

Innovation de rupture et mesure des surfaces des technologies du médical

Serge Carras, président d'Altimet*

La caractérisation de surface dans les domaines du médical a toute sa place. Altimet nous présente quelques applications possibles.

Constructeur établi depuis 2004 à Thonon-les-Bains en Haute-Savoie, la société Altimet est devenue la référence en métrologie optique des états de surface. Elle déclare aujourd'hui un parc de plusieurs centaines de machines installées dans les industries de haute précision et les matériaux innovants... et ceci de la PME au grand compte, en passant par l'ETI.

Au fil des années, elle a étoffé et développé sa gamme d'instruments optiques Altisurf tout d'abord destinée aux laboratoires de R&D, mais désormais qualifiée par la métrologie de production qui s'en est équipée grâce aux modules 50 et 60 MSC, embarqués dans la ligne, sur COBOT, ou manportables.

Partant d'une expérience incomparable dans les secteurs de l'aéronautique et de l'horlogerie avec un contrôle de la géométrie et texture des matériaux et des alliages, Altimet l'a renforcée sur les surfaces polies ou texturées, transparentes ou revêtues, substrats innovants qui constituent aujourd'hui les surfaces fonctionnelles du domaine médical.

Une performance décisive pour la prothèse orthopédique

Altimet est présente dans l'ostéosynthèse auprès des fabricants de prothèses orthopédiques : hanche, genou, épaule, rachis mais aussi plaques, vis et broches, pour lesquelles l'état de surface va être relié à l'ostéogénèse. Il en est de même pour les vis et inserts où la spécification de rugosité est primordiale pour les praticiens.

La société équipe les centres techniques qui se consacrent à l'usure et à la fonctionnalité de surface tels que le Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes de l'École Centrale de Lyon, le CRITT MDTs de Charleville-Mézières, la métallurgie des alliages, la préparation des surfaces, le revêtement plasma, le coldspray... tels le CRITT Lorius de Longwy, l'UTT Nogent, le centre des matériaux de Mines Paris Tech, l'UTBM, l'Insa de Lyon, Rennes...

Autant d'applications que de types de surfaces utilisant un procédé par étapes, d'élaboration ou de finition, qui nécessitera un contrôle de conformité tout au long du cycle de production.

Trois domaines clés d'innovation de rupture

Une nouvelle approche : la décomposition modale discrète (DMD)

Partant des travaux du postdoctorat réalisé chez Altimet en 2012 par Hugues Favrelière du laboratoire SYMME de Polytech-Savoie à Annecy (74), Altimet a procédé au rachat en 2020 du Brevet MODAL EP271 8665B1 « Procédé et dispositif de caractérisation de surfaces » de l'USMB. La DMD est une méthode innovante d'analyse et de filtrage des surfaces dont le but est de fournir des éléments d'analyse permettant de mieux comprendre les phénomènes touchant aux surfaces fonctionnelles et d'aspect.

Une application de la DMD en recherche orthopédique : la prothèse de hanche

L'implantation de Prothèse Totale de Hanche (PTH) est fréquemment pratiquée en chirurgie

orthopédique avec 100 000 poses/an en France. Elle permet à de nombreuses personnes souffrant d'affections dégénératives ou inflammatoires évoluées de marcher à nouveau.

Lors du changement de prothèses céramiques, il arrive au chirurgien de constater des marques d'incrustations d'alliages métalliques sur la partie sphérique de la prothèse (**figure 1**- tête prothétique). Ces incrustations fines et nettes ou sous forme d'une bande large peuvent être responsables d'une usure prématurée de la prothèse ou d'un mauvais comportement d'usage tel que le bruit d'articulation. Dans le cas présent, nous effectuons avec la Décomposition Modale Discrète (DMD) une analyse multi-échelle des incrustations métalliques présentes sur des composants articulaires de prothèse de hanche, avec une approche métrologique du phénomène.

Parant de mesures faites sur les zones de contact du composant articulaires, la DMD met en évidence différents ordres de défauts géométriques des surfaces étudiées et détermine les conséquences de ces incrustations sur l'état de surface et sur les variations géométriques en termes de défaut de forme et d'ondulation. La hanche est l'articulation qui relie la cavité articulaire du bassin (le cotyle) à la tête du fémur (extrémité hémisphérique de l'os de la cuisse). Une prothèse totale de hanche (**figures 1 et 2**) est constituée d'une cupule, d'une tige fémorale et d'une tête prothétique. La cupule est la partie supérieure de la PTH, c'est une demi-sphère de métal (titane ou chrome cobalt) encastrée dans la cavité cotyloïdienne. Dans la cupule est logée une garniture de polyéthylène, de métal ou de céramique, appelée insert. La tige fémorale est la partie métallique (en titane, acier ou

[*] Cet article intègre des résumés de publication et de thèse de Julien Grandjean. « Influence des défauts de forme sur les performances d'assemblages : application aux prothèses totales de hanche ». Université de Savoie-Mont-Blanc, Laboratoire Polytech' SYMME. Le filtrage modal présenté fait l'objet d'un brevet : Fascicule de brevet européen EP 2 718 665 B1 - Titulaire : ALTIMET SAS, Inventeurs : Samper, Favrelière, Legoïc.

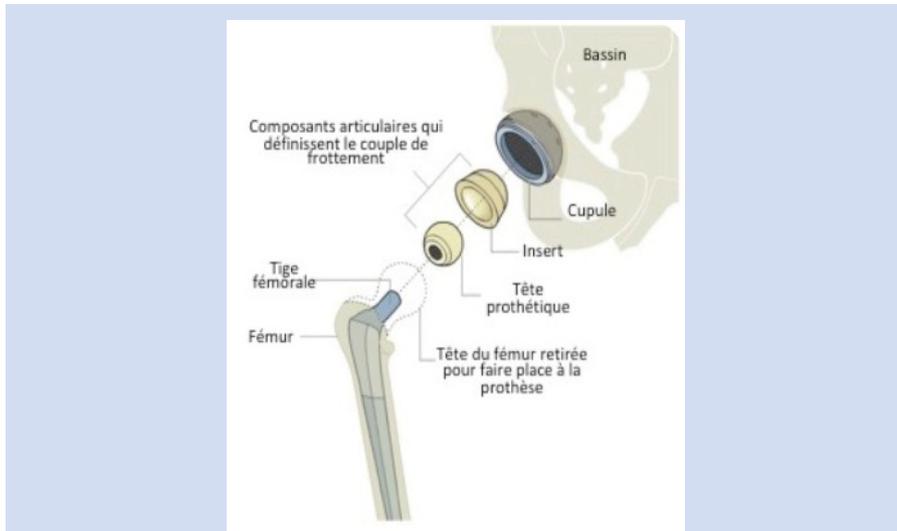


FIGURE 1 : Composants de la prothèse.

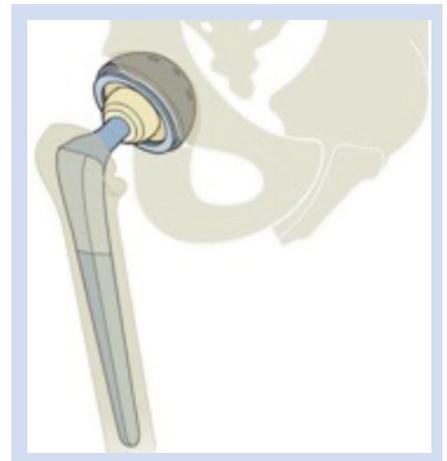


FIGURE 2 : Prothèse assemblée.

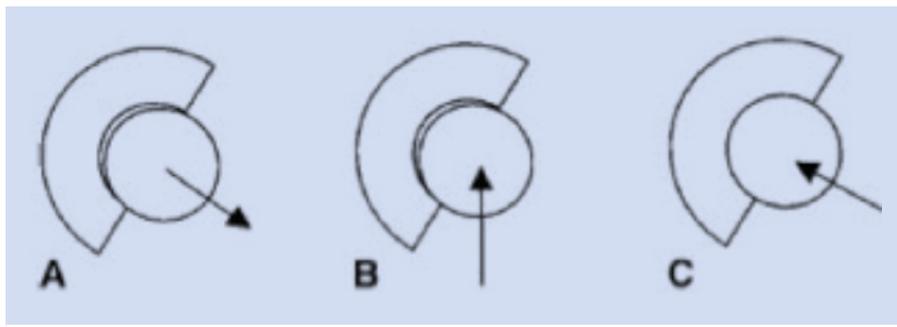


FIGURE 3 : Phénomène de micro-séparation. A : Phase de balancement et micro-séparation, B : Choc du talon sur sol et contact en bordure de l'insert : chargement de bord, C : Glissement sur bordure puis remise en place.



FIGURE 4 : Stripe wear.

chrome cobalt) insérée dans l'extrémité supérieure du fémur, elle supporte la tête prothétique (en céramique ou chrome-cobalt) fixée sur le col de la tige fémorale et qui s'articule avec l'insert.

La hanche est naturellement lubrifiée par le liquide synovial qui lubrifie l'articulation après la pose de la prothèse. Les matériaux les plus couramment utilisés pour limiter les frottements de l'ensemble tête prothétique/insert sont le couple métal-polyéthylène. Cependant l'usure du polyéthylène est importante et provoque le phénomène d'ostéolyse, où l'organisme cherche à éliminer les particules «étrangères» et détruit l'os avoisinant. Ce phénomène fragilise les os et peut conduire au descellement de la prothèse. Si le polyéthylène réticulé permet de mieux résister à l'usure et limite ainsi l'apparition de l'ostéolyse, les améliorations technologiques ont également permis de développer de nouveaux couples de frottement «dur-dur» comme le

couple céramique-céramique. L'utilisation de ce couple a longtemps été limitée du fait de la fragilité de la céramique pouvant engendrer des fractures d'implants. Ceci a été en partie résolu par le développement de nouvelles céramiques, avec l'emploi du couple céramique-céramique pour les patients jeunes. Son taux d'usure s'avère jusqu'à 4 000 fois inférieur à celui du couple métal-polyéthylène conventionnel limitant ainsi considérablement les risques d'ostéolyse. Le risque fracturaire est aujourd'hui très limité par l'amélioration des matériaux, de l'ordre de 0,005 à 0,02 % pour l'Alumine.

Phénomène de bande d'usure ou Stipe Wear

Dès les premières générations de prothèses en céramique, de nombreux explants présentent des zones rugueuses sur la tête et l'insert traduisant des fractures intragranulaires et une érosion. Cette usure spécifique s'appelle le «stripe wear» (bande d'usure). Une illustration

en est donnée à la figure 4. Elle est liée à la cinématique de la hanche, et plus précisément aux phénomènes de micro-séparation. La micro-séparation (figure 3) correspond à un relâchement de la hanche médial-latéral pendant la marche, due à la laxité articulaire qui est responsable d'usure prématurée.

Nota : la couleur du stripe wear est due au crayonnage destiné à le rendre apparent

La microséparation peut également apparaître avec le conflit prothétique fémoro acétabulaire, qui correspond au phénomène de contact de la tige fémorale avec la cupule ou l'insert (figure 5A). Celui-ci peut avoir lieu lors d'une flexion importante de la hanche (e.g. lors de la montée d'escalier ou lors du passage de la position assise à debout). Le second inconvénient du conflit prothétique fémoro acétabulaire est qu'il favorise une usure des parties en contact provoquant ainsi l'apparition de particules métalliques qui viennent compromettre le liquide synovial (figure 5B).

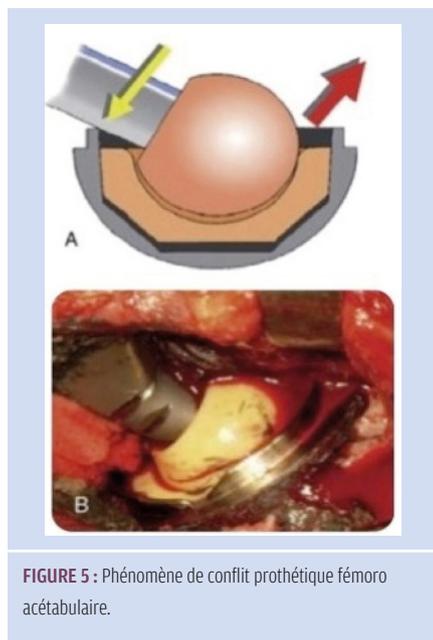


FIGURE 5 : Phénomène de conflit prothétique fémoro-acétabulaire.

Incrustations métalliques

Certains explants céramiques présentent des marques d'incrustations d'alliages sur l'insert ou la tête fémorale. Ces incrustations peuvent se présenter fines et nettes (figure 6) ou sous forme de larges bandes semblables au stripe wear. Il est admis que ces incrustations sont la conséquence de conflit prothétique fémoro-acétabulaire ou du frottement entre les parties céramiques et les parties métalliques de la prothèse ou de l'outillage utilisé lors de la pose par le chirurgien.

Analyse par recours à la décomposition modale discrète (DMD)

La DMD consiste ici à décomposer le signal dans une famille de fonctions discrètes définie a priori, de la même manière que la transformée de Fourier discrète, ou bien encore la transformée en ondelettes discrètes.

Dans cette décomposition, le signal correspond à la surface mesurée, et peut être une surface plane, cylindrique, sphérique... D'une manière plus précise, la DMD permet de décomposer la surface mesurée dans une famille de descripteurs appelés modes ou déformées modales. Cette famille de fonctions est établie à partir des modes de vibration de l'élément géométrique de référence; ces fonctions correspondent par exemple aux modes de vibration d'un plan si la surface de mesure est « plane », etc. Ceci explique le nom choisi pour ce paramétrage, le paramétrage modal.

L'opération de décomposition consiste à effectuer mathématiquement une projection

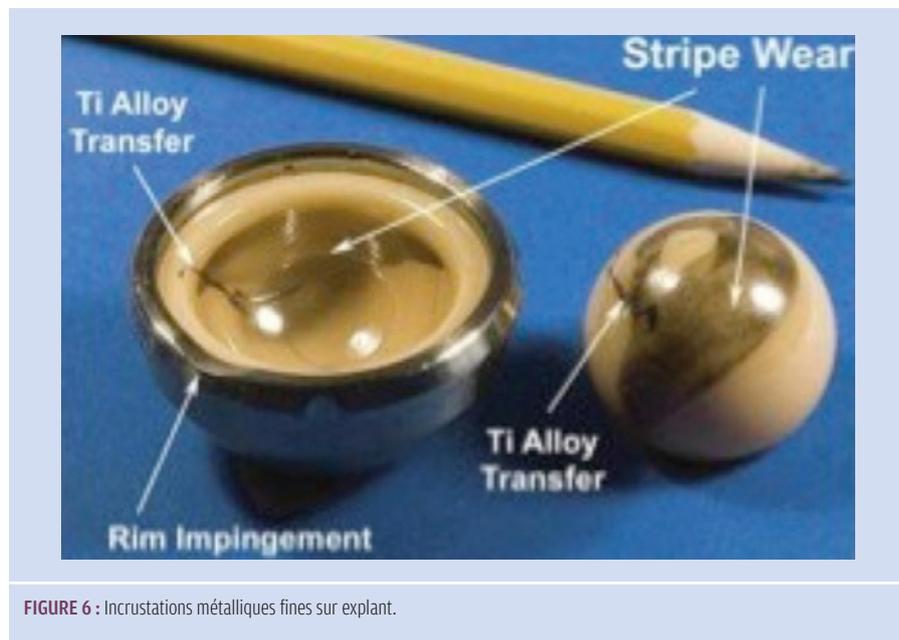


FIGURE 6 : Incrustations métalliques fines sur explant.

vectorielle de la mesure mise sous forme vectorielle dans l'espace vectoriel lui-même formé par les modes de vibrations calculés du modèle numérique.

On peut alors exprimer la surface mesurée sous la forme suivante :

$$V = \sum_{i=1}^{N_q} \lambda_i Q_i + \epsilon(N_q)$$

Où N_q représente le nombre de modes choisis pour la décomposition, et ϵ le résidu de la décomposition. Les modes Q_i sont une résolution classique de la mécanique vibratoire obtenue ici numériquement par la méthode

des éléments finis ce qui implique une décomposition modale discrète.

Analyse multiéchelle d'une surface sphérique : la tête prothétique

• Échantillons

L'étude est ici faite uniquement sur des échantillons de têtes prothétiques présentant des anomalies telles que décrites précédemment. L'étude du second composant articulaire de la rotule, l'insert, est menée de façon analogue à celle présentée ici pour une tête prothétique. Deux échantillons, présentent différents niveaux d'incrustations métalliques (figure 7) :

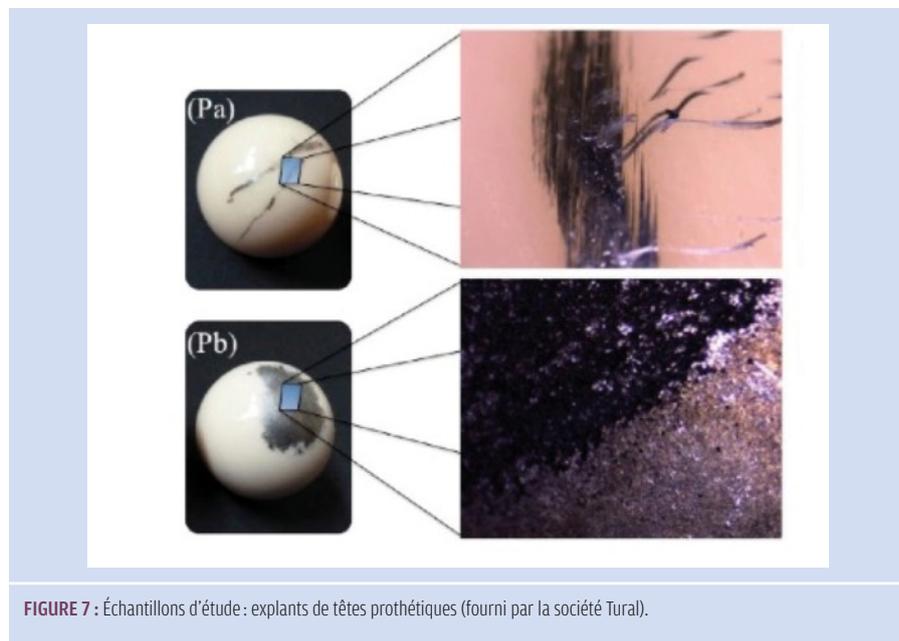


FIGURE 7 : Échantillons d'étude : explants de têtes prothétiques (fourni par la société Tural).

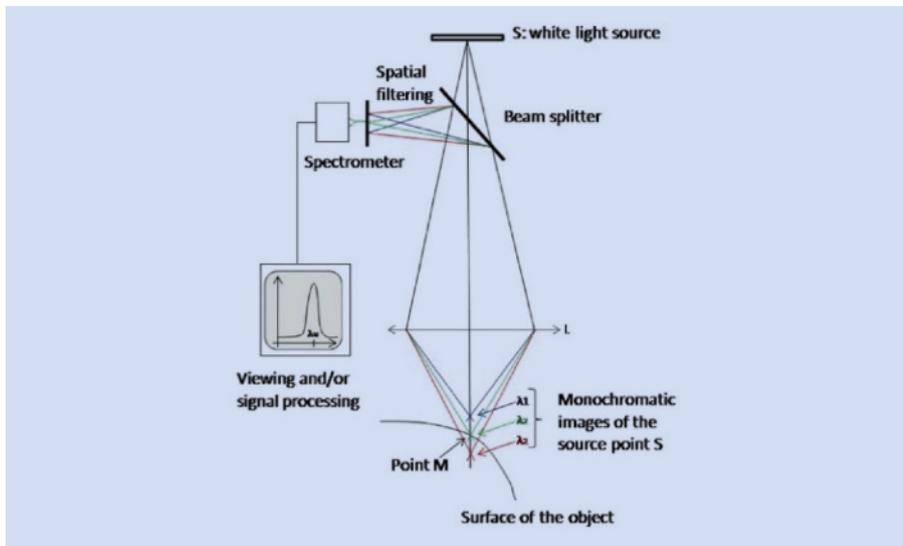


FIGURE 8 : Principe de la microscopie confocale chromatique à champ étendu.

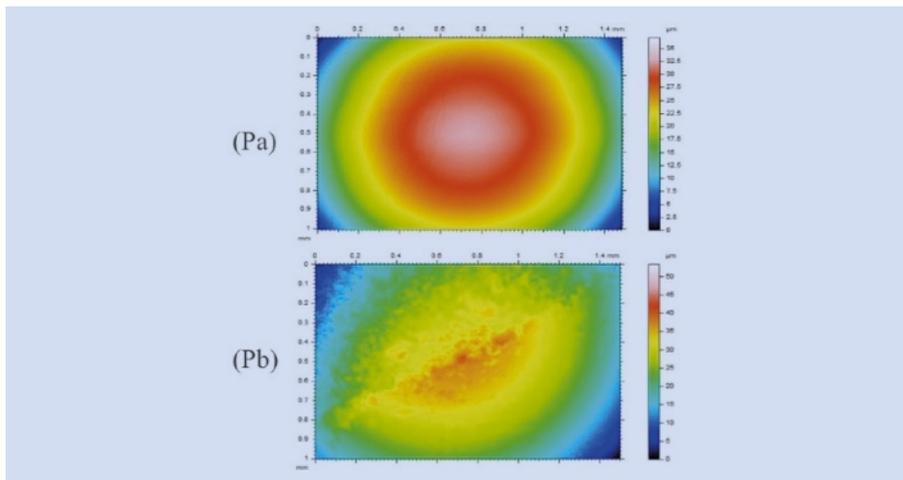


FIGURE 9 : Reconstruction 3D fausses couleurs des surfaces mesurées sur les deux échantillons.

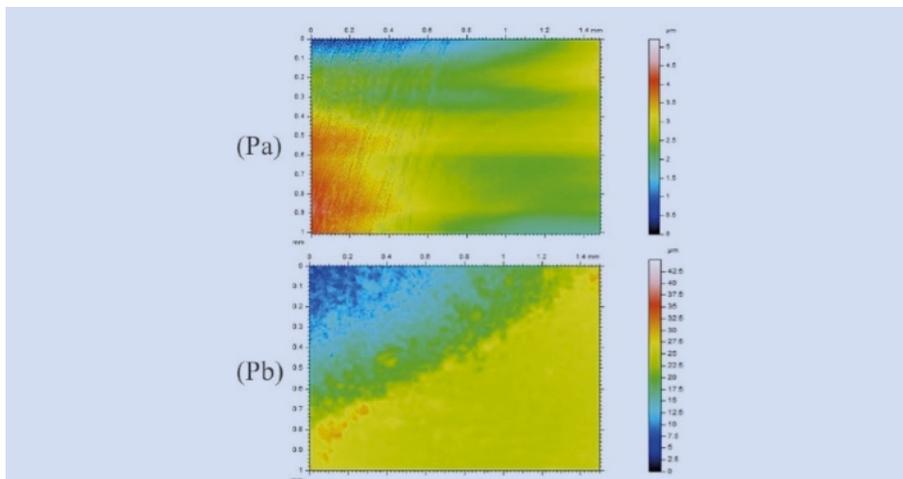


FIGURE 10 : Reconstruction des surfaces obtenues après suppression de forme (sphère) par le critère des moindres carrés.

- Tête de prothèse A (Pa) : incrustations métalliques fines
- Tête de prothèse B (Pb) : incrustations métalliques plus importantes, présence d'une zone où la détérioration semble plus avancée.

• Moyen de Mesure AltiSurf 520

Un AltiSurf 520 d'Altmet est ici utilisé pour les mesures basées sur la microscopie confocale à champ étendu (figure 8), équipé d'une sonde optique confocale chromatique de profondeur de champ de 300 μm , et de précision axiale en z de 0,06 μm .

Les mesures sont effectuées sur les zones présentant des anomalies (figure 9), afin d'évaluer les variations géométriques de forme, d'ondulation et de rugosité correspondant aux incrustations (figure 7).

• Analyse multi-échelle par la méthode modale

Son objectif est de faire apparaître les variations géométriques des surfaces mesurées sur les composants articulaires de prothèses de hanche dont les surfaces nominales de référence des têtes prothétiques sont des surfaces sphériques. La première étape consiste donc à filtrer la sphère nominale en prenant en compte uniquement les zones non détériorées de la surface mesurée. Le calcul du rayon et la position du centre de la sphère la mieux ajustée, consiste à minimiser la distance entre la surface et la sphère selon le critère des moindres carrés.

La figure 10 présente les surfaces les surfaces source mesurées à partir desquelles la méthode modale caractérise les défauts de forme, d'ondulation et de rugosité.

La Décomposition Modale Discrète (DMD), décompose la surface originellement mesurée dans une famille de descripteurs issus de la mécanique vibratoire. Ces descripteurs correspondent aux modes naturels de vibration de la géométrie de référence, ici un plan. Cette famille de descripteurs forme un espace vectoriel, appelé base modale.

Quand l'on projette la surface mesurée dans la base modale, on obtient la décomposition suivante dont on a choisi le nombre de modes égal à ici à 500 pour la décomposition. On peut alors visualiser la DMD sous forme de spectre modal des amplitudes (figure 11).

On remarque que le spectre modal de la décomposition de cette surface est contenu dans une double enveloppe qui décroît rapidement. Les modes (Qi) sont triés par ordre

de fréquence, mais la forme de l'enveloppe montre qu'ils sont triés simultanément par ordre d'amplitude. Cette caractéristique permet d'utiliser les résultats de la DMD pour recomposer le défaut de forme, d'ondulation et de rugosité des surfaces décomposées.

• **Filtrage Modal et résidu**

Le résidu est utilisé afin de comparer la surface mesurée et la surface reconstruite à partir de l'ensemble des modes de la décomposition. Ceci permet d'évaluer, pour la surface considérée, la pertinence du paramétrage modal et la qualité de l'approximation réalisée. Le résidu (ϵ) de la DMD est obtenu à l'issue de l'opération (5), le nombre de mode pour la décomposition étant choisi à 500. La **figure 12** présente pour l'échantillon (Pa) le résidu de la décomposition modale.

On remarque que ce résidu a une très faible amplitude ($< 1,8 \mu\text{m}$), et est composé principalement des éléments à très faible périodicité de la surface, et du bruit de mesure.

La décomposition modale permet ainsi d'obtenir une très bonne approximation d'une surface à

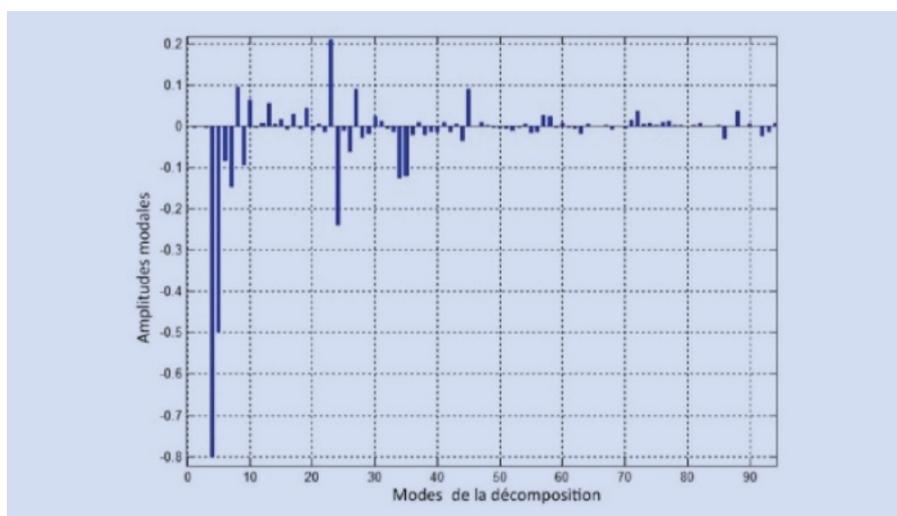


FIGURE 11 : Exemple de spectre modal des amplitudes, pour l'échantillon (Pa).

partir d'un nuage de points. La forme du spectre (décroissance rapide) indique par ailleurs qu'un faible nombre de paramètres est suffisant pour représenter de façon efficace une surface.

• **Défaut de forme, d'ondulation et de rugosité**
La méthode modale permet enfin de

reconstruire les différentes composantes d'une surface, en recomposant une partie de la DMD. On peut ainsi obtenir les défauts de forme, d'ondulation, et de rugosité d'une surface par simple reconstruction d'une partie du « signal géométrique » (**figure 13**).

SCR SA

Expert en solution complète pour le traitement thermique et l'automatisation

Nos services sont comme vos fours : presque uniques. Notre expérience et notre savoir-faire dans une large gamme d'applications telles que la supervision, le contrôle de processus, la gestion et la mesure, l'automatismes, la mise à jour et modernisation d'installations ou la fabrication de fours spéciaux pour le traitement thermique nous permettent de répondre avec un niveau de précision élevé à la demande du client.

Supervision

Sondes

Régulateurs

Système de nitruration

SCR SA - Swiss made
Tél : +41 32 474 47 27
www.scr-sa.ch

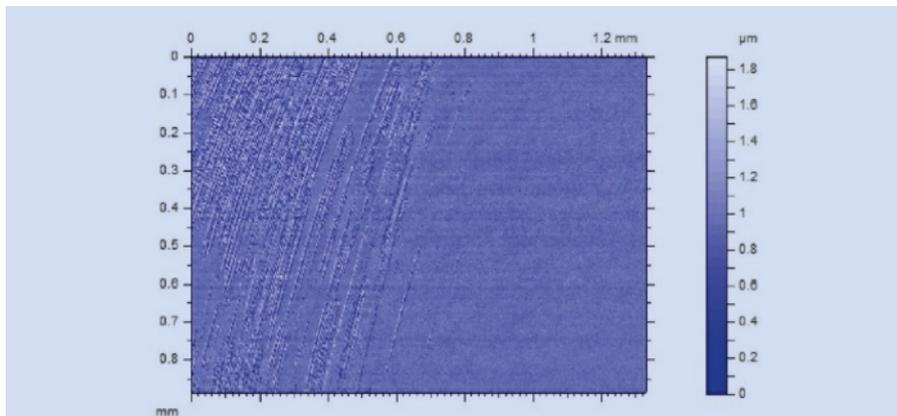


FIGURE 12 : Reconstruction du résidu de la DMD calculé sur la surface (Pa).

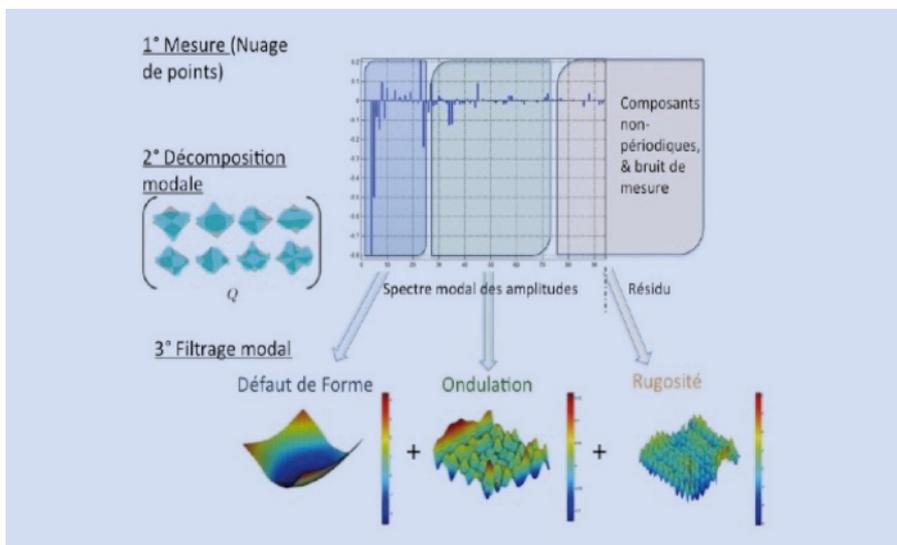


FIGURE 13 : Étapes de la méthode modale.

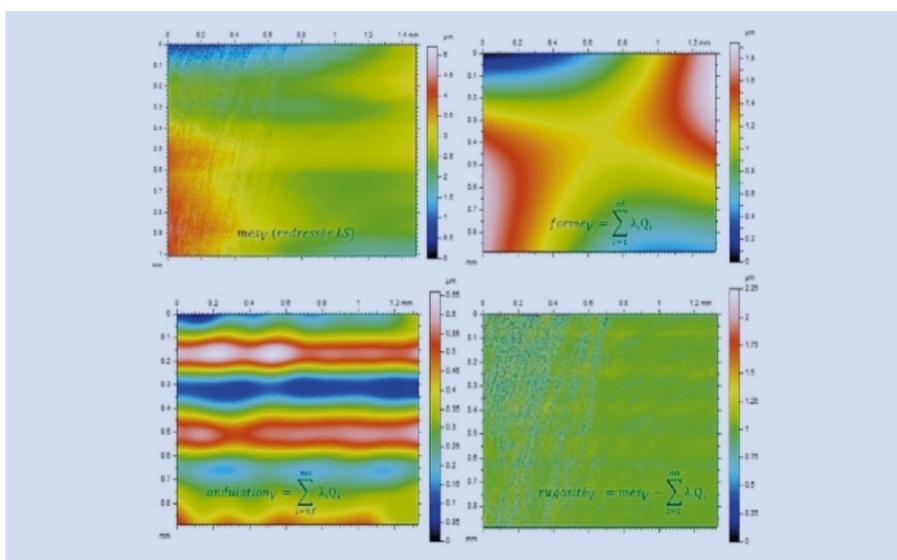


FIGURE 14 : Analyse multi-échelle de la tête prothétique (Pa), avec Nf=15 et No=100.

Il a été ainsi démontré que les marques métalliques visibles sur les têtes prothétiques peuvent avoir provoqué de façon plus ou moins évoluée la détérioration de la surface de la prothèse.

Alors que les premières marques (échantillon Pa) n'altèrent la surface que de façon superficielle par des rayures d'une échelle de l'ordre de la rugosité avec une simple modification de l'état de surface, les prothèses plus « marquées » (échantillon Pb) entraînent des modifications de l'ensemble des composantes géométriques de la surface, et notamment un défaut de forme important.

Les figures 14 et 15 montrent ainsi les reconstructions des composants de forme, d'ondulation et de rugosité obtenus par la méthode modale pour les deux surfaces étudiées :

Le choix des deux seuils Forme/Ondulation (Nf), et Ondulation/Rugosité (No) dans le filtrage a revêtu une influence forte.

• Une nouvelle approche métrologique ISO basée sur la DMD

La normalisation ne définissant pas encore le placement de ces seuils, Altimet a néanmoins tenu plusieurs conférences, notamment lors du congrès national de métrologie, en vue d'une inscription au programme de normalisation de l'outil modal et de nouveaux paramètres de rugosité 3D associés.

Altimet propose par ailleurs à l'utilisateur de la DMD des outils logiciels nés de l'expérience et de « comparables » afin de faire varier ces seuils à la manière de curseurs et visualiser en temps réel des reconstructions topographiques partielles. Il peut ainsi afin de définir pour chaque surface analysée, ce qu'il considère comme étant de l'ordre du défaut de forme, d'ondulation, ou de rugosité, avec naturellement le placement de seuils de validité et qualité.

Le lien entre dimension et état de surface

Une nouvelle technologie de scanning à ligne chromatique de très haute résolution permet de combiner une acquisition très rapide des formes volumiques des prothèses et inserts par exemple, mais aussi de l'état de surface, présent dans un même modèle numérique. Des liens vers les logiciels de métrologie standards de marché tels Metrolog X4 de Metrologic Group ou GOM Inspect du groupe Zeiss ont été développés et permettent une visualisation des écarts de tolérance directement sur les modèles numériques.

Les nouvelles surfaces fonctionnalisées par laser femto-seconde

À Saint-Étienne, Altimet est partenaire du volet caractérisation de Manutech-USD, équipement d'excellence regroupant des institutionnels et industriels développant une chaîne de texturation multi-échelle des matériaux.

La plateforme associe des lasers femto seconde titane-saphir, des moyens de caractérisation avancés FIB/MEB/EBSD et un AltiSurf 540 qui combine des fonctions spécialement développées de caractérisation univoque: optique chromatique, interférométrique, faible force, mouillabilité, indentation-dureté, sclérométrie, tribologie. Le flux laser femto-seconde réalise la gravure de microcavités et laser-ripples à l'échelle micrométrique et nanométrique destinées à fonctionnaliser les surfaces des matériaux en leur conférant des propriétés fonctionnelles inédites favorisant l'adhérence, la croissance osseuse, le glissement, la régénération/autonettoyage ou encore la résistance à l'usure. Autant de propriétés qui touchent à l'état de l'art des fonctions dont sont dotés les nouveaux dispositifs médicaux.

En conclusion

L'apport de ces innovations de rupture restant naturellement à envisager de manière pertinente et adaptée, Altimet propose son assistance pour toute spécification ou caractérisation de surface fonctionnalisée les intégrant. Elle offre ainsi à la location de moyenne ou longue durée des machines communicantes Industrie 4.0 opérationnelles sur site en moins de deux jours et destinées à la preuve de concept ou au pilote pré-industriel. En outre, la société assure le conseil-formation-location-vente de ces machines mais aussi des prestations sur-mesure.

Bibliographie

Analyse multi-échelle des composants articulaires d'une prothèse de hanche par la méthode modale, par Julien GRANDJEAN^{ab}, Gaëtan LE GOIC^c, Hugues FAVRELIÈRE^a, Yann LEDOUX^b, Serge SAMPER^a, Laure DEVUN^c

[a] Laboratoire SYMME (Systèmes et Matériaux pour la Mécatronique), un laboratoire de l'Université Savoie Mont-Blanc et rattaché à Polytech Anecy Chambéry.

[b] Laboratoire I2M-UMR 5295 (Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux), Université de Bordeaux, Talence, France.

[c] Entreprise TURAL, Recherche et Essais, Marignier, France.

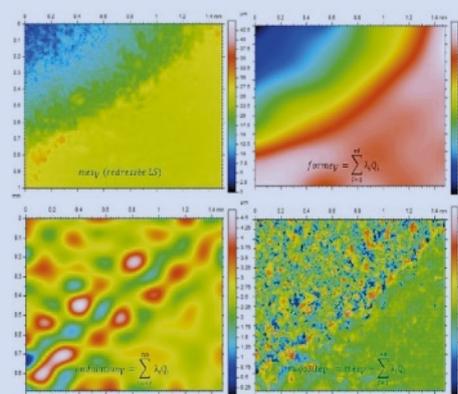


FIGURE 15 : Analyse multi-échelle de la tête prothétique (Pb), avec $N_f=40$ et $N_o=150$.



FIGURE 16 : AltiSurf 60-Cobot.

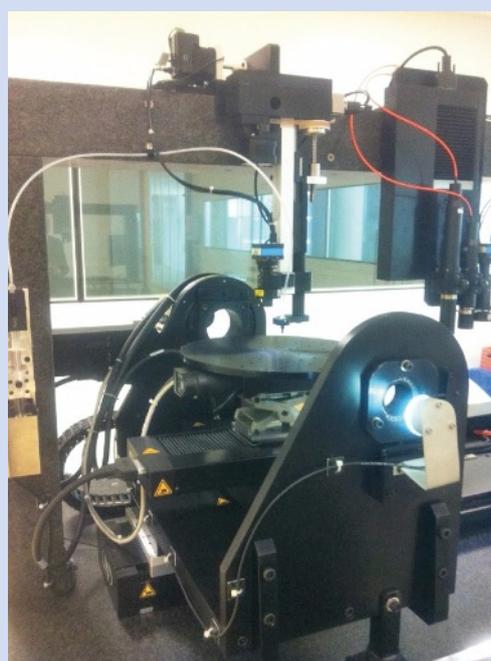


FIGURE 17 : Platine de mesure multiphysique de l'AltiSurf 560.