

Les exigences en matière de qualité des surfaces techniques sont de plus en plus élevées et les fabricants sont confrontés à d'énormes défis. Comment tester ces surfaces? Outre les méthodes standard, on utilise de plus en plus des procédés sophistiqués. Le microscope à force atomique est une nouvelle méthode de mesure capable de détecter les plus intimes aspérités dans le domaine nanométrique. La combinaison de cette technique et de la géométrie fractale pourrait être à l'origine de nouvelles normes en matière d'analyse de surface.

Analyse des surfaces à l'aide de l'AFM et des fractals

Par Peter Walther*

Aujourd'hui, l'état des surfaces utilisées en technique prend de plus en plus d'importance. Ceci est d'autant plus vrai pour les couches de tous genres telles que les verres optiques (lunettes ou miroirs techniques), matières plastiques (industrie de l'emballage, supports magnétiques des données informatiques), ainsi que certains métaux (acier de traitement pour les machines-outils, protection anticorrosion, bijouterie), etc. Une attention toute particulière doit être prêtée aux pièces de mécanique que l'on miniaturise de plus en plus, et dont la précision doit être toujours plus grande pour garantir le bon fonctionnement de l'ensemble. Outre les méthodes classiques de métrologie telles les méthodes optiques, le microscope électronique (SEM, Scanning Electron Microscope) ou le rugotest, le microscope à force atomique (AFM, Atomic Force Microscope) trouve une application de plus en plus large.

Le microscope à force atomique ne peut, il est vrai, mesurer que de petites surfaces, mais il permet en revanche d'analyser les zones critiques telles qu'inclusions et impuretés. Grâce à cette possibilité, on peut, par exemple, trouver une solution à la mauvaise adhérence de certaines couches. Le microscope à force atomique présente, par rapport au microscope électronique, les avantages suivants: la mesure s'effectue en milieu ambiant et non sous vide et elle dure peu.

*Professeur de mécatronique à l'École d'ingénieurs de Bienne, doyen du dépt. Microtechnique

Microscopie à force atomique (AFM, Atomic Force Microscope)

Afin de simplifier l'exposé, on ne présente ici que l'AFM qui n'est qu'un élément d'une technique nommée SPM (Scanning Probe Microscopy). En microscopie à force atomique, comme son nom l'indique, les forces atomiques jouent un rôle prépondérant. Une pointe d'une extrême finesse est amenée à proximité de la surface à examiner, jusqu'à presque la toucher. A l'échelle atomique, les forces dites de van der Waals

(forces locales autour des atomes) sont d'une importance toute particulière. En rapprochant la pointe de la surface, elle subit une attraction dès que la distance d est suffisamment petite; si l'on continue d'approcher la pointe, c'est une répulsion qui s'exercera sur elle (voir figures 1a et 1b). Ce phénomène est utilisé pour maintenir constante par régulation la distance d entre pointe et surface. En règle générale, on travaille dans le domaine de répulsion, là où la sensibilité est la plus grande, et la pente de la courbe suffisamment forte (voir partie gauche de la figure 1a).

Il faut donc un dispositif qui permette de mesurer la distance d et un entraînement mécanique capable de déplacer la pointe vers le haut et le bas avec la précision exigée. Si le dispositif remplit sa fonction, la pointe ne «touche» pas vraiment la surface: si, dès lors, on déplace la pointe à l'aide d'un entraînement adéquat au-dessus de la surface, cette pointe, constamment à la distance d , suivra les irrégularités de la surface en question et les mesurera.

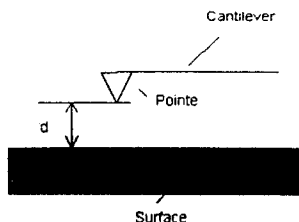


Fig. 1a. Cantilever avec pointe

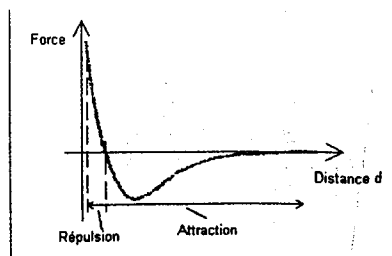


Fig. 1b. Courbe de potentiel en fonction de la distance d entre pointe et surface

Palpation d'une surface

Le fonctionnement d'un AFM est des plus simples. La pointe dont il est question ci-dessus mesure environ $4 \mu\text{m}$ et se trouve fixée à un petit levier élastique (env. $0,2 \text{ mm}$), le «Cantilever», qui se déplace au-dessus de la surface à mesurer. Ce «Cantilever» possède, au-dessus de la pointe, une petite surface réfléchissante qui sert à dévier un rayon laser de façon telle que l'on puisse détecter

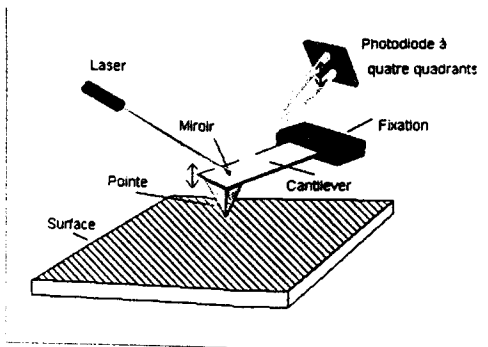


Fig. 2. Dispositif d'un Cantilever

même une flèche infime à l'aide d'une photodiode à quatre quadrants. La figure 2 montre schématiquement le dispositif décrit. Grâce à celui-ci, on peut mesurer la distance d entre la pointe et la surface. Pour maintenir la distance d constamment dans le domaine nanométrique, il faut un entraînement de très haute précision, capable de déplacer la pointe dans le domaine mentionné. En général, on utilise un élément piézo-électrique. Un montage en régulation se charge du bon fonctionnement, c'est-à-dire du maintien constant de la distance d . Pour un premier ajustement, il faut encore un entraînement micrométrique motorisé.

La pointe palpe la surface à examiner point par point et ligne par ligne, si bien qu'on peut établir une image de la surface mesurée dans le domaine micrométrique. Un ordinateur traite les données et représente la surface à l'écran, sous forme d'une image en couleurs fausses qui, selon les besoins, sera traitée plus avant. Les différentes hauteurs sont représentées par des luminosités différentes. D'habitude, une couleur plus lumineuse représente une hauteur plus élevée. L'un des principaux intérêts qu'offre un AFM réside dans les possibilités de traiter plus avant les données acquises. Par exemple, certains domaines intéressants de la surface peu-

vent être aisément et très précisément explorés, comme l'illustre la figure 3.

Rugosité d'une surface

La qualité d'une surface utilisée en technique peut être caractérisée à l'aide de différents paramètres. Citons en particulier la valeur R_a (rugosité moyenne selon DIN 4768), la valeur R_t (profondeur maximum de rugosité selon DIN 4748), ainsi que la valeur R_z (DIN 4768). La

figure 4 montre la définition des valeurs R_a et R_t . La mesure de l'une des grandeurs citées ne renseigne que sur la

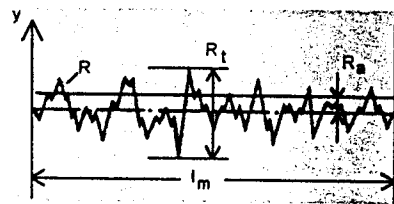


Fig. 4. Définition de R_a et R_t

valeur le long d'une seule ligne. On admet que l'état de la surface toute entière est à peu près le même partout. Si nécessaire, on répètera les mesures en plusieurs secteurs de la surface. La rugosité sera classée en N catégories, N variant de 1 à 12, N1 désignant la surface la plus lisse et N12 la plus rugueuse. La méthode de mesure utilisée laisse généralement une trace sur la surface mesurée, car on se sert d'une pointe en diamant. La méthode est donc destructrice. Etant donné que des normes de mesure de la rugosité existent depuis longtemps et que les valeurs mentionnées en début de paragraphe ont cours aussi bien chez les fabricants que chez leurs clients, l'introduction d'une nouvelle méthode ne se fera que petit à petit. Cependant, il existe, aujourd'hui

déjà, plusieurs tentatives de caractérisation d'une surface, dont celle de l'application de l'AFM. A l'aide de dispositifs AFM, on peut sans difficulté, déterminer les valeurs citées à l'intérieur d'une surface maximum de $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$. Les valeurs caractéristiques mesurées par AFM peuvent l'être non seulement le long d'un segment de droite comme par la méthode classique, mais aussi pour la surface entière. Les dispositifs AFM permettent de mesurer plusieurs autres caractéristiques comme, par exemple, le comptage des pores, la détermination de la densité des pores d'une surface d'aluminium anodisé, voire la transformation bidimensionnelle selon Fourier, etc.

Qu'appelle-t-on fractals ?

On ne saurait, dans le cadre de cet article, répondre de façon complète à cette question. Nous nous contenterons d'esquisser l'utilité de cette nouvelle méthode mathématique en ce qui concerne l'analyse des surfaces utilisées en technique. Dans son livre «The Fractal Geometry of Nature» paru en 1982, Benoît Mandelbrot a vulgarisé la notion de fractal. Bien qu'il ne soit pas l'inventeur de cette nouvelle conception de la nature, Mandelbrot fut celui grâce à qui la théorie s'imposa. Le domaine

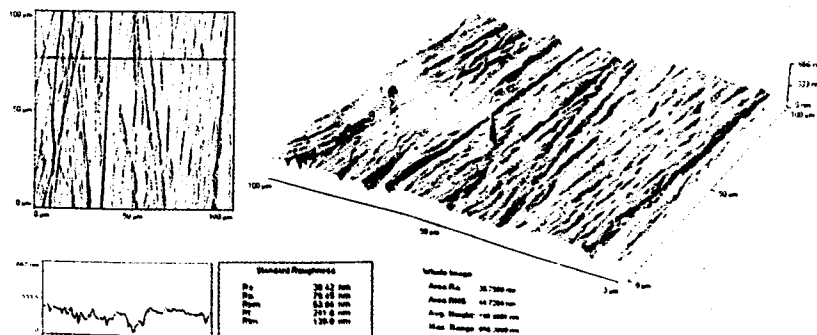


Fig. 3. Image AFM d'une surface en 3D, y compris mesure, réalisée avec Accures de Topometrix

Fig. 5a. Flocon de neige de Koch

des fractals est très vaste et ceux-ci s'appliquent à de nombreux objets et appareils d'usage quotidien. Dans ce qui suit, nous nous limiterons à un aspect très partiel des fractals, appliqué à la caractérisation des surfaces.

En géométrie fractale, une ligne n'a pas nécessairement la dimension un, mais peut avoir, par exemple, la dimension 1.5. De même, une surface peut être d'un ordre supérieur à deux. Essayons d'illustrer notre propos à l'aide du flocon de neige de Koch. La figure 5a montre un tel flocon, tandis que la figure 5b présente un flocon naturel. La ressemblance est évidente. La particularité

Fig. 5b. Flocon de neige naturel

du flocon de Koch réside dans la longueur du périmètre et dans l'aire de la surface. Le périmètre possède une longueur infinie, alors que l'aire, elle, est finie. Le périmètre de longueur infinie provient de l'algorithme qui engendre le flocon de Koch.

On démarre avec un triangle équilatéral dont on partage chaque côté en trois parties égales. Puis, prenant pour base le tiers mitoyen de chaque côté, on construit trois nouveaux triangles équilatéraux dont les sommets sont dirigés vers l'extérieur du triangle initial. On efface la base choisie pour les trois petits triangles et l'on obtient ainsi une figure à six sommets et douze côtés. Puis on recommence avec chacun des côtés. Si l'on poursuit à l'infini, on obtient finalement le flocon de neige de Koch comme montré dans la figure 5a. Le périmètre augmente chaque fois jusqu'à devenir infiniment long. Une courbe construite de cette façon ne possède plus la dimension un, comme une ligne habituelle, mais une dimension supérieure à un, à savoir $D = \log(5)/\log(3) = 1,465$.

Une ligne fractale peut être générée d'une autre façon encore, par exemple par la méthode du déplacement stochastique du point médian. Ce déplacement possède approximativement l'aspect du mouvement brownien d'une molécule dans un plan. La dimension fractale d'un mouvement brownien pur est exactement de $D=1,5$. La figure 6 montre une telle ligne; il n'est pas utile, ici, d'entrer dans les détails de l'algorithme nécessaire pour la générer. Si l'on compare avec



Fig. 6. Ligne générée à l'aide des fractals

une courbe typique issue d'un rugotest (voir figure 4), on y voit une certaine parenté. C'est précisément cette parenté qui a conduit à considérer l'état des surfaces sous un jour nouveau.

Analyse de surface selon C. A. Brown

Le «tracé selon Richardson» est l'une des représentations les plus anciennes dans cette nouvelle optique. C.A. Brown a amélioré la méthode de Richardson et, par conséquent, nous ne parlerons que de la méthode selon C.A. Brown. Le fondement de cette dernière consiste en l'approximation successive à la longueur réelle de la ligne obtenue par exemple par le rugotest.

En première approximation, on prend tout simplement la longueur totale L de l'intervalle. Puis on subdivise l'intervalle à l'aide d'un «Compas virtuel» en n_1 intervalles partiels, tout en conservant constante l'ouverture du compas, mais de façon telle que le dernier arc de cercle arrive exactement à la longueur L . Bien entendu, les centres successifs des arcs de cercle sont les intersections de la courbe mesurée avec l'arc précédent. La somme des segments entre deux centres successifs $L_1 = n_1 * l_1$ est un peu plus grande que la longueur L de l'intervalle. Dans un deuxième temps, on augmente à n_2 le nombre d'intervalles ce qui donne $L_2 = n_2 * l_2$ comme nouvelle somme, laquelle, à nouveau, est plus grande que L_1 . Ce procédé est répété autant de fois que nécessaire pour que la longueur finale L_i soit égale à la longueur de la courbe du rugotest. Il est évident qu'à chaque augmentation du nombre d'intervalles n_i , la longueur L_i s'accroît d'autant.

Les longueurs relatives $p_i = L_i/L$ des lignes l_i sont les grandeurs déterminantes de cette nouvelle méthode d'analyse. Si, pour un acier poli, on reporte graphiquement p_i en fonction de l'ouverture l_i du compas, on obtient le graphe de la figure 7. On notera l'échelle logarithmique utilisée pour l'ouverture du compas, ainsi que les deux plateaux et la transition entre eux, transition que l'on peut représenter approximativement par une droite. Les deux intersections de la droite oblique avec les horizontales des plateaux, ainsi que la pente

de cette droite, servent à caractériser la qualité de la surface. On peut conclure que plus la surface est lisse, plus les plateaux sont rapprochés l'un de l'autre. Remarquons qu'une surface parfaitement idéale aurait, rapportée à l'axe horizontal, une longueur relative p_i égale à un, indépendamment de l'ouverture du compas l_i . De la pente, on peut déduire la dimension fractale D de la courbe mesurée.

La nouvelle méthode décrite ci-dessus exploite de façon idéale l'extrême finesse de la pointe d'un AFM, car le rayon des pointes traditionnelles de mesure, de l'ordre d'un μm , ne permet pas de mesurer des structures d'un ordre inférieur au μm . Mais il faut aussi mentionner que la nouvelle méthode n'est pas tout à fait au point et qu'elle ne peut pas encore servir de norme. Pour y parvenir, on devra encore investir en recherche et en capitaux.

La combinaison décrite ci-dessus, mesure par AFM et méthode de la géométrie fractale, permet d'espérer que la détermination de la qualité des surfaces pourrait être repensée, voire même faire l'objet d'une nouvelle standardisation. La nouvelle méthode de mesure est à la fois rapide et non destructrice. Si un nouveau standard, basé sur la méthode présentée, venait à s'imposer, on pour-

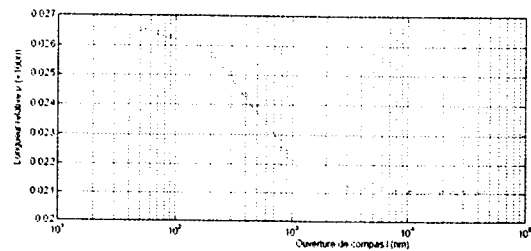


Fig. 7. Tracé de Brown d'une surface polie

rait mieux définir les caractéristiques d'une surface technique qu'avec les méthodes classiques. Cependant, il faudra encore beaucoup d'efforts et de force de conviction pour y parvenir.

Le présent article a pu voir le jour grâce au soutien du CTI (projet 3503.1). Les mesures AFM ont été faites avec un microscope type Accurex de Topometrix. A cet occasion, nous aimerions encourager les responsables des petites et moyennes entreprises à nous contacter pour des problèmes du genre présenté dans cet article. Cela en vaut la peine!