attendre les années 1970 pour que le chrome hexavalent soit véritablement reconnu pour être à l'origine de nombreuses pathologies aiguës et/ou chroniques rencontrées chez les personnels travaillant dans les ateliers de traitements de surface, mais également dans d'autres secteurs industriels, comme c'est le cas de l'industrie des tanneurs ou de l'ameublement.

Toujours en lien avec sa toxicité importante, le chrome hexavalent sera un peu plus tard identifié comme ayant un impact important sur l'environnement, via l'air et

l'eau, obligeant alors les décideurs publics et les organismes de régulations à proposer son encadrement d'usage dans les années 2000, au travers de directives européennes telle que la directive CMR, puis à sa mise sous autorisation un peu plus tard, via le règlement européen REACH*, géré par l'ECHA (European Chemical Agency) à partir de 2007.

Dans le domaine des traitements de surface, la mise sous autorisation, tout comme le respect des valeurs limites d'exposition professionnelle des personnels face aux vapeurs de chrome (ou VLEP, exprimées en mg/m^3 dans l'air), imposent à la fois des améliorations importantes des systèmes de protection individuels et collectifs, mais aussi et surtout la recherche de procédés alternatifs sans chrome hexavalent.

Porté depuis ses débuts par des applications de haute technologie, des matériaux de plus en plus légers et des pièces souvent sollicitées dans des environnements parfois corrosifs, le secteur de l'aéronautique emploie historiquement un large panel de procédés de traitements de surface mettant en œuvre du chrome hexavalent : décapages chimiques, anodisations de l'aluminium, dépôts galvaniques ou encore diverses peintures sont autant de procédés que la filière doit désormais faire évoluer sur une courte durée au regard de ses cycles de développement historiques.

Rappelons pour les non-initiés que le secteur aéronautique se caractérise par des durées d'incubation longues, en lien avec les multiples processus à mener afin de développer, justifier puis faire approuver par les autorités toute évolution d'un composant (ou pièce) qui compose un produit final. Ces exigences strictes trouvent notamment leurs origines auprès des autorités de certification nationales (DGAC ou Direction Générale de l'Aviation Civile, pour le secteur civil et DGA ou Direction Générale de l'Armement, pour le secteur militaire) qui sont garantes de la sécurité des vols et des personnes survolées, et imposent en ce sens une grande rigueur dans la gestion des évolutions.

Parmi les processus de développement, on peut notamment citer le processus de maturation technologique «TRL» (Technology Readiness Level, ou niveau de maturité technologique) qui est un système d'évaluation

* Registration, Evaluation, Autorisation and Restriction of Chemicals.

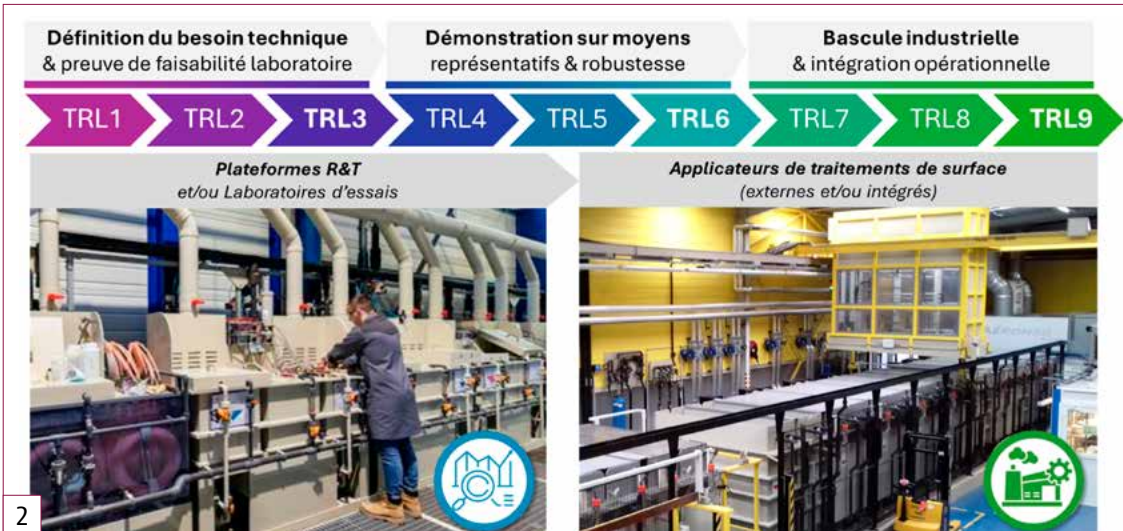


Figure 2. Echelle de maturité TRL et illustrations d'installations de développement R&T de traitements de surface associés. À gauche : Ligne prototype IRT M2P, site de Duppigheim. À droite : Ligne AERONEO, STEN, Groupe DYNEL

allant de 1 à 9, employé entre autres par le secteur aéronautique pour statuer sur la maturité d'une technologie donnée (procédé, matériau ou sous ensemble). Cette grille de cotation permet ainsi d'évaluer différents axes et d'auditer un développement depuis la définition du besoin (TRL 1) jusqu'à son intégration industrielle opérationnelle (TRL 9), en passant par des phases intermédiaires de démonstrations techniques (TRL 3 à 6) généralement menées à échelle semi-industrielle (ou démonstrateurs). La **figure 2** illustre les différentes étapes et enjeux associés à ce processus TRL.

Motivés par la réglementation REACH, ces travaux de recherche constituent une formidable opportunité de remettre à plat des phénomènes scientifiques vieux de plus d'un demi-siècle, et de confronter des procédés historiques avec le niveau de connaissance et les techniques de caractérisations actuelles. Chez Safran, tout comme dans un grand nombre de secteurs industriels, le processus TRL décrit plus haut est largement employé pour le développement des nouveaux procédés, puisque celui-ci permet d'assurer leur performance, leur robustesse mais aussi et surtout de limiter les risques liés à l'industrialisation de pièces en série, souvent associée à des investissements onéreux.

Comme évoqué, ces développements nécessitent alors le concours de toute la filière : recherche

académique, formulateurs de produits, plateformes de R&T (Recherche et Technologies), laboratoires testeurs, bureaux d'études, applicateurs de traitements de surface, ou encore financeurs étatiques dans le but d'aboutir à la qualification d'un nouveau procédé et promouvoir son usage par le plus grand nombre. En ce sens, il est également important pour l'ensemble des donneurs d'ordres de participer à des groupes de normalisation (ex : AFNOR) et des consortiums (ex : GIFAS) afin de coordonner, mutualiser et harmoniser les pratiques sur ces nouveaux procédés.

Parmi les procédés de traitements de surfaces concernés par les restrictions à court-moyen terme du chrome hexavalent, la quasi-totalité ont d'ores et déjà franchi les jalons TRL 6 et sont déployés, ou en cours de déploiement auprès des fournisseurs. Cette relative efficacité, qui aura pris une vingtaine d'année de développement tout de même tous procédés confondus, met en évidence l'importance de l'enjeu qui se déroule en toile de fond : conserver l'agilité des développements afin de garantir la pérennité des fabrications et continuer à produire sur le sol européen avec des procédés d'avenir, plus respectueux des hommes et de l'environnement. Dans cette optique, une proportion très importante de pièces a basculé et est dorénavant fabriquée en série selon ces nouveaux procédés, comme illustré sur la **figure 3** (non exhaustif).

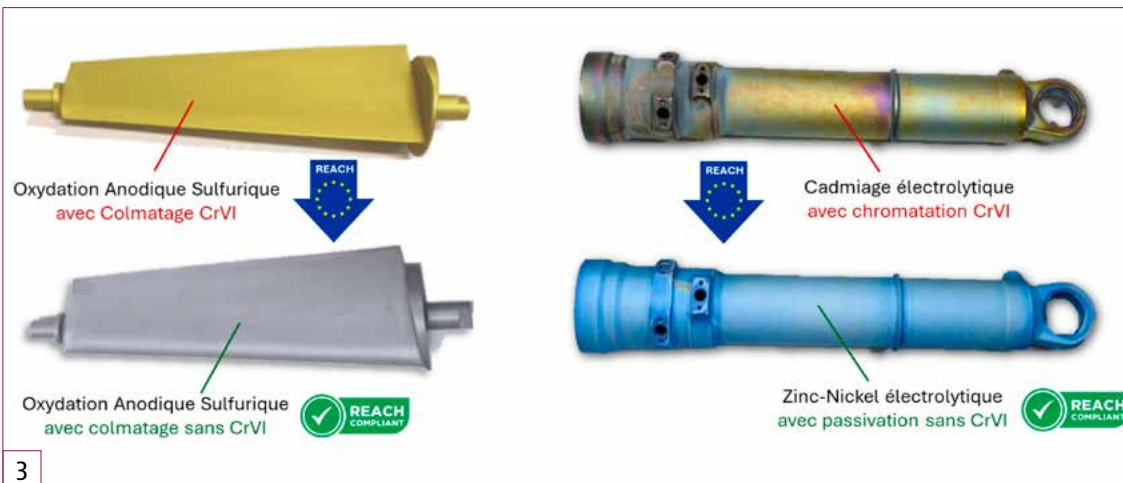


Figure 3. Exemples d'articles Safran revêtus d'anciens et nouveaux revêtements conformes à la directive REACH. À gauche : pièce de turboréacteur en alliage d'aluminium Programme GE90 / Safran Aircraft Engines. À droite : pièce de train d'atterrissage en acier Programme Falcon 900 / Safran Landing Systems

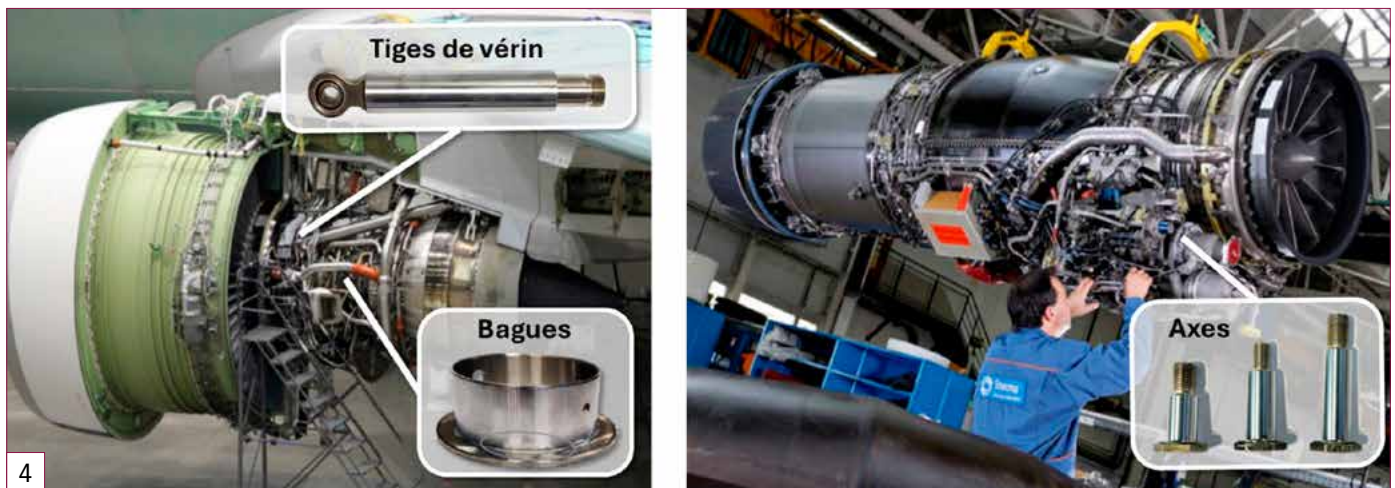


Figure 4. Illustrations d'application du chromage dur chez Safran Aircraft Engines. À gauche : moteur GE90 équipant le Boeing 777. À droite : moteur M88 équipant le Dassault Rafale.

L'ensemble des sociétés du groupe Safran est alors en ordre de marche et porté par une gouvernance responsable de gestion des substances, centralisée à l'échelle du groupe international. Une fois le chrome hexavalent substitué, le travail ne s'arrête pas là puisqu'un effort de conduite du changement reste à mener afin d'implémenter ces nouvelles pratiques dans les ateliers auprès des metteurs aux bains, des mécaniciens sur les lignes d'assemblages ou encore des clients utilisateurs.

La conséquence du retrait du chrome 6 amène par exemple des impacts cosmétiques importants qui nécessitent de remettre à niveau les standards d'acceptation historique. Des campagnes de sensibilisation et d'évolution des pratiques sont alors à mener à toutes les échelles afin de documenter ces évolutions qui font partie du cahier des charges. Les décideurs tout comme les financeurs et organismes de régulations sont désormais sensibilisés aux difficultés rencontrées par le secteur. Parmi elles, on peut notamment citer la difficulté à identifier une solution de substitution unique répondant aux différents cahiers des charges, face à l'échéancier imposé par la réglementation REACH. C'est le cas du procédé de « chromage dur », qui consiste à déposer une couche de chrome allant généralement de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres d'épaisseur selon les applications et réalisé dans un bain contenant de l'acide chromique, donc du chrome hexavalent. Comme son nom l'indique le chromage dur présente une dureté relativement élevée comparée à celles d'autres dépôts métalliques usuels (autour de 1000 Hv) ce qui en fait un candidat historique très polyvalent pour durcir une surface soumise à l'usure ou pour récupérer les cotes d'une pièce usée, et ce à des coûts extrêmement compétitifs, en plus d'être facilement usinable.

Pour le motoriste Safran Aircraft Engines, le chromage dur est historiquement employé sur une grande diversité d'applications très exigeantes (telles que des pièces de suspension, de régulation, d'étanchéité ou encore pour recharger des pièces usées) mais également sur une large variété de programmes : moteurs civils ou militaires, récents ou anciens, en neuf ou en réparation.

Ces différents cahiers des charges donnent alors lieu à une stratégie de substitution « à géométrie variable », en lien avec les différents enjeux technico-économiques de

chaque programme : volumétrie annuelle, disponibilité de la supplychain, facilités d'applications ou encore températures et usures des pièces. Ces éléments sont autant de variables qui imposent une analyse au cas par cas, et nécessitent alors un travail complexe, à la plus petite maille des pièces unitaires, coûteuses en ressources humaines et en temps. Quelques illustrations d'applications Safran Aircraft Engines en **figure 4** (non exhaustif).

Cette phase d'analyse impose dans certains cas d'adopter une approche technique proche du retro engineering, c'est-à-dire dans l'objectif de comprendre « pourquoi » le revêtement de chrome dur a été spécifié par les ingénieurs concepteurs des programmes conçus dans les années 1970 à 1990. Une fois ces différents cas d'emploi compris, et en lien avec l'absence d'une solution parfaitement équivalente au chromage dur utilisant du chrome 6 disponible, des études sont ensuite orientées vers une phase de définition d'éprouvettes d'essai représentatives, à comparer au chromage dur actuel. L'objectif final est de proposer des procédés de substitution pertinents, après avoir mené des essais d'usures (ou essais tribologiques) représentatifs des contraintes rencontrées en service (frottement, température, étanchéité ou évènement moteur particulier).

Pour cela, de nombreux fournisseurs et laboratoires sont sollicités afin de proposer des procédés existants ou bien en rupture et de les tester sur des bancs d'essais parfois imaginés pour l'occasion, représentant alors une formidable opportunité de co-développement. L'objectif est double : envisager des procédés non actuellement matures (comme les procédés de chromage avec des bains ne contenant pas de chrome 6) et profiter de cette opportunité pour les développer, soit, a contrario, de sélectionner des procédés et moyens déjà disponibles sur certains sites industriels et de valider leur applicabilité sur ces pièces dans le but de respecter les exigences réglementaires. En ce sens, l'industrie des traitements thermiques et de surfaces offre une très grande palette de procédés de protection contre l'usure par durcissement. Bien entendu, selon les matériaux, le type d'usure, la géométrie des pièces à traiter ou encore l'épaisseur à déposer, un choix minutieux doit être réalisé afin de trouver le meilleur compromis technique et économique.

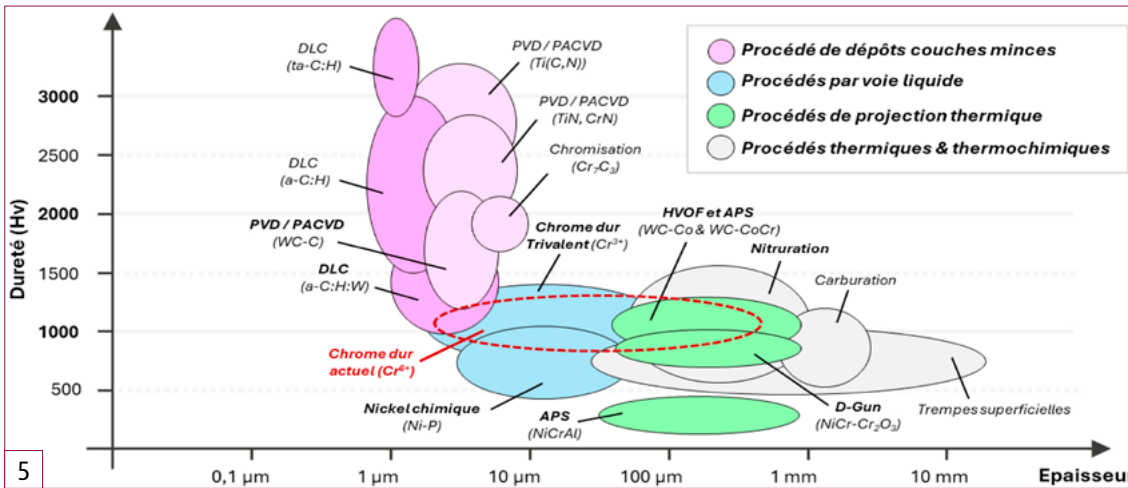


Figure 5. Principaux procédés de substitution au chromage dur envisagés par Safran Aircraft Engines selon leur dureté et épaisseur (non exhaustif)

La **figure 5** présente quelques-uns des principaux procédés de durcissement des surfaces connus dans l'aéronautique (non exhaustif).

Comme on le comprend sur la figure précédente, le nombre de procédés disponibles couplé au coût important des développements font qu'il n'est pas envisageable d'évaluer l'ensemble des technologies existantes. Cette contrainte illustre alors l'enjeu de sélectionner attentivement de «nouveaux» procédés dans la documentation, et de renforcer leur utilisation sur des programmes d'avenir. Ce lien entre la substitution d'un procédé historique, qu'est le chromage dur, et la qualification de nouveaux procédés pour des usages futurs illustre bien la perspective à laquelle font face les ingénieurs, contraints à proposer des solutions alternatives face à un sujet technique non résolu à ce jour.

Parmi les procédés envisagés pour remplacer le chromage dur, plusieurs sont alors en phase de test avec chacun leurs avantages et inconvénients, et des degrés de maturité plus ou moins avancés (en interne au sein du groupe Safran ou bien dans l'industrie au sens large). Parmi ces procédés alternatifs, nous pouvons citer les procédés suivants (**Figure 6**)

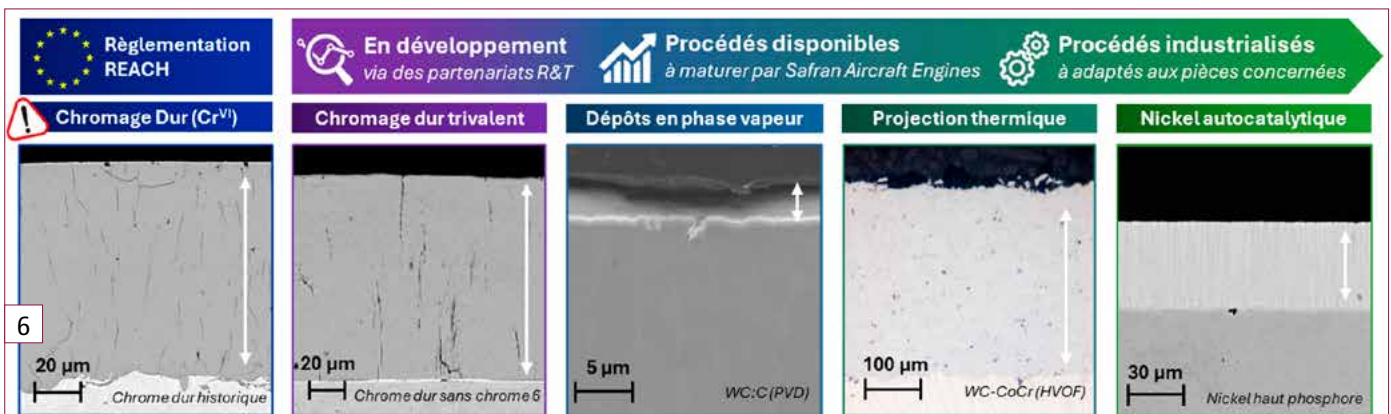
Parmi les différentes alternatives étudiées par Safran Aircraft Engines, l'une d'entre elle présente un enjeu particulièrement critique pour tout un secteur d'activité : le chromage dur en bain dit «trivalent», c'est-à-dire à partir d'un bain contenant du chrome sous la forme «chrome 3». Ce procédé, proche du chromage dur

historique en termes d'installations et de mise en œuvre, constitue en effet l'alternative permettant aux applicateurs de chromage dur de maintenir la pérennité de leur activité et des emplois qu'ils génèrent. En outre, ce procédé permet également une substitution proche du «1 pour 1» c'est-à-dire avec peu de compromis à faire vis-à-vis du cahier des charges fonctionnel.

C'est pourquoi, depuis plus de 10 ans, les applicateurs de chrome dur recherchent des alternatives au chrome hexavalent. Jusqu'à récemment, ces efforts n'avaient que très peu abouti pour des raisons techniques de l'ordre de la chimie et de la gestion des espèces en solution (verrous scientifiques). Sous l'impulsion de certains donneurs d'ordre en phase de substitution, de nouveaux développements ouvrent aujourd'hui la voie à des solutions qui pourraient, dans certains cas, remplacer le chrome 6 de façon plus ou moins pérenne. Par exemple, certains revêtements à base de chrome 3 (ou chrome trivalent) offrent une dureté équivalente à celle du chrome actuel en sortie de bain. Cependant, cette dureté a tendance à croître de façon très significative avec la température, limitant alors les usages et l'équivalence entre les solutions. Malgré ces contraintes, ils pourraient convenir pour des applications où les pièces évoluent à température ambiante (agroalimentaire ou actionnement).

Du côté des alternatives françaises, un effort de recherche important est en cours sur des bains de chromage dur trivalent à ligands dits «inorganiques» qui permettent d'obtenir un revêtement dont les propriétés

Figure 6. Coupes micrographiques de plusieurs procédés de substitution, selon leur degré de maturité. © Safran Aircraft Engines



sont très prometteuses, notamment en termes de dureté et de résistance à l'usure, mais avec cependant des compromis à faire.

Bien que l'objectif principal du chrome dur soit bien de durcir les surfaces qu'il recouvre, ces nouveaux procédés aboutissent à une protection contre la corrosion pour le moment moins efficace que leur prédécesseur, à dureté équivalente après dépôt, en lien avec la structure différente obtenue avec les bains à base de chrome 3 ou de chrome 6.

En effet, soit le dépôt répond au besoin en termes de dureté mais pas en termes de structure et de tenue anticorrosion, soit la structure est compatible de l'attendu mais la dureté reste trop faible. Également, ces bains nécessitent une grande maîtrise de la chimie, des courants électriques ou encore des contaminations, et ne sont à l'heure actuelle qu'à un stade de développement TRL relativement bas. Ce type de traitement reste cependant très pertinent et attractif pour des usages aéronautiques, avec des requis en température dépassant souvent les 200°C. Pour ces différentes raisons, le développement de ce type de chimie est soutenu par l'ensemble des donneurs d'ordre du secteur car prometteur, bien que non mature à l'heure actuelle (Figure 7).

Figure 7.

Installations semi industrielles de bains de chromage dur sans chrome 6.

© Chrome Dur Industriel



Comme c'est le cas pour l'ensemble des traiteurs de surface, le métier d'applicateur de chromage dur est voué à évoluer pour subsister. Là où le chrome hexavalent exigeait essentiellement un savoir-faire mécanique et des analyses sous traitées à des laboratoires externes, le passage vers ces nouveaux bains à base de chrome 3 s'accompagne d'un changement de paradigme au travers de nouvelles compétences et savoir-faire à développer : chimie fine, contrôle qualité, gestion assidue des procédés, tout en conservant la maîtrise des outils mécaniques. La complexité du sujet et les délais réglementaires impartis font que beaucoup de verrous restent à lever, et nécessitent un effort continu et soutenu de la part de tous les financeurs, étatiques ou industriels afin d'assurer, à terme, une capacité de production en série robuste, et à la hauteur des besoins de l'aéronautique. Nous l'avons compris, les enjeux sont multiples sur les plans technique, économique ou environnemental, et les industriels du secteur doivent désormais être résilients afin de s'adapter à ces évolutions réglementaires

et assurer la pérennité des fabrications. En ce sens, on comprend que plusieurs stratégies soient à l'œuvre et imbriquées dans divers processus de développement complexes qui obligent les décideurs aéronautiques à se positionner sur plusieurs fronts. L'importance d'intégrer l'ensemble de la chaîne de valeur est alors capitale pour avancer au mieux vers la ou les solutions les plus viables, quitte à remettre en question les coûts de fabrication, relativement faibles avec les procédés historiques et désormais plus importants sur les nouveaux procédés dont il est question ici.

Rappelons enfin qu'en parallèle de ce chantier visant à faire évoluer toute une filière industrielle, la réglementation européenne évolue elle aussi au gré des enjeux de société discutés à Bruxelles. Initialement destiné à être interdit sur le sol européen, un régime de «restriction» dont les règles ne sont pas encore définies est désormais jugé plus approprié par l'UE et l'ECHA afin de réglementer les risques associés aux chrome hexavalent pour la santé humaine, principalement en raison du nombre très important d'usages, qui génèrent une charge de travail considérable pour les autorités.

En ce sens, un nouveau projet de restriction établi à la demande de la commission européenne, est en phase d'instruction par l'ECHA, avec une possible entrée en vigueur à l'horizon 2028. Ce processus visera, non plus à interdire, mais à restreindre l'usage du chrome VI en limitant l'exposition des travailleurs (VLEP) ou encore les rejets atmosphériques. Il soulève toutefois des questions au sein d'une filière en pleine mutation : concurrence vis-à-vis d'autres régions d'Europe ou du monde, pérennité des investissements réalisés ou encore risque de retour en arrière de certains clients. Autant d'incertitudes réglementaires qui laissent planer le doute sur le choix de la stratégie à adopter par les industriels. Malgré ces défis, la transition vers un secteur aérien plus propre et décarboné reste plus que jamais l'objectif prioritaire. ■

BIBLIOGRAPHIE

1. Gigandet M.-P. et Thierry L., Chromatisation, Techniques de l'ingénieur, m1558, 2004
2. Brignon J.-M., INERIS, Le chrome et ses composés, documents INERIS, 2015
3. Ruimi M., Traitements de surface des matériaux par voie humide, EDP Sciences, 2013
4. APRE, CDTI, Guiding notes to use the TRL self-assessment tool, BRIDGE2HE H2020, EU, 2016
5. Belzane T. & Cotinot J., Substitution du chromage dur chez Safran Aircraft Engines, A3TS, 2025
6. Salvi T., Compréhension, mise au point et déploiement d'un procédé de chromage dur à base d'un bain de Chrome III à ligands inorganiques pour le traitement de pièces à géométries complexes et fortement sollicitées thermo-mécaniquement, Thèse doctorale, Institut UTINAM & IRT M2P, 2024
7. Zorgno R., Towards a CrVI restriction – Initial considerations on the transition from authorization to restriction for Cr(VI) substances, A3TS, 2026