

Aide informatisée au choix des traitements de surface

Computer aided design of surface treatments

D. Landru ⁽¹⁾, C. Tassin ⁽¹⁾, Y. Bréchet ⁽¹⁾, L. Salvo ⁽²⁾

Résumé

Depuis une dizaine d'années des outils informatique d'aide au choix des matériaux et des procédés ont été développés. A partir d'un cahier des charges défini par l'utilisateur, la démarche comprend plusieurs étapes : une "filtration" permettant d'éliminer les matériaux ou les procédés qui ne conviennent pas, un classement des solutions potentielles à l'aide d'un "indice de confiance" attribué à chaque choix proposé, et enfin une documentation apportant des informations complémentaires relatives au matériau ou au procédé retenu.

Le choix d'un traitement de surface, complexe par nature au vu du nombre de paramètres à prendre en compte, doit pouvoir être guidé par une démarche rationnelle identique à celles existant déjà pour les matériaux et les procédés.

Nous présentons ici une méthodologie de sélection des traitements de surface à partir d'un cahier des charges, ainsi qu'un logiciel développé pour réaliser cette sélection à l'aide de trois bases de données : une base qui recense les "matériaux-substrats" , une base décrivant les "objectifs" ou "propriétés fonctionnelles" visés par le traitement, et enfin une base des "traitements de surface" dans laquelle les attributs de chaque traitement sont détaillés afin d'être comparés aux propriétés définies dans le cahier des charges.

Cette démarche est ensuite testée sur des cas concrets, ce qui permet d'en apprécier les intérêts et aussi les limitations.

1 LTPCM, Institut National Polytechnique de Grenoble, St Martin d'Hères

2 GPM2, Institut National Polytechnique de Grenoble, St Martin d'Hères

1. Introduction

Depuis environ une dizaine d'années des méthodes de sélection des matériaux et des procédés ont été développées sous l'initiative de l'Université de Cambridge: l'intérêt de telles méthodes est de proposer des démarches rationnelles de sélection des matériaux et des procédés en fonction d'un cahier des charges lié à une application. L'avantage de disposer d'une méthode rationnelle réside premièrement dans la définition claire du cahier des charges d'une pièce (ce qui n'est pas toujours facile), dans la facilité de la transmission du savoir et surtout dans la réalisation d'un premier tri parmi les nombreuses possibilités qui s'offrent à l'ingénieur : on estime à plusieurs milliers le nombre de matériaux existants et à plusieurs centaines les procédés de fabrication. Sans détailler ici le principe de cette méthode, que l'on peut trouver dans des ouvrages de référence [1], nous allons tout de même en indiquer brièvement la philosophie pour montrer comment s'intègre par la suite la sélection des traitements de surface.

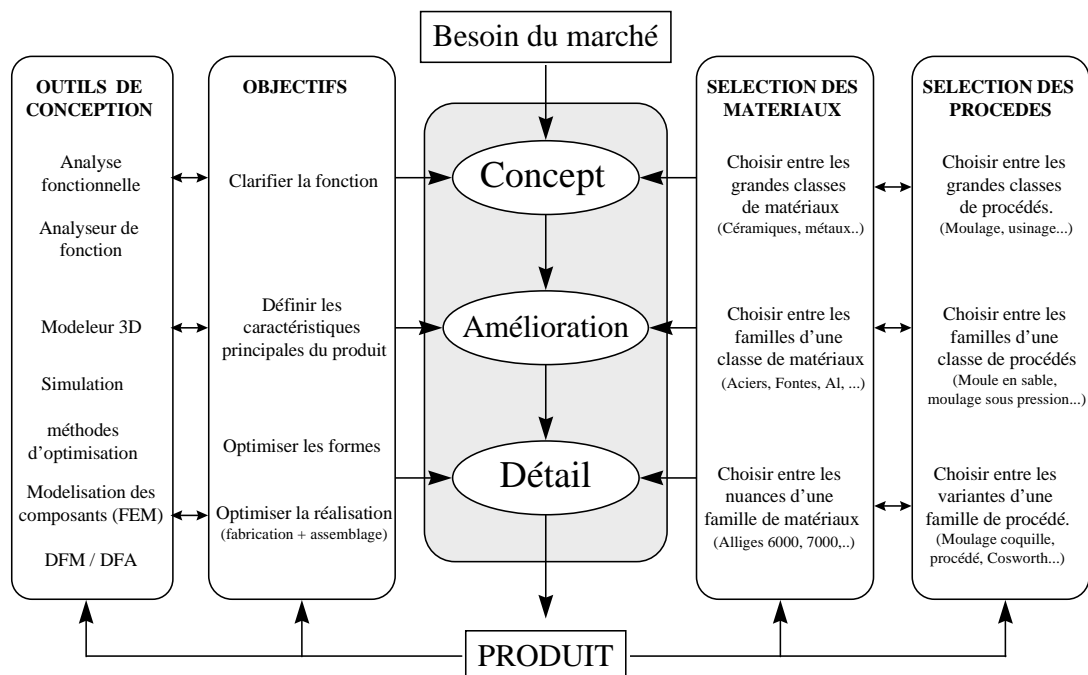


Figure 1 : Les grandes étapes de la conception et les niveaux d'information requis.

Le cheminement de la figure 1 (illustrée pour les matériaux et les procédés) montre que l'on passe d'une phase de concept (assez générale) à une phase de détail où chaque élément du cahier des charges doit être précisé et respecté. Ainsi en partant des grandes familles de matériaux (métaux, céramiques, composites, polymères, matériaux naturels), il est possible d'éliminer et de classer progressivement ceux-ci et d'aboutir à une liste finale réduite sur laquelle l'analyse détaillée sera menée. On distingue en général trois étapes :

- le filtrage qui se fait sur les propriétés des matériaux et sur les attributs des procédés.
- la classification qui se fait au travers d'indices de performances pour les matériaux et par les coûts sur les procédés.
- la documentation qui permet d'affiner sa sélection et de tenir compte d'information locale

Dans ce cheminement, on voit qu'il va être nécessaire de disposer de bases de données qui regroupent l'ensemble des matériaux de manière hiérarchisée comme le montre la figure 2 pour les matériaux (il en est de même pour les procédés ou les

formes des pièces). Pour chaque matériau nous disposerons des propriétés mécaniques, thermiques, électriques, environnementales de manière soit numérique, qualitative ou encore booléenne. Un point fondamental de ces bases de données est qu'elles doivent être pleines, en d'autres mots que pour chaque matériau, toute propriété doit être renseignée, sinon les étapes de filtration et de classification seront caduques.

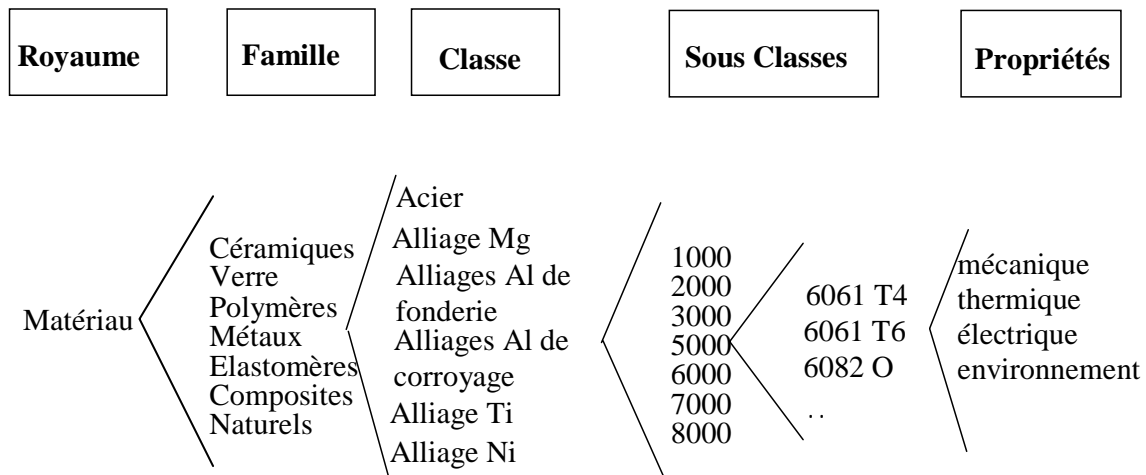


Figure 2 : Une base de données hiérarchique des matériaux

A partir de là la sélection est relativement simple : il suffit d'exprimer les critères du cahier des charges et de les tester sur les matériaux existants. Un des points forts de tout ceci est bien sûr l'utilisation de l'outil informatique qui permet, à partir de bases de données, de rendre opérationnelle cette méthodologie et de l'appliquer sur des études de cas. C'est ce qu'a compris l'Université de Cambridge en développant un logiciel CES [2] qui permet de suivre cette approche, ce qui n'est pas possible avec les autres outils existants.

Il reste que la démarche présentée ci-dessus reste parfois trop générale et qu'il est nécessaire de développer des approches complémentaires pour affiner certains points de la sélection. Ceci se fait en général par des approches de type questionnaire comme cela a été fait pour la sélection des procédés d'assemblages [3]. C'est aussi dans cet esprit qu'a été introduite la sélection des traitements de surface dans CES [2]. Nous allons maintenant décrire la méthodologie adoptée, ainsi que l'outil informatique développé dans un autre logiciel spécifiquement dédié au choix des traitements de surface: STS (Surface Treatment Selector).

2. Sélection des traitements de surface

2.1 Schéma général

La première étape consiste à rédiger le cahier des charges sur lequel va s'effectuer la sélection. Celui-ci doit contenir deux données indispensables : la nature du matériau de base et une liste des objectifs (propriétés fonctionnelles) visés par le traitement. Ces données sont extraites de deux bases intégrées dans STS et qui sont décrites dans le paragraphe suivant. Nous y détaillerons également la troisième base, celle des traitements de surface: c'est elle qui sera interrogée par le logiciel dans la procédure de sélection.

2.2 Les bases de données du logiciel STS

2.2.1. la base des "matériaux - substrats"

Elle est utilisée pour préciser la nature du matériau de base (désigné aussi sous le terme de "substrat"). Lorsque se pose la question de sélectionner un traitement de surface pour une utilisation donnée, le matériau de base qui constitue le volume de la pièce a généralement été déjà identifié lors de l'étape de conception de la pièce, au vu d'un certain nombre de propriétés physiques, structurales, de mise en forme, ainsi que du coût de réalisation des pièces. La base de données des matériaux substrats est construite de manière hiérarchique à partir des grandes classes de matériaux : métaux, céramiques et polymères. Elle contient 34 références dont la plupart désignent des matériaux métalliques (métaux ou familles d'alliages métalliques).

Cette base ne contient pas d'information sur les propriétés de ces différents matériaux, elle ne fait que définir le type de substrat sur lequel le traitement de surface devra s'appliquer.

2.2.2. la base des objectifs (ou " requêtes fonctionnelles")

Le recours à un traitement de surface est nécessaire lorsque le matériau de base choisi pour réaliser une pièce ne peut assurer les performances requises au niveau de la surface de la pièce: ces performances, désignées par les termes de "**propriétés fonctionnelles**" ou "**requêtes fonctionnelles**" peuvent être de natures très variées (aspect, résistance à la corrosion, résistance à l'usure, isolation thermique....) et ce sont elles qui vont dicter le choix du ou des traitements de surfaces adaptés. Il s'agit donc d'en dresser une liste dans le cahier des charges en s'appuyant sur la base de données correspondante. Cette base des objectifs, présentée figure 3, est répertoriée en quatre familles :

- **décoration** : il s'agit de conférer à la surface un aspect attractif : doré, coloré, mat ou brillant
- **protection** : lorsque la pièce est destinée à fonctionner dans un environnement agressif, il peut être nécessaire de protéger sa surface afin d'allonger sa durée de vie. En fonction du type d'agression (chimique ou mécanique), l'objectif sera de renforcer la tenue de la pièce à la corrosion, à l'oxydation, ou à l'usure.
- **fonctionnalisation** : il s'agit de conférer à la surface de la pièce des propriétés physiques particulières (optiques, électriques, thermiques, magnétiques, etc...). La grande variété de ces propriétés fait que de nombreux secteurs industriels sont concernés, parmi lesquels l'industrie de la microélectronique.
- **préparation** : certaines étapes finales de réalisation des pièces, qu'il s'agisse d'assemblage ou de finition par peinture, nécessitent un état de surface maîtrisé, par exemple de planéité maximale, ou au contraire de rugosité élevée. Une étape intermédiaire de préparation de la surface est alors nécessaire.
- **réparation** : lorsque la surface de la pièce a été endommagée, une réparation est parfois possible et peut s'avérer être une solution économiquement satisfaisante.

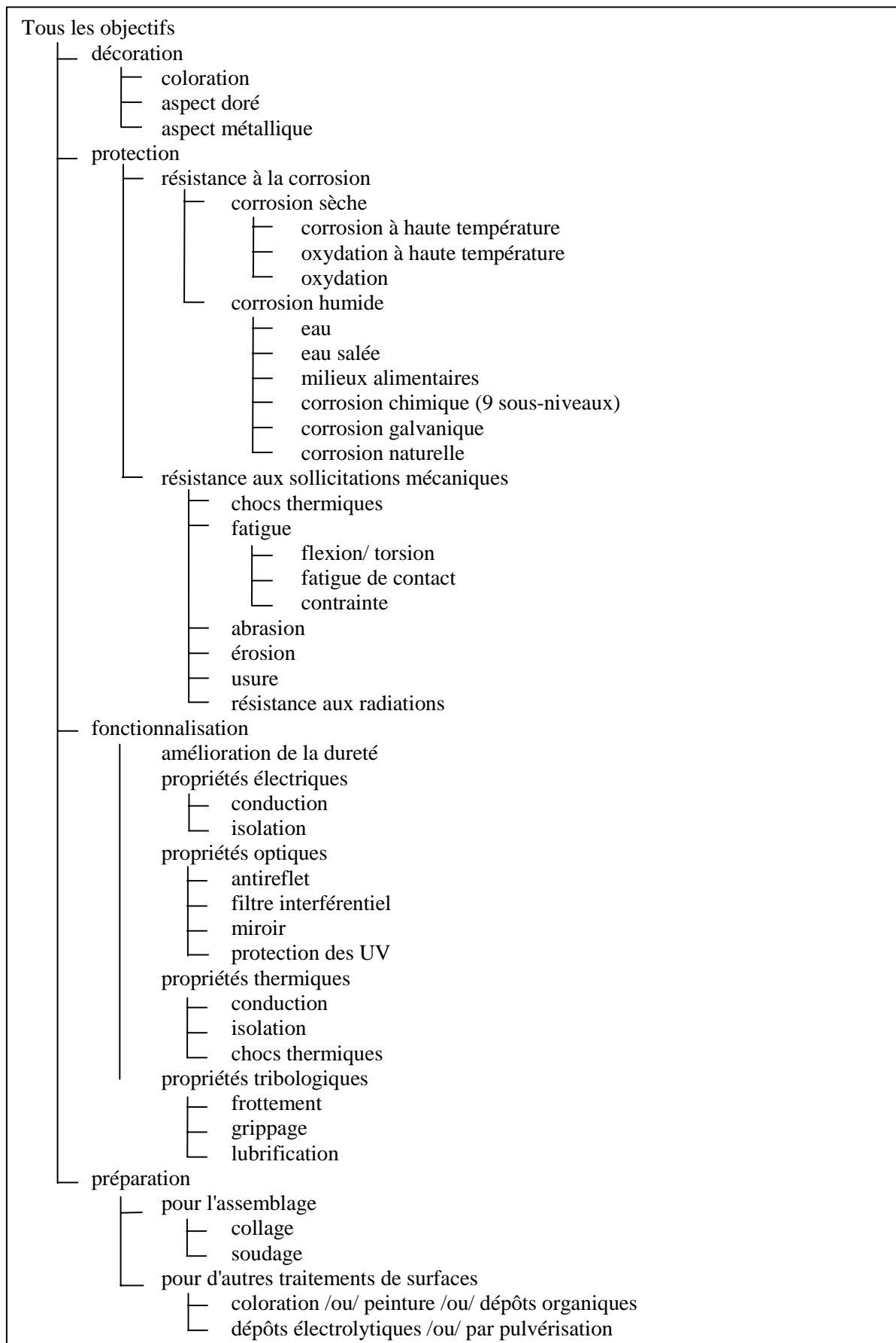


Figure 3 : Base des objectifs visés par les traitements de surfaces

2.2.3. La base des traitements de surface

C'est la base la plus importante de STS puisqu'elle doit à la fois recenser le plus grand nombre de traitements (actuellement 227 traitements sont référencés) et, pour chacun de ces traitements, contenir toutes les informations pouvant être comparées à celles définies dans le cahier des charges, c'est-à-dire :

- une liste des matériaux – substrats sur lesquels le traitement peut être effectué
- une liste des objectifs que le traitement peut remplir

Chaque traitement est ainsi détaillé dans une "fiche" qui regroupe ces attributs. Un exemple est donné sur la figure 4 dans le cas du revêtement de nickel chimique.

<p>Nickel chimique</p> <p>* Famille : dépôt chimique</p> <p>* <u>Matériaux substrats</u> :</p> <ul style="list-style-type: none">aciersfontesalliages d'aluminiumalliages de cuivrecomposites <p>* <u>Procédé</u> : dépôt chimique</p> <p>* <u>Objectifs</u> :</p> <ul style="list-style-type: none">conductivité électriquepréparation pour soudagerésistance à la corrosion naturellerésistance à la corrosion galvaniquerésistance à l'usurefrottementrésistance à l'érosionaugmentation de la dureté superficielle <p>* Propriétés du dépôt :</p> <ul style="list-style-type: none">matériau déposé : nickel (avec 6 à 12% de phosphore ou 2 à 7% de bore)dureté du dépôt : 500 – 900 HVépaisseur du dépôt : 25 μmcroissance : paraboliqueadhérence : variablepréparation de surface : très importanteporosité / bulle de gaz : négligeable <p>* Description du procédé : un métal est déposé sur un substrat par déplacement ou par réduction chimique d'un de ses sels présent en solution</p> <p>* Notes :</p> <p>Applications : industrie nucléaire, réservoirs, composants de pompes, vannes hydrauliques ou pneumatiques, moules pour industrie des plastiques</p> <p>Commentaires : dépôt régulier, excellent pour des applications de frottement</p> <ul style="list-style-type: none">la dureté après dépôt (400 – 500 HV) peut être portée à 1000 HV par un traitement thermique à 400°C (dureté comparable au "chrome dur")coût plus élevé qu'un dépôt électrolytique

Figure 4 : Fiche descriptive du dépôt de nickel chimique.

En plus des deux données (nature du substrat et objectifs visés) indispensables à la sélection d'un traitement de surface, chaque fiche contient un certain nombre d'informations complémentaires concernant : l'épaisseur du traitement, sa régularité, son adhérence sur le substrat, la température atteinte au cours du traitement, les limitations géométriques éventuelles des pièces à traiter, la formation de contraintes dans la zone traitée, le recours éventuel à un traitement (thermique par exemple) postérieur à celui sélectionné.

2.2.4 Adéquation à un cahier des charges

La sélection s'effectue en interrogeant toutes les fiches contenues dans la base des traitements de surfaces et en comparant, pour chaque traitement, les objectifs fixés par le cahier des charges et ceux que le traitement est capable d'assurer. L'adéquation globale est définie comme le produit de l'adéquation du substrat et de celle des objectifs. Lorsque la nature du substrat et tous les objectifs du cahier des charges figurent explicitement parmi les attributs d'un même traitement, alors ce traitement convient au problème posé avec une adéquation égale à 100 %.

Lorsque le substrat S (par ex. : acier) ne figure pas explicitement dans la liste des attributs du traitement, mais qu'un ascendant de S y figure (par ex. : métaux), alors l'adéquation du substrat est réduite à 90%. On considère en effet qu'un traitement compatible avec une famille plus large que S doit convenir pour S. A l'inverse, si c'est un descendant de S qui y figure (distant de S dans l'arborescence des substrats par un nombre d'embranchements égal à d), alors l'adéquation du substrat est donnée par l'expression $100 / (1+d) \%$.

Le calcul de l'adéquation d'un objectif à un cahier des charges se fait suivant les mêmes principes. Lorsque plusieurs objectifs figurent au cahier des charges, l'adéquation globale aux objectifs est définie comme la moyenne des adéquations de chaque objectif.

Au final, le résultat d'une recherche effectuée par STS est constitué d'une liste de traitements de surfaces classés par ordre décroissant d'adéquation au cahier des charges défini par l'utilisateur, comme cela apparaît dans l'exemple concret traité ci-dessous.

3. Etude de cas traitée avec STS

Examinons sur la figure 5 le résultat de la sélection effectuée par STS sur le cahier des charges suivant, fréquemment rencontré dans la réalisation de pièces pour des secteurs industriels très variés (industries mécanique, automobile, textile, papetière...) :

- matériau substrat : acier
- objectifs : amélioration des propriétés de frottement
amélioration de la résistance à l'abrasion

Résultats :

1. dépôt de carbure de tungstène par projection (adéquation = 90 %)
2. dépôt de molybdène par projection (adéquation = 90 %)
3. dépôt d'alumine par projection (adéquation = 90 %)
4. dépôt de diamant ou de carbone adamantin par CVD (adéquation = 90 %)
5. dépôt d'oxydes Cr_2O_3 , Al_2O_3 + TiO_2 par projection (adéquation = 90 %)
6. dépôt composite céramique-métal par projection (adéquation = 90 %)
7. dépôt de chrome dur électrolytique (adéquation = 90 %)
8. dépôt d'acier au chrome – molybdène par projection (adéquation = 90 %)
9. dépôt de nickel chimique (adéquation = 75 %)
10. dépôt chimique de nickel + SiC (adéquation = 75 %)
11. dépôt d'acier inoxydable par projection (adéquation = 68 %)
12. dépôt de cermet WC + Co, Cr_3C_2 + NiCr par projection (adéquation = 68 %)

Figure 5 : Solutions proposées pour améliorer les caractéristiques de frottement et de résistance à l'abrasion de pièces en acier

Les traitements proposés sont principalement les dépôts de matériaux auxquels leur dureté élevée confère une bonne résistance à l'abrasion, mais aussi possédant de bonnes propriétés de frottement. On retrouve bien dans cette liste les traitements appliqués industriellement pour répondre à ces deux objectifs :

- les dépôts de carbure de tungstène, utilisés pour revêtir les outils de coupe
- les dépôts de molybdène réalisés sur les segments de piston des moteurs d'automobile
- les dépôts d'alumine protégeant les guide-fils de l'industrie textile
- les dépôts de chrome dur réalisés sur un grand nombre de pièces frottantes (rails de guidage de machines outils, arbres, vérins, cylindres de laminoirs....)
- les dépôts de nickel chimique (renforcé ou non par des particules de carbure de silicium) utilisés pour le revêtement intérieur des cylindres de moteurs d'automobile

On voit donc sur cet exemple que les solutions proposées par STS correspondent bien à celles adoptées par les différents secteurs industriels concernés. Toutefois une réserve doit être faite en ce qui concerne les valeurs d'adéquation (ou indices de confiance) attribuées aux différents traitements : ces indices ne doivent pas être interprétés comme une hiérarchie stricte dans les solutions proposées par STS. En effet, ils reflètent pour l'essentiel la précision des informations figurant dans les bases de données, particulièrement en ce qui concerne la résistance aux divers modes de corrosion ou aux différents modes d'usure. Ces indices doivent donc être pris avec prudence, ils peuvent permettre d'écarter certains traitements clairement inadaptés, mais ils ne dispensent pas de rechercher des compléments d'informations pour les traitements potentiellement intéressants, soit dans la littérature, soit auprès des experts en traitements de surface.

3. Conclusion

La démarche de recherche d'un traitement de surface adapté à un cahier des charges donné est un problème souvent complexe par le grand nombre de paramètres qu'il faut prendre en compte : la nature du substrat, la nature du revêtement et les différents procédés permettant de le réaliser, ainsi que le coût de l'opération. Cette première version du logiciel STS a nécessité la collection d'une grande partie de ces paramètres, leur structuration au sein de trois bases de données, puis leur interconnection afin de rendre possible une procédure de sélection.

L'exemple présenté dans cet article montre bien l'intérêt et l'utilité de cette démarche, mais aussi ses imitations actuelles. L'adéquation d'un traitement à un cahier des charges se heurte en effet au niveau de précision, très variable, des attributs référencés dans chaque fiche de traitement : cela est vrai pour la nature du substrat, mais aussi pour des objectifs souvent recherchés tels que l'amélioration du comportement à la corrosion (dans quels milieux le revêtement est-il performant ?) ou à l'usure (quel est le mode d'usure mis en jeu ?).

Les améliorations à apporter à cette première version du logiciel STS concernent donc en premier lieu les bases de données qu'il s'agit de compléter. Pour la base des traitements de surfaces, il est nécessaire de préciser les objectifs, comme nous venons de le mentionner, mais aussi d'apporter des informations liées au procédé de traitement utilisé, comme la compatibilité avec le substrat (nature ou géométrie), la microstructure du revêtement obtenu, le coût de réalisation.....

Enfin il n'est pas inutile de préciser les ambitions de ce logiciel. Il s'agit avant tout d'un outil destiné à guider les concepteurs de pièces de structure et à orienter leur dialogue avec les experts en traitements de surface qu'ils seront dans tous les cas amenés à consulter. C'est également un outil pédagogique qui, grâce à la structuration des données permet de travailler avec des étudiants sur des projets précis.

4. Références bibliographiques

[1] Ashby M.F. "Materials Selection in Mechanical Design", Butterworth Heinemann Editors, 2nd edition, 1999, 502 pages

[2] Granta Design <http://granta.co.uk>

[3] M. Ashby, Y. Bréchet, L. Salvo "Sélection des Matériaux et des procédés de mise en œuvre", Traité des Matériaux, vol 20, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2001, 479 pages.

[4] D. Landru, Y. Bréchet, C. Tassin "Aide informatique à la sélection des revêtements et des traitements de surface", Matériaux et Techniques, n°1-2, 2002, page 3.