



HAL
open science

La rugosité des surfaces et ses applications

Clément Poull, Mohamad Janbein, Lucie Druoton, Céline Roudet, Sandrine Lanquetin, Michaël Roy, Christian Gentil

► **To cite this version:**

Clément Poull, Mohamad Janbein, Lucie Druoton, Céline Roudet, Sandrine Lanquetin, et al.. La rugosité des surfaces et ses applications. Journées Françaises d'Informatique Graphique (JFIG 2022), Nov 2022, Bordeaux, France. hal-03892076

HAL Id: hal-03892076

<https://hal.science/hal-03892076>

Submitted on 9 Dec 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La rugosité des surfaces et ses applications

Clément Poull, Mohamad Janbein, Lucie Druoton,
Céline Roudet, Sandrine Lanquetin, Michaël Roy, Christian Gentil

Laboratoire d'Informatique de Bourgogne (LIB)
Université de Bourgogne Franche-Comté, Dijon

Abstract

Dans cet article, nous présentons un état de l'art sur les applications liées à la notion de rugosité des surfaces. Ce travail ne prétend pas être exhaustif. Nous nous sommes attachés à référencer les travaux dans les domaines qui nous ont paru les plus pertinents. Le monde industriel s'intéresse depuis longtemps à caractériser et à contrôler la rugosité pour la conception, la fabrication et le contrôle qualité. En informatique graphique, la rugosité est modélisée pour produire des géométries de surfaces ou pour simuler son impact sur la lumière lors du processus de rendu.

1. Introduction

La prise en compte de la rugosité est certainement apparue dès lors que l'homme a façonné des outils (comme les grattoirs, racloirs ou pointes de flèches en silex) ou des objets pour des fonctions bien particulières (comme l'adhérence [ZTC*22], pour maîtriser les propriétés psychosensorielles ou tactiles [RLE14], dans un souci d'esthétisme, ...).

La rugosité est un concept complexe et il est difficile d'en donner une définition générale. C'est une notion qui dépend du contexte d'application et qui englobe un grand nombre de configurations géométriques possibles. Il est d'usage d'opposer la rugosité à ce qui est lisse. En mathématiques, les surfaces lisses sont étudiées depuis toujours, au travers des notions de régularité, de continuité et de différentiabilité, mais cela ne représente qu'une partie très restreinte de l'ensemble des surfaces continues [Hun94]. La rugosité est plutôt référencée sous le terme "irrégularité" au sens non-différentiable. Cette irrégularité est souvent caractérisée à l'aide du coefficient de Lipchitz, du coefficient de Hölder (ponctuel, local ou global) ou de l'exposant de Hurst [PS99]. Les premières courbes ou fonctions continues et nulle part différentiables ont été introduites par Bolzano en 1830 [Jar81, Thi03] puis Weierstarss en 1872, ou encore Takagi [AK12, AK10]. Toutes sont basées sur une construction itérative et multi-échelle, conduisant à la notion d'auto-similarité [Man77], en lien avec la géométrie fractale [MB90], les dimensions fractale [MPP84, YLYP03, NMP19] et multi-fractale (spectre de singularités) [MBA93, JAR*07, AAKR08]. Dans ce contexte, la transformée en ondelettes est l'outil indispensable à la caractérisation de singularités/discontinuités dans des signaux 1D [MH92] ou 2D [LC04] d'origines variées et à leur distribution (via le spectre de singularités) [Kes03, SV04].

L'évaluation de la rugosité des surfaces est essentielle pour beaucoup de problèmes expérimentaux [BV03, BHJ*18] en métro-

logie, tribologie (s'intéressant aux actions de contact entre deux systèmes matériels), mécanique, physique, chimie, biologie ... C'est également un élément clé pour aborder voire expliquer un grand nombre de phénomènes comme le frottement entre surfaces en contact [Mye62, MRG14], les effets hydrophobes [HJSC13], l'oxydation [Now20], la corrosion, ...

De nombreux travaux ont été réalisés en relation avec la rugosité, soit pour la contrôler, soit pour en étudier les propriétés, soit tout simplement pour la caractériser. Dans ce contexte, le contrôle et la mesure objective de la rugosité se heurtent à deux problèmes essentiels. Le premier est la collecte des données qui nécessite des procédés de numérisation sophistiqués et précis [Lea11], du fait de l'échelle d'observation à considérer (de l'ordre du micron par exemple en métrologie des états de surfaces de pièces mécaniques et du kilomètre en bathymétrie [FH85]). Le second concerne la façon de la quantifier ou la caractériser.

En industrie, des normes ont été définies [CCS94, DLT*00] et des quantificateurs ont été proposés. On en dénombre autour d'une quinzaine pour les plus utilisés. Le logiciel d'analyse de surface Mountain Map® propose près de 80 types de mesures différents [Dig22].

Cet article présente une liste non exhaustive des principaux domaines applicatifs dans lesquels des travaux conséquents en rapport avec la rugosité ont été proposés. La section 2 regroupe les applications en industrie, qui sont très variées. La perception de l'apparence rugueuse d'une surface s'avère à la fois importante pour contrôler les défauts d'aspects de produits manufacturés [WH93, RKJ11, LG12] et pour assurer un rendu photo-réaliste d'une scène 3D en informatique graphique. Dans ce dernier domaine, la restitution de la rugosité des surfaces étant essentielle et complexe, plusieurs modèles ont été considérés, que nous exposons dans la section 3.

2. Industrie

Par nécessité, le domaine de l'industrie est certainement le premier à avoir proposé de quantifier la rugosité. Celle-ci est généralement référencée sous l'expression "état de surface". Cette quantification est utile pour donner des indications ou des consignes quant au résultat attendu à l'issue du procédé de fabrication. Il peut s'agir soit de garantir une fonctionnalité ou simplement pour l'aspect esthétique souhaité. Ces directives ont des impacts directs sur les procédés d'usinage (phase d'ébauche, demi-finition, finition, rectifiage) plus ou moins sophistiqués et longs, pouvant introduire des coûts de production supplémentaires. Ceci conduit à la question de la définition de la rugosité et de sa caractérisation.

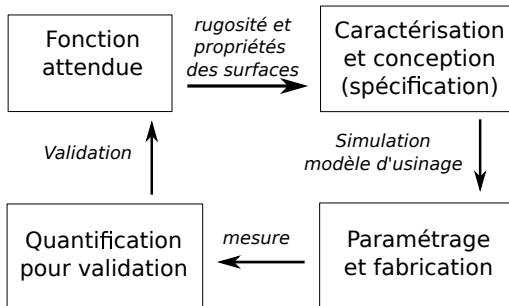
Les directives de fabrication n'ont de sens que si l'on est capable de vérifier si les pièces fabriquées sont conformes aux consignes fournies. C'est le domaine du contrôle et de la mesure : la métrologie des surfaces. Cette partie ne sera pas abordée dans ce document, pour plus de détail voir [Lea11].

Pour imposer des valeurs caractéristiques, il est nécessaire de connaître les relations entre les paramètres d'usinage (type d'outil, vitesse de coupe, profondeur de coupe, ...) et ces valeurs. C'est le domaine de la simulation et de la modélisation des procédés d'usinage.

Enfin, le concepteur qui spécifie les consignes doit également connaître la relation entre les valeurs qu'il impose et les fonctionnalités qu'il attend. L'étude des propriétés des surfaces, qui va au-delà de la rugosité est nommée "intégrité des surfaces" (IS). Elle est définie par Field et al. [FK*71] comme "l'état inhérent ou amélioré d'une surface produite lors d'un usinage ou d'une autre opération de génération de surface".

La figure 1 illustre les interactions entre ces différentes étapes.

FIGURE 1 – La fonctionnalité attendue est traduite en consigne d'état de surface lors de la conception. Ces consignes imposent des paramètres d'usinage. La mesure permet de caractériser la surface fabriquée et de valider sa conformité à la fonctionnalité attendue.



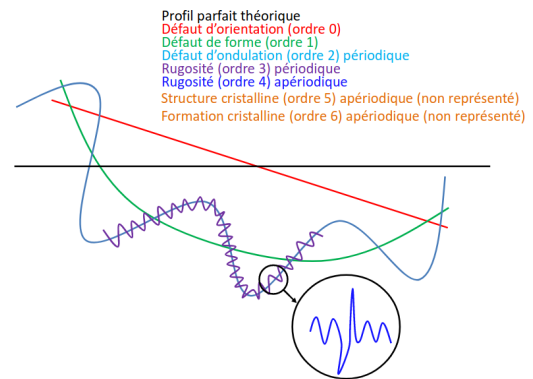
2.1. Caractérisation de la rugosité

La géométrie d'une surface rugueuse est complexe. À partir de mesures (le plus souvent des relevés topographiques), on extrait des statistiques caractérisant les propriétés de cette géométrie (moyenne des amplitudes : R_a , écart-type : R_q , moyenne des pentes, ...). Elles doivent être les plus simples possibles et en lien avec les fonctionnalités que souhaite contrôler le concepteur. Mais

ces quantificateurs sont également liés aux instruments de mesure. Ainsi les premiers dispositifs permettaient de mesurer des profils sur les surfaces. Les caractérisations qui en découlaient ne pouvaient pas rendre compte des propriétés de la surface globale. Puis les dispositifs de mesure ont évolué et permettent d'acquérir la topographie de la surface totale, autorisant de nouveaux quantificateurs (surface développée, ...).

Comme nous l'avons évoqué en introduction, la rugosité consiste en une variation localisée sur plusieurs niveaux d'échelle. L'une des difficultés est de déterminer le niveau d'échelle à partir duquel on observe cette rugosité. Mais pour les applications industrielles, cette question est assez simplement tranchée, car généralement cette rugosité apparaît à des échelles très inférieures à celle de la forme. Ainsi les normes [CCS94, DLT*00] proposent de segmenter la géométrie des surfaces suivant quatre niveaux ou ordres d'échelle : l'orientation (par rapport à une ligne horizontale : ordre 0), la forme (ordre 1), l'ondulation (déformations macro-géométriques de grande longueur d'onde : ordre 2), la rugosité périodique (ordre 3) et aperiodique (ordre 4) [CCS94] (voir figure 2).

FIGURE 2 – Les différents ordres d'échelle des défauts de l'état de surface (étude d'un profil 2D suivant une coupe perpendiculaire à la surface). Schéma tiré de [Leb17].



Les mesures de rugosité sont généralement regroupées en quatre classes ou ensembles de paramètres [BJ03] :

- les paramètres d'amplitude incluant les différents moments statistiques (moyenne, écart-type, coefficients d'asymétrie et d'aplatissement),
- les paramètres spatiaux (densité des pics, rapport d'aspect ou directionnalité de la texture, ...),
- les paramètres hybrides (pente quadratique moyenne de la surface, courbure moyenne arithmétique aux pics, surface développée),
- et les paramètres fonctionnels (indice de portance de la surface, hauteur correspondant à 5% de la surface portante, indice de rétention de fluides dans les vallées, ...).

Chacun de ces paramètres met en avant certaines caractéristiques géométriques ou fonctionnelles de la surface, mais le plus souvent à une valeur de ces caractéristiques peuvent correspondre des géométries et des propriétés physiques très variées.

2.2. Rugosité et propriétés des surfaces

Il n'est pas toujours facile d'établir une relation entre la rugosité et une fonctionnalité attendue d'une surface [LGBS*16, DL17, BHJ*18]. La rugosité est souvent associée aux altérations micro-géométriques de la surface géométrique théorique (souvent lisse). A l'origine, des altérations physiques et chimiques survenant dans la structure fine du matériau provoquent des irrégularités de courte longueur d'onde, d'amplitudes et espacements variables. Ces changements, bien que limités à une petite couche de surface, peuvent affecter la qualité du composant ou, dans certains cas, rendre la surface inacceptable. L'analyse multi-échelle facilite la compréhension des relations entre topographies et interactions de surface en métrologie, physique, chimie ou biologie [VGBG*07, BHJ*18] et permet de distinguer des groupes d'échantillons n'ayant pas subi les mêmes procédés d'usinage [CRS95, Kha14, LGBS*16].

Il existe de nombreux états de l'art, chacun se focalisant sur un domaine spécifique ([SWT22, ZO87, LB21, KYS12, GH17] : pour en citer quelques uns).

Indépendamment du domaine d'application, ces études diffèrent de par leur approche méthodologique, leur façon de caractériser et générer la rugosité. Pour l'approche méthodologique, on trouve tout d'abord des démarches purement expérimentales. La rugosité des pièces est produite par un procédé de fabrication (par exemple ponçage d'une surface avec du papier de verre de différentes finesses). Les propriétés physiques sont déterminées expérimentalement et mesurées avec des dispositifs idoines (mouillabilité : mesure de l'angle de contact, étude du frottement statique : mesure de la force tangentielle de décrochage). La rugosité est évaluée et quantifiée (mesure de la topographie et calcul du R_a). Enfin, une analyse statistique détermine l'existence de dépendances entre les quantificateurs de rugosité et les propriétés physiques [EPAM10].

D'autres études, intègrent des connaissances plus sophistiquées des matériaux et des procédés de fabrication. Elles nécessitent également d'adapter les méthodes de mesure de rugosité. Par exemple, la qualité perçue des produits en bois est fortement impactée par la rugosité de la surface avec des conséquences importantes sur les coûts de finition. Chaque essence ayant une anatomie spécifique et le bois étant un matériau poreux, la recommandation des normes ne s'applique pas. Des bonnes pratiques adaptées à ce contexte sont présentées dans [GH17] (instrument de mesure, résolution, élimination des défauts de forme, ...). Il est même nécessaire d'étudier et de formaliser des notions subjectives comme la perception visuelle ou tactile des matériaux pour étudier l'impact de la rugosité sur ces fonctionnalités [RLE14, Ram05].

Le choix des paramètres de rugosité est déterminant. En tribologie (étude de la mécanique des contacts), la notion de rugosité est fondamentale pour expliquer ou contrôler les phénomènes observés. Les simples quantificateurs de type R_a sont insuffisants. Les phénomènes de contact sont particulièrement complexes à étudier et à analyser sur des surfaces réelles. Non seulement, il est difficile de fabriquer des surfaces de référence en accord avec l'étude menée, mais la mesure précise des caractéristiques de la surface est tout aussi complexe [PRA19a]. Des modèles de représentation ou de génération de surfaces, rendant compte des propriétés statistiques des surfaces, ont été proposés [Nay71, GW01] et sont

maintenant systématiquement utilisés [PRA19a]. Les premiers modèles [Nay71] sont basés sur la théorie des processus aléatoires avec un contrôle de la distribution de probabilité des pics, à partir du spectre de puissance ou d'autres méthodes comme celle du déplacement du point milieu (algorithme de génération de montagnes fractales) [PH15]. Des évolutions ont été proposées dans [GW01] en faisant la distinction entre pics et aspérités. Des modèles de génération basés sur l'application d'un filtre dans l'espace de Fourier à un bruit blanc [HT92, YAM17] ont mis en évidence l'importance de l'exposant de Hurst (caractère fractal) sur l'évolution de la surface de contact.

L'étude des relations entre les caractéristiques de rugosité et les propriétés des surfaces fait partie du domaine plus vaste qu'est l'étude de l'intégrité des surfaces (IS), dans lequel sont prises en compte toutes les propriétés de la surface. L'IS est aussi qualifiée de signature résiduelle multi-physique (biologique, mécanique, optique) et multi-échelle (micro ou nano-structure) laissée par le(s) procédé(s) de fabrication sur la surface [Leb17, MOC*08]. Ce terme décrit à la fois l'état et les attributs d'une surface usinée et sa relation avec les performances fonctionnelles recherchées [Dav10]. Parmi ces dernières, la résistance à la fatigue (décrivant la déformation et le comportement à la rupture en science des matériaux), la vitesse de corrosion, le comportement tribologique (frottement, usure et lubrification, précision dimensionnelle, etc.) [HCB006] sont les plus corrélées à l'IS. La caractérisation complète et précise des différents aspects liés à l'IS fournit alors un lien important entre les traitements subis par la surface au moment de sa fabrication et la fonction recherchée.

Lebon [Leb17] a montré son impact clinique direct sur la longévité de l'assemblage prothétique. Il a également réussi à évaluer les paramètres des procédés d'usinage les plus influents sur cette "composante de rugosité" (aussi primordiale que la géométrie des prothèses). D'autres travaux [SGH*06, PAD*11, DAWT19, The21] montrent l'importance de la rugosité lors de l'intégration d'implants dentaires (obtenus à l'aide de biomatériaux usinés par fabrication additive) au niveau osseux (ostéo-intégration).

2.3. Fabrication et maîtrise de la rugosité

Un autre défi est cette fois de contrôler la rugosité lors du processus de fabrication. Là encore, les études sont ad hoc, et dépendent du processus de fabrication et des paramètres de rugosité fonctionnels pris en compte [ZTWZ15, Kri20].

En ingénierie mécanique, Benardos et al. [BV03] ont recensés quatre familles de facteurs affectant la rugosité lors de l'usinage des matériaux métalliques : les caractéristiques de la pièce (dureté du matériau usiné et dimensions), les caractéristiques de l'outil de coupe (géométrie et matériau), les paramètres d'usinage (vitesses d'avance et de coupe, inclinaison d'outil, ...) et le phénomène de coupe (efforts, vibration, ...). Parmi ces facteurs, ceux liés au procédé d'usinage, notamment à l'outil, semblent prépondérants [Leb17]. Certaines démarches consistent à modéliser le procédé d'usinage (géométrie de l'outil de coupe, profondeur de coupe, vitesse de coupe) et d'en déduire l'expression mathématique de la géométrie résultant de l'usinage. À partir de cette géométrie, les paramètres de rugosité peuvent être calculés et la relation de

dépendance aux paramètres d'usinage peut être établie. Des validations expérimentales renforcent ces résultats [QdCR10,DTMA21]. Les variations de l'environnement d'usinage affectant le procédé de fabrication peuvent être prises en compte en introduisant des modèles stochastiques [DDH21]. Les caractéristiques de rugosité contrôlée sont généralement simples (R_a , R_z et R_q). Pour d'autres méthodes d'usinage, comme le laminage à froid [SLAH21], la simulation est faite à partir d'une modélisation des forces mises en oeuvre lors du procédé de mise en forme.

2.4. Contrôle qualité

Dans le domaine du contrôle qualité et de la métrologie des surfaces, le contrôle de la rugosité fait partie des procédés de validation et assure la conformité des pièces usinées [Dig22]. Les mesures de rugosité considérées sont souvent celles que l'on retrouve dans les normes : R_a (moyenne arithmétique des hauteurs), R_q (premier moment statistique), etc. Elles peuvent également être estimées par une analyse multi-échelle des données d'entrée, facilitant la détection et l'évaluation d'anomalies d'aspect ou de rayures sur une surface industrielle [WH93, RKJ11, LG12].

Ces données d'entrée sont assez souvent des images (cartes de hauteurs ou textures) issues de caméras ou encore parfois des mesures de profils de lasers optiques, ou profilomètres dans les travaux étudiés ici. Initialement utilisée pour caractériser le défaut de forme d'une géométrie, la Décomposition Modale Discrète (DMD) a été plus récemment généralisée aux variations géométriques d'ondulation et de rugosité, pour caractériser les défauts d'aspects [LG12] (souvent aperiodiques et localisés). Cette transformée considère les modes de vibration de l'élément géométrique de référence comme fonctions de base. L'analyse en ondelettes est utilisée pour l'inspection des surfaces usinées via un traitement d'images (notamment de textures) [CRS95, MABA11]. Cette analyse peut être mise en oeuvre via l'algorithme du "lifting scheme" [Blu01], par une transformée en ondelettes normalisée en fréquence [JBL02] ou via des paquets d'ondelettes [ZT10, WSL*17]. La rugosité est reconstruite à partir des coefficients d'ondelettes, déterminés sur les hautes fréquences et permet ainsi le calcul de paramètres normalisés tels que le R_a , le R_q ou encore le R_z (hauteur maximale servant à vérifier la présence de pics extrêmes pouvant affecter les contacts statiques ou glissants sur une pièce). Cette analyse permet aussi d'estimer la dimension fractale de profils de rugosité de surfaces [WYY03a, WYY03b] dans le cadre de l'ébullition nucléée (engendrant un phénomène de transfert thermique).

De nombreux objets manufacturés n'ont cependant cette apparence fractale que lorsqu'ils sont observés à des échelles suffisamment fines (microstructures à géométries chaotiques). En appliquant les travaux de Mandelbrot aux surfaces d'ingénierie, Brown [Bro13] a introduit plusieurs techniques d'analyse géométrique multi-échelle (actuellement normalisées et parfois désignées par l'acronyme SSFA : Scale-Sensitive Fractal Analysis). Le but est d'établir une corrélation fonctionnelle entre la topographie et le comportement attendu de la surface, en déterminant l'échelle d'analyse la plus à même de dévoiler les détails et la complexité du relief. Cela facilite la conception de produits ayant des comportements optimaux lors d'interactions de différents types (friction, adhésion, contact, usure, ...) ou sert à discriminer les surfaces et

distinguer le bon produit du mauvais dans les systèmes de contrôle qualité [MABA11, MLZ*21].

En construction routière, la mesure de rugosité permet aussi de contrôler l'usure de la chaussée (dans un but de maintenance pour la sécurité), en utilisant l'analyse en ondelettes [WFZ05, WF04]. Cette dernière est encore utilisée pour obtenir une approximation de la dimension fractale et une mesure de lacunarité fractale caractérisant la rugosité du pavage routier [Lin99].

3. Informatique graphique

De nos jours, les données 3D sont présentes dans plusieurs domaines industriels, comme le divertissement numérique, la visualisation scientifique, la conception assistée par ordinateur (CAO), l'architecture, l'industrie médicale, etc. Le contenu 3D des scènes virtuelles utilisées pour la production d'images de synthèse est majoritairement représenté :

- en majorité par des cartes de hauteur pour la représentation des terrains (sauf pour certaines formes 3D spécifiques et localisées comme les surplombs, arches ou grottes),
- par des maillages polygonaux, qui peuvent être associés à des informations de couleur ou à des cartes de texture.

Dans ce contexte, les recherches actuelles s'attachent à obtenir les scènes les plus réalistes possibles (intégrant un maximum de détails, par exemple de la rugosité, lorsque cela est justifié), tout en minimisant le temps de traitement (pour des applications temps-réel) et de transmission des données.

3.1. Texture

Maintenant que la puissance de calcul et la capacité de stockage permettent d'utiliser des textures photoréalistes, augmenter la résolution des textures n'a qu'un impact limité sur la qualité d'une scène virtuelle, il faut donc utiliser une autre technique pour améliorer le rendu. Une manière de procéder est de créer une rugosité sur la surface d'un objet afin de simuler les interactions entre la lumière et la matière. Cette rugosité peut être ajoutée sous deux formes : une perturbation du maillage d'un objet avec des *displacement maps* rendant l'objet véritablement rugueux ou alors en ne modélisant que l'impact de la rugosité sur la lumière avec des *bump maps* et des *normal maps*. Ces cartes peuvent être acquises à partir d'objets physiques, créés par des artistes ou bien totalement de synthèse grâce aux textures procédurales. Nous nous intéressons ici à ces dernières qui permettent d'avoir un meilleur contrôle comparé à l'acquisition de texture, tout en étant bien plus rapides que la création par des artistes. De plus, vu que la plupart des méthodes de génération a un coût minime en mémoire et en temps de calcul, elles peuvent être générées à la volée, tout en ayant un niveau arbitraire de détails. Enfin, en jouant sur les paramètres d'entrée, il est possible d'ajouter de la variété, en créant par exemple des natures de roches semblables (ayant des degrés de rugosité différents mais proches).

Plusieurs méthodes de génération de textures existent et elles peuvent être regroupées en deux grandes familles : les méthodes totalement procédurales et les méthodes semi-procédurales. La première famille est la plus représentée par les bruits procéduraux [Per85, CD05, LLDD09, GDG12, GSV*14, Pav16, CCG19] : outils

utilisés pour reproduire statistiquement de nombreux phénomènes, mais difficiles à contrôler. Des techniques spectrales peuvent également être utilisées pour générer de la rugosité [Lew89, HT92, WAW*21, PRA19b]. On se référera à [LLC*10, EMP*02a] pour plus d'informations. Il est également possible de synthétiser des textures à l'aide d'automates cellulaires [Tur91, MNR21], d'équations de réaction-diffusion [McG08, WK91, SKJY06], de la programmation génétique [HR04, CKT08] ou encore des processus ponctuels [GAD*20]. Ces méthodes peuvent être utilisées pour faire croître des textures sur une surface ou directement sur un volume afin d'éviter les problèmes de raccord dans le cas des textures 2D.

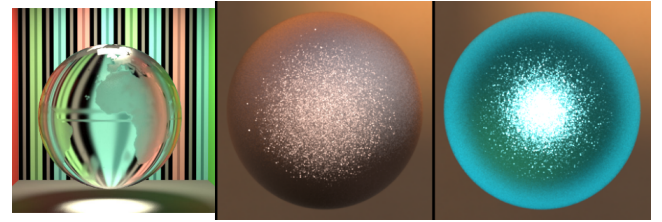
Les méthodes semi-procédurales sont également qualifiées de "Textures by Example" du fait qu'elles utilisent des échantillons fournis par le développeur pour tenter de recréer des textures similaires ou de créer une version sans limite de résolution spatiale. Certaines se basent sur une génération statistique [GLLD12] et d'autres utilisent des textons (micro-structures d'une image) [GLM17] afin de faire des transitions sans couture en faisant varier le texton et enfin, certaines méthodes se basent sur une modélisation inverse [HHD*22]. Pour obtenir de bons échantillons, il est possible de générer une petite texture capturant le plus possible d'informations de l'originale [WHZ*08]. Les lecteurs intéressés se référeront à [WLKT09].

Toutes ces méthodes ont encore des limites, notamment le manque de contrôle du résultat, entraînant la nécessité de faire retravailler la texture par des artistes. Des mesures plus objectives de la qualité de la texture produite éviteraient l'évaluation souvent guidée par un ressenti subjectif.

Enfin, il est aussi possible de simuler de la rugosité à une échelle inférieure au pixel grâce à des méthodes statistiques basées sur la théorie des microfacettes. Cette dernière a été introduite en informatique graphique par Cook et Torrance [CT81] pour modéliser la réflexion de la lumière sur les surfaces rugueuses, au moyen de paramètres tels que la rugosité de la surface et ses propriétés optiques. Plusieurs variantes ont été proposées depuis pour reproduire fidèlement l'apparence de surfaces réelles complexes telles que le verre gravé [WMLT07], le métal rayé [RGB16], les surfaces rugueuses présentant des reflets scintillants, pailletés (isotropes ou non) [CSDD20]. Pour simuler l'apparence de tels matériaux (exemples illustrés à la figure 3), ces modèles à microfacettes sont échantillonnés et associés à la prise en compte :

- du phénomène de transmission de la lumière à travers les milieux transparents (tels que le verre ou l'eau) ou translucides (peau ou marbre) via la BTDF (fonction de distribution du facteur de transmission bidirectionnel) [Sta01, WMLT07, LJ*18]. Lorsque la limite d'un milieu est lisse, la transmission est facilement modélisée à l'aide de la loi de réfraction de Snell [WMLT07]
- de la BSDF : fonction de distribution de diffusion bidirectionnelle [CSDD21] vue comme la somme des BRDF et BTDF, dans le sens où elle prend en compte à la fois la réflexion et la réfraction à l'interface entre les différents médias.

FIGURE 3 – Rendu de sphères en verre gravé (globe), en métal (milieu) et en verre (droite) scintillants. Image de gauche tirée de [WMLT07], les autres provenant de [CSDD21].



3.2. La rugosité dans l'évaluation de la qualité visuelle des maillages 3D

Pour désigner les caractéristiques non lisses d'un maillage 3D, on évoque surtout les arêtes vives/saillantes, les textures géométriques ou les bruits/artefacts géométriques, mais le terme rugosité n'est apparu qu'à partir de 2005 [GECB05, CGE05, RDB07]. Ces aspects se retrouvent lorsqu'on évoque les traitements effectués sur les maillages surfaciques 3D comme la compression avec pertes, la simplification, le lissage ou le tatouage et qui "endommagent" l'apparence des données initiales, qui se trouvent affectées par un bruit dit géométrique. De nombreuses techniques de lissage ou de débruitage cherchant à préserver l'aspect visuel (également appelées "surface fairing") existent depuis longtemps [Tau95, DMSB99]. Pour cela, les algorithmes intègrent des métriques d'évaluation précises et objectives de la qualité visuelle (du maillage 3D simplifié par rapport à l'original). Ces dernières ont pour but de préserver les caractéristiques visuellement saillantes (régions attirant fortement l'œil), en se basant sur un système de suivi oculaire [HHO04] ou de manière automatique [Lin00, LVJ05]. Ces études exploitent aussi le fait que la vision humaine est sensible aux changements de courbure [KKK02].

L'évaluation de la qualité visuelle d'un maillage passe par l'estimation de la rugosité. Elle sert en effet de mesure locale des artefacts visuels produits par le tatouage de maillages [CGE05, GECB05, LDGD*06, CGEB07, KBT10] ou pour masquer les artefacts de quantification après compression avec pertes de ces maillages [Lav09]. Cela se justifie puisque que, parmi les éléments clés de la perception humaine, le procédé dit de "masquage visuel" [Sil96, Lav07, Lav09, WTM12] met en évidence le fait qu'un signal visuel peut masquer ou réduire la visibilité d'un autre. Les premières métriques proposées ne permettaient pas de faire la différence entre les régions rugueuses et les arêtes vives. Dans le cadre du tatouage, cette distinction est essentielle sachant qu'une zone rugueuse présente un degré élevé de "masquage", alors qu'un changement géométrique sur les arêtes ou les régions lisses est beaucoup plus visible [Lav09]. C'est un aspect également important pour la prise en compte des informations structurelles des maillages lors de leur compression ou remaillage [Lav11, Nou16]. Enfin, sachant que la contribution perceptive de la texture est en général plus importante que la géométrie du modèle, de nouvelles métriques considérant les textures des maillages [GVC*17, NDF*22, ZSM*22], leur perception en fonction de l'interaction lumière-matière [VSKL17]

ou encore leur visualisation au travers d'un environnement immersif de réalité virtuelle [NDF*21] ont vu le jour.

3.3. Modélisation, rendu et édition de terrains de synthèse

Les terrains présentent divers degrés de rugosité (massifs montagneux, falaises côtières, collines érodées, vallées fluviales, gorges, ...) et sont les éléments fondamentaux des scènes synthétiques 3D extérieures (appelées aussi mondes virtuels). Pour satisfaire aux exigences de l'industrie du jeu vidéo, du cinéma d'animation et des simulateurs d'entraînement, on observe actuellement des terrains extrêmement détaillés sur des étendues de plusieurs milliers de kilomètres [Cor20]. On peut distinguer trois grandes familles d'approches non exclusives : la génération procédurale (qui tente d'imiter la nature par des modèles phénoménologiques), la simulation physique (qui tente de la reproduire par simulation) et l'approche intermédiaire, la synthèse à partir d'exemples.

Les premiers algorithmes de génération de terrains [FFC82, Vos91] se basaient sur des subdivisions itératives et l'utilisation de bruits procéduraux. Les altitudes des nouveaux points (construits par itération), dépendent de celles des voisins du niveau inférieur (pour garder la cohérence de la surface) et sont perturbés aléatoirement en fonction du niveau d'itération. L'aspect rugueux est ainsi introduit, où la variance du bruit suit une loi de puissance, d'exposant lié à la dimension de Hausdorff de la surface. De par leur nature auto-affine, les terrains naturels peuvent être modélisés avec précision par des processus stochastiques localement fractals. Plusieurs modèles se basent ainsi sur le mouvement Brownien fractionnaire [MVN68] et multifractionnaire [ST06, EBLV10, WNM19]. Le style très uniforme et homogène provoqué par l'exploitation de l'auto-similarité/affinité engendre un manque de réalisme, mais ces méthodes ont l'avantage de produire des étendues infinies avec une précision potentiellement illimitée.

Pour donner un aspect plus naturel aux reliefs, on peut s'appuyer sur une combinaison de fonctions basées bruit [EMP*02b] ou sur des processus stochastiques complexes [EBLV10] produisant par exemple plus de rugosité aux sommets que dans les plaines. Les algorithmes de simulation géomorphologique d'érosion, prenant directement en considération les causes physiques, sont notamment capables de refléter la fragmentation ou sculpture de la roche [PPG*20], le transport de matière/particules et sa redistribution (par érosion hydraulique ou éolienne) [MKM89] ou le soulèvement tectonique [Cor20].

Par analogie avec les méthodes de synthèse de textures (cf. section 3.1), des bases d'exemples réels (ayant divers degrés de rugosité) sont souvent utilisées comme point de départ de la synthèse. Plusieurs assemblages de ces cartes de hauteurs réelles de régions de la Terre sont proposés [ZSTR07, GMM15, GDGP16, GDG*17]. Le contrôle utilisateur est possible par esquisse du positionnement souhaité de ces exemplaires à la grande richesse géologique, ou grâce à des outils encore plus interactifs [GPM*22]. A noter également des gains en temps de traitement et en mémoire au fur et à mesure des avancées des techniques. Les lecteurs intéressés se référeront à [STBB14, GGP*19], pour plus de détails.

Une seule métrique a récemment été proposée pour quantifier le

réalisme perçu de terrains planaires, représentés par cartes de hauteurs [RKv*22]. Cette dernière est inadaptée pour l'évaluation des grandes structures, telles les réseaux de rivières ou la distribution des vallées en zone montagneuse. C'est pourquoi les chercheurs préfèrent se fier aux retours de graphistes, d'artistes et d'experts du domaine sur des critères tels que l'expressivité de l'outil, le temps de création/paramétrage ou de génération, l'interactivité et bien sûr le réalisme.

4. Conclusion

Cet état de l'art présente un ensemble non-exhaustif de travaux, chacun faisant référence à une notion de rugosité. Nous nous sommes focalisés principalement sur deux domaines d'application qui nous ont semblé les plus directement concernés par la rugosité : l'industrie et l'informatique graphique. Les applications sont multiples et les objets d'étude très variés. En informatique graphique, les applications directes touchent à la génération de terrains, à la modélisation des effets micro-structuraux pour simuler l'interaction de la lumière avec les matériaux ou à la qualité perceptuelle des modèles 3D. Dans le domaine industriel, les études sont beaucoup plus variées allant par exemple à l'impact de l'usure des pales d'éoliennes sur le rendement énergétique ou de la rugosité de surface sur les propriétés d'un film diélectrique.

La rugosité n'est pas toujours référencée sous cette dénomination générique et peut apparaître sous les appellations suivantes : état de surface, texture, texture géométrique, bruit, irrégularité, non-différentiabilité.

Les études sont multiples et dépendantes du contexte. Suivant les problèmes abordés, les définitions diffèrent, mais elles s'accordent à décrire la rugosité comme l'ensemble des variations géométriques locales "discernables" de la forme globale. Ce discernement peut être évident lorsqu'il concerne les objets manufacturés, mais beaucoup moins pour des structures naturelles comme en orométrie ou bathymétrie. La rugosité est très souvent liée à l'aspect multi-échelle et à la géométrie fractale. Beaucoup de quantificateurs standards R_a , R_q ,... ne les prennent pas en compte, ce qui induit des difficultés pour établir des relations entre ces paramètres et les propriétés physiques des surfaces. Les approches fréquentielles, en analyse comme en synthèse produisent des résultats plus pertinents.

La synthèse de rugosité, utile pour produire des surfaces de référence ou réaliser des simulations, fait généralement appel à des processus aléatoires avec un contrôle du spectre de puissance des amplitudes. Mais la validation de la qualité de la surface synthétisée est toujours dépendante de la caractérisation que l'on s'est donnée a priori et donc de ce qu'est une surface rugueuse. Dans le cas de l'industrie, la validation peut se faire à l'aide de valeurs de quantificateurs référencés dans des normes, ou par exemple pour la génération de terrains par validation par des experts.

5. Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet ANR JCJC Fraclettes (ANR-20-CE46-0003).

References

- [AAKR08] ARNÉODO A., AUDIT B., KESTENER P., ROUX S. G. : Wavelet-based multifractal analysis. *Scholarpedia* 3 (2008), 4103. 1
- [AK10] ALLAART P. C., KAWAMURA K. : The improper infinite derivatives of takagi's nowhere-differentiable function. *Journal of mathematical analysis and applications* 372, 2 (2010), 656–665. 1
- [AK12] ALLAART P. C., KAWAMURA K. : The takagi function : a survey. *Real Analysis Exchange* 37, 1 (2012), 1–54. 1
- [BHJ*18] BROWN C., HANSEN H., JIANG X. J., BLATEYRON F., BERGLUND J., SENIN N., BARTKOWIAK T., DIXON B., GOÏC G. L., QUINSAT Y., STEMP W. J., THOMPSON M. K., UNGAR P. S., ZAHOUANI E. H. : Multiscale analyses and characterizations of surface topographies. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 67, 2 (2018), 839–862. 1, 3
- [BJ03] BLUNT L., JIANG X. : *Advanced techniques for assessment surface topography : development of a basis for 3D surface texture standards" surfstand"*. Elsevier, 2003. 2
- [Blu01] BLUNT L. : Application of the lifting wavelet to rough surfaces. *Precision Engineering* 25, 2 (2001), 83–89. 4
- [Bro13] BROWN C. A. : *Areal Fractal Methods*. Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 129–153. 4
- [BV03] BENARDOS P., VOSNIAKOS G.-C. : Predicting surface roughness in machining : a review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003), 833–844. 1, 3
- [CCS94] CHIFFRE L. D., CHRISTIANSEN S., SKADE S. : Advantages and industrial applications of three-dimensional surface roughness analysis. *CIRP Annals* 43 (1994), 473–478. 1, 2
- [CD05] COOK R. L., DE ROSE T. : Wavelet noise. *ACM Trans. Graph.* 24, 3 (2005), 803–811. 4
- [CGE05] CORSINI M., GELASCA E. D., EBRAHIMI T. : A multi-scale roughness metric for 3D watermarking quality assessment. In *Sixth Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services* (2005). 5
- [CGEB07] CORSINI M., GELASCA E. D., EBRAHIMI T., BARNI M. : Watermarked 3D mesh quality assessment. *IEEE Transactions on Multimedia Volume* 9, 2 (2007), 247–256. 5
- [CGG19] CAVALIER A., GILET G., GHAZANFARPOUR D. : Local spot noise for procedural surface details synthesis. *Computers and Graphics* 85 (2019), 92–99. 4
- [CKT08] CHANG C.-C., KUO Y.-T., TAI W.-K. : Genetic-based approach for synthesizing texture. *International Journal on Artificial Intelligence Tools* 17 (08 2008), 731–743. 5
- [Cor20] CORTIAL Y. : *Synthèse de terrain à l'échelle planétaire*. PhD thesis, Université de Lyon, 2020. 6
- [CRS95] CHEN X., RAJA J., SIMANAPALLI S. : Multi-scale analysis of engineering surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 35, 2 (1995), 231–238. 3, 4
- [CSDD20] CHERMAIN X., SAUVAGE B., DISCHLER J.-M., DACHSBACHER C. : Procedural Physically-based BRDF for Real-Time Rendering of Glints. *Computer Graphics Forum* 39, 7 (2020), 243–253. 5
- [CSDD21] CHERMAIN X., SAUVAGE B., DISCHLER J.-M., DACHSBACHER C. : Importance sampling of glittering bsdfs based on finite mixture distributions. In *Proc. of Eurographics Symposium on Rendering* (2021). 5
- [CT81] COOK R. L., TORRANCE K. E. : A reflectance model for computer graphics. *SIGGRAPH Comput. Graph.* 15, 3 (1981), 307–316. 5
- [Dav10] DAVIM J. P. : *Surface Integrity in Machining*. Springer-London, 2010. 3
- [DAWT19] DANK A., AARTMAN I. H., WISMEIJER D., TAHMASEB A. : Effect of dental implant surface roughness in patients with a history of periodontal disease : A systematic review and meta-analysis. *International journal of implant dentistry* 5, 1 (2019), 1–11. 3
- [DDH21] DENKENA B., DITTRICH M.-A., HUUK J. : Simulation-based surface roughness modelling in end milling. *Procedia CIRP* 99 (2021), 151–156. 4
- [Dig22] DIGITALSURF : Guide de métrologie des surfaces, 2022. URL : <https://guide.digitalsurf.com/fr/guide.html>. 1, 4
- [DL17] DAS J., LINKE B. S. : Evaluation and systematic selection of significant multi-scale surface roughness parameters (srps) as process monitoring index. *Journal of Materials Processing Technology* 244 (2017), 157–165. 3
- [DLT*00] DE CHIFFRE L., LONARDO P., TRUMPOLD H., LUCCA D., GOCH G., BROWN C., RAJA J., HANSEN H. : Quantitative characterization of surface texture. *CIRP Annals* 49, 2 (2000), 635–652. 1, 2
- [DMSB99] DESBRUN M., MEYER M., SCHRÖDER P., BARR A. H. : Implicit fairing of irregular meshes using diffusion and curvature flow. In *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (1999), ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., p. 317–324. 5
- [DTMA21] DANIYAN I., TLHABADIRA I., MPOFU K., ADEODU A. : Investigating the geometrical effects of cutting tool on the surface roughness of titanium alloy (ti6al4v) during milling operation. *Procedia CIRP* 99 (2021), 157–164. 4
- [EBLV10] ECHELARD A., BARRIÈRE O., LÉVY VÉHEL J. : Terrain modelling with multifractional Brownian motion and self-regulating processes. In *ICCVG 2010* (2010), vol. 6374 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 342–351. 6
- [EMP*02a] EBERT D., MUSGRAVE F., PEACHEY D., PERLIN K., WORLEY S. : *Texturing and Modeling : A Procedural Approach*. Elsevier Science, 2002. 5
- [EMP*02b] EBERT D. S., MUSGRAVE F. K., PEACHEY D., PERLIN K., WORLEY S. : *Texturing and Modeling : A Procedural Approach*, 3rd ed. ed. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2002. 6
- [EPAM10] ENCINAS N., PANTOJA M., ABENOJAR J., MARTÍNEZ M. : Control of wettability of polymers by surface roughness modification. *Journal of Adhesion Science and Technology* 24, 11-12 (2010), 1869–1883. 3
- [FFC82] FOURNIER A., FUSSELL D., CARPENTER L. : Computer rendering of stochastic models. *Commun. ACM* 25, 6 (1982), 371–384. 6
- [FH85] FOX C. G., HAYES D. E. : Quantitative methods for analyzing the roughness of the seafloor. *Reviews of Geophysics* 23, 1 (1985), 1–48. 1
- [FK*71] FIELD M., KAHLES J. F., ET AL. : Review of surface integrity of machined components. *Annals of the CIRP* 20, 2 (1971), 153–163. 2
- [GAD*20] GUEHL P., ALLEGRE R., DISCHLER J.-M., BENES B., GALIN E. : Semi-Procedural Textures Using Point Process Texture Basis Functions. In *Journées Françaises d'Informatique Graphique* (2020). 5
- [GDG12] GILET G., DISCHLER J., GHAZANFARPOUR D. : Multi-scale assemblage for procedural texturing. *Comput. Graph. Forum* 31, 7 (2012), 2117–2126. 4
- [GDG*17] GUÉRIN E., DIGNE J., GALIN E., PEYTAVIE A., WOLF C., BENES B., MARTINEZ B. : Interactive Example-Based Terrain Authoring with Conditional Generative Adversarial Networks. *ACM Transactions on Graphics* 36, 6 (2017). 6
- [GDGP16] GUÉRIN E., DIGNE J., GALIN E., PEYTAVIE A. : Sparse representation of terrains for procedural modeling. *Computer Graphics Forum* 35, 2 (2016), 177–187. 6
- [GECB05] GELASCA E. D., EBRAHIMI T., CORSINI M., BARNI M. : Objective evaluation of the perceptual quality of 3D watermarking. In *Proc. of International Conference on Image Processing* (2005). 5
- [GGP*19] GALIN E., GUÉRIN E., PEYTAVIE A., CORDONNIER G., CANI M.-P., BENES B., GAIN J. : A Review of Digital Terrain Modeling. *Computer Graphics Forum* 38, 2 (2019), 553–577. 6

- [GI17] GURAU L., IRLE M. : Surface roughness evaluation methods for wood products : A review. *Current forestry reports* 3, 2 (2017), 119–131. 3
- [GLLD12] GALERNE B., LAGAE A., LEFEBVRE S., DRETTAKIS G. : Gabor Noise by Example. *ACM Transactions on Graphics* 31, 4 (2012). 5
- [GLM17] GALERNE B., LECLAIRE A., MOISAN L. : Texton Noise. *Computer Graphics Forum* (2017). 5
- [GMM15] GAIN J., MERRY B., MARAIS P. : Parallel, Realistic and Controllable Terrain Synthesis. *Computer Graphics Forum* (2015). 6
- [GPM*22] GUÉRIN E., PEYTAVIE A., MASNOU S., DIGNE J., SAUVAGE B., GAIN J., GALIN E. : Gradient Terrain Authoring. *Computer Graphics Forum* 41, 2 (2022). 6
- [GSV*14] GILET G., SAUVAGE B., VANHOEY K., DISCHLER J.-M., GHAZANFARPOUR D. : Local random-phase noise for procedural texturing. *ACM Trans. Graph.* 33, 6 (2014). 4
- [GVC*17] GUO J., VIDAL V., CHENG I., BASU A., BASKURT A., LAVOUE G. : Subjective and objective visual quality assessment of textured 3d meshes. *ACM Transactions on Applied Perception* 14, 2 (2017), 1–20. 5
- [GW01] GREENWOOD J., WU J. : Surface Roughness and Contact : An Apology. *Meccanica* 36, 6 (2001), 617–630. 3
- [HCB06] HARLIN P., CARLSSON P.-A., BEXELL U., OLSSON M. : Influence of surface roughness of pvd coatings on tribological performance in sliding contacts. *Surface and Coatings Technology* 201, 7 (2006), 4253–4259. 3
- [HHD*22] HU Y., HE C., DESCHAINTE V., DORSEY J., RUSHMEIER H. : An inverse procedural modeling pipeline for SVBRDF maps. *ACM Transactions on Graphics* 41, 2 (2022), 1–17. 5
- [HHO04] HOWLETT S., HAMILL J., O’SULLIVAN C. : An experimental approach to predicting saliency for simplified polygonal models. In *Proceedings of the 1st Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization* (2004), Association for Computing Machinery, p. 57–64. 5
- [HJSC13] HOUDA B., JOURNAUX L., SABRE R., COINTAULT F. : Roughness evaluation of vine leaf by image processing. In *10th IAS-TEDE International Conference Signal Processing, Pattern Recognition and Applications (SPPRA 2013)* (2013), pp. 258–263. 1
- [HR04] HEWGILL A., ROSS B. J. : Procedural 3d texture synthesis using genetic programming. *Computers and Graphics* 28, 4 (2004), 569–584. 5
- [HT92] HU Y. Z., TONDER K. : Simulation of 3-D random rough surface by 2-D digital filter and fourier analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 32, 1-2 (1992), 83–90. 3, 5
- [Hun94] HUNT B. R. : The prevalence of continuous nowhere differentiable functions. *Proceedings of the American mathematical Society* 122, 3 (1994), 711–717. 1
- [Jar81] JARNÍK V. : On bolzano’s function. *Bolzano and the Foundations of Mathematical Analysis* (1981), 67–81. 1
- [JAR*07] JAFFARD S., ABRY P., ROUX S. G., VEDEL B., WENDT H. : The contribution of wavelets in multifractal analysis. In *The Zuhai Conference on Wavelets and Applications* (2007). 1
- [JBL02] JOSSO B., BURTON D. R., LALOR M. J. : Frequency normalised wavelet transform for surface roughness analysis and characterisation. *Wear* 252, 5 (2002), 491–500. 4
- [KBT10] KIM K., BARNI M., TAN H. Z. : Roughness-adaptive 3-D watermarking based on masking effect of surface roughness. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security Volume* 5, 4 (2010), 721–733. 5
- [Kes03] KESTENER P. : *Analyse multifractale 2D et 3D à l’aide de la transformation en ondelettes : application en mammographie et en turbulence développée*. PhD thesis, Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2003. 1
- [Kha14] KHAWAJA Z. : *Analyse des états de surface en science des matériaux : caractérisation multi-échelles par ondelette et détermination de l’anisotropie des surfaces*. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne, 2014. 3
- [KKK02] KIM S.-J., KIM S.-K., KIM C.-H. : Discrete differential error metric for surface simplification. In *Proceedings of the 10th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications* (2002), IEEE Computer Society. 5
- [Kri20] KRISHNAN B. R. : Review of surface roughness prediction in machining process by using various parameters. *International Journal of Recent Trends in Engineering & Research (IJRTER)* 6, 1 (2020), 7–12. 3
- [KYS12] KHORASANI A. M., YAZDI M. R. S., SAFIZADEH M. S. : Analysis of machining parameters effects on surface roughness : a review. *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering* 5, 1 (2012), 68–84. 3
- [Lav07] LAVOUE G. : A roughness measure for 3d mesh visual masking. In *Proceedings of the 4th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization* (2007), p. 57–60. 5
- [Lav09] LAVOUE G. : A local roughness measure for 3D meshes and its application to visual masking. *ACM Transactions on Applied Perception* 5, 4 (2009), 21 :1–21 :23. 5
- [Lav11] LAVOUE G. : A multiscale metric for 3D mesh visual quality assessment. *Computer Graphics Forum* 30, 5 (2011), 1427–1437. 5
- [LB21] LEE J., BABADAGLI T. : Effect of roughness on fluid flow and solute transport in a single fracture : A review of recent developments, current trends, and future research. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 91 (2021), 103971. 3
- [LC04] LE CADET O. : *Méthodes d’ondelettes pour la segmentation d’images : applications à l’imagerie médicale et au tatouage d’images*. PhD thesis, INP Grenoble, 2004. 1
- [LDGD*06] LAVOUE G., DRELIE GELASCA E., DUPONT F., BASKURT A., EBRAHIMI T. : Perceptually driven 3D distance metrics with application to watermarking. In *SPIE Applications of Digital Image Processing XXIX* (2006). 5
- [Lea11] LEACH R. : *Optical Measurement of Surface Topography*. Springer, 2011. 1, 2
- [Leb17] LEBON N. : *Impact de l’usinage par CFAO sur l’intégrité de surface des prothèses dentaires coronaires*. PhD thesis, Université Paris 13, 2017. 2, 3
- [Lew89] LEWIS J. P. : Algorithms for solid noise synthesis. *SIGGRAPH Comput. Graph.* 23, 3 (1989), 263–270. 5
- [LG12] LE GOÏC G. : *Qualité géométrique & aspect des surfaces : approches locales et globales*. PhD thesis, Université de Grenoble, 2012. 1, 4
- [LGBS*16] LE GOÏC G., BIGERELLE M., SAMPER S., FAVRELIÈRE H., PILLET M. : Multiscale roughness analysis of engineering surfaces : A comparison of methods for the investigation of functional correlations. *Mechanical Systems and Signal Processing* 66-67 (2016), 437–457. 3
- [Lin99] LINA A. : *Transformée en ondelettes, tortuosité et lacunarité fractale pour la caractérisation de surfaces rugueuses. Application à la mesure de rugosité de pavage*. PhD thesis, Département de Génie Electrique et de Génie Informatique, Ecole polytechnique de Montréal, 1999. 4
- [Lin00] LINDSTROM P. : *Model Simplification Using Image and Geometry-Based Metrics*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, 2000. 5
- [LJJ*18] LEE J. H., JARABO A., JEONG D. S., GUTIERREZ D., KIM M. H. : Practical multiple scattering for rough surfaces. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Asia 2018)* 37, 6 (2018). 5
- [LLC*10] LAGAE A., LEFEBVRE S., COOK R., DEROSE T., DRETTAKIS G., EBERT D., LEWIS J., PERLIN K., ZWICKER M. : A Survey of Procedural Noise Functions. *Computer Graphics Forum* 29, 8 (2010), 2579–2600. 5

- [LLDD09] LAGAE A., LEFEBVRE S., DRETTAKIS G., DUTRÉ P. : Procedural Noise using Sparse Gabor Convolution. *ACM Transactions on Graphics* 28, 3 (2009), 54–64. 4
- [LVJ05] LEE C. H., VARSHNEY A., JACOB D. W. : Mesh saliency. *ACM Transactions on Graphics* 24, 3 (2005), 659–666. 5
- [MABA11] MORALA-ARGÜELLO P., BARREIRO J., ALEGRE E. : A evaluation of surface roughness classes by computer vision using wavelet transform in the frequency domain. *Int J Advanced Manufacturing and Technology* 59 (2011). 4
- [Man77] MANDELBROT B. B. : *Fractals : Form, Chance, and Dimension*. W.H. Freeman, 1977. 1
- [MB90] MAJUMDAR A., BHUSHAN B. : Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces. *Journal of Tribology* 112, 2 (1990), 205–216. 1
- [MBA93] MUZY J. F., BACRY E., ARNEODO A. : Multifractal formalism for fractal signals : The structure-function approach versus the wavelet-transform modulus-maxima method. *Phys. Rev. E* 47 (1993), 875–884. 1
- [McG08] MCGRAW T. : Generalized reaction–diffusion textures. *Computers and Graphics* 32, 1 (2008), 82–92. 5
- [MH92] MALLAT S., HWANG W. : Singularity detection and processing with wavelets. *IEEE Transactions on Information Theory* 38, 2 (1992), 617–643. 1
- [MKM89] MUSGRAVE F. K., KOLB C. E., MACE R. S. : The synthesis and rendering of eroded fractal terrains. *SIGGRAPH Comput. Graph.* 23, 3 (1989), 41–50. 6
- [MLZ*21] MA J., LI G., ZHAN Q., WU D., WEI X., WANG X., ZHAO Q., ZUO J. : Surface roughness detection based on image analysis. In *2021 4th International Conference on Data Science and Information Technology* (2021), p. 196–200. 4
- [MNR21] MORDVINTSEV A., NIKLASSON E., RANDAZZO E. : Texture generation with neural cellular automata, 2021. 5
- [MOC*08] M’SAOUBI R., OUTEIRO J., CHANDRASEKARAN H., DILLON JR O., JAWAHIR I. : A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. *International Journal of Sustainable Manufacturing* 1, 1-2 (2008), 203–236. 3
- [MPP84] MANDELBROT B. B., PASSOJA D. E., PAULLAY A. J. : Fractal character of fracture surfaces of metals. *Nature* 308 (1984), 721–722. 1
- [MRG14] MOREAU N., ROUDET C., GENTIL C. : Study and comparison of surface roughness measurements. In *Journées du Groupe de Travail en Modélisation Géométrique* (2014). 1
- [MVN68] MANDELBROT B. B., VAN NESS J. W. : Fractional brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM Review* 10, 4 (1968), 422–437. 6
- [Mye62] MYERS N. : Characterization of surface roughness. *Wear* 5, 3 (1962), 182–189. 1
- [Nay71] NAYAK P. R. : Random process model of rough surfaces. *Journal of Lubrication Technology* 93, 3 (1971), 398–407. 3
- [NDF*21] NEHMÉ Y., DUPONT F., FARRUGIA J.-P., LE CALLET P., LAVOUÉ G. : Visual Quality of 3D Meshes with Diffuse Colors in Virtual Reality : Subjective and Objective Evaluation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* (2021). 6
- [NDF*22] NEHMÉ Y., DUPONT F., FARRUGIA J.-P., CALLET P. L., LAVOUÉ G. : Textured mesh quality assessment : Large-scale dataset and deep learning-based quality metric, 2022.
- [NMP19] NAYAK S. R., MISHRA J., PALAI G. : Analysing roughness of surface through fractal dimension : A review. *Image Vis. Comput.* 89 (2019), 21–34. 1
- [Nou16] NOURI A. : *Cartes de saillance et évaluation de la qualité des maillages 3D*. PhD thesis, Normandie Université, 2016. 5
- [Now20] NOWAK W. : Effect of surface roughness on oxidation resistance of stainless steel aisi 316ti during exposure at high temperature. *J. of Materi Eng and Perform* 29 (2020), 8060–8069. 1
- [PAD*11] PERROTTI V., APRILE G., DEGIDI M., PIATTELLI A., IEZZI G. : Fractal analysis : a novel method to assess roughness organization of implant surface topography. *Periodontics Restorative Dent.* 31, 6 (2011), 633–9. 3
- [Pav16] PAVIE N. : *Modélisation par bruit procédural et rendu de détails volumiques de surfaces dans les scènes virtuelles*. PhD thesis, Université de Limoges, 2016. 4
- [Per85] PERLIN K. : An image synthesizer. *SIGGRAPH Comput. Graph.* 19, 3 (1985), 287–296. 4
- [PH15] PAGGI M., HE Q. C. : Evolution of the free volume between rough surfaces in contact. *Wear* 336-337 (2015), 86–95. 3
- [PPG*20] PARIS A., PEYTAVIE A., GUÉRIN E., ARGUDO O., GALIN E. : Desertscape Simulation. *Computer Graphics Forum* 38, 7 (2020), 47–55. 6
- [PRA19a] PÉREZ-RÀFOLS F., ALMQVIST A. : Generating randomly rough surfaces with given height probability distribution and power spectrum. *Tribology International* 131 (2019), 591–604. 3
- [PRA19b] PÉREZ-RÀFOLS F., ALMQVIST A. : Generating randomly rough surfaces with given height probability distribution and power spectrum. *Tribology International* 131 (2019), 591–604. 5
- [PS99] PODSIADLO P., STACHOWIAK G. : Applications of hurst orientation transform to the characterization of surface anisotropy. *Tribology International* 32, 7 (1999), 387–392. 1
- [QdCR10] QUINTANA G., DE CIURANA J., RIBATALLADA J. : Surface roughness generation and material removal rate in ball end milling operations. *Materials and Manufacturing Processes* 25, 6 (2010), 386–398. 4
- [Ram05] RAMANANANTOANDRO T. : *Implications tactiles et visuelles de la rugosité du bois et des matériaux dérivés du pin maritime*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2005. 3
- [RDB07] ROUDET C., DUPONT F., BASKURT A. : Multiresolution mesh segmentation based on surface roughness and wavelet analysis. In *Visual communications and image processing* (2007), pp. 65082E.1–65082E.12, vol. 6508 (2). 5
- [RGB16] RAYMOND B., GUENNEBAUD G., BARLA P. : Multi-scale rendering of scratched materials using a structured sv-brdf model. *ACM Trans. Graph.* 35, 4 (2016). 5
- [RKJ11] ROSENBOOM L., KREIS T., JÜPTNER W. : Surface description and defect detection by wavelet analysis. *Measurement Science and Technology* 22, 4 (2011), 045102. 1, 4
- [RKv*22] RAJASEKARAN S. D., KANG H., ČADÍK M., GALIN E., GUÉRIN E., PEYTAVIE A., SLAVÍK P., BENES B. : Pprm : Perceived terrain realism metric. *ACM Trans. Appl. Percept.* 19, 2 (2022). 6
- [RLE14] RAMANANANTOANDRO T., LARRICQ P., ETERRADOSSI O. : Relationships between 3d roughness parameters and visuotactile perception of surfaces of maritime pinewood and mdf. *Holzforschung* 68, 1 (2014), 93–101. 1, 3
- [SGH*06] SHALABI M., GORTEMAKER A., HOF M., JANSEN J., CREUGERS N. : Implant surface roughness and bone healing : a systematic review. *Journal of Dental Research* 85 (07 2006), 496–500. 3
- [Sil96] SILVERSTEIN L. D. : Foundations of vision. *Color Research & Application* 21, 2 (1996), 142–144. 5
- [SKJY06] SANDERSON A. R., KIRBY R. M., JOHNSON C. R., YANG L. : Advanced reaction-diffusion models for texture synthesis. *Journal of Graphics Tools* 11, 3 (2006), 47–71. 5
- [SLAH21] SCHULTE C., LI X., ABEL D., HIRT G. : Model-based control of the strip roughness in cold rolling. *IFAC-PapersOnLine* 54, 11 (2021), 109–114. 4

- [ST06] STOEV S. A., TAQQU M. S. : How rich is the class of multifractional brownian motions? *Stochastic Processes and their Applications* 116, 2 (2006), 200–221. 6
- [Sta01] STAM J. : An illumination model for a skin layer bounded by rough surfaces. In *Proceedings of the 12th Eurographics Workshop on Rendering Techniques* (2001), Springer-Verlag, p. 39–52. 5
- [STBB14] SMELIK R. M., TUTENEL T., BIDARRA R., BENES B. : A survey on procedural modelling for virtual worlds. *Comput. Graph. Forum* 33, 6 (2014), 31–50. 6
- [SV04] SITZIA-VERLEURE G. C. : *Méthodes thermodynamiques appliquées à l'imagerie médicale*. PhD thesis, Université de Montréal, 2004. 1
- [SWT22] SONG G., WANG Y., TAN D. Q. : A review of surface roughness impact on dielectric film properties. *IET Nanodielectrics* 5, 1 (2022), 1–23. 3
- [Tau95] TAUBIN G. : A signal processing approach to fair surface design. In *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (1995), Association for Computing Machinery, p. 351–358. 5
- [The21] THENARD T. : *Influence de la rugosité de surfaces Ti-6Al-4V obtenues par fabrication additive SLM sur l'ostéointégration : Évaluation in vitro et in silico*. PhD thesis, HESAM Université, 2021. 3
- [Thi03] THIM J. : *Continuous Nowhere Differentiable Functions*. Master's thesis, Lulea University of Technology, 2003. 1
- [Tur91] TURK G. : Generating textures on arbitrary surfaces using reaction-diffusion. *SIGGRAPH Comput. Graph.* 25, 4 (1991), 289–298. 5
- [VGBG*07] VAN GORP A., BIGERELLE M., GRELLIER A., IOST A., NAJJAR D. : A multi-scale approach of roughness measurements : Evaluation of the relevant scale. *Materials Science and Engineering : C* 27 (2007), 1434–1438. 3
- [Vos91] VOSS R. F. : Random fractal forgeries. In *Fundamental Algorithms for Computer Graphics* (1991), pp. 805–835. 6
- [VSKL17] VANHOEY K., SAUVAGE B., KRAEMER P., LAVOUÉ G. : Visual quality assessment of 3d models : On the influence of light-material interaction. *ACM Trans. Appl. Percept.* 15, 1 (2017). 5
- [WAW*21] WANG Y., AZAM A., WILSON M. C., NEVILLE A., MORINA A. : Generating fractal rough surfaces with the spectral representation method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J : Journal of Engineering Tribology* 235, 12 (2021), 2640–2653. 5
- [WF04] WEI L., FWA T. F. : Characterizing road roughness by wavelet transform. *Transportation Research Record* 1869, 1 (2004), 152–158. 4
- [WFZ05] WEI L., FWA T. F., ZHE Z. : Wavelet analysis and interpretation of road roughness. *Journal of Transportation Engineering* 131, 2 (2005), 120–130. 4
- [WH93] WOLF D., HUSSON R. : Application des ondelettes à l'analyse de texture et à l'inspection de surface industrielle. *Journal de Physique III* 3, 11 (1993), 2133–2148. 1, 4
- [WHZ*08] WEI L.-Y., HAN J., ZHOU K., BAO H., GUO B., SHUM H.-Y. : Inverse texture synthesis. *ACM Trans. Graph.* 27, 3 (2008), 1–9. 5
- [WK91] WITKIN A., KASS M. : Reaction-diffusion textures. *SIGGRAPH Comput. Graph.* 25 (1991), 299–308. 5
- [WLKT09] WEI L.-Y., LEFEBVRE S., KWATRA V., TURK G. : State of the Art in Example-based Texture Synthesis. In *Eurographics 2009, State of the Art Report, EG-STAR* (2009), pp. 93–117. 5
- [WMLT07] WALTER B., MARSCHNER S. R., LI H., TORRANCE K. E. : Microfacet models for refraction through rough surfaces. In *Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques (EGSR)* (2007), Eurographics Association, p. 195–206. 5
- [WNM19] WARSZAWSKI K. K., NIKIEL S. S., MRUGALSKI M. : Procedural method for fast table mountains modelling in virtual environments. *Applied Sciences* 9, 11 (2019). 6
- [WSL*17] WANG X., SHI T., LIAO G., ZHANG Y., HONG Y., CHEN K. : Using wavelet packet transform for surface roughness evaluation and texture extraction. *Sensors* 17, 4 (2017). 4
- [WTM12] WANG K., TORKHANI F., MONTANVERT A. : A fast roughness-based approach to the assessment of 3D mesh visual quality. *Computers and Graphics Volume* 36, 7 (2012), 808–818. 5
- [WYY03a] WANG A., YANG C., YUAN X. : Evaluation of the wavelet transform method for machined surface topography 2 : fractal characteristic analysis. *Tribology International* 36, 7 (2003), 527–535. 4
- [WYY03b] WANG A., YANG C., YUAN X. : Evaluation of the wavelet transform method for machined surface topography 1 : methodology validation. *Tribology International* 36, 7 (2003), 517–526. 4
- [YAM17] YASTREBOV V. A., ANCIAUX G., MOLINARI J. F. : The role of the roughness spectral breadth in elastic contact of rough surfaces. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 107 (2017), 469–493. 3
- [YLYP03] YUAN C., LI J., YAN X., PENG Z. : The use of the fractal description to characterize engineering surfaces and wear particles. *Wear* 255, 1-6 (2003), 315–326. 1
- [ZO87] ZOBECK T. M., ONSTAD C. : Tillage and rainfall effects on random roughness : A review. *Soil and Tillage Research* 9, 1 (1987), 1–20. 3
- [ZSM*22] ZHANG Z., SUN W., MIN X., WANG T., LU W., ZHAI G. : No-reference quality assessment for 3d colored point cloud and mesh models. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* (2022), 1–14. 5
- [ZSTR07] ZHOU H., SUN J., TURK G., REHG J. M. : Terrain synthesis from digital elevation models. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 13, 4 (2007), 834–848. 6
- [ZT10] ZAWADA-TOMKIEWICZ A. : Estimation of surface roughness parameter based on machined surface image. *Metrology and Measurement Systems* 17 (2010). 4
- [ZTC*22] ZHENG B., TANG J., CHEN J., ZHAO R., HUANG X. : Investigation of adhesion properties of tire—asphalt pavement interface considering hydrodynamic lubrication action of water film on road surface. *Materials* 15, 12 (2022). 1
- [ZTWZ15] ZHANG S., TO S., WANG S., ZHU Z. : A review of surface roughness generation in ultra-precision machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 91 (2015), 76–95. 3