

MESURES MÉCANIQUES

États de surface: la norme

▼ La métrologie des états de surface est à un tournant de son histoire. Dans quelques mois sera en effet publiée la norme ISO 25178 portant sur la caractérisation des états de surface en 3D. Le nouveau document permettra de décrire les surfaces à l'aide de paramètres normalisés, et de mieux comprendre les phénomènes liés à leur microgéométrie. Pour les fabricants, les centres de recherche et les industriels qui ont participé aux travaux prénormatifs, c'est l'aboutissement de plusieurs années d'études. Nouveaux paramètres, nouvelles méthodes de calcul, nouveaux filtres... les changements sont nombreux. François Blateyron, directeur R&D chez Digital Surf, a participé à l'élaboration de la nouvelle norme. Il nous explique ici ce qui va changer.

Elle était très attendue, la voilà qui arrive enfin. Elle, c'est la toute nouvelle norme ISO 25178, qui devrait révolutionner le contrôle des états de surface. Fini l'emploi des paramètres bidimensionnels pour caractériser les surfaces en 3D, finis les "bidouillages maison" qui constituaient parfois le seul moyen de pallier l'absence de support normatif... Désormais, les surfaces pourront être caractérisées en 3D par des paramètres et des méthodes de calcul normalisés.

Pour comprendre l'intérêt de la nouvelle norme, il faut revenir quelques années en arrière. Depuis l'apparition des premiers enregistreurs de rugosité au début des années 30, la mesure des états de surface est longtemps restée basée sur la profilométrie

à contact: les instruments mesuraient le profil de la surface à analyser grâce au déplacement d'une pointe le long d'un trajet rectiligne. Mais à moins de se trouver dans des conditions particulières d'isotropie, la mesure de profil n'était pas représentative de la surface analysée. Pour pallier cette limite, les métrologues et les fabricants d'instruments de mesure ont défini un certain nombre de règles per-

mettant de se ramener au cas d'une surface isotrope, et de se satisfaire ainsi d'une mesure profilométrique. La norme ISO 4288, par exemple, spécifie de mesurer les profils suivant la direction perpendiculaire à celle de la texture (perpendiculaire aux stries dans le cas d'une surface brossée, par exemple). La méthode a fait ses preuves, mais elle se limite aux surfaces présentant une structure directionnelle (surfaces brossées, tournées, etc.).

Pour caractériser les autres surfaces anisotropes, il faut attendre le début des années 80... C'est à cette époque qu'apparaissent en effet les premiers moyens de mesure surfaciques, tels que les interféromètres en lumière blanche ou les profilomètres 3D. Grâce à eux, il est possible d'analyser tous types de surfaces, de caractériser des défauts localisés (écaillage, cratères, etc.) qui pouvaient passer inaperçus avec une simple mesure de profil, et de mieux comprendre les phénomènes liés à la microgéométrie des surfaces (frottement, usure, glissement, adhérence des dépôts, résistance aux chocs, etc.).

De Birmingham à Cancun

Avec le développement de ces instruments apparaissent les premiers paramètres 3D, qui sont souvent basés sur une extrapolation de ce qui existe déjà en profilométrie. Mais personne ne parle le même langage... Comme souvent en l'absence de norme, chaque fabricant, ou presque, préconise sa propre méthode de calcul. Et il faut attendre le début des années 90 pour que soient enfin lancés les premiers travaux de normalisation dans

l'analyse des états de surface surfaciques.

Les premières études sont réalisées dans le cadre d'un programme européen conduit par le professeur Stout de l'université de Birmingham. Le programme, qui se déroule de 1990 à 1993, aboutit à la publication du "livre bleu" (blue book) et à la définition d'un premier ensemble de paramètres (les "14 de Birmingham"). Pendant les années qui suivent, le rapport sert de référence à l'ensemble des fabricants d'instruments de mesure d'états de surface.

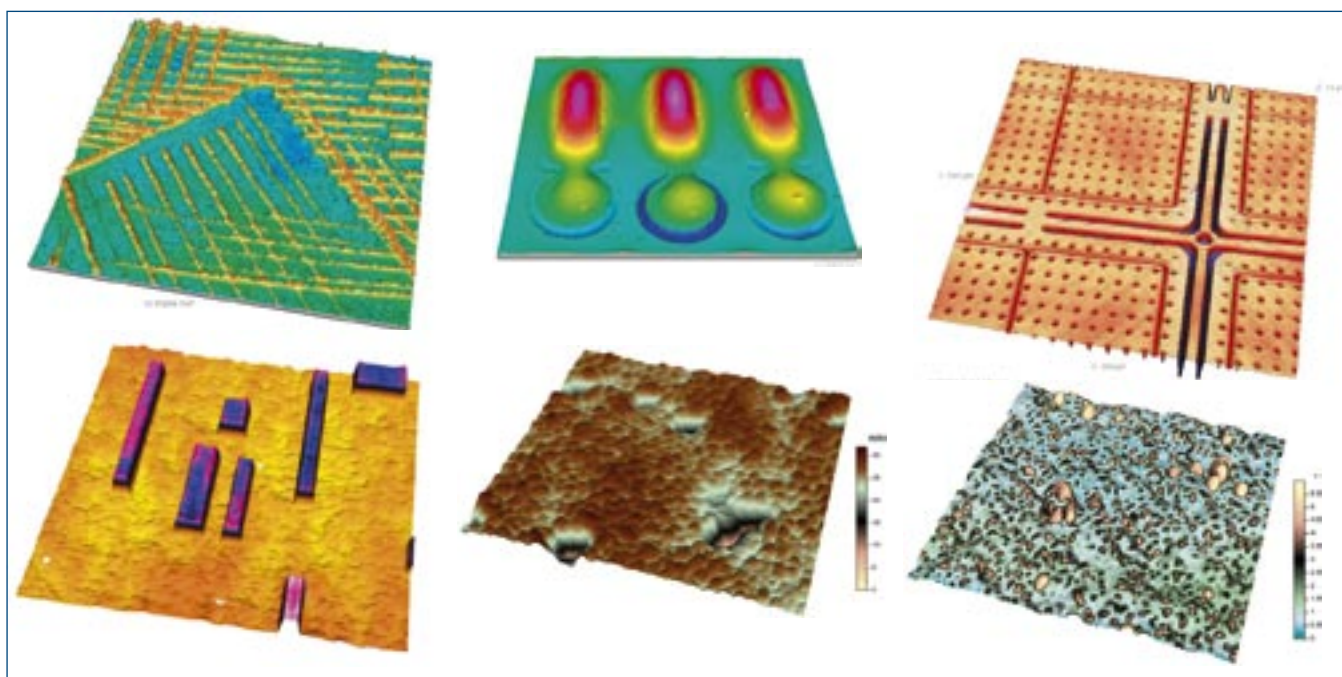
A la suite de ce programme, les comités techniques TC57, puis TC213, en charge à l'ISO de la normalisation des états de surface, décident de se pencher sur la question. Mais ils s'aperçoivent rapidement qu'il est nécessaire d'effectuer un travail de recherche complémentaire afin d'assurer la stabilité des paramètres 3D (pour qu'un même paramètre ait la même valeur en tout point de la surface) et leur corrélation avec les critères fonctionnels utilisés dans l'industrie. Ils souhaitent aussi que la future norme couvre les instruments de mesure eux-mêmes, ainsi que leur étalonnage. Ces travaux sont menés dans le cadre d'un nouveau programme de recherche européen baptisé Surfstand, qui réunit un ensemble d'universitaires, de fabricants d'instruments de mesure et d'industriels (constructeurs automobiles, roulementiers, etc.). Les travaux se déroulent de 1998 à 2001 et aboutissent à la publication du "livre vert" (green book), qui jette les bases de la future norme.

Les résultats de ce programme sont officiellement présentés et confiés à l'ISO durant la

L'essentiel

- ▶ Dans quelques mois sera publiée la norme ISO 25178 permettant de caractériser les états de surfaces en 3D.
- ▶ Le document définit de nouveaux paramètres et de nouvelles méthodes de calculs permettant de mieux appréhender les phénomènes liés à la microgéométrie des surfaces.
- ▶ A terme, il modifiera aussi la définition des paramètres utilisés jusqu'à présent en profilométrie 2D.

ISO 25178 va tout changer



Les systèmes de mesure surfaciques permettent d'analyser tous types de surfaces, de mieux comprendre les phénomènes liés à leur microgéométrie et de caractériser les défauts localisés. Grâce à la future norme ISO 25178, il sera désormais possible de décrire les états de surface en 3D grâce à des paramètres et des méthodes normalisés.

réunion de Madrid en janvier 2002. Six mois plus tard, le comité TC213 vote la création d'un nouveau groupe de travail, le WG16, et lui assigne la tâche de développer la future norme. Celui-ci doit bien sûr définir le contenu d'un document régissant la caractérisation tridimensionnelle des états de surface, mais aussi réviser les normes existantes en profilométrie afin de les rendre cohérentes avec la nouvelle norme. Le groupe se réunit pour la première fois en janvier 2003 à Cancun. Durant trois ans, il élabore la norme tant attendue à partir des travaux réalisés par le programme Surfstand. Fin 2005, l'ISO alloue le numéro 25178 à la norme, et lui donne ainsi un passeport officiel...

Les nouveaux paramètres

Il faut d'ores et déjà s'attendre à de nombreux changements. A l'inverse de la démarche qui avait été suivie jusqu'à présent, dans laquelle les outils existants en profilométrie étaient extrapolés à l'analyse surfacique, les

états de surface seront désormais définis d'abord en 3D, puis déclinés en 2D. Pour les professionnels du domaine, cette démarche devrait permettre d'établir un ensemble cohérent de définitions reposant sur des bases mathématiques rigoureuses, et non plus sur l'extrapolation de concepts utilisés par expérience dans l'industrie depuis une vingtaine d'années.

Première règle adoptée, celle qui définit **l'appellation des nouveaux paramètres surfaciques**. Ceux-ci commenceront par la lettre majuscule S (ou V pour certains paramètres fonctionnels). Contrairement à ce qui existe en 2D, les préfixes des paramètres 3D ne refléteront plus les distinctions entre les composantes de rugosité, d'ondulation ou de structure. Vu la multiplicité des traitements et des filtrages qui sont désormais à la disposition des métrologues pour extraire l'information d'une surface, la séparation en trois composantes semble en effet obsolète. Là où l'état de surface en 2D fait la différence

entre Pa, Ra et Wa, le domaine du 3D n'emploiera donc que Sa. Ce dernier sera un paramètre surfacique de rugosité, d'ondulation ou calculé sur la surface primaire, suivant le préfiltrage qui aura été effectué avant de calculer le paramètre.

Les paramètres d'amplitude. La plupart des formules mathématiques permettant de calculer les paramètres d'amplitude en 2D suivant l'ISO 4287 peuvent être facilement applicables à la mesure surfacique. C'est le cas par exemple de la rugosité moyenne quadratique du profil Rq, dont la formule contient une intégrale simple. En passant à l'intégrale double (sur une surface), on définit tout naturellement le paramètre Sq (rugosité moyenne quadratique de la surface). La même règle s'applique également pour les paramètres Sa (rugosité moyenne arithmétique), Ssk (facteur d'asymétrie), Sku (facteur d'aplatissement), Sp (hauteur maximale des pics) et Sv (profondeur maximale des creux).

Les nouveaux paramètres de l'ISO 25178

| | Paramètres 2D (normes ISO 4287, ISO 13565-1 et 2) | Paramètres surfaciques (future norme ISO 25178) |
|--------------------------------|---|--|
| Paramètres d'amplitude | Ra, Pa, Wa (Ecart moyen arithmétique du profil) | Sa (Rugosité moyenne arithmétique de la surface) |
| | Rq, Pq, Wq (Ecart moyen quadratique du profil) | Sq (Rugosité moyenne quadratique de la surface) |
| | Rsk, Psk, Wsk (Facteur d'asymétrie du profil) | Ssk (Facteur d'asymétrie de la surface) |
| | Rku, Pku, Wku (Facteur d'aplatissement du profil) | Sku (Facteur d'aplatissement de la surface) |
| | Rp, Pp, Wp (Hauteur maximale de saillie du profil) | Sp (Hauteur maximale des pics) |
| | Rv, Pv, Wv (Profondeur maximale de creux du profil) | Sv (Profondeur maximale des creux) |
| | Rt, Pt, Wt (Hauteur totale du profil) | St remplacé par Sz |
| | Rz (Hauteur maximale du profil) | Sz (Hauteur maximale de la surface, du plus haut point à la plus profonde vallée) |
| | Rc (Hauteur moyenne des éléments du profil) | Pas d'équivalent |
| | Rsm (Largeur moyenne des éléments du profil) | Pas d'équivalent |
| Rdq (Pente moyenne du profil) | Sdq (Pente moyenne de la surface) | |
| Paramètres de taux de portance | Rmr, Pmr, Wmr (Taux de longueur portante du profil) | Smr (Taux de surface portante) |
| | Rdc, Pdc, Wdc (Différence de hauteur de coupe du profil) | Sdc (Différence de hauteur de surface portante) |
| | Pas d'équivalent | Smc (Hauteur de taux de surface portante) |
| Paramètres d'isotropie | Pas d'équivalent | Str (Rapport d'aspect de la texture de surface) |
| | Pas d'équivalent | Sal (Longueur d'autocorrélation de la surface) |
| | Pas d'équivalent | Std (Direction de texture de la surface) |
| Paramètres fonctionnels | Rk, Rpk, Rvk | Sk, Spk, Svk |
| | Pas d'équivalent | Vmp, Vmc, Vvc, Vvv (Paramètres de volume) |

Seul le célèbre Rz (hauteur maximale du profil) pose problème, puisqu'il existe un paramètre Rz dit "des dix points" (défini dans la norme ISO 4287 de 1984) et une variante, définie (en 1997) comme étant la moyenne des hauteurs maximales de profil Rti calculées sur chaque longueur de base. Par souci de simplification, le Sz sera défini dans la future norme comme "la hauteur maximale du plus haut point à la plus profonde vallée", comme l'était jusqu'à présent défini le St. Ce dernier, devenu inutile, disparaît de la norme.

Les paramètres de taux de portance. Ces paramètres, qui se rapportent à la distribution des hauteurs, sont eux aussi facilement

exprimables en 3D. Les paramètres Rmr et Rdc deviennent ainsi Smr (le taux de surface portante) et Sdc (la différence de hauteur de surface portante).

On note cependant l'apparition d'un nouveau paramètre, Smc, qui définit la hauteur de taux de surface portante (ou la valeur inverse du taux de portance).

L'analyse spectrale permet elle aussi de définir un certain nombre de paramètres caractéristiques de la surface. A partir de la transformée de Fourier et de la fonction d'autocorrélation, il est possible en effet de distinguer les surfaces isotropes (qui présentent des caractéristiques identiques quelle que soit la direction de la mesure) des sur-

faces anisotropes (qui présentent un état de surface aléatoire).

L'image obtenue par autocorrélation comporte un pic central (accompagné dans certains cas de pics secondaires). Les rayons minimum et maximum du lobe que l'on obtient à partir du seuillage du pic central permettent de caractériser l'isotropie de la surface. Si la surface présente les mêmes caractéristiques dans toutes les directions, le lobe central sera approximativement circulaire, et les rayons minimum et maximum approximativement égaux. Si au contraire la surface présente une orientation privilégiée, le lobe central sera "allongé" et le rayon maximum sera supérieur au rayon minimum. En calculant le rapport des deux rayons (R_{\min}/R_{\max}), on obtient ainsi un bon indicateur de l'isotropie de la surface. Ce paramètre est le rapport d'aspect de la texture (Str).

La valeur R_{\min} fournit également une indication utile sur le contenu spectral de la surface. Une surface comprenant essentiellement des composantes spectrales de grande longueur d'onde, par exemple, fournira un rayon minimum R_{\min} élevé. Dans la nouvelle norme, R_{\min} prend le nom de longueur d'autocorrélation (Sal). Ce paramètre est exprimé en micromètres.

Le spectre de Fourier, enfin, permet de déterminer la direction des structures de la surface. En représentation polaire, le spectre montre en effet des maxima qui correspondent aux directions privilégiées de la surface. L'angle correspondant au maximum du spectre polaire permet de définir le paramètre Std (direction de texture), exprimé en degrés.

Les paramètres fonctionnels. La caractérisation fonctionnelle d'un état de surface joue un rôle primordial dès que deux pièces entrent en contact. L'industrie mécanique, et en particulier l'industrie automobile, a donc longtemps cherché à optimiser les paramètres et les méthodes de filtrage afin d'améliorer leurs corrélations avec les phénomènes fonctionnels. Le premier réflexe a été de reproduire en 3D la construction graphique utilisée pour définir les paramètres fonctionnels de la norme ISO 13565-2. En gardant la courbe d'Abbott (calculée cette fois-ci sur l'ensemble de la surface), on peut en effet calculer les paramètres Sk, Spk et Svk, homologues des paramètres Rk, Rpk et Rvk.

De même, le projet Surfstand avait défini un jeu d'indices fonctionnels permettant de caractériser les zones de la surface intervenant dans les phénomènes de lubrification, d'usure et de contact : Sbi (l'indice de portance) caractérise, à la manière de Spk, la zone haute de la surface concernée par les phéno-

mènes d'usure. *Sci* (l'indice de rétention de fluide du cœur) représente quant à lui le volume de vide principal agissant comme réserve de lubrifiant et *Svi* (indice de rétention de fluide des creux) caractérise, à la manière du *Svk*, le volume de vide des vallées les plus profondes.

Tous ces paramètres représentent une étape intermédiaire vers la définition de **paramètres fonctionnels de volume**, jugés plus pertinents. Comme les précédents, ces paramètres sont calculés sur la courbe d'Abbott (à partir de deux seuils de taux de portance fixés à 10 et 80 %). On définit ainsi deux paramètres de volume de matière (V_{mp} et V_{mc} , pour les pics et le cœur) et deux paramètres de volume de vide (V_{vc} et V_{vw}). Ces paramètres sont exprimés en unité de volume par unité de surface (ml/m^2 ou $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$). À terme, seuls ces paramètres de volume devraient figurer dans la norme ISO 25178.

La segmentation et le filtrage

Dans les années 70, des ingénieurs de l'école des Arts et Métiers, de Peugeot et de Renault ont conçu une méthode d'analyse des motifs d'une surface destinée à caractériser les états de surface fonctionnels. La **segmentation**, c'est son nom, permet d'identifier les motifs de la texture qui interviennent dans une fonction particulière de la pièce (lubrification, contact, etc.).

La méthode, qui a connu un large succès

dans l'industrie française, a été normalisée au niveau international en 1996. Depuis, plusieurs spécialistes ont essayé, sans grand succès, d'extrapoler la méthode aux états de surface en 3D. Il a fallu attendre l'application des méthodes d'analyse d'image aux états de surface 3D pour retrouver l'intérêt de la segmentation, qui figure désormais dans la future norme ISO 25178. Elle permettra notamment de calculer les paramètres S_d (densité de pics) et S_{sc} (courbure moyenne des pics).

Parallèlement aux travaux menés par le groupe WG16 sur les états de surface surfaciques, l'ISO a créé un autre groupe de travail (WG15) avec un rôle bien spécifique : développer une "boîte à outils" proposant différents types de filtres, valables en 2D et en 3D.

Ce groupe développe actuellement une spécification technique en plusieurs parties, l'ISO TS 16610. Pour l'instant, seules les versions de filtres en 2D sont définies. Néanmoins, le filtre gaussien, couramment utilisé en profilométrie, devrait bientôt rejoindre la nouvelle norme, de même que les filtres robustes (qui permettent de réduire les erreurs au voisinage des pics et des vallées) et les filtres morphologiques, utilisés également en profilométrie.

La boîte à outils créée par le WG15 comporte aussi des techniques destinées à analyser les surfaces à des échelles précises. C'est le cas de la décomposition par ondelettes, qui permet de générer un profil (ou une surface) ne comportant que les composantes appartenant à un niveau d'échelle donné.

Néanmoins, tous les concepts utilisés pour le filtrage en 2D ne sont pas applicables aux mesures surfaciques. C'est le cas par exemple de la notion de *cut-off*, utilisée dans les filtres qui éliminent les longueurs d'onde spatiales. Pour certains filtres (tels que le filtre par ondelettes), la notion de longueur d'onde n'entre pas en jeu. Dans la nouvelle norme, le terme *cut-off* sera donc remplacé par le terme *nesting index*, plus général...

L'ensemble des outils définis dans les normes ISO 25178 et ISO 16610 vont désormais être progressivement mis à la disposition de la communauté scientifique et des industriels. Mais rien ne presse. Si les premières parties de l'ISO 25178 concernant les paramètres surfaciques devraient être publiées dès 2007, il va certainement falloir attendre 2009 pour la révision des paramètres de mesure profilométrique. D'autre part, il y a fort à parier que l'industrie n'abandonnera pas si facilement les anciennes méthodes et que la transition sera longue...

François Blateyron
Directeur R&D chez Digital Surf

Digital Surf, en bref

Créée en 1989 à Besançon (25), *Digital Surf* est spécialisée dans la micro et nanométrie des états de surface. Elle fournit une large panoplie d'outils pour les intégrateurs et les OEM : logiciels d'analyse des surfaces, capteurs chromatiques, capteurs laser à triangulation, systèmes d'acquisition, etc. Son logiciel *MountainsMap*, en particulier, est utilisé par de nombreux fabricants d'instruments de caractérisation des surfaces. Il propose déjà un certain nombre de paramètres et de filtres définis dans les nouvelles normes. Parmi les grands noms qui intègrent les solutions de la société comtoise, citons *Hommelwerke*, *Taylor Hobson*, *KLA-Tencor* ou encore *Nanosurf*. *Digital Surf* emploie 30 personnes et réalise un chiffre d'affaires de 2,3 M€.

MLZD