



**HAL**  
open science

# Qualité géométrique & aspect des surfaces : approches locales et globales

Gaëtan Le Goïc

► **To cite this version:**

Gaëtan Le Goïc. Qualité géométrique & aspect des surfaces : approches locales et globales. Autre. Université de Grenoble, 2012. Français. NNT : 2012GRENA023 . tel-00777746v2

**HAL Id: tel-00777746**

**<https://theses.hal.science/tel-00777746v2>**

Submitted on 18 Jan 2013

**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.

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

### DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Génie Mécanique**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

**Gaëtan Le Goïc**

Thèse dirigée par **Serge Samper**  
et codirigée par **Fabien Formosa**

préparée au sein du **Laboratoire SYstèmes et Matériaux pour la MÉcatronique (SYMME)**  
et de l'**École Doctorale SISEO**

## Qualité géométrique & Aspect des surfaces

approches locales et globales

Thèse soutenue publiquement le **1er Octobre 2012**,  
devant le jury composé de :

**Thomas G. Mathia**

Directeur de Recherche, Ecole Centrale de Lyon, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes CNRS-UMR 5513, France, Président

**Christopher A. Brown**

Professeur des Universités, Worcester Polytechnic Institute, Surface Metrology Laboratory, Massachusetts, Etats-Unis, Rapporteur

**Maxence Bigerelle**

Professeur des Universités, Université de Valenciennes, Laboratoire TEMPO, France, Rapporteur

**Maurice Pillet**

Professeur des Universités, Polytech Annecy Chambéry, Université de Savoie, Laboratoire SYMME, France, Examineur

**Laurent Gwinner**

Expert industriel, Département Technique du comité Francéclat (CETEHOR), Besançon, France, Examineur

**Serge Samper**

Professeur des Universités, Polytech Annecy Chambéry, Université de Savoie, Laboratoire SYMME, France, Directeur de thèse

**Fabien Formosa**

Maître de Conférences, Polytech Annecy Chambéry, Université de Savoie, Laboratoire SYMME, France, Co-Directeur de thèse





## Avant-propos

Ces travaux de recherche ont été réalisés au laboratoire SYMME localisé à Annecy, dans le cadre du programme européen *Interreg4 France-Suisse* pour la période 2007-2013.

Ce programme rassemble les territoires frontaliers de l'Arc Jurassien et du Bassin Lémanique, afin d'apporter des réponses à des problématiques communes. Le projet *Aspect de surface* s'inscrit dans ce cadre, et vise à renforcer un point fort de l'activité économique des deux cotés de la frontière Franco Suisse : la réalisation de produits à forte valeur ajoutée (horlogerie, automobile, médical, domotique, etc). Ces produits exigent une qualité de surface irréprochable dont l'évaluation par l'homme entraîne une forte variabilité de jugement. Ce projet regroupe différentes entreprises industrielles, le Centre Technique du Decolletage (CTDEC) à Cluses et le département technique du comité Francéclat (CETEHOR) à Besançon, et deux laboratoires de recherche : le SYMME (Université de Savoie) et le Laboratoire de Production Microtechnique (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne). Le contexte général de ces travaux est présenté dans la figure 1.

Créé en 2006, le laboratoire **SY**stèmes et **MA**tériaux pour la **ME**catronique est l'un des quatre laboratoires de l' Ecole Polytechnique Universitaire de l'Université de Savoie. Ce laboratoire réunit les compétences de 45 enseignants chercheurs et 25 doctorants, répartis au sein de quatre groupes de compétences : le groupe Qualité des Produits et des Systèmes (QPS), le groupe Conception Instrumentation et Contrôle de Systèmes (CICS), le groupe Matériaux de Structures (MS) et le groupe Matériaux Fonctionnels (MF). Les domaines d'application du laboratoire sont l'Energie, la Production Industrielle, la Santé et les Très Grands Instruments.



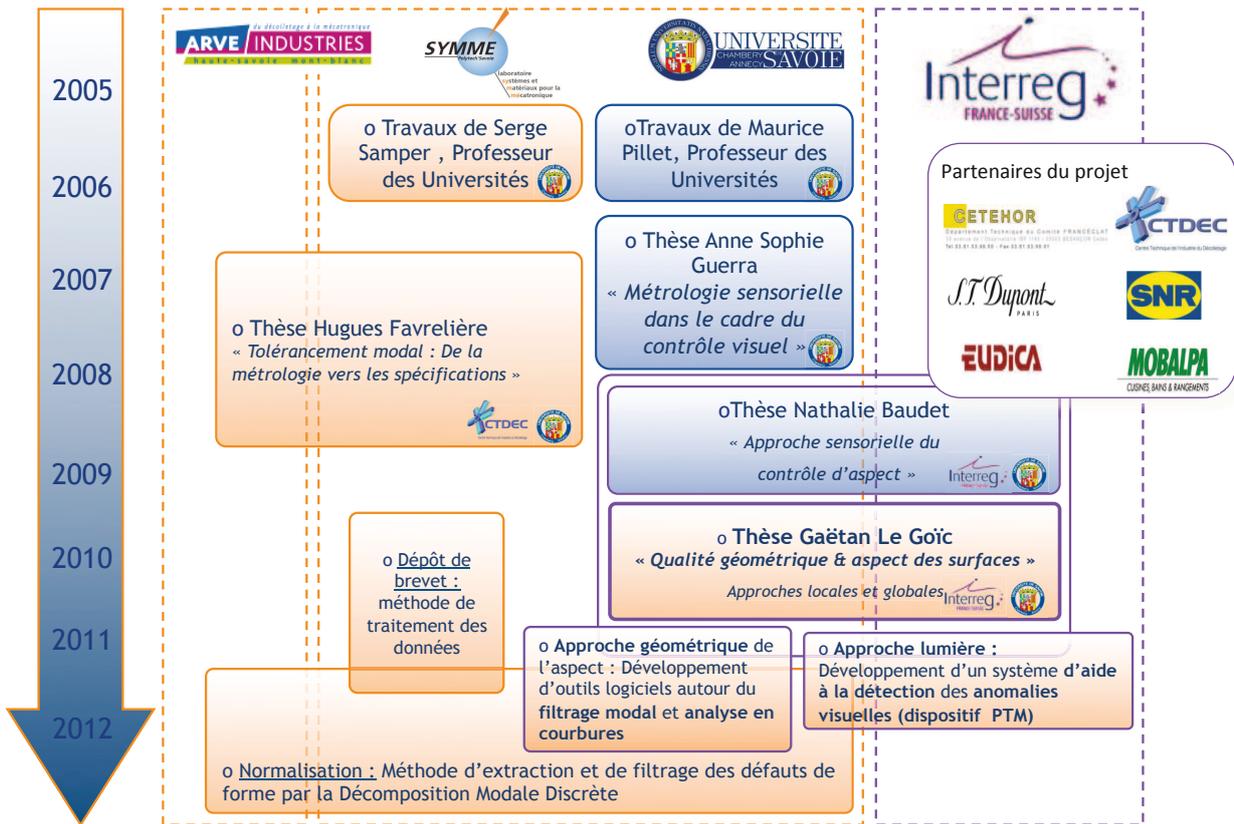


Figure 1 – Contexte des travaux



	2.2.3.c Synthèse et perspectives . . . . .	40
3	Aspect de surface & lumière . . . . .	41
	3.1 Concepts et définitions . . . . .	41
	3.1.1 Lois générales de la réflexion . . . . .	41
	3.1.2 Modèle de réflexion unifié de Nayar . . . . .	43
	3.2 Bidirectional réflectance distribution function (BRDF) . . . . .	44
4	Conclusion . . . . .	46
<b>2</b>	<b>Approche géométrique de la qualité d'aspect - De la mesure au comportement visuel des surfaces</b>	<b>47</b>
1	Introduction . . . . .	47
2	Décomposition multi-échelle des surfaces . . . . .	48
	2.1 La Décomposition Modale Discrète . . . . .	50
	2.1.1 Principe . . . . .	50
	2.1.2 Opération de décomposition . . . . .	50
	2.2 Généralisation de la méthode : de la forme à la rugosité . . . . .	51
	2.2.1 Etape E0 : Construction de la base des descripteurs . . . . .	54
	2.2.2 Etape E1 : Identification des surfaces ou des sous-surfaces fonctionnelles . . . . .	54
	2.2.3 Etape E2 : Choix du niveau modal & Discrétisation des surfaces identifiées . . . . .	54
	2.2.4 Etape E3 - Mesure : Choix du moyen, Acquisition & Exportation . . . . .	55
	2.2.5 Etape E4 - Sous-échantillonnage . . . . .	55
	2.2.6 Etape E5 - Association . . . . .	56
	2.2.7 Etape E6 - décomposition (DMD) . . . . .	56
	2.2.8 Etape E7 - Visualisation et caractérisation . . . . .	57
	2.2.9 Etape E8 - Interpolation . . . . .	58
	2.2.10 Etape E9 - Interprétation des résultats . . . . .	58
3	Application de la DMD à l'analyse de l'aspect visuel de surfaces . . . . .	58
	3.1 Principe . . . . .	58
	3.2 Cas des anomalies d'aspect <i>locales</i> . . . . .	60
	3.2.1 Echantillons . . . . .	60
	3.2.2 Mesure . . . . .	61
	3.2.3 Filtrage des points aberrants . . . . .	62
	3.2.4 Décomposition multi-échelle par la méthode modale (DMD) . . . . .	64
	3.2.4.a Opération d'association . . . . .	64
	3.2.4.b Opération de décomposition . . . . .	65
	3.2.4.c Filtrage Modal . . . . .	68
	3.2.4.d Caractérisation des composantes non périodiques : Analyse du <i>résidu</i> de la DMD . . . . .	71
	3.2.5 Interprétation des résultats de la DMD . . . . .	72
	3.2.6 Autre exemple (particulier) d'anomalie d'aspect <i>locale</i> . . . . .	73
	3.3 Cas des anomalies d'aspect <i>globales</i> . . . . .	75
	3.3.1 Echantillons . . . . .	75
	3.3.2 Mesure . . . . .	76
	3.3.3 Filtrage des points aberrants . . . . .	76
	3.3.4 Décomposition multi-échelle par la méthode modale (DMD) . . . . .	77

	3.3.5	Interprétation des résultats de la DMD . . . . .	79
	3.4	Synthèse et perspectives . . . . .	81
4		Interprétation avancée : Analyse en courbures . . . . .	82
	4.1	Introduction . . . . .	82
	4.2	Décomposition Modale Discrète & calcul de courbure . . . . .	82
	4.3	Exemples d'application de l'approche <i>courbure</i> sur des surfaces comportant des anomalies d'aspect locales . . . . .	85
	4.4	Synthèse et perspectives . . . . .	87
5		Conclusion . . . . .	88
<b>3</b>		<b>Approche <i>géométrique</i> de la qualité d'aspect - Préparation des surfaces mesurées</b>	<b>89</b>
1		Calibration d'une machine de mesure par la méthode modale . . . . .	89
	1.1	Introduction . . . . .	89
	1.2	Protocole de mesure et de calibration . . . . .	90
	1.3	Caractérisation des variations géométriques . . . . .	92
	1.3.1	Caractérisation des variations pour une surface mesurée . . . . .	92
	1.3.2	Caractérisation des variations géométriques du lot de surfaces de calibration . . . . .	93
	1.3.3	Surface de correction . . . . .	95
	1.3.4	Conclusion et perspectives . . . . .	96
2		Filtrage des points aberrants . . . . .	97
	2.1	Introduction . . . . .	97
	2.2	Historique et principe . . . . .	98
	2.3	Définition et méthodes pour identifier les points aberrants . . . . .	99
	2.3.1	Définition . . . . .	99
	2.3.2	Méthodes existantes . . . . .	99
	2.3.2.a	Critère d'identification de Peirce . . . . .	101
	2.3.2.b	Autres méthodes d'identification . . . . .	103
	2.4	Proposition d'une nouvelle méthode d'identification dédiée à la métrologie des surfaces . . . . .	103
	2.4.1	Echantillons et moyen de mesure . . . . .	103
	2.4.2	Distributions . . . . .	104
	2.4.3	Méthode proposée pour le traitement des mesures de surface . . . . .	105
	2.4.3.a	Hypothèse de normalité . . . . .	105
	2.4.3.b	Filtrage de forme . . . . .	105
	2.4.3.c	Critère d'identification et approche multi-échelle pour le traitement des PA . . . . .	107
	2.4.4	Proposition d'une méthode dédiée à la métrologie des surfaces : synthèse . . . . .	111
	2.5	Conclusion . . . . .	112
3		Préparation des mesures : Conclusion . . . . .	113
<b>4</b>		<b>Approche <i>Lumière</i> de la qualité d'aspect d'une surface</b>	<b>115</b>
1		Introduction . . . . .	115
2		La technique <i>Polynomial Texture Mapping</i> (PTM) . . . . .	116
	2.1	Historique et Principe . . . . .	117

2.1.1	Protocole d'acquisition . . . . .	118
2.1.2	Calcul des Polynomial Texture Mappings . . . . .	119
2.2	Etat de l'art et applications de la technique . . . . .	122
2.2.1	Domaines d'application . . . . .	122
2.2.2	Acquisition et visualisation des PTMs . . . . .	122
2.2.3	Transformations et simulations d'effets lumière à partir des PTMs . . . . .	123
2.3	Synthèse . . . . .	125
3	Mise en œuvre d'un dispositif d'aide à la détection lors du contrôle d'aspect des surfaces . . . . .	126
3.1	Objectif et principe général du SISD . . . . .	126
3.2	Etude du besoin . . . . .	127
3.3	Solutions techniques retenues . . . . .	128
3.4	Interface utilisateur . . . . .	130
4	Applications du SISD & résultats . . . . .	132
4.1	Aide à la détection des anomalies lors du contrôle d'aspect des surfaces . . . . .	132
4.1.1	Performances du SISD : analyse de rayures normalisées . . . . .	132
4.1.2	Applications de la méthode sur des surfaces de pièces <i>réelles</i> . . . . .	135
4.2	Autres applications et perspectives du dispositif . . . . .	138
5	Conclusion . . . . .	141
<b>5</b>	<b>Synthèse : Proposition de méthodologies globales, de la détection à la décision</b>	<b>143</b>
1	Introduction . . . . .	143
2	Proposition d'une méthodologie globale et déploiements potentiels de ces travaux . . . . .	144
2.1	Analyse de niveau 1 : déploiement <i>simple</i> de l'approche lumière . . . . .	144
2.1.1	Mise en œuvre . . . . .	145
2.1.2	Perspectives . . . . .	145
2.2	Analyse de niveau 2 : Association des approches dans une méthodologie globale <i>séquentielle</i> . . . . .	146
2.2.1	Mise en œuvre . . . . .	147
2.2.2	Lien entre les deux approches : système de reprise de référentiel . . . . .	148
2.2.3	Perspectives . . . . .	149
2.3	Proposition d'une méthodologie globale <i>intégrée</i> . . . . .	149
3	Synthèse et rôle de l'expert sensoriel . . . . .	150
	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>151</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>155</b>
	<b>Publications associées à ces travaux</b>	<b>169</b>





## Table des figures

1	Contexte des travaux . . . . .	iv
1.1	Ecart entre Qualité attendue et Qualité perçue par le client [Giordano 06] . . . . .	6
1.2	Evolution de l'intensité de la sensation en fonction du stimulus [MacLeod 09] . . . . .	7
1.3	Les 3 étapes du contrôle sensoriel [Baudet 12] . . . . .	8
1.4	Facteurs d'influence lors de l'analyse sensorielle . . . . .	9
1.5	Exemple de gamme d'exploration . . . . .	11
1.6	Chaîne de mesure - Profilométrie par palpeur mécanique, selon [Raphet 06] . . . . .	17
1.7	Ecart de position pour un élément géométrique de type plan, à partir de [Anselmetti 11] . . . . .	24
1.8	Exemples d'imperfections de surface définies par la norme ISO 8785 [ISO-8785 98] . . . . .	25
1.9	Proposition de description des 4 ordres de défauts surfaciques . . . . .	26
1.10	Ordres de défauts géométriques sur un profil . . . . .	27
1.11	Acquisition et lien entre les différents types de données surfaciques . . . . .	29
1.12	Influence de l'état de surface sur la couleur ressentie, à partir de [Elias 05] . . . . .	31
1.13	Caractérisation de l'isotropie d'une surface . . . . .	31
1.14	Lien entre <i>Amplitude</i> , <i>Extension</i> et <i>Courbure</i> d'une anomalie d'aspect, selon Surrel [Surrel 12] . . . . .	33
1.15	Définition d'une anomalie de surface, selon les attributs géométriques d'altitude, de pente et de courbure, à partir de [Legay 05a] . . . . .	34
1.16	Analyse en courbure par le système Ondulo d'une aile automobile injectée, à partir de [VISUOL 12] . . . . .	36
1.17	Forme, courbure de Gauss, et courbure moyenne d'une surface, à partir de [Roberts 01] . . . . .	38
1.18	Réflexion <i>spéculaire</i> sur une surface . . . . .	42
1.19	Réflexion <i>diffuse</i> sur une surface . . . . .	42
1.20	Diagrammes de réflexion pour différentes surfaces selon le modèle de Nayar, à partir de [Aluze 98] . . . . .	43
1.21	Modèle de réflexion unifié de Nayar, à partir de [Zamuner 11] . . . . .	44
1.22	Définition des angles $\theta_i$ , $\phi_i$ , $\theta_e$ , $\phi_e$ selon [Durou 07a] . . . . .	45
2.1	Représentation des premiers descripteurs de la base vectorielle utilisée pour la DMD	54
2.2	Association par le critère de Gauss (Moindres carrés) : $\sum d_i^2$ minimal . . . . .	56

2.3	Exemple de spectre modal des amplitudes . . . . .	57
2.4	Séparation des composantes de forme, ondulation et rugosité . . . . .	57
2.5	Mise en œuvre de la DMD pour l'analyse de la fonction <i>aspect de surface</i> . . . . .	60
2.6	Exemples d'application de la méthode pour des anomalies d'aspect <i>locales</i> . . . . .	61
2.7	Représentation des surfaces mesurées sur les 2 échantillons . . . . .	62
2.8	Etape de filtrage des points aberrants . . . . .	63
2.9	Redressement par la méthode des moindres carrés, des surfaces <i>Surf-1</i> et <i>Surf-2</i> . . . . .	64
2.10	Représentation du spectre modal des amplitudes, pour les modes [0,100] . . . . .	66
2.11	évolution des écarts quadratiques moyens (EQM) en fonction du nombre de modes de décomposition, en pourcentage de l'EQM initial . . . . .	67
2.12	Filtrage modal . . . . .	68
2.13	Analyse multi-échelle par la méthode modale, avec $N_f = 40$ , $N_w = 100$ et $N_q = 500$ . . . . .	70
2.14	Reconstruction des résidus de la DMD, pour les surfaces <i>Surf-1</i> et <i>Surf-2</i> . . . . .	71
2.15	Interprétation quantitative par seuillage à partir du résidu de la DMD ( <i>Surf-1</i> ) . . . . .	73
2.16	Reconstruction des surfaces résultats pour l'échantillon <i>Surf-3</i> . . . . .	74
2.17	Technique de sablage pour les surfaces horlogères . . . . .	76
2.18	Représentation des surfaces mesurées sur les deux échantillons . . . . .	76
2.19	Etape de filtrage des points aberrants . . . . .	77
2.20	Filtrage de forme par la méthode modale, avec $N_f = 50$ , $N_q = 50$ . . . . .	78
2.21	Extraction de profil(Ouest-Est) sur les échantillons <i>Surf-G1</i> et <i>Surf-G2</i> . . . . .	79
2.22	Analyse <i>area-scale</i> de deux lots de surfaces obtenues par sablage . . . . .	81
2.23	DMD et stratégie d'analyse en courbures . . . . .	85
2.24	Surf-1 : Composantes du tenseur de courbure . . . . .	86
2.25	Surf-1 : Principaux indicateurs scalaires de courbure . . . . .	86
2.26	Surf-1 - Courbure de Mehlum de 2 <sup>nd</sup> ordre . . . . .	87
2.27	Surf-2 - Représentation en courbures principales . . . . .	87
3.1	Système de micro-positionnement XY . . . . .	90
3.2	Représentation d'une mesure de calibration . . . . .	91
3.3	Décomposition Modale Discrète d'une mesure de plan de verre . . . . .	92
3.4	Spectre modal des amplitudes pour le lot de mesures de calibration . . . . .	93
3.5	Estimation des variations de chaque composante de la DMD, pour le lot de surfaces mesurées . . . . .	94
3.6	Spectre modal <i>moyen</i> des amplitudes pour le lot de mesures de calibration . . . . .	95
3.7	Correction d'un système de micro-positionnement XY par l'approche modale . . . . .	95
3.8	Flow chart - détection et traitement des PA, selon la norme ISO-16269-4 . . . . .	100
3.9	échantillon <i>Surf-4</i> - Représentation 3D de la mesure d'un étalon de planéité . . . . .	104
3.10	échantillon <i>Surf-5</i> - Représentation 3D d'une mesure de la carre d'un ski . . . . .	104
3.11	Test de normalité sur les surfaces mesurées . . . . .	105
3.12	Filtrage de forme par l'approche modale . . . . .	106
3.13	Spectre modal des amplitudes . . . . .	106
3.14	Test de normalité après filtrage des composantes de forme par la méthode modale . . . . .	107
3.15	Evolution du pourcentage de points modifiés à chaque diminution de la taille de la fenêtre d'analyse . . . . .	109
3.16	Séries de profils issus de l'échantillon <i>Surf-4</i> . . . . .	110
3.17	Séries de profils issus de l'échantillon <i>Surf-5</i> . . . . .	111
3.18	Proposition d'un méthode de traitement des PA dédiée à la métrologie des surfaces . . . . .	112

4.1	Définition des angles $\theta_i, \phi_i, \theta_e, \phi_e$ selon [Durou 07a] . . . . .	118
4.2	Définition des positions des sources lumineuses sur les sommets d'un isocaèdre, selon [Malzbender 01c] . . . . .	119
4.3	Niveaux de gris d'un pixel en fonction de la position de la source lumineuse . . . . .	120
4.4	surface réflectance approximée par un polynôme de degré 2 . . . . .	120
4.5	Rendus visuels sous différents éclairages, obtenus par la technique PTM . . . . .	121
4.6	Polynomial Texture Mappings au <i>Worcester Art Museum</i> (Massachusetts, Etats-Unis) . . . . .	122
4.7	Acquisitions de PTMs sur des surfaces de dimensions importantes . . . . .	123
4.8	Transformation de la surface réflectance : simulation du rendu d'une surface spéculaire réalisé sur une tablette archéologique, selon [Malzbender 00a] . . . . .	124
4.9	Transformation de la surface réflectance : mise en évidence des détails d'une surface par la technique du masque flou, selon [Palma 10] . . . . .	125
4.10	Principe de fonctionnement du dispositif PTM . . . . .	127
4.11	Diagramme pieuvre . . . . .	127
4.12	Dispositif d'aide à la détection des anomalies développé et réalisé au laboratoire <i>Symme</i> (SISD) . . . . .	130
4.13	Interface utilisateur du SISD . . . . .	131
4.14	Rayure normalisée sur une surface métallique, réalisée avec un effort normal de $6600 \mu N$ (mesure AFM), à partir de [Puntous 12] . . . . .	132
4.15	Visibilité en fonction des caractéristiques géométriques des rayures normalisées, à partir de [Puntous 12] . . . . .	133
4.16	Echantillon R1 - Reconstruction PTM du rendu visuel de la surface sous différents éclairages . . . . .	134
4.17	Echantillon R2 - Reconstruction PTM du rendu visuel de la surface sous différents éclairages . . . . .	134
4.18	Echantillon R3 - Reconstruction PTM du rendu visuel de la surface sous différents éclairages . . . . .	135
4.19	Aide à la détection des anomalies d'aspect par une approche PTM, sur des surfaces de produits à haute valeur ajoutée . . . . .	137
4.20	Reconstruction du champ de normales d'une surface à partir des PTMs . . . . .	139
4.21	Reconstruction des topographies à partir des PTMs . . . . .	140
4.22	Méthodes d'approximation des surfaces de réflectance en chaque pixel . . . . .	140
5.1	Cycle 1 : déploiement <i>simple</i> de l'approche lumière . . . . .	145
5.2	SISD : Automatisation du chemin d'éclairage . . . . .	146
5.3	Cycle 2 : proposition d'une méthodologie globale <i>séquentielle</i> pour l'analyse de la qualité d'aspect . . . . .	147
5.4	Montage de positionnement de Boys, à partir de [Bui 11] . . . . .	148
5.5	Système de positionnement intégré au SISD . . . . .	148
5.6	Cycle 3 : perspective de méthodologie globale <i>intégrée</i> pour l'analyse de la qualité d'aspect . . . . .	149
5.7	Proposition d'une méthodologie globale : 3 cycles d'utilisations . . . . .	150



## Liste des tableaux

1.1	Les 3 effets lumière . . . . .	12
1.2	Attributs et niveaux pour une anomalie de type marque sur un briquet . . . . .	13
1.3	Exemple de grille de décision pour l'inspection visuelle de briquets . . . . .	14
1.4	Classification des principaux moyens de mesure mécaniques de topographie de surface	18
1.5	Classification des principaux moyens de mesure optiques de topographie de surface .	20
1.6	Exemples d'indicateurs d'état de surface - Méthode du profil . . . . .	28
1.7	Forme locale et Indice de forme, selon [Zhao 10] . . . . .	40
2.1	Classification des principaux paramétrages de surface, selon [Favrelière 09] . . . . .	49
2.2	Etapas de la décomposition Modale discrète généralisée . . . . .	53
2.3	Principaux paramètres de mesure, pour les surfaces Surf-1 et Surf-2 . . . . .	62
2.4	Association d'un plan par le critère des moindres carrés . . . . .	65
2.5	Principaux paramètres de mesure, pour les surfaces <i>Surf-G1</i> et <i>Surf-G2</i> . . . . .	76
2.6	Indicateurs d'états de surface . . . . .	80
2.7	Descripteurs de la base de courbure, calculés à partir de la base modale, pour les modes 5, 10, 20, 50 et 100 . . . . .	84
4.1	Fonctions principales et fonctions de contraintes . . . . .	128
4.2	Solutions techniques retenues pour le dispositif d'acquisition des PTMs . . . . .	129
4.3	Échantillons d'application R1, R2 et R3 . . . . .	133



# Introduction

*Lorsque l'on ne sait pas vers où on navigue, aucun vent  
n'est le bon*

[ SENEQUE ]

4 av. J-C – 65 ap J-C

## Préambule

Parmi tous les leviers à disposition des entreprises pour ajouter de la valeur aux produits, la prise en compte de la perception par les clients est aujourd'hui centrale, dès la conception des produits. En effet, afin de répondre au plus près aux attentes du client, les entreprises ayant atteint une maturité industrielle sur les aspects techniques et fonctionnels se différencient par leur maîtrise de la perception et du ressenti de leurs produits. Autrefois limitée aux domaines liés à la communication, la prise en compte de l'*esthétique* des produits se généralise ainsi à l'ensemble des activités de l'entreprise, et particulièrement à la conception des produits et à la production.

Le consommateur est aujourd'hui mieux informé et plus attentif à ce qu'il perçoit de la qualité d'un produit. Cette perception est basée sur deux axes, le rationnel et l'émotionnel. Le rationnel est basé sur une opinion centrée sur la logique, souvent influencée par le contexte culturel de l'individu. Il se traduit souvent en terme de perception de l'utilité d'un produit. L'émotionnel se traduit par des notions de beauté, de désir ou inversement d'aversion vis à vis d'un produit. L'influence de la culture est alors plus implicite. Le consommateur établit à partir de ces deux axes une *valeur d'estime* des produits, qui impacte fortement les résultats de l'entreprise.

Dans le cadre industriel, la maîtrise de la perception des produits s'inscrit dans une démarche qualité déployée dès la conception des produits, puis lors du développement, de la fabrication et de la mise sur le marché des produits. Lors de la conception, cette approche se traduit par exemple

par la mise en œuvre de techniques de type *design sensoriel*. Durant la fabrication des produits, la qualité perçue est souvent évaluée par des techniques d'analyse sensorielle, basée sur l'évaluation par des experts de la qualité perçue des produits. Lors de la mise sur le marché, les produits sont par exemple mis en valeur par des techniques de communication (packaging, publicité, etc.).

La mise en œuvre de ces approches nécessite d'appréhender le processus de la perception. De façon générale, et particulièrement pour le processus de la perception, les propriétés des produits et leur comportement dépendent souvent davantage de leurs surfaces que de leurs propriétés massiques ou volumiques. Les surfaces limitent le produit, le sépare du milieu environnant, et assurent ainsi de nombreuses fonctions du produit. Ces fonctions traduisent des interactions entre la surface et ce qui l'entoure. Il peut s'agir par exemple de frottement (interaction de la surface avec un corps solide ou un fluide), d'étanchéité, ou encore de mouillabilité. On parle alors de fonctions *techniques*. Plus généralement, les surfaces interagissent avec leur environnement lumineux, la fonction assurée est alors l'apparence, ou l'*aspect* de la surface.

La maîtrise de la perception des produits est aujourd'hui un enjeu industriel majeur pour l'industrie, qui nécessite de connaître les propriétés des surfaces des produits, et les interactions avec leurs environnements lumineux. L'objet de ces travaux est d'apporter une contribution à ces deux axes de recherche, à travers une approche *géométrique* puis une approche *lumière* de la qualité d'aspect des surfaces. nous montrons comment ces approches peuvent être intégrées au contrôle de la qualité d'aspect industriel, pour aider à mieux détecter les anomalies d'aspect et mieux évaluer l'apparence des surfaces.

## L'objet des travaux

L'objectif général de ces travaux est d'apporter une contribution à la problématique de l'analyse de l'aspect des surfaces, à partir de paramètres liés à la géométrie des surfaces, et à travers d'une modélisation de l'interaction surface/lumière, par des approches locales et globales.

Le chapitre 1 présente un état de l'art des différentes approches de l'analyse de l'aspect des surfaces. Nous décrivons dans une première partie le moyen actuellement le plus répandu dans l'industrie de répondre aux problématiques liées à la qualité d'aspect des surfaces : le contrôle sensoriel (humain). De façon générale, l'humain interprète en permanence l'information visuelle pour se situer et interagir avec son environnement. Cette interprétation se manifeste par des processus d'enregistrement (*reconnaissance de forme*) et de reconstruction des éléments de l'environnement. Dans le cadre industriel, la faculté de l'humain à analyser une surface que ce soit de façon globale ou locale a permis la mise en œuvre du contrôle de la qualité d'aspect des surfaces, particulièrement pour les produits à haute valeur ajoutée. C'est le processus d'*analyse sensorielle*. Le développement de méthodologies et leurs formalisations, à la manière de ce qui a été mis réalisé en contrôle dimensionnel, permet de réduire sensiblement la variabilité inhérente au contrôle par l'humain : on parle alors de *métrologie sensorielle*. Aujourd'hui, l'analyse de la qualité d'aspect des surfaces est très souvent réalisée dans les entreprises par contrôle sensoriel humain (visuo-tactile), mis à part pour certaines applications spécifiques (par exemple dans les domaines automobile ou l'aéronautique) ou des systèmes automatiques ont pu être mis en œuvre. Cependant, la référence (équivalent de l'étalon en métrologie dimensionnelle) reste aujourd'hui l'expert sensoriel. L'explication vient de l'apparition récente et partielle en terme d'applications des systèmes de contrôle visuel automatiques, mais aussi du fait que les experts sont souvent les seuls garants des connaissances et du patrimoine des entreprises

dans le domaine de l'analyse de la qualité d'aspect.

Les travaux développés dans les chapitres suivants se situent ainsi dans le cadre d'une recherche d'une solution semi-automatique du contrôle d'aspect, où l'expert reste au centre du processus. L'objectif final est de proposer des solutions d'aide aux experts durant les 3 étapes du contrôle visuel (Détection/Evaluation/Décision), basées sur des critères objectifs intrinsèques aux surfaces. Ce type de support permettrait de réduire la variabilité du contrôle sensoriel tout en intégrant le patrimoine humain de l'entreprise en terme d'analyse de l'aspect des surfaces.

La première approche que nous proposons est *géométrique*. Le constat initial est qu'il est aujourd'hui possible de disposer aisément et rapidement d'une information précise sur la géométrie des surfaces. Cette réalité actuelle a été rendue possible par le récent développement des moyens de mesure en terme de nombre d'observations, d'étendue et de temps de mesure. Cette évolution des technologies permet aujourd'hui d'envisager une approche géométrique de la qualité d'aspect des surfaces.

Après avoir présenté un état de l'art du lien entre géométrie et aspect de surface (seconde partie du chapitre 1), nous développons dans le chapitre 2 nos travaux basés sur le paramétrage modal des variations géométriques d'une surface. Après avoir indiqué les apports amenés à cette méthode afin qu'elle soit applicable dans le cadre de ces travaux, nous montrons qu'elle permet de réaliser une analyse multi-échelle des surfaces, et d'isoler les composantes liées aux anomalies d'aspect, ce qui facilite quantitativement leur détection et leur évaluation. Nous montrons ensuite comment extraire de ces informations les indicateurs de courbure, afin de procéder à une évaluation plus qualitative, en lien avec l'impact visuel des anomalies.

Ces travaux sur l'approche géométrique mettent en évidence l'importance de disposer d'une information source (issue de la mesure des surfaces) de bonne qualité. A ce sujet, deux points doivent être particulièrement considérés dans le cadre de l'analyse de l'aspect pour l'interprétation des données géométriques mesurées. Il s'agit de :

- La présence potentielle sur les surfaces de variations géométriques générées par le moyen de mesure
- La présence potentielle de points aberrants (parfois assez nombreux), résultant notamment des techniques de mesures optiques sans contact utilisées dans ces travaux

L'objet du chapitre 3 est de proposer des méthodes permettant de répondre efficacement à ces deux problématiques en conditionnant les données mesurées avant l'application des méthodes d'analyse du(des) lien(s) entre géométrie des surfaces et comportement visuel.

La seconde approche de l'analyse de l'aspect des surfaces est développée dans le chapitre 4, et est basée sur l'analyse et la modélisation de l'interaction des surfaces avec leur environnement lumineux. L'objectif est de compléter les travaux liés à l'approche géométrique, et particulièrement de proposer une réponse aux difficultés de mise en œuvre de l'approche géométrique pour l'inspection des surfaces, souvent trop coûteuse en temps d'acquisition et de traitement des données pour des surfaces étendues. Un outil spécifique à la problématique de détection des anomalies est présenté, basé sur la technique *Polynomial Texture Mappings*. Nous décrivons l'intégration de cette technique au cadre spécifique de l'analyse de la qualité d'aspect des surfaces dans le contexte industriel des produits à haute valeur ajoutée, à travers la conception et la réalisation d'un dispositif d'aide à la détection des anomalies, puis nous présentons les résultats obtenus avec ce dispositif.

Enfin, nous proposons dans le chapitre 5 d'intégrer les approches *géométrique* et *lumière* présentées précédemment, à travers une méthodologie *globale* de l'analyse de la qualité d'aspect des surfaces. Cette méthodologie présente différentes options de déploiement industriel de ces travaux, afin d'apporter un support aux experts lors des différentes étapes du contrôle de la qualité d'aspect des surfaces.

## Comment décrire l'aspect d'une surface ?

### Objectif du chapitre

*L'objectif est de présenter au lecteur un ensemble d'outils et de méthodes permettant de décrire l'aspect d'une surface. Tout d'abord, nous détaillons un des outils aujourd'hui les plus utilisés dans l'industrie, et qui sert souvent de référence : l'analyse sensorielle. Pour apporter une aide au contrôle humain, et diminuer sa variabilité, il est nécessaire de faire en sorte de se référer à des critères objectifs. Nous montrons que ceux-ci peuvent être liés soit à la géométrie, soit à l'interaction de la lumière avec la surface.*

## 1 L'évaluation sensorielle des surfaces

### 1.1 Qualité perçue & qualité attendue : relation client/fournisseur

Dans l'industrie des produits à haute valeur ajoutée, l'aspect d'un matériau ou d'un produit fini, et sa perception par le consommateur est un élément essentiel.

Dès la conception/création du produit, on cherche à maîtriser sa perception finale par le client, en incluant par exemple des spécifications au Cahier des Charges relatives à la qualité d'aspect ou à la notion d'*esthétique*. On parle de *design sensoriel* [Bassereau 09]. Une des méthodes les plus connues et utilisées pour répondre à cette problématique, i.e. prendre en compte les émotions et l'affectivité des consommateurs par rapport au produit dès sa conception, est l'*ingénierie Kansei* [Levy 10]. De façon générale, l'objectif de ces méthodes (design sensoriel, kansei, analyse sensorielle) est de minimiser l'écart entre la qualité attendue [Gotlieb 94] et la qualité perçue par le client [Balin 07]. En effet, plus l'entreprise réussira à réduire cet écart, plus la satisfaction des clients sera grande [Lewis 93]. La figure 1.1 présente une représentation de cet écart [Giordano 06].

Au cours et/ou en fin du cycle de fabrication du produit, la qualité d'aspect d'une surface est très souvent décrite et évaluée par un contrôle humain, et même lorsque des analyses instrumentales sont effectuées, l'humain reste souvent la référence pour qualifier l'aspect d'une surface, et décider de son acceptabilité ou non. L'avantage de l'évaluation par l'humain est principalement sa grande flexibilité vis à vis du type de pièces et d'anomalies d'aspect, et lorsqu'il est entraîné sa

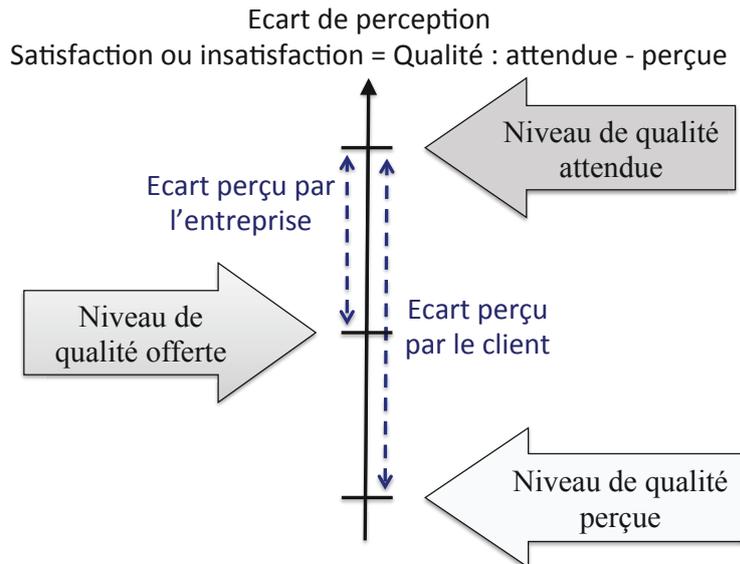


Figure 1.1 – Ecart entre Qualité attendue et Qualité perçue par le client [Giordano 06]

capacité à percevoir rapidement des anomalies de petite taille relativement à la surface inspectée. L'inconvénient principal est la variabilité au cours du temps (facteurs liés à la fatigue et à la motivation) et entre différents opérateurs des résultats obtenus lors de la détection et de l'évaluation des anomalies d'aspect. Cette variabilité se traduit par une non-détection de certaines anomalies d'aspect mais aussi inversement par une sur-qualité coûteuse pour l'entreprise. Nous présentons dans cette partie les concepts principaux du contrôle sensoriel, puis les méthodes actuelles de formalisation de ce processus, mises en place afin de minimiser la variabilité des résultats de l'analyse sensorielle des surfaces.

## 1.2 L'analyse sensorielle

L'analyse sensorielle consiste à percevoir de façon consciente une information à partir d'un ou plusieurs systèmes sensoriels. Dans le cadre de l'analyse des surfaces à haute valeur ajoutée, les systèmes sensoriels principalement utilisés sont la vue [Corbé 04] et plus rarement le toucher. L'information perçue est essentiellement une représentation de la topographie de la surface. Le traitement le plus immédiat de cette information consiste à *identifier* l'objet (ou la surface). De manière fondamentale, cette identification est réalisée par comparaison avec une forme préalablement mémorisée, on parle alors de *reconnaissance*. Une forme plus élaborée de l'interprétation de l'information perçue est de *décrire* la surface par un ensemble de mots (description simple), ou par un ensemble de mots pondérés par des valeurs numériques. On parle alors de description quantifiée [Mac Leod 09]. La norme française ISO 11035 définit ces mots, appelés *descripteurs*, comme étant les termes renvoyant le sujet à un élément de la perception du produit. Les valeurs numériques associées aux descripteurs permettent d'exprimer l'intensité de leur perception.

▮ *Descripteurs* : termes renvoyant le sujet à un élément de la perception du produit  
[ISO-11035 94]

Sauvageot [Mac Leod 09] propose une courbe type de l'intensité de la perception en fonction du stimulus (Figure 1.2). Il définit ainsi quatre domaines de perception :

- la zone *infraliminaires* : la sensation est confuse, noyée dans le bruit.
- la zone *liminaire* : la sensation est perçue, mais de façon aléatoire.
- la zone *supraliminaires* : la sensation est perçue de façon nette, avec une intensité variable.

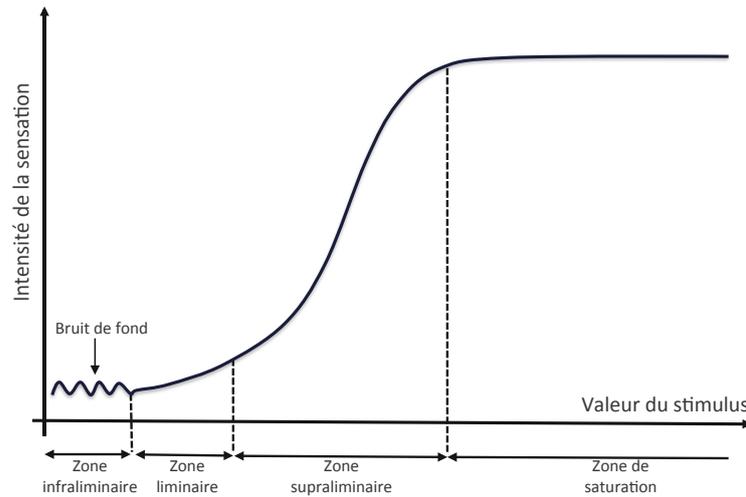


Figure 1.2 – Evolution de l'intensité de la sensation en fonction du stimulus [Mac Leod 09]

- la zone de *saturation* : la sensation est perçue de façon nette, avec une intensité forte, qui n'augmente plus quand on augmente le stimulus.

Dans le cadre industriel de l'analyse sensorielle des surfaces, l'enjeu principal est d'améliorer la perception dans la zone liminaire et de diminuer la variabilité dans le jugement de l'intensité dans la zone supraliminaire. On rejoint deux problématiques principales de l'analyse de l'aspect d'une surface : mieux détecter (zone liminaire), et mieux évaluer, i.e évaluer de façon reproductible (zone supraliminaire) l'intensité de ce que l'on perçoit. De nombreuses méthodologies ont été développées en ce sens afin de formaliser le processus d'analyse sensorielle et l'interprétation des résultats obtenus. On parle alors de *métrologie sensorielle*.

### 1.3 La métrologie sensorielle

Pour [Estler 99], le résultat d'une mesure est *une distribution de probabilité qui fournit un codage sans ambiguïté d'un état de connaissance sur la quantité mesurée*. Il définit ainsi la métrologie comme étant une interprétation statistique des données issues de la mesure. La métrologie sensorielle est donc l'interprétation des données obtenues par l'analyse sensorielle, qui constitue l'étape de mesure dans l'évaluation humaine des surfaces. La métrologie nécessite de mesurer une *grandeur*, en se rapportant à une référence appelée *unité de mesure*. La représentation physique d'une valeur déterminée de cette grandeur de référence est appelée *étalon* [Courtier 03]. La formalisation des méthodes du contrôle sensoriel vise ainsi notamment à améliorer la *fidélité* du moyen de mesure (l'humain), et particulièrement sa *reproductibilité* (mesures faites dans des conditions variables : environnement, moment de l'expérience, différents opérateurs). De façon plus générale, il s'agit de minimiser la variabilité au cours de l'ensemble du processus d'analyse sensorielle.

#### 1.3.1 Les trois étapes de la métrologie sensorielle

En 1964, Colquhoun [Colquhoun 64] décompose pour la première fois trois sous-étapes du processus d'inspection sensorielle. Il s'agit de la détection, du jugement, et de la décision. Les étapes de jugement et de décision telles que définies par Colquhoun étant assez proches, Drury [Drury 75, Drury 92] puis Rebsamen [Rebsamen 10] utilisent un modèle constitué uniquement des étapes de détection et d'évaluation. Baudet et al. [Baudet 11] montrent que ce modèle est spécialement adapté pour le contrôle visuel avec un objectif fonctionnel non esthétique (l'écart

visuel est relié à une altération d'une fonction du produit), où les tolérances d'acceptabilité sont clairement définies. Dans le cas où l'objectif est d'évaluer la fonction esthétique du produit, ces zones de tolérances sont difficiles à établir. Baudet [Baudet 12] propose dans ce cas de décomposer le processus de métrologie sensorielle en trois étapes :

- (i) *L'exploration* : Localiser et caractériser une anomalie sur la surface. Ainsi, il s'agit dans un premier temps de détecter un écart, défini par rapport à une référence et/ou par rapport à l'intention du concepteur. L'écart détecté est alors appelé anomalie, elle peut être acceptable ou non. Dans un second temps, il s'agit de caractériser l'anomalie. Baudet [Baudet 11] propose par exemple de différencier les anomalies évolutives (ex : point de corrosion) et non-évolutives, puis de déterminer leur typologie : il pourra s'agir d'une marque, d'une hétérogénéité, d'une pollution, ou d'une déformation.
- (ii) *L'évaluation* : Evaluer l'intensité de la perception d'une anomalie pour chaque descripteur choisi. L'évaluation est d'abord factuelle (ex : taille, forme) puis elle est mise en perspective par rapport à l'environnement de l'anomalie (ex : contraste, localisation sur la surface).
- (iii) *La Décision* : Accepter ou refuser la pièce. A partir des descripteurs et des niveaux d'intensité associés, l'opérateur attribue une intensité finale à la qualité d'aspect de la surface. Cette intensité peut être calculée par une somme ou une moyenne des intensités associées à chaque descripteur [Guerra 09]. Baudet [Baudet 11] propose de s'appuyer sur un support d'aide à la décision plus élaboré, afin de prendre en compte l'effort de détection. Ce support est appelé *grille hiérarchique corrigée*.

La figure 1.3 détaille les 3 étapes du modèle préconisé pour le contrôle esthétique des produits [Baudet 12].

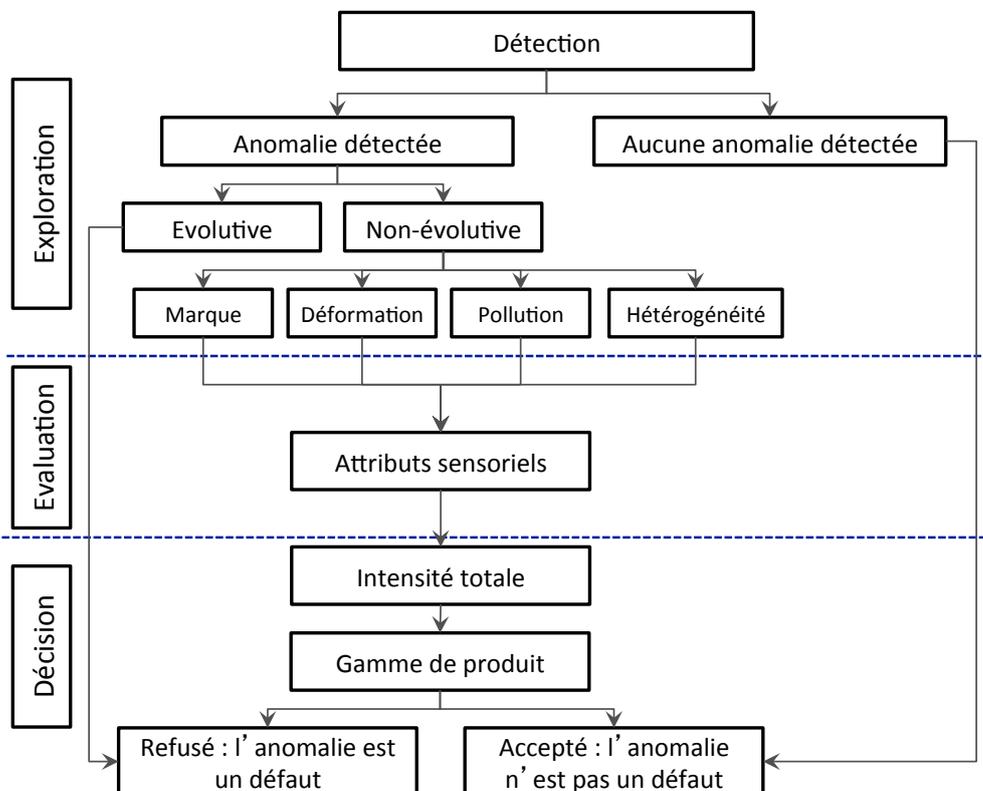


Figure 1.3 – Les 3 étapes du contrôle sensoriel [Baudet 12]

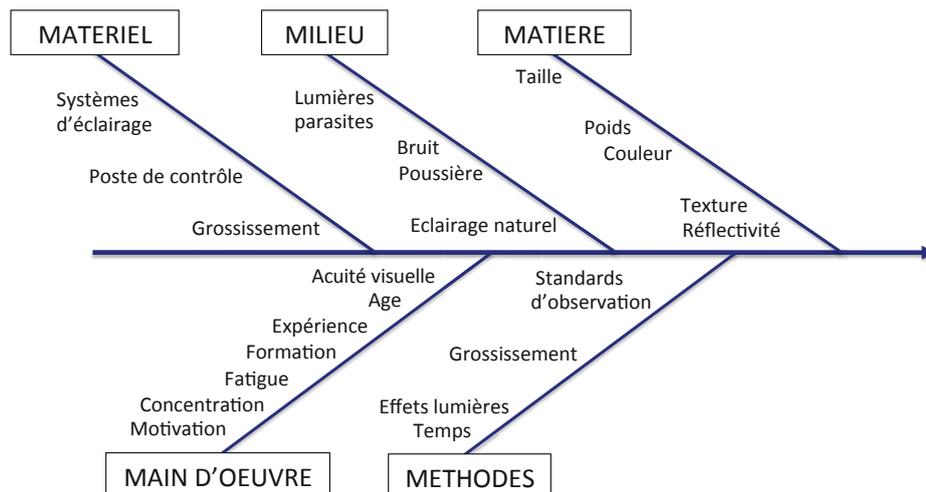


Figure 1.4 – Facteurs d'influence lors de l'analyse sensorielle

### 1.3.2 L'environnement visuel

De nombreux facteurs, principalement liés à l'environnement lors de l'étape d'exploration des surfaces, impactent le processus de métrologie sensorielle. Debrosse et al. [Debrosse 10] proposent un classement de ces différents facteurs à partir de l'analyse 5M (Figure 1.4). Cette classification met en évidence le nombre important et la variété des facteurs pouvant affecter les résultats d'une analyse sensorielle. Megaw [Megaw 79] propose une étude de ces facteurs dans le cas spécifique de l'inspection visuelle. De plus, le référentiel de bonnes pratiques AFNOR X10-042 [X10-042 06] pour la caractérisation sensorielle des matériaux synthétise les différents facteurs influents et les préconisations pour l'inspection visuelle dans le cadre industriel. Nous détaillons ci-dessous certains des facteurs pouvant affecter l'inspection visuelle d'une surface :

- (i) *L'acuité visuelle* (main d'oeuvre) : de façon évidente, on devrait toujours s'assurer qu'un opérateur amené à faire du contrôle visuel ait une bonne acuité visuelle. Cette condition n'est cependant pas suffisante [Gallwey 82]. Megaw [Megaw 79] montre que l'acuité visuelle statique n'est pas le seul paramètre à prendre en compte. Par exemple, l'acuité visuelle dynamique, qui fait notamment appel à la vision périphérique de l'opérateur, est aussi un paramètre essentiel pour le contrôle de la qualité d'aspect des surfaces [Nelson 69].
- (ii) *Les conditions d'éclairage* (milieu/méthodes) : Ferguson [Ferguson 74] a montré que les conditions d'éclairage influent fortement sur la fatigue visuelle de l'opérateur. Dans la pratique, cette considération peut se traduire par exemple par la mise en place d'un éclairage muni d'un système préservant l'opérateur de la lumière directe. Les conditions d'éclairage influent aussi directement sur la performance du contrôle visuel. Blackwell [Blackwell 59] montre par exemple l'intérêt d'utiliser un éclairage puissant pour augmenter le contraste sur la surface à inspecter. De nombreux autres auteurs détaillent les différentes techniques d'éclairage pour le contrôle visuel [Busin 12, Seulin 00, Aluze 98], et mettent notamment en évidence l'intérêt de l'utilisation de différents éclairages lors d'une inspection visuelle. Guerra et al. [Guerra 09] montrent l'intérêt d'éclairer la surface sous certains angles d'incidence, qui représentent des configurations particulières des lois de Descartes (voir section 3.1.1). L'utilisation d'une cabine de contrôle peut aussi permettre de mieux maîtriser les conditions liées à l'éclairage, en parti-

culier le type de lumière, le fond d'observation, ou encore la position des sources lumineuses.

- (iii) *Le temps d'inspection* (moyen) : le temps alloué au contrôle sensoriel industriel d'une surface est une contrainte importante. Drury et Addison [Drury 73] évaluent la relation entre le temps d'inspection et la performance du contrôle visuel. Ils proposent ainsi de choisir le temps d'inspection optimal par une approche coûts (équation 1.1) :

$$C_T = N \cdot P_g \cdot P_1 \cdot C_1 + N \cdot (1 - P_g) \cdot P_2 \cdot C_2 + C_3 \quad (1.1)$$

$C_T$ :	Coût total/heure
$N$ :	Nombre de pièces inspectées/heure
$P_g$ :	Probabilité d'avoir des pièces acceptables
$P_1$ :	Probabilité de fausse alarme
$P_2$ :	Probabilité de non détection
$C_1$ :	Coût de sur-qualité
$C_2$ :	Coût d'acceptation de pièces défectueuses
$C_3$ :	Coût travail/heure

- (iv) *L'entraînement et le feed-back* (méthodes) : Wang, Lin et Drury [Wang 97] ont montré que le contrôle visuel peut être rendu plus reproductible en entraînant les opérateurs. La définition d'une stratégie d'exploration [Nickles 03] peut aussi permettre, après avoir défini des priorités de détection (par exemple en fonction de la typologie des anomalies ou en définissant des *zones critiques*) d'améliorer la performance du contrôle visuel. Dans la même direction, Gramopadhye et al. [Gramopadhye 97, Gramopadhye 12] ont montré que la mise en place d'un *feedback* dans le processus de contrôle visuel permettait aussi de le rendre plus reproductible.

## 1.4 Exemple de mise en œuvre dans l'entreprise

L'analyse sensorielle a été mise en œuvre initialement dans le cadre de l'industrie agro-alimentaire [Costell 02] [Sauvageot 82, Depledt 02, Sauvageot 06] [Coulon 12], puis s'est ensuite généralisée dans de nombreuses industries [Faye 04] [Rebsamen 10]. Dans le domaine automobile, Legay [Legay 05b, Legay 05a] étudie par exemple la corrélation des résultats issus de l'analyse sensorielle avec ceux obtenus par une méthode de quantification optique. Dans ce même domaine, Crochemore et al. [Crochemore 04a] montrent comment procéder à une analyse sensorielle sur les composants d'habitacles de voitures, et plus généralement pour les produits en matériaux plastiques [Crochemore 04b]. Nous détaillons dans cette partie un exemple de mise en œuvre d'une analyse sensorielle, visuo-tactile dans l'industrie des produits à haute valeur ajoutée.

### 1.4.1 Etape d'exploration

Comme précisé dans la section 1.3.1, cette étape consiste à détecter les anomalies, et à les caractériser. La stratégie pour l'exploration peut être soit *aléatoire*, soit *systématique* : on demande alors aux opérateurs de suivre un protocole de contrôle, adapté aux spécificités du composant que l'on inspecte. Par exemple, on peut définir un parcours des yeux, ou encore un type d'anomalie d'aspect à détecter en priorité. Ces spécifications sont généralement définies à partir d'une connaissance des anomalies générées par le moyen de production, ou par une analyse statistique du type

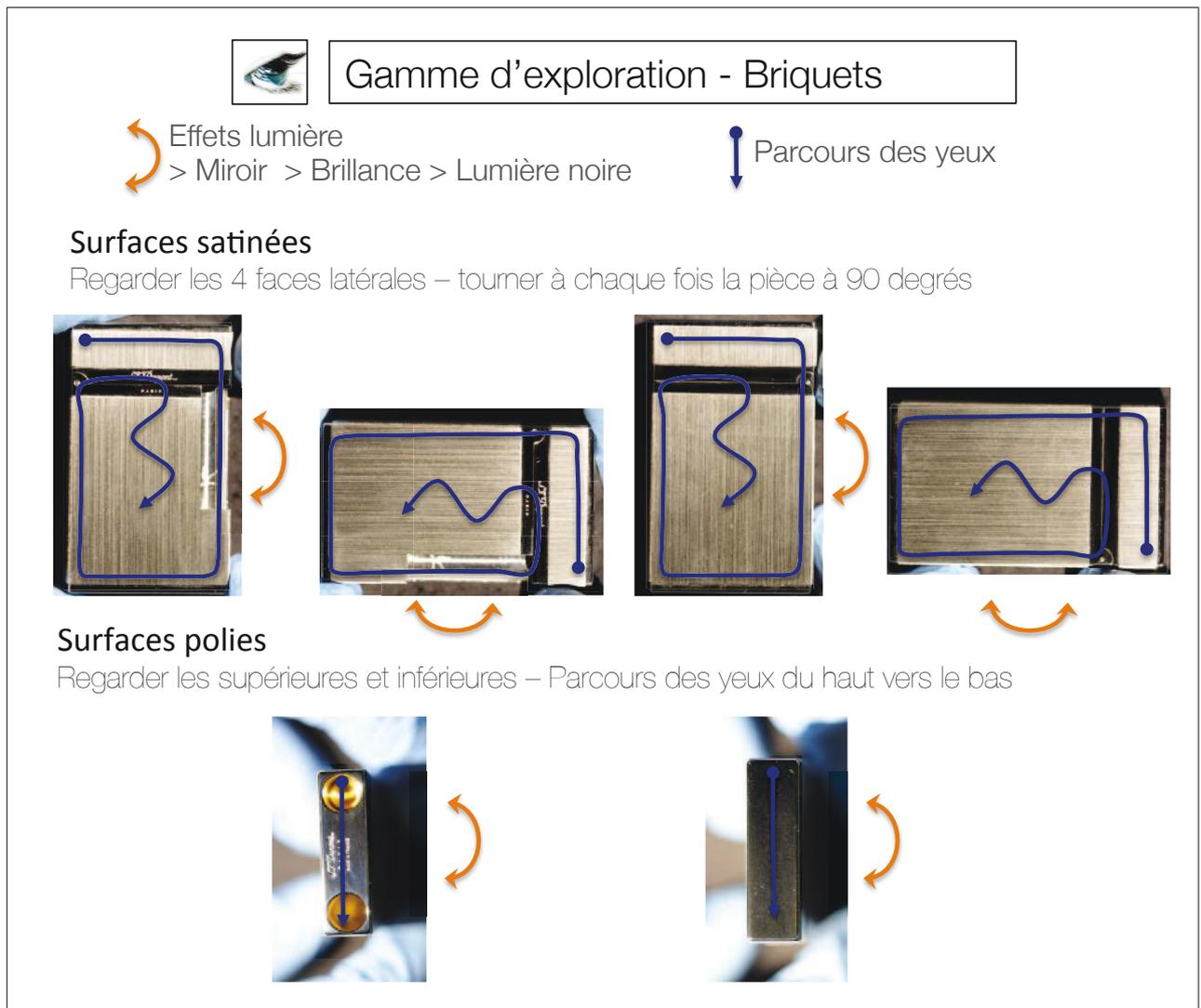
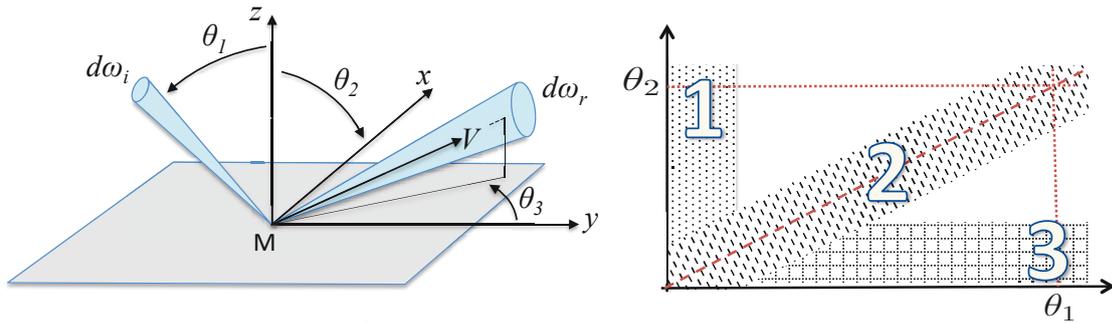


Figure 1.5 – Exemple de gamme d'exploration

et de la localisation des anomalies présentes sur les pièces au moment de l'inspection. La figure 1.5 montre un exemple possible de gamme de contrôle pour un produit de la société *ST Dupont*, partenaire du projet *Interreg4 - Aspect de surface*. Pour chaque face, le parcours des yeux est défini et l'opérateur doit mettre en position la pièce dans trois configurations spéciales. Ces configurations sont définies par la position et l'orientation de l'éclairage, la position et l'orientation de l'observateur, et enfin la position et l'orientation du produit. On parle de *scène d'observation*. Ces configurations particulières sont appelées *effets lumière* et correspondent à des cas particuliers des lois de Snell-Descartes sur la réflexion de la lumière.

Le tableau 1.1 illustre ces différentes configurations et présente les rendus visuels correspondants pour deux des faces du briquet inspecté. Ces configurations mettent en évidence le fait que certaines anomalies n'apparaissent que dans un cône de vision limité. Les positions correspondantes aux effets lumière permettent souvent de mettre en valeur les irrégularités visuelles des surfaces. De plus, la recherche par l'opérateur de ces configurations particulières conduit à parcourir une large gamme de scènes d'observation, et facilite ainsi la détection.



$\theta_1$  : Angle d'incidence de la source lumineuse

$\theta_2$  : Angle d'observation

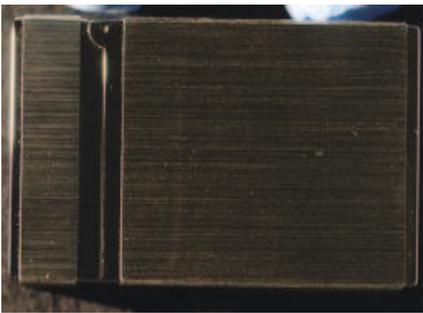
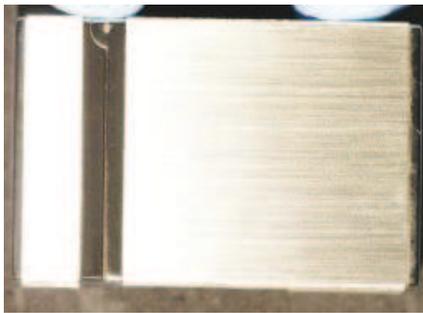
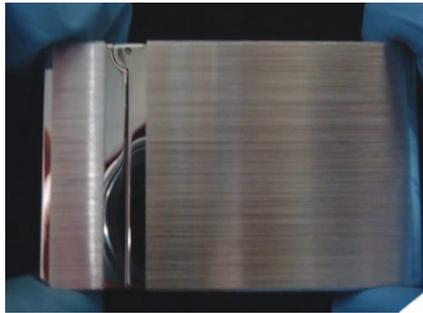
1-Effet <i>lumière noire</i>	2-Effet <i>brillance</i>	3-Effet <i>miroir</i>
<p>L'observateur regarde la surface verticalement, et l'éclairage est rasant, ce qui donne à la surface un aspect globalement noir, et fait ressortir certaines irrégularités de surface avec un fort contraste (<math>\theta_1 \simeq 0</math>).</p>	<p>L'observateur regarde dans l'axe du rayon spéculaire (<math>\theta_2 \simeq \theta_1</math>). La surface apparaît alors très brillante (cette configuration est aussi appelée effet <i>lumière blanche</i>).</p>	<p>L'observateur regarde la surface verticalement et se voit dans le reflet sur la surface (<math>\theta_2 \simeq 0</math>).</p>
		
		

Tableau 1.1 – Les 3 effets lumière

### 1.4.2 Etape d'évaluation

Dans cet exemple, on se réfère à un standard écrit pour évaluer et caractériser les anomalies. Les anomalies visuelles sont classées selon 4 grandes catégories, appelées *attributs* : il s'agit soit d'une marque, soit d'une hétérogénéité, soit d'une déformation ou enfin d'une pollution. L'opérateur doit alors décrire de façon factuelle les anomalies qu'il détecte, en s'appuyant sur le standard défini pour le type de pièce qu'il inspecte.

Cet exemple propose d'utiliser 2 types de critères d'évaluation [Baudet 12] :

- (i) *les critères liés aux conditions d'observation.*

Pour évaluer les anomalies, on pourra par exemple quantifier l'effort de détection :

- Contrôle *global* : L'anomalie est vue immédiatement dans les conditions standards d'inspection
- Contrôle *standard* : L'anomalie est vue dans les conditions d'observation standard (par exemple, à 30 cm)
- Contrôle *renforcé* : L'anomalie est vue en utilisant un système de grandissement, ou après un temps important d'inspection

Au niveau des conditions d'observations, on peut aussi s'appuyer sur les effets lumières (voir Tableau 1.1), en déterminant sous combien d'effets lumière une anomalie est visible. Une anomalie visible dans un cône d'observation limité aura une importance moindre qu'une anomalie de même type visible sur un large angle d'observation.

(ii) *la mise en perspective : critères liés au contexte de l'anomalie.*

Une anomalie n'aura pas la même importance selon sa situation sur le produit au niveau global (par exemple : situation sur une face visible en utilisation normale ou non) ou au niveau local. On parle par exemple d'anomalie *noyée dans le décor*. De la même façon, on peut évaluer une hétérogénéité de couleur locale (sur une surface) ou globale (entre deux composants d'un produit).

Le tableau 1.2 présente un exemple d'attributs et des niveaux correspondants pour une anomalie de type marque.

Paramètres	Attributs	Valeurs
Conditions d'observation	Effort de détection	Visible immédiatement
		Visible dans les conditions standards (30 cm)
		Visible en contrôle renforcé (Tps > 15 sec)
	Orientation	Visible sous 1 seul effet lumière
		Visible sous 2 effets lumière
		Visible sous tous les effets lumière
Mise en perspective	Contexte local	localisation favorable
		noyé dans le contexte
		localisation défavorable et non noyé dans le contexte
	Contraste de couleur	Pas de contraste
		Contraste faible
		Contraste élevé
	Localisation	Face principale
		Face de derrière
		Face de dessus et champs latéraux
		Face de dessous

Tableau 1.2 – Attributs et niveaux pour une anomalie de type marque sur un briquet

### 1.4.3 Etape de décision

L'étape de décision doit permettre, à partir des attributs et des niveaux précédemment définis à l'opérateur de l'inspection visuelle de décider si une anomalie est acceptable ou non. Pour rappel, d'après la méthode pour le contrôle esthétique définie dans la figure 1.3, nous nous intéressons ici uniquement aux anomalies non évolutives. En effet, si une anomalie évolutive a été détectée (par exemple une piqûre de corrosion), celle-ci doit être classée directement comme non acceptable, car son évolution dans le temps n'est pas maîtrisée.

Plusieurs outils méthodologiques existent pour aider les opérateurs lors de cette étape. L'exemple proposé reprend le principe de la grille hiérarchique corrigée [Baudet 12]. Cette grille permet de formaliser le calcul de l'intensité totale à attribuer à une anomalie, à partir des attributs et niveaux définis dans l'étape d'évaluation, liés aux conditions d'observations et au contexte de l'anomalie (*mise en perspective*). Le tableau 1.3 présente un exemple de grille de décision pour un briquet.

Conditions d'observation		Mise en perspective				DE CI SI ON
Effort de détection	Effet lumière	Local		Global	Position	
		Orientation	Couleur			
Visible en contrôle <b>renforcé</b> (tps inspection $\geq$ 15 sec)	<b>3</b>	Visible sous <b>1 seul</b> effet lumière  =	l'anomalie est dans le <b>sens du décor</b>  -1	l'anomalie est de la <b>même couleur</b> que la pièce  =	face <b>non visible</b> produit monté  -1	1
						2
Visible en contrôle <b>standard</b> (30 cm)	<b>4</b>	Visible sous <b>2 effets</b> lumière  =	Décor <b>uni</b>  =		face <b>arrière</b> et <b>champs latéraux</b>  =	3
						4
Visible <b>immédiatement</b>	<b>5</b>	Visible sous <b>tous</b> les effets lumière  +1	l'anomalie n'est <b>pas</b> dans le <b>sens du décor</b>  =	l'anomalie cause un <b>contraste de couleur</b>  +1	face <b>principale</b>  +1	5
						6
						7
						8

Tableau 1.3 – Exemple de grille de décision pour l'inspection visuelle de briquets

La grille se parcourt de gauche à droite. En fonction de l'effort de détection, on attribue à l'anomalie un niveau compris entre trois et cinq. Les attributs définis dans l'étape précédente (évaluation) permettent ensuite de majorer ou de minorer ce niveau initial, pour obtenir la cote d'intensité finale. Par exemple, une anomalie visible en contrôle standard (4), sous un seul effet lumière (=), sur une face à décor uni (=), causant un contraste de couleur (4+1) sur la face principale (4+1+1), aura une cote finale d'intensité égale à 6. Le produit sera alors considéré comme non acceptable (intensité  $\geq$  6).

## 1.5 Conclusion

Nous avons présenté l'approche sensorielle, humaine, de l'analyse de la qualité d'aspect des surfaces. Cette approche est basée sur les mécanismes de *vision humaine*, qui consistent essentiellement à interpréter l'information visuelle perçue, pour enregistrer (*reconnaissance de forme et association*), et reconstruire l'environnement (*reconstruction de la topographie*) afin de nous situer et de pouvoir interagir dans cet espace.

Dans le cadre industriel, la faculté de l'humain à analyser son environnement visuel a permis la mise en œuvre du contrôle d'aspect des surfaces, particulièrement pour les manufactures de produits à haute valeur ajoutée. C'est le *contrôle sensoriel*. Le développement et la formalisation des méthodologies, de façon analogue à ce qui a été développé en contrôle dimensionnel a permis de réduire sensiblement la variabilité inhérente du contrôle humain. On parle alors de *métrologie sensorielle*. De plus, le contrôle sensoriel possède une qualité inhérente à l'intervention humaine, qui est sa très grande flexibilité vis à vis du type de produits, de l'échelle d'analyse, ou encore du type d'anomalies présentes sur les surfaces. De ce fait, cette approche est aujourd'hui très répandue. De plus, le contrôle sensoriel industriel fait toujours l'objet de nouvelles recherches afin de mieux maîtriser la perception des produits par les clients, malgré les coûts liés à la variabilité inhérente à l'intervention humaine.

L'objet de la suite de ce chapitre et plus globalement de ces travaux de recherche est de proposer des approches complémentaires, où l'expert visuel (l'humain) reste au centre du processus d'analyse de l'aspect des produits. L'objectif est de définir puis d'apporter aux experts des critères objectifs d'analyse liés à la perception visuelle des surfaces durant les trois étapes du contrôle visuel, i.e la détection, l'évaluation, et la décision finale d'acceptabilité. Ces critères peuvent soit être liés à la géométrie des surfaces (section 2), soit à l'interaction de la surface avec son environnement lumineux (section 3).

## 2 Aspect de surface & géométrie

Par définition, une surface représente la limite entre l'objet auquel elle appartient et son environnement. Ainsi, de très nombreuses fonctions de l'objet dépendent directement de l'interaction de ses surfaces avec les éléments qui l'entoure [Raphet 08]. En présence de plusieurs corps, cette interaction se traduit par exemple par des problématiques de frottements [Bigerelle 12a, Bigerelle 12b], d'étanchéité ou de résistance. Elle peut aussi se manifester par des phénomènes de corrosion ou d'oxydation liés au milieu ambiant. L'*aspect* peut aussi être vu comme une fonction particulière des surfaces, qui correspond à l'interaction de la surface avec son environnement lumineux (Voir Section 3). L'objet de cette partie est de montrer comment passer de la mesure à la définition de caractéristiques d'une surface, puis de détailler les liens existants entre certaines caractéristiques géométriques surfaciques et la fonction *aspect*.

### 2.1 De la mesure aux caractéristiques

#### 2.1.1 Mesure de la topographie d'une surface

Quel que soit le produit, les surfaces industrielles comportent des irrégularités. Celles-ci constituent des écarts locaux ou globaux par rapport à une surface idéale appelée surface nominale. Pour caractériser une surface et son comportement, il est nécessaire de mesurer la surface [Raphet 06] afin de disposer d'une information quantifiée sur sa géométrie. Cette information peut-être de type altitudes ( $z(x, y)$ ), on parle alors de mesure de topographie. Elle peut aussi être une forme dérivée de l'information en altitude, il s'agit alors de mesure de pentes (ordre 1) ou de courbures (ordre 2). Pour définir et caractériser de façon complète une surface, il faudrait que cette information soit continue sur la surface. Dans la pratique, la mesure ne permet d'obtenir qu'une information discrète, échantillonnée de la surface. un des enjeux essentiels est donc d'adapter les pas de mesure et l'échantillonnage de la surface en fonction du comportement que l'on cherche à mettre en évidence. Cette notion d'échelle d'analyse est centrale dans la métrologie des surfaces. Elle est développée plus en détail dans la section 2.1.2.

##### a) Principales techniques de mesure de surface

Historiquement, la mesure d'une surface a d'abord été réalisée par l'humain à travers une analyse sensorielle visuelle et/ou tactile. Cette méthode est aujourd'hui encore très répandue notamment pour contrôler la qualité d'aspect d'une surface, où malgré l'apparition de techniques instrumentales semi-automatiques ou automatiques, l'humain reste la référence (voir section 1). Dans un second temps, les moyens de mesure d'état de surface ont permis de mesurer des lignes de points, appelées profils de la surface. En fonction de la typologie de l'objet, ces profils peuvent alors être mesurés linéairement ou parfois circulairement, généralement au moyen de palpeurs mécaniques. Parallèlement, les premiers paramètres statistiques d'état de surface concernant des mesures de profils ont été normalisés [ISO-4287 97, ISO-13565 96]. La figure 1.6 présente un exemple type de chaîne de mesure pour un palpeur profilométrique.

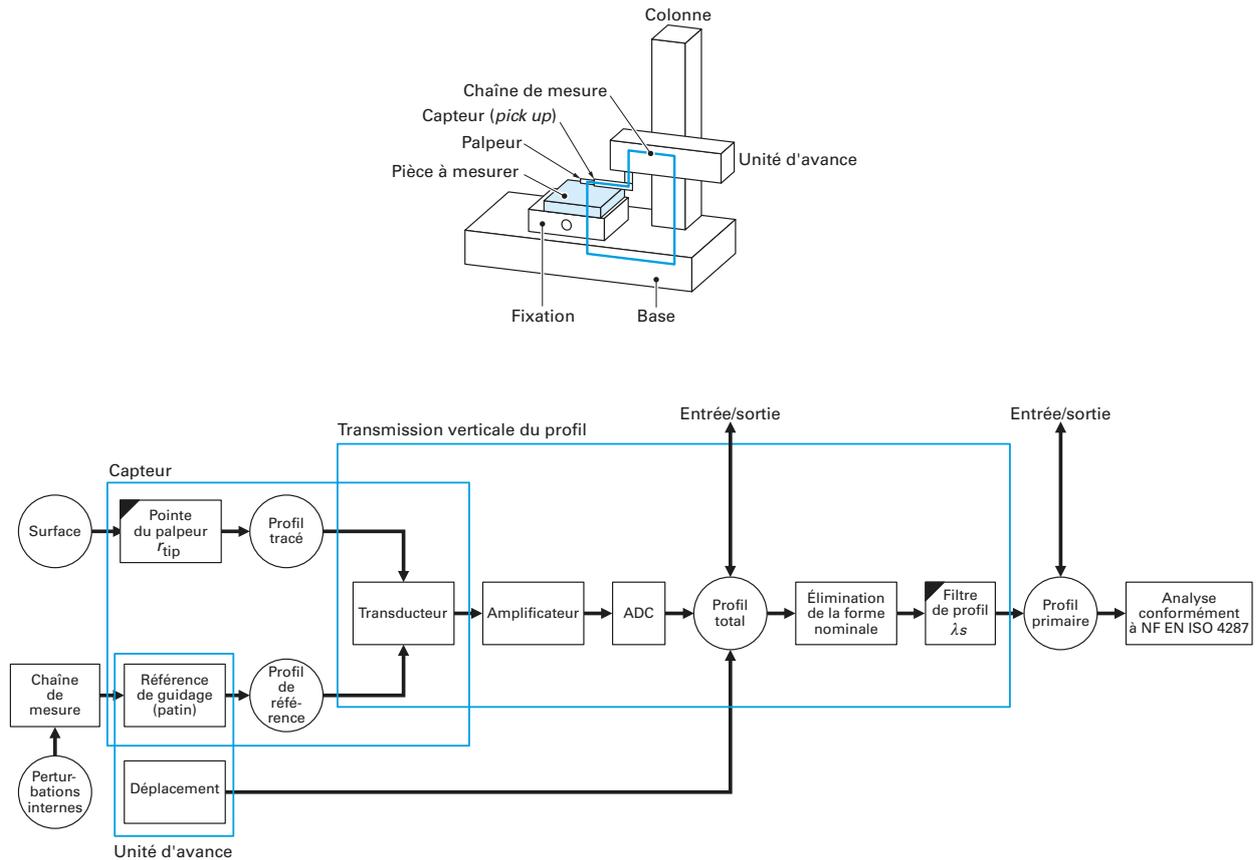


Figure 1.6 – Chaîne de mesure - Profilométrie par palpeur mécanique, selon [Raphet 06]

Suite à l'apparition récente de moyens de mesures optiques sans contact capables de mesurer un grand nombre de points avec une bonne résolution latérale et verticale, les techniques de mesure de topographie et de traitement de l'information mesurée se sont développées. On peut désormais procéder à la mesure intégrale d'une surface ou d'une portion de surface à l'échelle de la micro voire de la nano-géométrie. Cependant, une surface est souvent appréhendée comme une série de profils parallèles, avec l'inconvénient de l'influence du choix de la direction de mesure. Une autre méthode consiste à acquérir l'information directement sur l'ensemble de la zone à mesurer. On parle alors de mesure à champs étendu.

Nous proposons de classer les techniques de mesure de topographie en deux sous ensembles, les méthodes *ponctuelles* et les méthodes à *champs étendu*. D'un point de vue plus technologique, il existe deux catégories principales de moyens de mesure, les *méthodes mécaniques* et les *méthodes optiques*. Le tableau 1.4 présente les principaux moyens de mesure de topographie mécaniques, tandis que les tableaux 1.5a et 1.5b présentent les méthodes de mesure de topographie optique et les principes généraux associés à ces techniques.

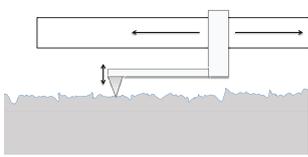
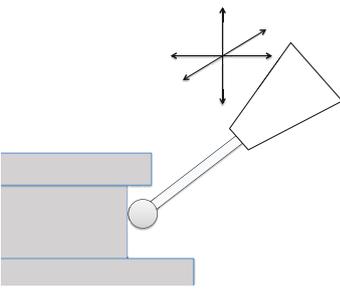
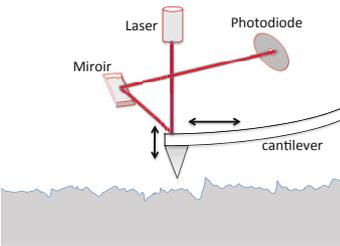
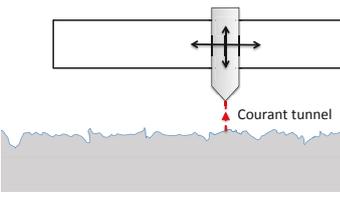
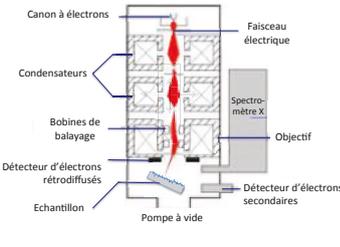
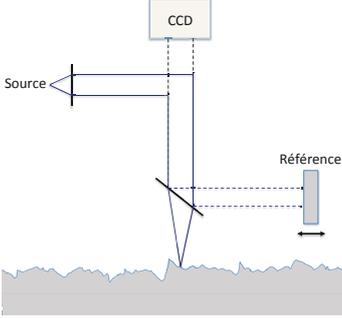
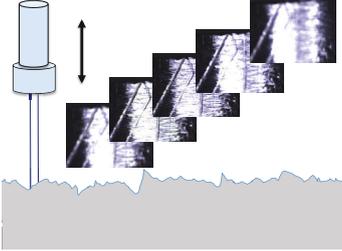
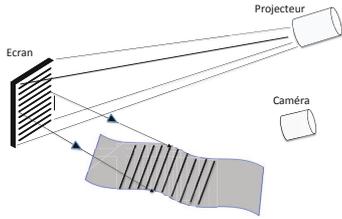
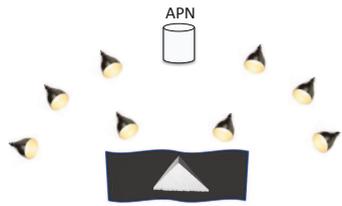
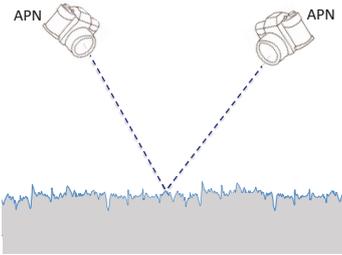
Méthodes mécaniques				
	Nom	Principe	Illustration	Spécificités
Mesure	Rugosimètre mécanique	Les déplacements verticaux du palpeur sont enregistrés au cours du balayage au moyen d'un capteur inductif ou optique pour acquérir le relief du profil		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Résolution latérale élevée liée aux dimensions de la pointe diamant</li> <li>- contrôle destructif sur surfaces fragiles</li> <li>- Temps d'acquisition long en topographie 3D</li> </ul>
	Machine à Mesurer Tridimensionnelle (MMT)	La tête de mesure se positionne en tout point de l'espace, généralement au moyen de trois liaisons glissières ; la position des points à mesurer est définie préalablement par l'utilisateur		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Spécialement destinés à mesurer un écart de forme sur une surface, ou un écart de localisation entre différentes surfaces d'un objet</li> <li>- Grande flexibilité par rapport au type de surface à mesurer</li> </ul>
ponctuelle	Microscope à Force Atomique (AFM)	L'altitude des points de la surface est acquise par mesure des forces d'interactions atomiques entre une sonde et la surface, proportionnelles à la distance sonde/surface		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Très haute résolution</li> <li>- Temps d'acquisition long pour de la topographie 3D</li> <li>- Débattement vertical limité : adapté pour des mesures fines d'état de surface</li> </ul>
	Microscope à Effet Tunnel (STM)	La mesure est réalisée par mesure du courant tunnel dont l'intensité dépend de la distance entre la sonde et la surface. On mesure les variations de courant, ou les déplacements de la sonde (à courant constant)		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesure de topographie à l'échelle atomique</li> <li>- Surfaces conductrices ou semi-conductrices</li> <li>- temps d'acquisition long</li> </ul>
Mesure à champ étendu	Microscope électronique à balayage (MEB)	L'acquisition est réalisée par mesure du flux d'électrons secondaires émis par l'échantillon. Ce flux est directement lié à l'angle faisceau incident /surface		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Matériau conducteur (métallisation nécessaire)</li> <li>- Mesure dans le vide</li> <li>- Champs de mesure réduit</li> <li>- Très haute résolution</li> </ul>

Tableau 1.4 – Classification des principaux moyens de mesure mécanique de topographie de surface

Méthodes optiques - Mesure ponctuelle			
Nom	Principe	Illustration	Spécificités
Microscope Optique en champs proche (SNOM)	En plaçant une sonde très proche de surface, on peut mesurer l'onde évanescente de la lumière ( $\neq$ l'onde dispersée) et ainsi mesurer à un niveau de détail inférieur à la longueur d'onde de la lumière.		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temps d'acquisition long</li> <li>- Résolution moyenne</li> <li>- permet aussi d'obtenir des informations physiques et chimiques liées à la nature locale du matériau</li> </ul>
Microscope Confocal	La mesure est réalisée en contrôlant la focalisation d'un faisceau lumineux sur la surface. L'objectif se déplace verticalement afin que le faisceau reste focalisé, ce qui permet d'acquérir l'altitude du point éclairé.		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temps d'acquisition long (mesure point à point)</li> <li>- Mesure robuste aux variations de réflectivité<sup>1</sup></li> <li>- Limitation en pentes</li> <li>- Champs de mesure large</li> </ul>
Microscope Confocal avec codage chromatique	même principe que la microscopie confocale, l'objectif est équipé en plus d'un spectromètre qui permet de décomposer la lumière réfléchie, et de mesurer les altitudes sans mouvement vertical de la sonde		<ul style="list-style-type: none"> <li>- même caractéristiques que la microscopie confocale</li> <li>- Très bonne résolution verticale</li> </ul>
Triangulation Laser	La mesure de l'angle du faisceau laser réfléchi permet de calculer l'altitude du point considéré. Ces instruments existent aussi en capteur ligne		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesure très rapide (adapté à la mesure en ligne de production)</li> <li>- Grande gamme de mesure verticale : technique très adaptée à la mesure d'écart de formes, et de surfaces complexes</li> </ul>

(a)

Méthodes optiques - Mesure à champs étendu			
Nom	Principe	Illustration	Spécificités
Microscopie par interférométrie	La mesure est réalisée par superposition de 2 signaux, l'un réfléchi par une surface de référence, et l'autre par la surface. Les interférences de ces signaux sont liées à l'information en z.		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesure rapide</li> <li>- Limitations en pentes</li> <li>- Très bonne résolution</li> <li>- Spécialement adapté pour la mesure de surfaces super-polies</li> </ul>
Microscope à focalisation étendue	La mesure est réalisée à partir d'un balayage de la surface par niveaux. A partir des points focalisés des images prises à chaque niveau, la topographie est reconstruite		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesure rapide</li> <li>- Mesure de surfaces à forte pentes</li> <li>- Visualisation 3D possible en couleurs "vraies"</li> <li>- Résolution verticale moyenne</li> </ul>
Défectométrie (Réflexion de franges)	La lumière structurée (franges) est projetée sur un écran, l'analyse des franges réfléchies sur la surface permet d'extraire la pente locale, et par intégration le relief de la surface		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesure sur une zone étendue</li> <li>- détection de défauts</li> <li>- Acquisition rapide</li> <li>- Nécessité de surfaces réfléchissantes</li> </ul>
Photométrie	La technique consiste à prendre plusieurs images de la surface en faisant varier la position de la source lumineuse. Cette information permet d'obtenir les pentes, puis par intégration la topographie		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acquisition rapide</li> <li>- Mesure sur une zone étendue</li> <li>- Résolution verticale moyenne</li> <li>- Adapté aux surfaces peu réfléchissantes</li> </ul>
Photogrammétrie	Par triangulation, l'intersection des lignes de vue des différentes images permet de déterminer la position du point photographie dans l'espace, et ainsi de reconstruire la topographie de la surface		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acquisition très rapide, permettant la mesure dynamique</li> <li>- Grandes étendues de mesure</li> <li>- Résolution verticale moyenne</li> <li>- Facilité à mettre en œuvre</li> </ul>

(b)

Tableau 1.5 – Classification des principaux moyens de mesure optiques de topographie de surface

b) *Bilan des principales techniques et critères de choix*

Dans le cadre de l'analyse de la qualité géométrique des surfaces, et plus particulièrement de l'analyse de leur fonction *aspect*, il apparait que dans l'état actuel des techniques aucune ne satisfait totalement les contraintes du contrôle visuel industriel en terme de flexibilité vis à vis par exemple du type de produits ou de leur taille, et/ou en terme de temps d'inspection dans le contexte industriel. C'est d'autant plus problématique dans le domaine des produits à haute valeur ajoutée où les séries sont souvent réduites. Le moyen de production est alors qualifié de HVLV (High Variety Low Volume), et correspond à une grande variabilité au niveau de la géométrie des surfaces (taille et forme) et du matériau (réflectivité et état de surface).

Il s'agit donc, et c'est le sens de ces travaux, de combiner voire d'adapter certaines de ces techniques pour proposer une méthodologie, de la détection des anomalies d'aspect jusqu'à la décision d'acceptabilité finale. Cependant, on peut déjà extraire certaines caractéristiques potentiellement intéressantes pour le contrôle de la qualité géométrique des surfaces à haute valeur ajoutée :

- Capteurs Ponctuels / Capteurs à champs étendu : Les capteurs ponctuels permettent généralement de procéder à une mesure très fine de la surface. Certaines anomalies d'aspect importantes peuvent avoir des caractéristiques géométriques de taille/extension très réduites, il est donc souvent nécessaire de mesurer très finement les surfaces pour analyser sa qualité d'aspect. Le temps de mesure correspondant est alors généralement important. Il faut donc, de façon préalable à l'usage d'une telle technique localiser les zones critiques (les anomalies d'aspect) et segmenter la surface. En principe, on favorisera donc l'utilisation d'un moyen à champs étendu pour réaliser la détection des anomalies, alors qu'un moyen ponctuel sera plus à même de mesurer finement la topographie sur la surface segmentée.
- Capteurs sans contact / Capteurs à contact : Une contrainte immédiate du contrôle de la qualité d'aspect des surfaces est la nécessité qu'il soit non destructif. Dans ce contexte, l'utilisation des capteurs à contact est problématique. Cependant, la mesure des surfaces complexes, particulièrement quand les pentes sur la surface sont élevées et lorsque l'état de surface est de type poli-miroir, est difficile à réaliser avec les techniques sans contact alors qu'elle peut être réalisée avec un capteur à contact.
- Mesure des altitudes / Mesure des pentes / Mesure des courbures : Certains moyens permettent de mesurer la topographie de la surface, alors que pour d'autres, la topographie est recalculée à partir de l'information en pentes de la surface (mesurée directement) par d'une opération d'intégration. A l'inverse, la cartographie en courbures de la surface est elle obtenue par dérivation du champ de pentes, ou de normales de la surface. Ces opérations de dérivation et d'intégration induisent des erreurs liées par exemple à la dérivation du bruit de mesure (haute fréquence). Dans le cadre de l'analyse de la qualité d'aspect, on montre dans la suite de ces travaux que l'analyse des courbures de la surface apporte une information que ne révèle pas la topographie (carte des altitudes) de la surface (voir Section 2.2.3). Il peut donc être particulièrement intéressant de choisir un moyen "proche" du champ de courbures, i.e. qui permet d'obtenir rapidement et de façon robuste cette information. Par exemple, un moyen de mesure directe des pentes de la surface permet par exemple d'obtenir cette information par une seule étape de dérivation, alors qu'il faudra dériver les altitudes deux fois pour obtenir les courbures. L'ordre de l'erreur est alors sensiblement supérieur. Ainsi, le type de donnée mesuré par le moyen de mesure est un critère de choix essentiel.

### 2.1.2 Echelle et comportement

Comme précisé dans la section précédente, la notion d'échelle est essentielle pour la métrologie des surfaces. Un comportement peut être modélisé de façon satisfaisante à une échelle d'analyse donnée, alors qu'il sera nécessaire de changer de modèle si l'on change d'échelle d'analyse. La méthode *area-scale* développée par Brown [Brown 94, Brown 96] (voir chapitre 2, section 3.3.5) est basée sur la notion d'échelle d'analyse, et permet notamment de déterminer la corrélation de caractéristiques de la surface avec une fonction ou un comportement, en fonction de la taille des éléments du maillage utilisé sur la surface. Les résultats obtenus confirment l'importance de bien maîtriser l'échelle d'analyse lors du processus de métrologie des surfaces. On retrouve aussi très clairement cette notion dans de nombreuses méthodes de filtrage, par exemple :

- (i) *L'analyse en ondelettes*. Cette méthode est une technique de décomposition multi-résolution [Mallat 89] qui permet de procéder à une analyse d'une surface à différentes échelles, et d'obtenir des caractéristiques métrologiques des surfaces en terme de longueur d'onde et de phase [Lingadurai 06]. Les travaux de Chen et al. [Chen 95, Chen 99] sur des surfaces industrielles montrent que cette méthode permet de lier les aspects liés à l'usinage et à la fonction des surfaces avec ses caractéristiques multi-échelle. Dans le domaine de la tribologie, Lee et al. [Lee 98] appliquent la décomposition en ondelettes à des profils de rugosité, et montrent que cette méthode de filtrage est aussi bien adaptée pour des applications dans ce domaine. Plus récemment, Rosenboom et al. [Rosenboom 11] montrent l'intérêt de la décomposition en ondelettes dans le cadre de la détection de défauts sur une surface industrielle.
- (ii) *la transformée de Fourier*. La transformée de Fourier est la généralisation des séries de Fourier au cas non périodique. Elle permet de décomposer une information à une ou deux dimensions (profil ou surface) dans une base constituée d'harmoniques en sinus et en cosinus. Dans le cadre des surfaces industrielles, Raja et al [Raja 77] appliquent cette méthode sur des profils de rugosité. Peng et Kirk [Peng 97] montrent que la transformée de Fourier à deux dimensions permet de caractériser efficacement la texture d'une surface, et particulièrement son isotropie ou son anisotropie. L'utilisation de la transformée de Fourier est assez courante dans l'analyse de surfaces ou de profils extraits de surfaces, notamment pour paramétrer le défaut de forme. La norme [ISO-12781-2 11] fait notamment référence à des paramètres faisant intervenir les composantes harmoniques de la Transformée de Fourier discrète pour évaluer la planéité d'une surface.
- (iii) *la Décomposition Modale Discrète (DMD)*. Dans ses travaux pour obtenir automatiquement un modèle 3D pour la Conception Assistée par Ordinateur, Pentland [Pentland 90] choisit d'utiliser un comportement dynamique de l'objet, i.e. ses modes de vibrations naturels, pour décrire sa forme. Ainsi, la décomposition modale consiste à décomposer un signal dans une famille de fonctions discrètes définies a priori. De la même manière que la transformée de Fourier discrète, ce paramétrage permet de décomposer la surface mesurée dans une famille de descripteurs (fonctions discrètes) appelés modes ou déformées modales. Cette famille de fonctions est établie à partir des modes de vibration de l'élément géométrique de référence, ce qui explique le nom choisi pour ce paramétrage. La DMD est applicable à tous types de géométries (profils ou surfaces) [Favrelière 09]. Dans un premier temps mis en œuvre pour caractériser le défaut de forme d'une géométrie [Formosa 05], nous montrons dans ces travaux (voir section 2.2, Chapitre 2) comment la généraliser aux ordres des variations géométriques d'ondulation et de rugosité. Nous présentons ensuite l'application de la méthode au cadre de la caractérisation des défauts d'aspects, souvent aperiodiques, d'une surface [Le Goïc 11].

De manière similaire aux méthodes de filtrage adaptées aux signaux, ou sur des profils extraits de mesures de surface, la notion d'échelle d'analyse sur les surfaces est essentielle. Par analogie avec le traitement du signal, les surfaces sont constituées de composantes, dont la fréquence spatiale possède deux dimensions [Bouchareine 99]. Cette caractéristique permet ainsi de procéder à des opérations de filtrage *fréquentiel*, et de caractériser à différentes échelles ou à différents ordres une surface.

### 2.1.3 Caractéristiques géométriques normalisées

De façon générale, la normalisation permet de définir et de généraliser des règles de spécifications. Ainsi, certaines caractéristiques des surfaces sont normalisées afin de disposer d'un langage et d'outils communs et efficaces pour analyser les surfaces. Cette partie a pour objectif de détailler les différentes caractéristiques et indicateurs normalisés liés à la géométrie des surfaces.

#### 2.1.3.a les 6 ordres de défauts géométriques

On appelle *défait géométrique* les variations de l'objet (ou de la surface) considéré par rapport à un idéal, défini par le concepteur. Ces variations, aussi appelées *écarts*, peuvent être catégorisées selon six ordres de défauts. La définition de ces ordres de défauts est l'étape initiale pour modéliser la géométrie des surfaces, et permet de définir les différentes caractéristiques géométriques de la surface.

Au niveau macroscopique, ces écarts pourront être liés à :

#### 1. La *Taille*.

Le défaut de *taille* est défini comme étant la variation, ou l'écart de la valeur de la caractéristique intrinsèque du (des) éléments géométriques associés [ISO-14405-1 10, ISO-14405-2 11].

Par exemple, sur un élément géométrique sphérique, on déterminera l'écart entre le diamètre nominal de la sphère défini par le concepteur, et le diamètre de l'élément géométrique associé aux moindres carrés. Cet écart est le défaut de taille de la sphère. Les entités géométriques qui peuvent être tolérancées par une taille sont :

- (i) une surface cylindrique (taille linéaire : diamètre)
- (ii) une surface sphérique (taille linéaire : diamètre)
- (iii) deux surfaces planes opposées (taille linéaire : distance)
- (iv) une surface conique (taille angulaire : angle)

#### 2. La *Position*.

Le défaut de *position* est défini comme étant la variation, ou l'écart entre l'élément géométrique de référence et la surface associée à l'élément géométrique.

La référence peut être liée à l'élément géométrique lui-même (surface nominale) ou à une autre surface associée. Anselmetti détaille notamment dans son ouvrage sur la *Métrologie avec les normes ISO* [Anselmetti 11] comment identifier l'écart de position d'une surface. La figure 1.7 illustre un écart de position défini entre la surface nominale et la surface associée par la méthode des moindres carrés.

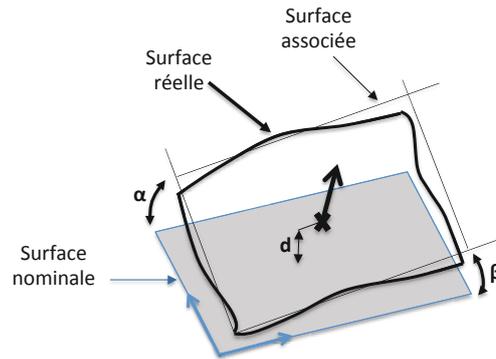


Figure 1.7 – Ecart de position pour un élément géométrique de type plan, à partir de [Anselmetti 11]

Au niveau surfacique, les variations géométriques sont décomposées en 4 catégories, appelées ordres de défauts :

### 3. *La Forme.*

Le défaut de *forme* (ou d'ordre 1) représente l'écart entre la forme théorique et la forme réelle de la surface obtenue après fabrication ou usinage de la surface [ISO-4287 97].

L'écart de forme toléré est matérialisé par une zone de tolérance, à l'intérieur de laquelle doit se situer la surface réelle.

Ainsi, le défaut de forme d'un profil linéaire est appelé défaut de rectitude. Pour un élément de référence de type cercle on parle de circularité, pour un profil le défaut de forme est généralement appelé *profil primaire*.

De la même façon, pour des surfaces on parle de défaut de planéité et de cylindricité pour des formes de référence de type plan et cylindre. Pour des lignes ou des formes quelconques, le défaut de forme est contenu dans une zone de tolérance définie par deux surfaces enveloppes d'une sphère, de diamètre égal à la tolérance et dont le centre parcourt la surface théorique [Bonzom 05]. De façon plus générale, nous proposons de compléter la définition du défaut de forme de la façon suivante :

Le défaut de *forme* représente l'écart entre la forme théorique et la forme réelle de la surface obtenue après fabrication ou usinage de la surface. Il est constitué des composantes de grande longueur d'onde de la surface, et est de classe  $C_1$  (sa dérivée d'ordre 1 est donc nécessairement continue).

Par analogie avec le terme employé pour les profils, nous avons choisi dans la suite de ce document d'utiliser le terme *Forme primaire* pour décrire le défaut de forme, afin de ne pas risquer une confusion avec l'écart de forme, i.e. l'écart sur la caractéristique de taille de l'élément géométrique (par exemple, un écart de diamètre sur un cylindre).

### 4. *L'ondulation.* De façon analogue avec la définition proposée pour le défaut de forme, nous proposons de compléter la définition du défaut d'ondulation de la façon suivante :

Le défaut d'*ondulation* (ou d'ordre 2) est constitué des composantes périodiques de la surface, de longueurs d'ondes inférieures à celles qui constituent le défaut de forme, et supérieures à celles qui constituent le défaut de rugosité. Il est de classe  $C_1$  (sa dérivée d'ordre 1 est donc nécessairement continue).

On peut utiliser un filtre de coupure pour séparer les composantes de forme de celles qui sont de l'ondulation [ISO-12085 96], mais il est difficile de définir avec précision la longueur

d'onde de coupure entre forme et ondulation, et ondulation et rugosité. Cependant, on peut considérer qu'il faut disposer de plusieurs périodes complètes de la composante pour qu'elle soit caractéristique de l'ondulation.

Dans le cadre d'un filtrage pour caractériser l'état de surface (i.e. la rugosité de la surface), on pourra simplement considérer que les défauts de forme et d'ondulation forment une seule entité, constituée de l'ensemble des composantes de classe  $C_1$  de la surface.

### 5. La rugosité.

Le défaut de *rugosité* (ou d'ordre 3) est constitué des composantes périodiques de la surface, de longueurs d'ondes inférieures à celles qui constituent le défaut d'ondulation (de classe  $C_1$ ), et de composantes pseudo-périodiques [ISO-25178-3 08], de classe  $C_0$  (dérivées non continues).

L'origine de ce défaut peut être par exemple lié au passage de l'outil lors de l'usinage, et peut se matérialiser sur la surface par des stries ou des sillons sur la surface, pseudo-périodiques.

### 6. La micro-rugosité. :

La micro-rugosité est constituée des composantes apériodiques de la surface, de classe  $C_0$ .

L'origine des composantes constituant le défaut de micro-rugosité peut être liée à un arrachement de matière lors du passage de l'outil, ou à toute autre altération de la surface lors de sa fabrication, de sa manipulation, ou de son usage ultérieur. On retrouve ainsi dans cet ordre de défaut l'ensemble des imperfections de surface telles que définies par la norme ISO 8785 [ISO-8785 98], ainsi que des composantes non périodiques liées notamment au bruit de mesure. La figure 1.8 montre des exemples d'imperfections de surface qui peuvent avoir une influence sur la fonction aspect de la surface.

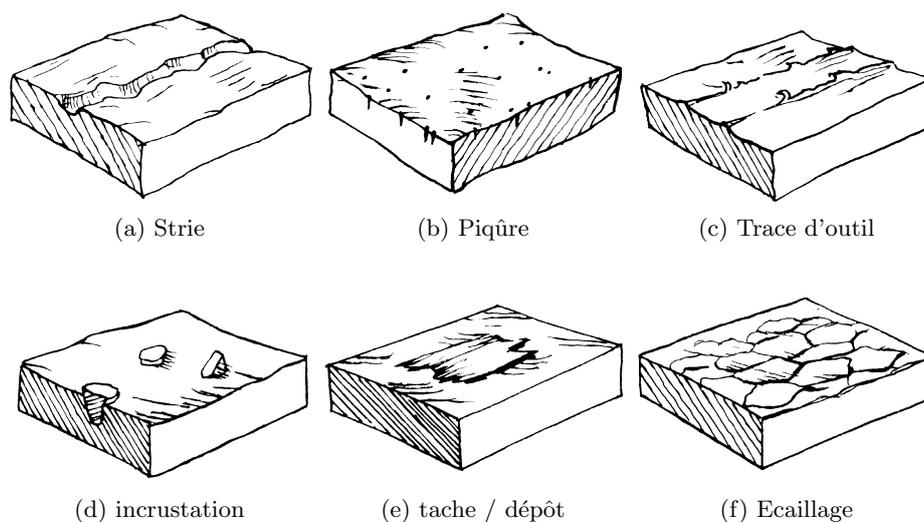


Figure 1.8 – Exemples d'imperfections de surface définies par la norme ISO 8785 [ISO-8785 98]

En synthèse, les ordres de défauts surfaciques permettent de différencier les différents types de variations possible sur une surface. La figure 1.9 présente une synthèse des différents ordres de défauts surfaciques et de leurs caractéristiques, tandis que la figure 1.10 présente un exemple de séparation du profil primaire (ordre 1), du profil d'ondulation (ordre 2), et du profil de rugosité (ordre 3 et 4 regroupés) d'une mesure.

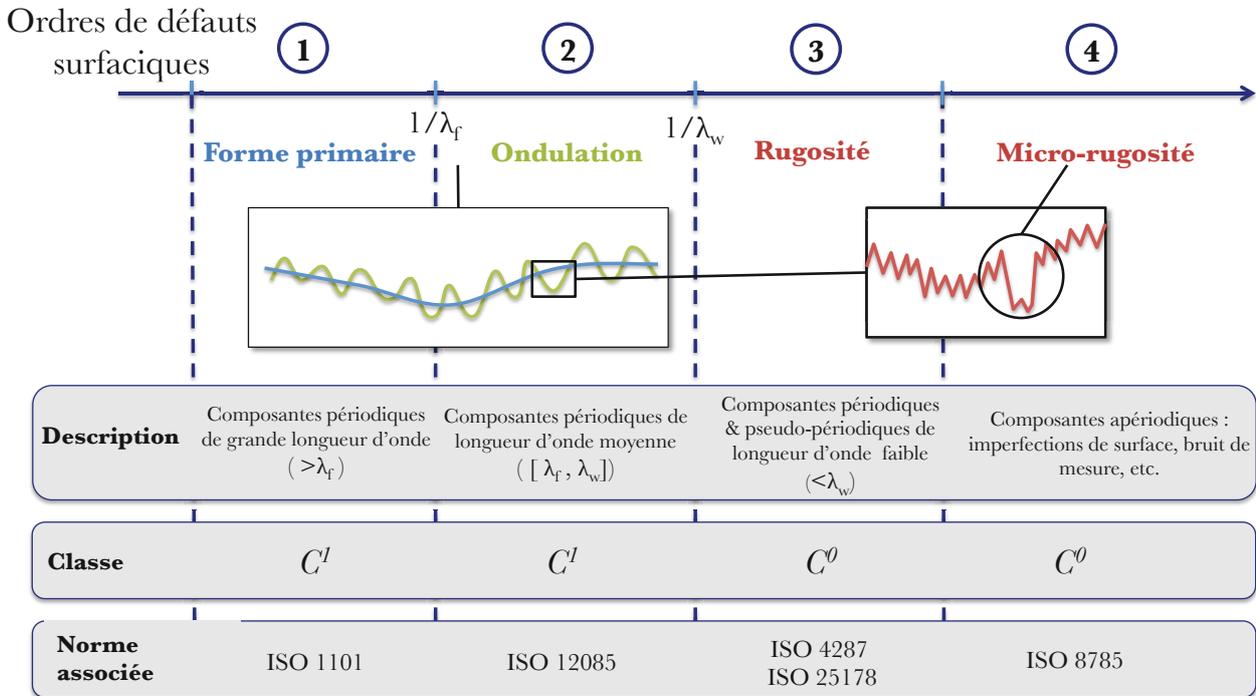


Figure 1.9 – Proposition de description des 4 ordres de défauts surfaciques

Lors de l'analyse des surfaces, une étape importante et préliminaire consiste ainsi souvent à caractériser ces différents ordres de défauts, i.e. séparer les composantes de forme, d'ondulation, de rugosité voire de micro-rugosité. Dans le cadre de l'analyse du lien entre caractéristiques géométriques et *aspect* d'une surface, on cherche par exemple à identifier dans quel ordre de défaut se situent les anomalies liées à l'aspect afin de les isoler des autres composantes de la surface. Dans la suite de ces travaux (chapitre 2, section 3) nous présentons nos apports dans cette direction, et l'importance de caractériser les différentes composantes pour isoler les anomalies visuelles et analyser l'apparence des surfaces à partir de l'information en altitudes.

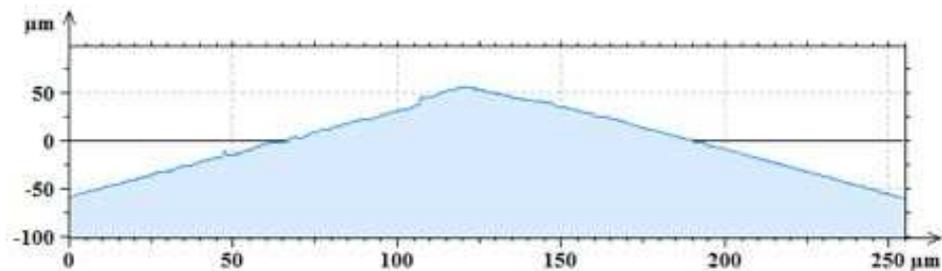
### 2.1.3.b Les indicateurs statistiques d'état de surface

De nombreux indicateurs ont été définis pour caractériser l'état de surface (ou la composante de rugosité de la surface). De façon analogue à l'évolution des moyens de mesure, ces indicateurs ont d'abord été définis pour des profils [ISO-4287 97, ASME-B46.1 09] puis généralisés aux surfaces [ISO-25178-3 08, ASME-B46.1 09].

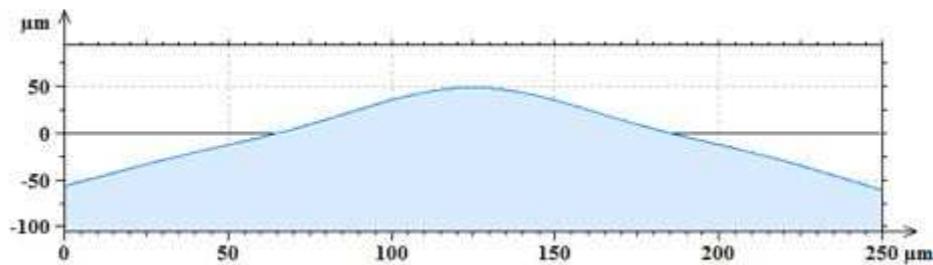
#### a) Vocabulaire

On rappelle ici la définition de certains éléments de vocabulaire et de notations fréquemment utilisés pour décrire les différents indicateurs normalisés d'état de surface.

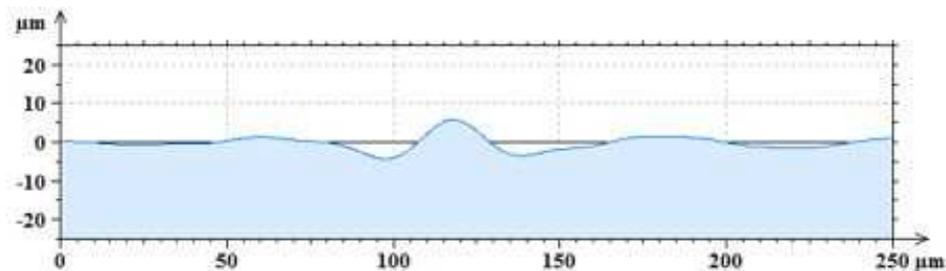
- la surface réelle : limite entre le corps de l'objet et le milieu environnant
- la longueur d'onde de coupure ( $\lambda_c$ ) : longueur d'onde utilisée lors du filtrage, pour séparer des composantes de fréquence différente
- la longueur de base de rugosité ( $l_r$ ) : longueur égale à la longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$
- la longueur de base d'ondulation ( $l_w$ ) : longueur égale à la longueur d'évaluation du profil d'ondulation
- la longueur de base primaire ( $l_p$ ) : longueur égale à la longueur d'évaluation du profil primaire (forme)
- La longueur d'évaluation ( $l_n$ ) : longueur du profil à évaluer, ou à mesurer. Pour le profil de rugosité, on préconise de choisir  $l_n = 5 \times l_r$



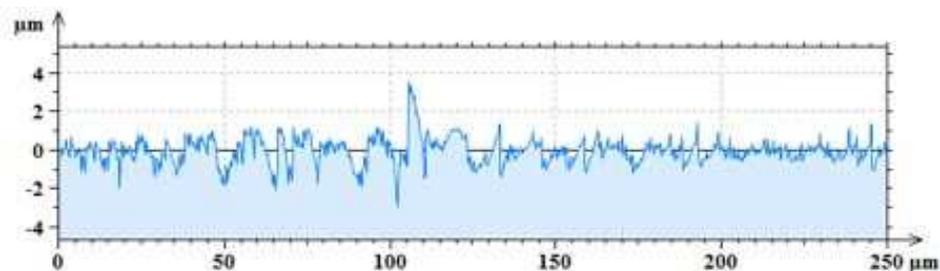
(a) Profil mesuré



(b) Profil P (primaire - défaut de forme - ordre 1)



(c) Profil W (ondulation - ordre 2)



(d) Profil R (rugosité - ordre 3 et 4)

Figure 1.10 – Ordres de défauts géométriques sur un profil

## b) Indicateurs d'état de surface

Le tableau 1.6 détaille certains des principaux indicateurs normalisés pour caractériser un profil.

$W_t$	Hauteur totale du profil W, cet indicateur correspond au défaut d'ondulation du profil
$R_a, R_q$	Ecart moyen de rugosité, $R_a$ est obtenu par une moyenne arithmétique des écarts sur la longueur $l_r$ , $R_q$ est obtenu par une moyenne quadratique des écarts sur la longueur $l_r$
$R_p, R_v$	Hauteurs maximales, respectivement des saillies (pics) et des creux (vallées) sur la longueur de base $l_r$
$R_{sk}, R_{ku}$	Facteurs d'asymétrie et d'aplatissement des profils : si $R_{sk}$ est négatif, le profil a pas ou peu de symétries ; et inversement si $R_{sk}$ est positif. Idem pour le facteur d'aplatissement $R_{ku}$
$R_{pc}$	Densité de pics sur le profil, calculée sur la longueur de base $l_r$

Tableau 1.6 – Exemples d'indicateurs d'état de surface - Méthode du profil

Les indicateurs de surface 3D ont été développés à partir des indicateurs sur les profils, et sont définis par la norme [ISO-25178-3 08]. L'intérêt principal de ces indicateurs est qu'ils ne sont plus dépendants de l'isotropie (ou de l'anisotropie de la surface). En effet, par la méthode du profil, l'orientation des textures sur la surface et l'orientation des profils choisis pour la caractériser sont des facteurs très influents sur les indicateurs de surface, et cette méthode ne permet pas de s'assurer que les résultats sont représentatifs de la surface, sauf dans des conditions particulières d'isotropie. Cette contrainte est levée par la méthode surfacique (3D).

De plus, de nouveaux indicateurs surfaciques prenant en compte la direction des textures de la surface ont été créés, par exemple l'indicateur de direction principale de texture d'une surface  $S_{td}$ . Les indicateurs équivalents à ceux existants sur des profils ont aussi été redéfinis pour les surfaces, la lettre R est remplacée par la lettre S dans le nom de l'indicateur. Par exemple, l'équivalent de l'indicateur d'écart arithmétique moyen  $R_a$  pour un profil est calculé de façon analogue pour une portion de surface et s'appelle  $S_a$ .

## 2.2 Lien entre caractéristiques géométriques et aspect

La typologie des anomalies d'aspect telle que définie dans la section 1.3.1 définit quatre catégories distinctes d'anomalies. Il peut s'agir d'une marque, d'une hétérogénéité, d'une pollution, ou d'une déformation. D'un point de vue géométrique, les défauts de type marque et de type déformation correspondent à une variation de la géométrie locale sur la surface. Une hétérogénéité correspond à une variation d'état de surface, ou de texture de surface. Elle peut être locale sur une surface, ou globale, i.e. entre différentes surfaces d'un produit ou entre différents produits. On s'attachera par exemple souvent à ce que tous les produits aient la même texture, ou plutôt qu'ils produisent visuellement la même impression de texture. Une pollution peut se traduire par une variation de géométrie (dépôt sur la surface), locale ou globale. Cependant, dans certains cas, cette anomalie d'aspect se traduit plus nettement par une variation de la couleur de la surface, et est difficile à évaluer par à partir de la géométrie. L'utilisation d'appareils de caractérisation de surfaces de type spectro-goniomètres par exemple peut alors permettre de caractériser plus aisément ce type d'anomalies d'aspects.

La problématique que pose l'approche géométrique est comment caractériser les anomalies d'aspect sur une surface, et quelles caractéristiques géométriques associer à l'information mesurée pour évaluer, et pouvoir juger de la criticité des anomalies d'aspect. Cette section présente le lien entre rendu visuel et certaines caractéristiques géométriques des surfaces, dérivées de l'information en altitudes, pentes, et courbures.

### 2.2.1 Acquisition des données

L'**information en altitude** d'une surface peut être acquise *directement*, au moyen d'une machine de mesure de surfaces (voir partie 2.1.1). La résolution latérale et verticale est alors très variable en fonction du moyen de mesure utilisé. L'étendue et le temps de mesure correspondant rendent aussi généralement difficile à mettre en œuvre des acquisitions sur des zones étendues. Ainsi, le temps et la quantité de donnée mesurées deviennent rapidement très significatifs et ne sont souvent pas adaptés à la problématique de ces travaux, la détection des anomalies d'aspect dans le contexte industriel des produits à haute valeur ajoutée. L'information en altitude d'une surface, peut aussi être obtenue *indirectement*, par mesure des pentes de la surface, puis intégration de l'information. Elle peut aussi être obtenue à partir de la mesure des courbures par deux intégrations successives. Cependant il existe en pratique très peu de moyens permettant de mesurer directement et avec une résolution suffisante les courbures d'une surface.

De la même façon, l'**information en pente** correspond aux normales en chaque point de la surface et peut être mesurée *directement*. Une des techniques possibles est la déflectométrie [Kafri 81, Surrel 04, Surrel 12]. Le dispositif présenté dans le chapitre 4 et développé dans ces travaux, basé sur la technique *Polynomial Texture Mapping* permet aussi d'obtenir cette information de façon simple et robuste à partir de la *réflectance* en chaque point (voir chapitre 4). Cette information peut aussi être obtenue par dérivation de l'information en  $z$ , ou éventuellement par intégration des courbures de la surface. Cependant, l'opération de dérivation à partir des altitudes est très sensible au bruit de mesure, et de façon plus générale à l'ensemble des composantes haute fréquence de la surface, ce qui la rend délicate à réaliser.

Enfin, l'**information en courbure** d'une surface est généralement obtenue par dérivation des pentes ou par double dérivation du champ d'altitudes de la surface, avec cependant la même problématique que soulevée précédemment liée à la gestion du bruit lors de la dérivation.

La figure 1.11 schématise les différents moyens d'obtenir la topographie, les pentes ou les courbures d'une surface.

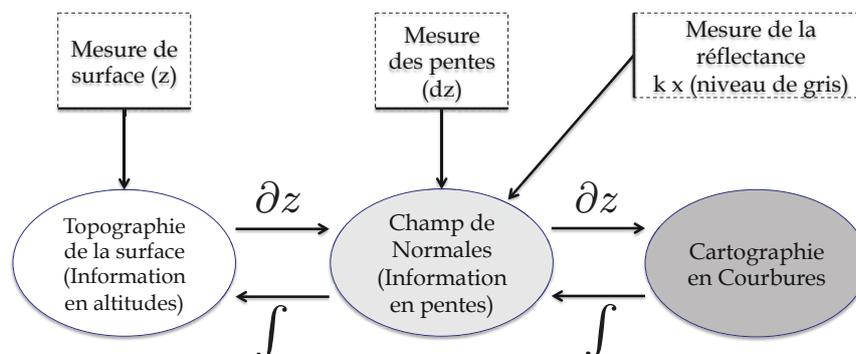


Figure 1.11 – Acquisition et lien entre les différents types de données surfaciques

## 2.2.2 Interprétation des altitudes ( $z$ )

Nous présentons dans cette section les liens pouvant exister entre l'information en altitude, mesurée sur la surface, et son rendu visuel. Nous présentons d'abord le cas des anomalies globales, puis le cas plus répandu dans l'industrie, et donc plus central dans ces travaux, des anomalies d'aspect locales.

### 2.2.2.a Anomalies globales

Les anomalies d'aspect *globales* font référence à des anomalies présentes sur l'ensemble d'une surface (exemple : hétérogénéité entre différents produits), ou sur une partie d'une surface. Certaines anomalies globales peuvent être décrites avec des indicateurs calculés à partir des altitudes mesurées sur la surface. On pourra par exemple différencier des états de surface produisant une différence de rendu visuel par une différence de  $S_a$  sur la surface. Cependant, la pratique montre qu'il est difficile de corrélérer un ou une combinaison de paramètres au rendu visuel de la surface. Par exemple, une surface obtenue par sablage pourra, en fonction des conditions de fabrication (taille des grains, vitesse de projection, etc.), avoir un rendu visuel différent, notamment au niveau de la couleur ressentie. Un exemple de ce type est traité dans la section 3.3 (chapitre 2), où les deux surfaces considérées ont des indicateurs de rugosité  $R_a$  et  $R_q$  quasi identiques, bien que leur rendu visuel diffère sensiblement, notamment en terme de couleur ressentie. Nous montrons ainsi dans cette section que l'analyse de la surface par des méthodes multi-échelle permet d'améliorer sensiblement la qualité des résultats obtenus :

- La décomposition des surfaces selon ses ordres de défauts surfacique (forme/ondulation/rugosité) permet d'isoler la composante liée à l'anomalie visuelle (ici, la composante de rugosité), ce qui facilite l'évaluation.
- D'autres méthodes d'analyse multi-échelle peuvent aussi permettre d'analyser la corrélation entre paramètres surfaciques et rendu visuel, par exemple la méthode *area-scale* (voir chapitre 2, section 2).

On retrouve le lien entre couleur et état de surface dans la littérature, et particulièrement dans les travaux de Elias [Simonot 02, Elias 05]. Le découplage couleur/texture peut être pris comme hypothèse dans une première approche, et permet d'analyser séparément ces deux points de vue de la qualité d'aspect. Elias montre que l'état de surface modélisé comme un ratio  $h/l$  où  $h$  est la hauteur du profil et  $l$  la longueur de corrélation, a une influence significative dans la perception de la couleur d'une surface (figure 1.12).

Cette influence crée une translation ascendante du spectre de réflectance. La conséquence est une augmentation de la clarté et de la désaturation de la surface. La prise en compte de l'état de surface à travers un ou plusieurs scalaires normalisés ou modaux (éléments du spectre) permettrait de corrélérer ce(s) dernier(s) à la perception des couleurs d'une surface observée. Ce couplage n'est pas développé dans ces travaux, dont le but principal est de reproduire le processus d'investigation des experts en augmentant sa robustesse. Lors de ce processus, le couplage couleur/état de surface apparaît naturellement. L'analyser pourrait être utile dans une seconde approche qui chercherait à identifier ses sources. Dans ce cas, l'analyse demanderait d'exploiter la corrélation entre la mesure d'une surface par analyse d'images à celle d'une mesure de topographie de la surface.

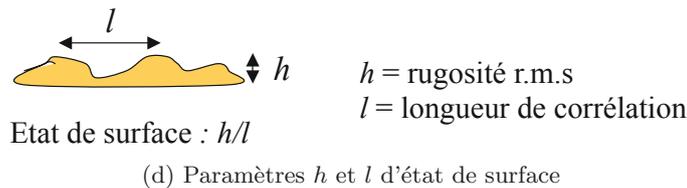
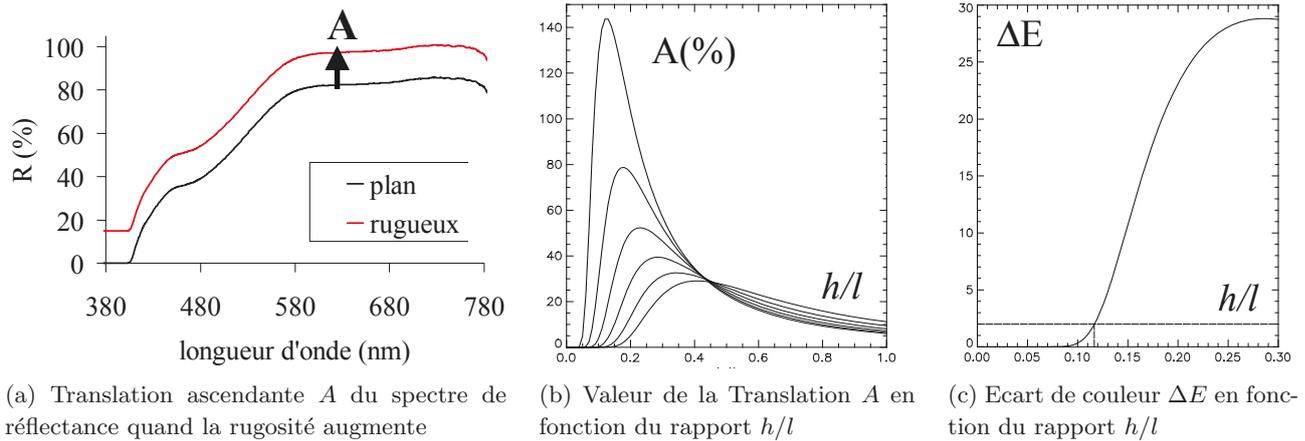


Figure 1.12 – Influence de l'état de surface sur la couleur ressentie, à partir de [Elias 05]

Enfin, l'analyse de l'isotropie d'une surface permet aussi d'avoir une bonne indication sur son rendu visuel *global*. En effet, plus une surface est isotrope (pas de sens de texture prépondérant), plus elle aura tendance à diffuser la lumière de façon équivalente dans toutes les directions d'observations. A l'inverse, une surface fortement anisotrope aura un rendu visuel très dépendant du sens d'observation et du sens d'éclairage [Dana 99a]. La figure 1.13 montre un exemple d'une surface d'un plastique isotrope, et d'une surface obtenue par soleillage (textures orientées selon les rayons de la surface), anisotrope, et les vues polaires de l'orientation des textures associées.

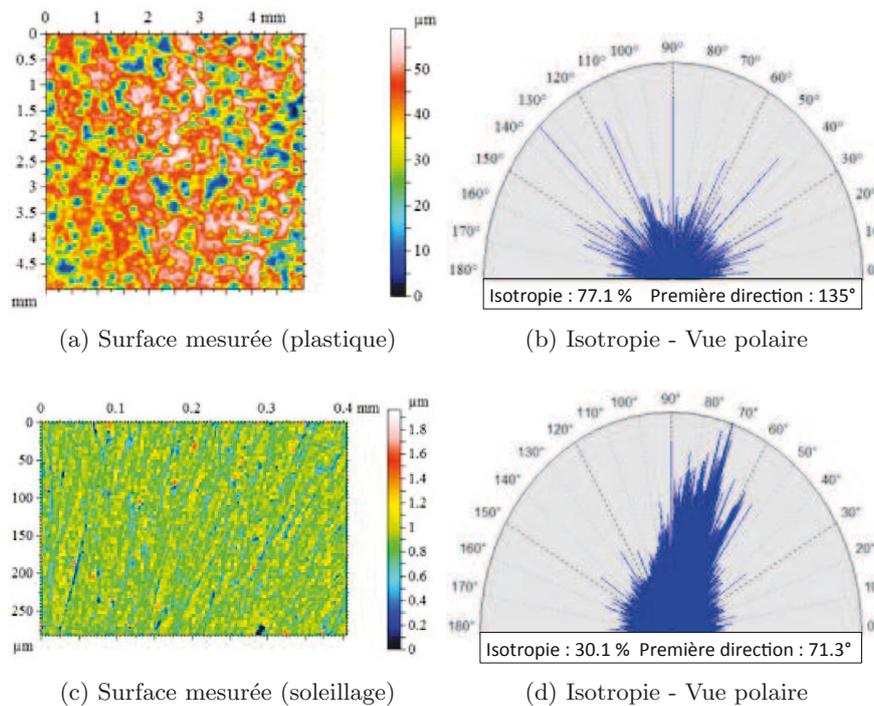


Figure 1.13 – Caractérisation de l'isotropie d'une surface

### 2.2.2.b Anomalies locales : approche amplitude/extension

Pour les anomalies locales, une méthode d'interprétation possible est de considérer leur amplitude (profondeur) ou/et leur extension. Par exemple, on peut mettre en place des indicateurs basés sur la longueur, la profondeur, ou encore le volume des anomalies. Il ressort de ce type d'études [Legay 05b, Legay 05a] qu'un de ces critères pris isolément ne permet pas de quantifier le rendu visuel localement. Un coup sur une surface dont l'amplitude mesurée est de  $0.5 \mu m$ , très localisé, n'aura sensiblement pas le même rendu qu'un coup dont la forme est régulière, sur une zone étendue, qui est généralement indétectable à l'œil nu.

L'association de deux indicateurs, liés à l'amplitude et à l'extension des anomalies, peut dans certains cas permettre de lier géométrie et aspect. Andersson [Andersson 09], dans ses travaux sur l'inspection de carrosserie automobile, confirme l'importance d'associer plusieurs indicateurs, si l'on souhaite se référer à un critère quantitatif d'amplitude et/ou d'extension. Il propose par exemple d'utiliser l'indicateur de *sévérité*, noté ( $S$ ), qui relie amplitude et extension (équation 1.2) :

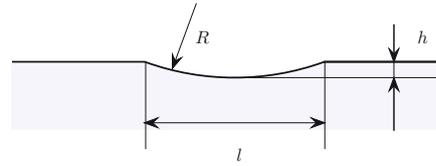
$$S = \frac{D}{A} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} S : & \text{Indice de sévérité} \\ D : & \text{Amplitude (Profondeur : Depth)} \\ A : & \text{Extension (Aire)} \end{cases} \quad (1.2)$$

Il montre que pour deux anomalies d'aspect situées dans une zone équivalente sur un produit, celle dont l'impact visuel est le plus fort a un indice de sévérité plus important. Cet exemple met en évidence la présence d'un autre facteur, déjà évoqué pour le contrôle sensoriel (section 1) : la *localisation des anomalies*. En effet, un produit peut avoir différentes *gammas de surfaces*, définies par exemple en rapport avec leur visibilité dans des conditions d'utilisation normales, ou d'autres critères de localisation. Andersson propose alors de compléter sa définition de l'indice de sévérité par un facteur plus général, noté  $R$  (équation 1.3) :

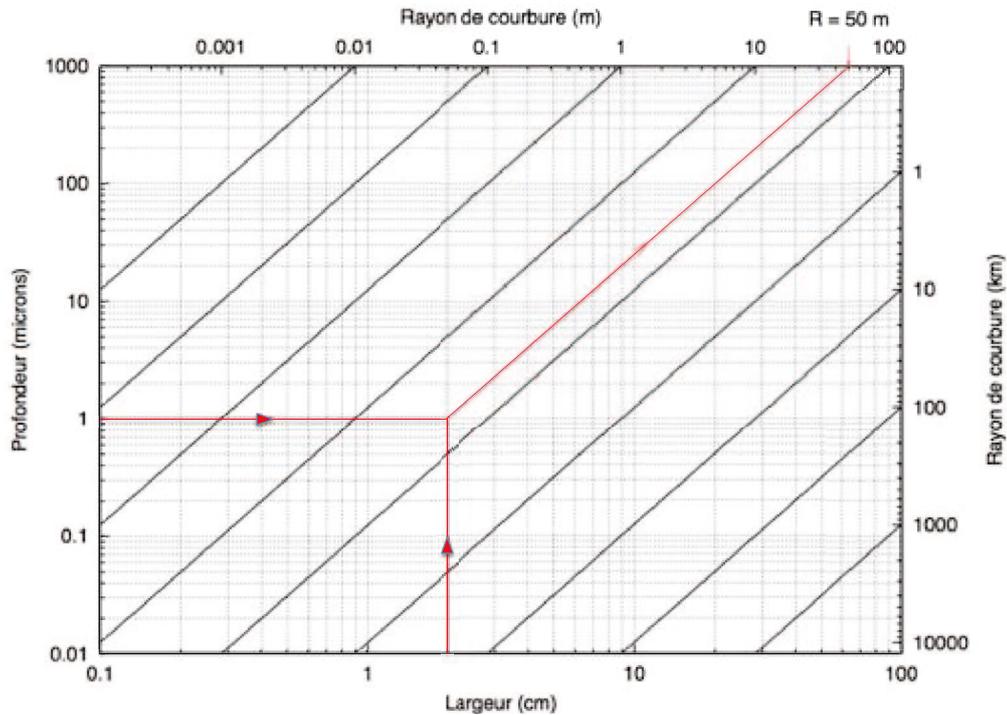
$$R = S \times Z \quad \text{avec} \quad \begin{cases} R : & \text{Indice de sévérité généralisé} \\ S : & \text{Indice de sévérité} \\ Z : & \text{Indice de sévérité de position, défini entre 1 et 10} \end{cases} \quad (1.3)$$

En introduisant ces différents concepts, Andersson illustre le fait que de nombreux facteurs influencent la criticité dans l'analyse de l'aspect, et c'est ce qui la rend particulièrement délicate à automatiser. Des mécanismes plus ou moins complexes de pondération peuvent être mis en œuvre, mais ils sont souvent incomplets tant les critères, parfois inconscients, acquis par l'expérience des experts visuels et des entreprises sont nombreux. Ainsi, le modèle de Andersson présenté précédemment ne prend par exemple pas en compte les variations de forme locales des anomalies, ou l'aspect multi-échelle des surfaces qui sont pourtant essentiels.

Il existe un indicateur géométrique multi-échelle permettant de lier amplitude et extension et directement dérivé des variations locales de surface, qui est la *courbure*. Dans sa présentation de la technique Ondulo afin de "mesurer" l'aspect, Surrel [Surrel 12] montre que la courbure permet de lier amplitude et extension. A des fins pédagogiques, il propose d'utiliser un modèle 2D, d'anomalie sphérique (voir figure 1.14a). A partir de ce modèle, il trace un *abaque* de courbure qui lie extension (i.e en 2D la longueur de l'anomalie) et amplitude (profondeur) (Figure 1.14). La lecture de cet abaque de courbure permet de façon simple, de mettre en évidence le lien entre extension, amplitude et courbure d'une anomalie. La section suivante présente de façon plus développée comment est défini cet indicateur, et son lien avec l'apparence des surfaces.



(a) Modélisation 2D d'une anomalie



(b) Abaque de courbure

Figure 1.14 – Lien entre *Amplitude*, *Extension* et *Courbure* d'une anomalie d'aspect, selon Surrel [Surrel 12]

### 2.2.3 Interprétation des pentes et des courbures : $(\partial z)$ , $(\partial^2 z)$

#### 2.2.3.a Introduction

La section précédente a permis de montrer qu'il existait un lien direct entre amplitude, extension, et courbure d'une anomalie. Dans cette partie, nous présentons ce qu'est la courbure, comment elle est liée à l'apparence des surfaces, puis nous présentons les principaux indicateurs de courbure utilisés dans nos travaux (section 4, chapitre 2).

Dans le cadre du contrôle de la qualité d'aspect des surfaces, l'information en pentes et en courbures d'une surface est spécialement pertinente [Rose 09]. En effet, l'œil humain est très sensible aux discontinuités de forme d'une surface [Andersson 09]. Ces variations se traduisent en termes de pentes par une variation locale forte, et en courbures par des intensités en courbures importantes à l'endroit des anomalies. Cette caractéristique est illustrée dans un exemple à deux dimensions, par la figure 1.15 extraite des travaux de Legay [Legay 05b, Legay 05a] sur la caractérisation morphologique des anomalies d'aspect de surface.

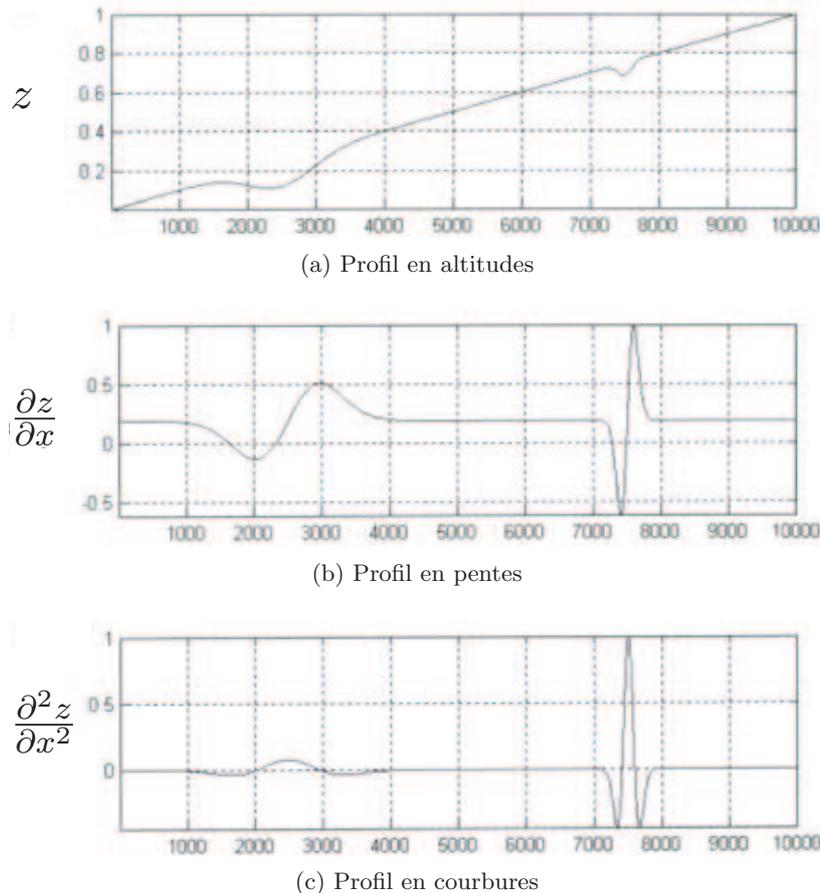


Figure 1.15 – Définition d’une anomalie de surface, selon les attributs géométriques d’altitude, de pente et de courbure, à partir de [Legay 05a]

Dans la littérature, de nombreux auteurs font référence aux courbures pour caractériser l’aspect d’une surface, notamment dans le domaine automobile [Fukumura 04, Sun 06, Park 07, Le Port 10], où afin de pallier à la variabilité du contrôle humain, des systèmes de mesure d’altitudes ont été mis en œuvre pour détecter et évaluer les anomalies d’aspect des surfaces. Anderson [Andersson 09] montre que l’interprétation directe des altitudes ne permet généralement pas de corréliser les anomalies mesurées avec l’évaluation visuelle faite par les experts. A contrario, il préconise l’utilisation d’un critère basé sur la courbure locale des surfaces, afin d’obtenir une bonne indication sur son impact visuel. Un des résultats intéressants de son étude est qu’une variation importante de courbures sur une surface révèle potentiellement deux configurations : il s’agit soit d’un changement dans la forme de la surface, net et voulu par le concepteur, ou alors la variation anormale révèle la présence d’une anomalie d’aspect locale.

De la même façon, Savio [Savio 07] montre l’intérêt d’évaluer les courbures sur les surfaces gauches pour l’étape de détection des anomalies [Farin 96]. Dans des applications à l’échelle beaucoup plus large du domaine de l’industrie pétrolière, Roberts [Roberts 01] montre que les courbures peuvent être utilisées pour détecter des anomalies locales, et ainsi révéler des zones de contraintes anormales sur les surfaces topographiques.

Si l’intérêt des courbures est reconnu dans de nombreux domaines industriels pour la détection et l’évaluation des anomalies de surface, et particulièrement pour l’analyse de l’aspect des surfaces, cet attribut géométrique est encore rarement utilisé. Une explication est probablement la difficulté d’obtention des courbures.

Les deux principaux moyens principaux d'aborder l'information en courbure sont :

(i) *Le calcul à partir de l'information en altitudes*

Historiquement, les moyens de mesure de surface ont été développés pour réaliser du contrôle dimensionnel, dans le cas des anomalies de surface il s'agit par exemple de mesurer la profondeur, où l'extension de l'anomalie. De plus, de nombreux paramétrages de surface ont été développés en parallèle à l'évolution des moyens de mesure pour être appliqués à des nuages de points 3D. C'est une des raisons du fait que la très large majorité des moyens de mesure sont aujourd'hui destinés à mesurer une information de type altitudes.

A partir de cette information, il est possible d'obtenir des cartographies en pentes et en courbures d'une surface mesurée en altitudes, par des opérations de dérivation successives. Ces opérations de calcul rendent l'information en courbure très sensible au bruit sur les données *brutes* d'altitudes. Les résultats obtenus sont alors souvent difficilement exploitables [Le Port 09, Le Port 11]. Souvent, il est alors nécessaire de préparer préalablement les mesures, en appliquant aux données brutes un filtre spatial à longueur d'onde de coupure élevée. La difficulté est alors de trouver le compromis entre supprimer efficacement le bruit haute fréquence sans trop réduire la résolution et le niveau de détail sur la surface. Cette étape de conditionnement des données préalable au calcul des courbures est essentielle, et est sensiblement plus difficile à maîtriser que les opérations de dérivations en elles mêmes.

(ii) *La mesure directe des courbures (ou des pentes)*

La mesure directe des courbures sur une surface permet de se libérer de la contrainte liée à la gestion du bruit lors de(s) l'opération(s) de dérivation. Dans une moindre mesure, la mesure des pentes permet de se limiter à une opération de dérivation pour obtenir l'information en courbures, et d'être moins sensible au bruit sur les données brutes. Rose, Surrel et Becker [Rose 09] proposent de formaliser la façon de mesurer les pentes et les courbures d'une surface, afin de garantir la fiabilité des mesures, notamment en préconisant l'utilisation d'un étalon spécifique à la mesure de pente et de courbure sur une surface. Dans la même direction, Yashchuk et al. [Yashchuk 08] ont proposé un étalon physique, appelé *Universal Test Mirror* (UTM) pour la mesure de pentes par profilométrie. Dans sa monographie sur les techniques optiques de mesure de champ, Surrel [Surrel 05] montre comment obtenir l'information en courbure, notamment par *défectométrie*. Cette technique a fait l'objet d'une réalisation industrielle sous le nom de *Système ONDULO*, dont les applications dans le domaine de la qualité d'aspect des surfaces sont nombreuses. La figure 1.16 montre un exemple d'analyse en courbures réalisée sur une aile de voiture par ce système<sup>2</sup> .

---

2. Société VISUOL Technologies

<http://www.visuol.com/25-27-fr-Plastiques.html>

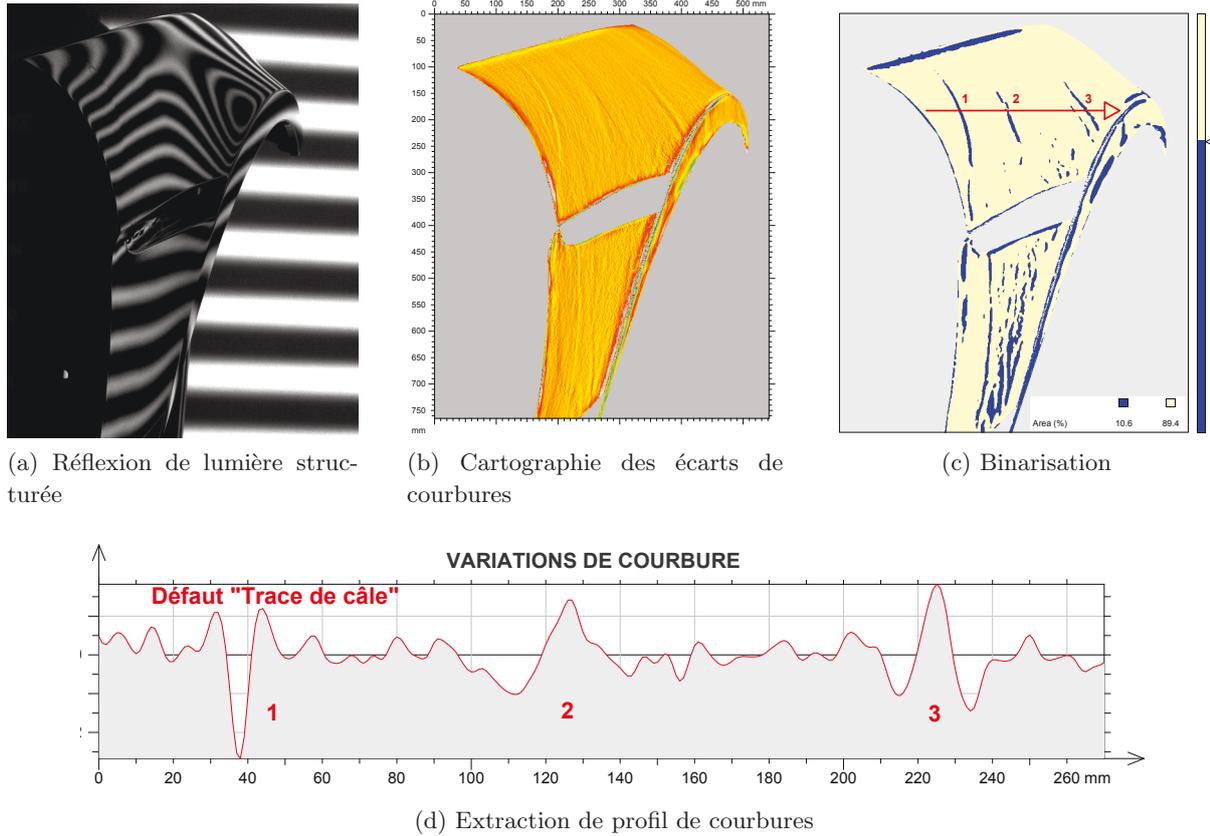


Figure 1.16 – Analyse en courbure par le système Ondulo d’une aile automobile injectée, à partir de [VISUOL 12]

### 2.2.3.b Définitions : Calcul, choix et représentation d’un indicateur de courbure

Nous présentons ici les concepts fondamentaux liés aux courbures, puis nous montrons comment elle est définie et calculée dans le cas où elle n’est pas obtenue par mesure directe. Nous montrons ensuite comment, à partir de l’information en courbure d’une surface, il est possible de choisir et de calculer des indicateurs spécifiques au cadre de l’analyse de la fonction aspect des surfaces.

La courbure est une propriété qui décrit le taux de changement de direction d’une courbe, ou d’une surface dans une direction donnée.

Si on se place dans un espace à deux dimensions, la courbure d’une courbe en un point est l’inverse du rayon d’un cercle tangent, appelé cercle osculateur. La courbure  $k$  correspond alors au taux d’évolution de l’angle tangent à un profil  $\theta$  par rapport à son abscisse curviligne  $s$  [Van Vliet 93, Roberts 01, Le Port 11]. Elle est définie par l’équation 1.4 :

$$k = \frac{d\theta}{ds} \quad (1.4)$$

Pour des fonctions de la forme  $y(x)$ , on peut alors écrire la courbure ( $k(x)$ ) sous la forme suivante (equation 1.5) :

$$k(x) = \frac{d^2y/dx^2}{(1 + (dy/dx)^2)^{3/2}} \quad (1.5)$$

Si on se place dans un espace à trois dimensions défini par des axes  $(x, y, z)$  orthogonaux, une surface peut alors s'exprimer sous la forme d'une fonction  $z = f(x, y)$ . Les pentes, sur les axes  $x$ , et  $y$  sont alors obtenues par dérivation de l'information en altitude (equation 1.6) :

$$\begin{cases} D_X = \frac{\partial z}{\partial x} \\ D_Y = \frac{\partial z}{\partial y} \end{cases} \quad (1.6)$$

Si on reprend la définition précédente, la courbure en un point est définie comme étant le taux de changement de direction d'une courbe. Pour des petits angles, le tenseur de courbure peut être approximé par la relation suivante 1.7 :

$$K = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

Le *tenseur de courbure* permet de calculer différents indicateurs de courbure dérivés, qui possèdent chacun des propriétés particulières et peuvent faciliter la représentation et la compréhension de l'apparence d'une surface. Nous développons dans la suite une liste des principaux indicateurs de courbure mis en œuvre dans la suite de ces travaux (cf section 4, chapitre 2).

(i) *Courbures principales.*

Les courbures, calculées sur les axes de mesure  $x$  et  $y$  sont deux directions particulières de calcul des courbures, qui n'ont pas forcément de sens particulier, mis à part si la surface considérée a des textures orientées dans une direction spécifique qui coïncide avec l'un des axes  $x$  ou  $y$ .

Cependant, il existe pour chaque point de la surface deux directions particulières, orthogonales, pour lesquelles les courbures sont maximales et minimales.

Les *courbures principales* sont les courbures calculées selon les directions pour lesquelles les courbures prennent des valeurs extrémales. Ces directions sont appelées *directions principales*, elles ont la propriété d'être uniques et orthogonales.

Les valeurs des courbures principales sont les valeurs propres du tenseur de courbure, notées  $k_i$ . Elles sont obtenues en résolvant l'équation (1.8). Les directions principales ( $v$ ) sont alors obtenues en résolvant le système défini par l'équation (1.9)

$$\det(K - \lambda I) = 0 \quad \text{avec } \lambda = \begin{pmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

$$Kv = \lambda v \quad (1.9)$$

(ii) *Courbure de Gauss.*

Au 19<sup>ème</sup> siècle, Gauss [Gauss 27], dans ses travaux fondamentaux sur la théorie des surfaces a montré que la courbure est à la différence d'une information en altitudes ou en pentes, un invariant local intrinsèque à une surface, i.e. indépendant de la base ou de l'espace choisi et défini par la surface en elle-même.

La courbure de Gauss, aussi appelée *courbure totale*, est définie comme étant le produit des courbures principales (Equation 1.10) . Elle est invariante quelle que soit la direction de calcul, et l'espace dans lequel on se situe : c'est une caractéristique *intrinsèque* de la surface. La courbure de Gauss est un des deux invariants du tenseur de courbure, il correspond à la trace de ce tenseur.

$$K_g = k_1 \times k_2 \tag{1.10}$$

Si la courbure de Gauss est constante et à valeur nulle sur une surface, alors la surface est dite *développable*. C'est le cas par exemple d'une surface plane ou de la surface latérale d'un cylindre (intérieure ou extérieure). Cet exemple montre que la courbure de Gauss définit des familles de surfaces, mais ne permet pas forcément de différencier certaines formes entre elles.

(iii) *Courbure Moyenne.*

La courbure moyenne en elle même n'est pas spécialement pertinente pour représenter les courbures. De plus, elle tend à se rapprocher de la courbure maximum, sur une des directions principales. Cependant, sa combinaison avec la courbure de Gauss permet de mieux caractériser la forme locale d'une surface. De plus, elle est aussi utilisée dans la définition d'autres attributs de courbure.

La *courbure moyenne* est définie comme étant la moyenne des courbures principales (Equation 1.11 )

$$H = \frac{k_1 + k_2}{2} \tag{1.11}$$

La combinaison de la courbure de Gauss avec la courbure moyenne permet de mieux caractériser la forme locale d'une surface (Figure 1.17).

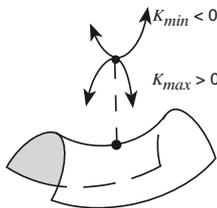
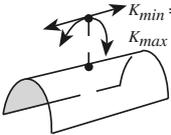
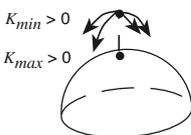
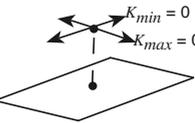
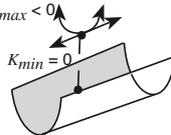
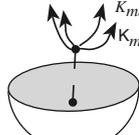
		GAUSSIAN CURVATURE		
		$K_g < 0$	$K_g = 0$	$K_g > 0$
MEAN CURVATURE	$H > 0$	 <p>Saddle</p>	 <p>Ridge (Cylinder)</p>	 <p>Dome (Ellipsoid)</p>
	$H = 0$		 <p>Flat or Planar</p>	
	$H < 0$		 <p>Valley (Cylinder)</p>	 <p>Bowl (Ellipsoid)</p>

Figure 1.17 – Forme, courbure de Gauss, et courbure moyenne d'une surface, à partir de [Roberts 01]

(iv) *Courbure maximale, et Orientation des courbures maximales.*

Roberts [Roberts 01] montre l'intérêt de représenter les courbures maximales et leurs orientations pour détecter les anomalies de forme locales sur les surfaces. Les courbures maximales sont obtenues à partir des courbures principales  $(k_1, k_2)$  (Equation 1.12), les orientations maximales sont la solution de l'équation (1.13).

$$k_{max} = \max(k_1, k_2) \quad (1.12)$$

$$\cos(\theta_{max}) = \frac{\vec{v}_{max} \cdot \vec{x}}{\|\vec{v}_{max}\|} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \vec{v}_{max} = v_1 & \text{si } k_{max} = k_1 \\ \vec{v}_{max} = v_2 & \text{si } k_{max} = k_2 \end{cases} \quad (1.13)$$

(v) *Courbure de Mehlum.*

Mehlum et Tarrou [Mehlum 98] ont proposé de nouveaux indicateurs de courbure afin de mieux décrire localement les surfaces. Il sont dit d'ordre 2 et d'ordre 3, l'ordre 1 étant l'ordre des indicateurs de courbures présentés précédemment. Nous nous limitons ici à l'indicateur de Mehlum d'ordre 2, qui en combinant les courbures de Gauss et moyennes apporte une description plus avancée de la forme locale de la surface. L'expression de l'indicateur de Mehlum d'ordre 2 est donné par l'équation (1.14) :

$$K_{mehlum2} = \frac{3}{2}H^2 - \frac{1}{2}K_g \quad (1.14)$$

(vi) *Indice de forme (shape index) et Intensité de courbure (Curvedness).*

L'indice de forme permet de définir la forme localement sur une surface, et l'intensité de courbure (*Curvedness*) donne une valeur scalaire du niveau de courbure local, indépendamment de la forme. Ils ont été proposés par Koenderink [Koenderink 92, Koenderink 03] dans ses travaux sur le lien entre échelle, forme et indicateurs de courbure sur une surface. Les indices de forme et d'intensité de courbure sont dérivés des courbures principales. Leurs expressions sont données respectivement par les équations 1.15 et 1.16. Zhao [Zhao 10], dans ses travaux sur le traitement des surfaces discrètes en métrologie, propose un tableau récapitulatif des différents types de surfaces, à partir de la valeur de l'indice de forme (Tableau 1.7).

$$s = -\frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{k_1 + k_2}{k_1 - k_2}\right) \quad (\text{où } k_1 \geq k_2) \quad (1.15)$$

$$c = \sqrt{\frac{k_1^2 + k_2^2}{2}} \quad (1.16)$$

Shape index (indicateur de forme) défini par [Koenderink 92]					
Surface type	Shape index interval	Type label	Surface type	Shape index interval	Type label
Spherical cup	$s \in [-1, -\frac{7}{8}]$	$T = -4$	Spherical cap	$s \in ]\frac{7}{8}, 1]$	$T = 1$
Through	$s \in ]-\frac{7}{8}, -\frac{5}{8}]$	$T = -3$	Dome	$s \in ]\frac{5}{8}, \frac{7}{8}]$	$T = 2$
Rut	$s \in ]-\frac{5}{8}, -\frac{3}{8}]$	$T = -2$	Ridge	$s \in ]\frac{3}{8}, \frac{5}{8}]$	$T = 3$
Saddle rut	$s \in ]-\frac{3}{8}, -\frac{1}{8}]$	$T = -1$	Saddle ridge	$s \in ]\frac{1}{8}, \frac{3}{8}]$	$T = 4$
Saddle	$s \in ]-\frac{1}{8}, \frac{1}{8}]$	$T = 0$	Plane	$s \in [-1, -\frac{7}{8}]$	$T = 5$

Tableau 1.7 – Forme locale et Indice de forme, selon [Zhao 10]

### 2.2.3.c Synthèse et perspectives

L'attribut géométrique de courbure permet de mieux appréhender ses variations de forme locale. Ainsi, de nombreux travaux de recherche et réalisations industrielles s'appuient sur cette caractéristique, et montrent que comparé aux altitudes, cet attribut apporte une information supplémentaire et pertinente pour analyser l'aspect des surfaces.

Les courbures d'une surface sont obtenues soit par mesure directe soit par dérivation des altitudes ou des pentes. L'importance de la métrologie dimensionnelle en recherche ou dans l'industrie fait que l'information à disposition est souvent la topographie (altitudes) des surfaces. Il faut alors réaliser une opération de dérivation pour obtenir l'information en courbure, qui si en elle-même ne présente pas de difficulté, nécessite le conditionnement préalable des données. La dérivation est très sensible au bruit et aux composantes haute fréquence, et si le conditionnement n'est pas réalisé efficacement les données obtenues en courbure sont souvent inexploitable (le bruit est devenu prépondérant par rapport à l'information utile). Inversement, on peut trop lisser les surfaces et particulièrement les anomalies d'aspect en réduisant la résolution ou le niveau de détail sur la surface pour filtrer le bruit avant dérivation. Cette difficulté est centrale dans le processus d'obtention des courbures.

D'autre part, nous avons présenté les indicateurs fondamentaux de courbure ( $k_{gauss}$ ,  $k_{mean}$ ), les courbures principales ( $k_1, k_2$ ) ainsi que les principaux indicateurs qui en dérivent. Chacun permet de mettre en évidence un aspect spécifique, que ce soit au niveau de la forme locale de la surface, ou encore pour mieux révéler les variations de forme locales importantes. Ces valeurs ou variations importantes de courbure sur la surface traduisent soit une anomalie locale sur la surface, soit un changement "net" dans la forme de la pièce, souhaité par le concepteur.

Nous présentons dans la section 4 comment cet attribut géométrique des surfaces peut être intégré à notre méthode, ainsi que les perspectives ouvertes par cette approche encore récente de l'analyse par les courbures de l'aspect des surfaces.

## 3 Aspect de surface & lumière

La section précédente a mis en évidence le lien entre certains attributs géométriques d'une surface et son apparence. Une autre approche consiste à voir l'*aspect* comme une fonction particulière des surfaces, directement liée à l'interaction (de la surface) avec l'environnement lumineux. L'objet est de montrer dans quelle mesure cette approche peut apporter des solutions à la problématique de l'aspect dans un cadre industriel. Dans un premier temps, nous présentons les concepts et définitions utilisées dans ces travaux, puis les principaux modèles décrivant l'interaction de lumière/surface. Nous présentons ensuite comment ces modèles peuvent être appliqués au rendu photo-réaliste, ou pour simuler un éclairage, et l'intérêt de cette approche dans le cadre de ces travaux.

### 3.1 Concepts et définitions

Cette section vise à faire une présentation des principaux modèles et grandeurs relatives à l'interaction de la lumière avec une surface, restreinte aux surfaces d'objets réels et opaques qui concernent la majorité des applications industrielles de ces travaux. Nous conseillons au lecteur qui souhaite approfondir dans ce domaine le mémoire pédagogique de V. Domurado<sup>3</sup>, ainsi que le très consistant mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches de Jean-Denis Durou [Durou 07a], qui présente notamment, dans le cadre de ses travaux sur le *Shape From Shading*, les principaux concepts liés à l'interaction d'une surface avec la lumière.

#### 3.1.1 Lois générales de la réflexion

L'interaction de la lumière avec une surface est décrite par les lois générales de Snell-Descartes. Elle peut être externe (réflexion/diffusion) ou interne (réfraction) à la surface. La réfraction ne concerne pas les matériaux opaques, et n'est pas présentée ici.

La réflexion et la diffusion visent à décrire comment une surface ré-émet le flux lumineux incident. On utilise aussi pour réflexion et diffusion les termes plus explicites de *réflexion spéculaire*, et de *réflexion diffuse*.

(i) *La réflexion spéculaire.*

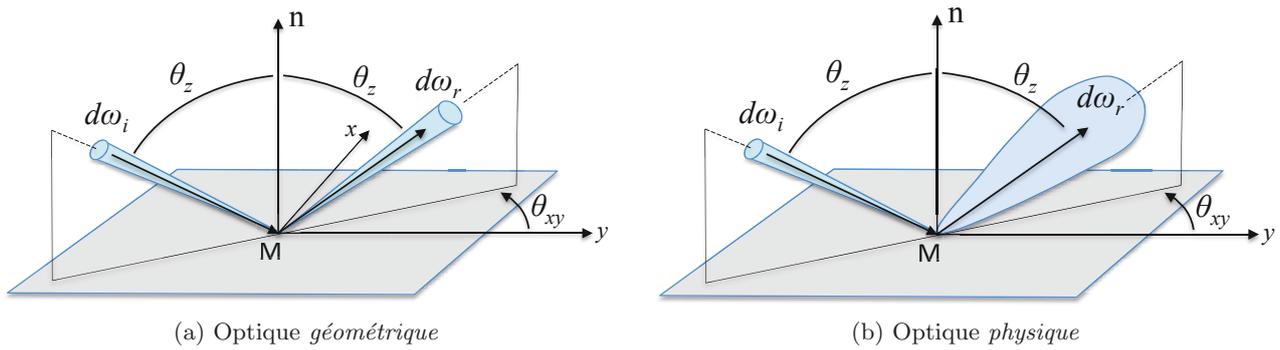
La réflexion spéculaire peut être modélisée selon deux formes simples, liées aux deux approches de l'optique :

- l'*optique géométrique* modélise la lumière par des rayons lumineux. Cette approche est suffisante pour décrire de nombreux phénomènes optiques, liés au trajet de la lumière.
- l'*optique physique* prend en compte la nature ondulatoire de la lumière.

La figure 1.18 illustre le phénomène de réflexion spéculaire selon ces deux approches.

---

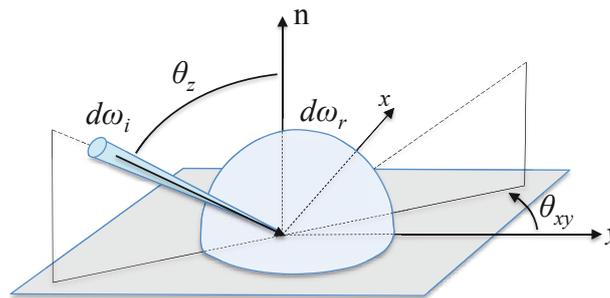
3. Vincent Domurado - *Mémoire de fin d'études* - <http://domurado.pagesperso-orange.fr/Memoire>

Figure 1.18 – Réflexion *spéculaire* sur une surface

En optique *géométrique*, la réflexion spéculaire a lieu dans une direction qui forme un angle (défini par rapport à la normale locale de la surface) égal à l'angle du rayon incident. La surface est modélisée comme parfaitement plane. En optique *physique*, la réflexion spéculaire se fait selon un *lobe de réflexion*, dont le maximum d'intensité correspond à l'angle d'incidence de la lumière. Les résultats de ce modèle sont plus proches de ce qui est observé sur les surfaces réelles. Ainsi, la forme du lobe dépend fortement de la topographie de la surface considérée. Plus la surface est rugueuse, plus le lobe sera étendu, et inversement plus la surface est lisse, plus la forme du lobe se rapproche du pic de réflexion spéculaire. La forme du lobe en fonction de l'état de surface est un lien direct entre aspect et géométrie des surfaces.

(ii) *La réflexion diffuse.*

La réflexion est diffuse sur une surface quand la lumière est réémise de façon homogène dans toutes les directions. Le modèle le plus courant de réflexion diffuse est le modèle d'éclairement de Lambert [Lambert 60]. La figure 1.19 illustre ce phénomène.

Figure 1.19 – Réflexion *diffuse* sur une surface

Dans la suite du document, une *surface spéculaire* fait référence à une surface réémettant uniquement la composante spéculaire, et une *surface lambertienne* fait référence à une surface où la lumière est intégralement réémise en diffusion, en référence au modèle développé par Lambert.

### 3.1.2 Modèle de réflexion unifié de Nayar

De nombreux modèles ont été développés pour décrire de la façon la plus complète possible les phénomènes de réflexion sur les surfaces. Il s'agit souvent de faire en sorte d'unifier partiellement ou totalement les lois générales de la réflexion présentées précédemment, afin de définir un modèle unique. Le modèle de Beckmann-Spizzichino [Beckmann 67, Beckmann 87], basé sur l'optique physique, décrit les phénomènes de réflexion sur des surfaces modélisées avec une distribution gaussienne des altitudes. Il s'applique à des surfaces qui peuvent être aussi bien polies ou rugueuses, et contient deux composantes : le *pic* et le *lobe* spéculaire. Le modèle de Torrance et Sparrow [Torrance 67, Goral 84] s'appuie sur l'optique géométrique, et modélise les surfaces comme un ensemble de micro-facettes planes, parfaitement spéculaires. Ce modèle comporte uniquement le lobe spéculaire, et le lobe de diffusion. Simple et facile à mettre en œuvre, ce modèle est très répandu, bien qu'il ne soit pas adapté aux surfaces peu rugueuses. Nous détaillons dans la suite un modèle plus complet, qui unifie les approches proposés par Beckmann-Spizzichino et Torrance-Sparrow. Il s'agit du modèle de Oren et Nayar [Nayar 90, Nayar 91, Oren 94, Dana 99b], souvent connu sous la dénomination de *modèle unifié de Nayar*.

Le modèle de Nayar décompose la réflexion du flux lumineux incident sur une surface en trois composantes : le lobe de diffusion, le lobe spéculaire, et le pic spéculaire. Ce modèle s'applique à l'ensemble des types d'état de surface. La figure 3.1.2 illustre les diagrammes de réflexion du modèle de Nayar, pour une surface rugueuse, une surface polie, et une surface de rugosité intermédiaire.

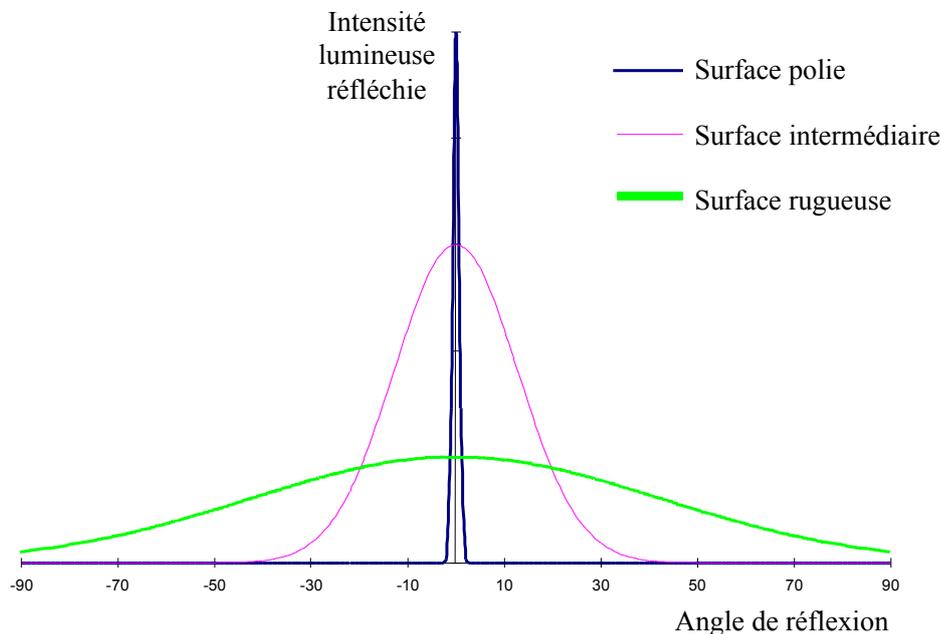


Figure 1.20 – Diagrammes de réflexion pour différentes surfaces selon le modèle de Nayar, à partir de [Aluze 98]

La combinaison des trois modèles de réflexion dans le modèle unifié de Nayar est illustrée dans la figure 1.21, issue des travaux de Zamuner [Zamuner 11]. Pour chaque angle  $\theta_r$ , l'intensité de chaque composante de la réflexion de la surface peut être obtenue par l'intersection de la direction d'observation avec chacune des trois composantes de la surface.

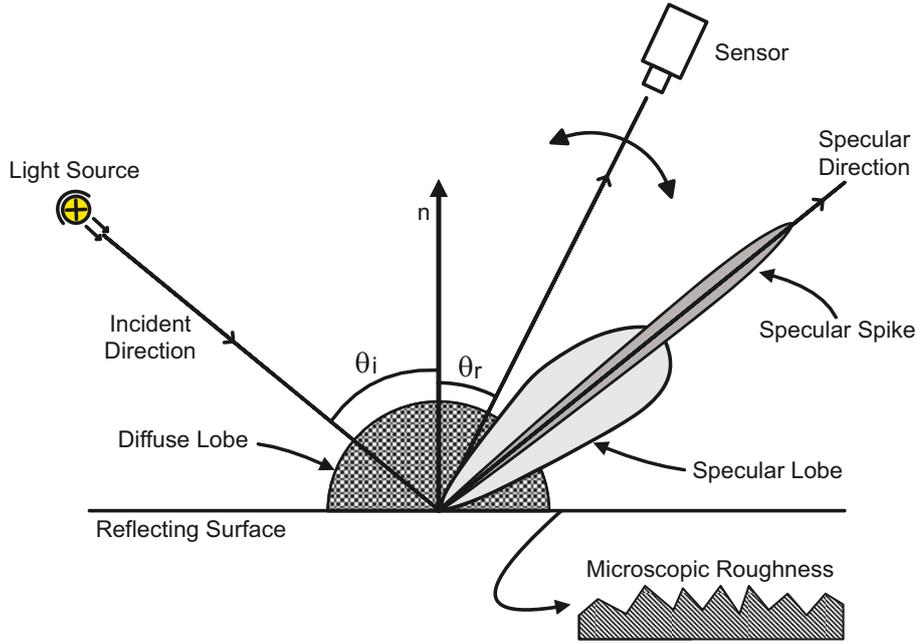


Figure 1.21 – Modèle de réflexion unifié de Nayar, à partir de [Zamuner 11]

### 3.2 Bidirectional réflectance distribution function (BRDF)

Pour les surfaces opaques, le modèle qui décrit de façon la plus fine l'interaction de la surface avec son environnement lumineux, c'est à dire comment la lumière est réémise par la surface (mélange de réflexion et de diffusion) est la *fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle* (en anglais : BRDF) [Durou 07a], initialement définie par Nicodemus [Nicodemus 65, Nicodemus 77].

La *réflectance*, aussi appelée *albédo*, est définie comme le rapport entre le flux lumineux réémis dans toutes les directions par la surface, et le flux lumineux incident, dans une direction donnée  $\vec{u}_i$

Ainsi, pour un élément de surface  $d\Sigma$ , la fonction BRDF est définie comme étant le rapport entre la luminance  $dL(\vec{u}_e)$  de l'élément de surface, et l'éclairement qu'il reçoit, noté  $dE$ . L'expression de la BRDF est donnée par l'équation 1.17. Les paramètres de la fonction sont illustrés dans la figure 1.22. La luminance est donnée en lumen par stéradian, ou candela ( $cd$ ), l'éclairement est donné en lumen par mètre carré, ou lux ( $lx$ ), et l'unité de la BRDF est l'inverse du stéradian ( $st^{-1}$ ). Il existe une définition plus complète de la BRDF, appelée *BRDF spectrale* qui modélise le comportement du matériau en fonction de la longueur d'onde du flux lumineux qui éclaire la surface, non présentée dans ces travaux.

$$f(\theta_i, \phi_i, \theta_e, \phi_e) = \frac{dL(\vec{u}_e)}{dE} \quad (1.17)$$

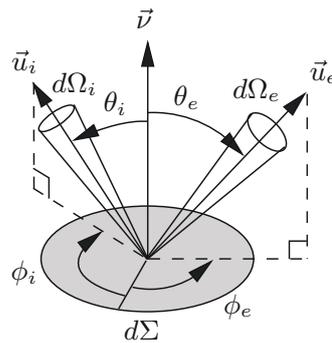


Figure 1.22 – Définition des angles  $\theta_i$ ,  $\phi_i$ ,  $\theta_e$ ,  $\phi_e$  selon [Durou 07a]

Dans la pratique, il existe deux moyens d'utiliser l'information de réflectance d'une surface. La première consiste à **mesurer la réflectance** sur un échantillon de la surface de l'objet, et de l'appliquer à l'ensemble de l'objet, afin de simuler son rendu visuel. Cette stratégie n'est pas satisfaisante dans le cas d'anomalies d'aspect locales sur une surface. Elle peut cependant permettre d'apporter une réponse complète à la problématique des anomalies d'aspect globales. Dans ce cas, la mesure de la réflectance d'une surface peut être réalisée avec un appareil de type *gonio-reflectomètre* [Murray-Coleman 90, Dana 99b, Koenderink 96]. La difficulté de ce type d'approche est son coût en terme de temps de calcul, ainsi qu'en quantité de données à acquérir et à traiter pour un échantillon de surface, même si des méthodes de compression par approximation ont été mis en place, par exemple en utilisant des harmoniques sphériques [Westin 92] ou des modèles non linéaires [Lafortune 97].

La seconde approche consiste à **modéliser la réflectance**. On peut alors ne mesurer que les paramètres nécessaires au modèle, puis approximer pour chaque point de la surface la fonction réflectance par interpolation à partir des données mesurées. Un champ d'applications de ce type de technique est lié à la réalité virtuelle (films d'animations, jeux vidéos, CAO, etc.). Le rendu visuel des objets recherché n'est alors pas forcément photo-réaliste. On parle dans ce cas de *model-based rendering*. Le second champ d'application de cette technique consiste à photographier un objet sous de multiples angles de vue et/ou d'éclairages afin de modéliser en chaque point sa réflectance, et ainsi de pouvoir simuler un rendu photo-réaliste quelles que soient les conditions d'éclairages. Dans le cadre de ces travaux, ce type d'approche est particulièrement intéressant, car il correspond exactement à ce que font les experts visuels durant l'inspection des surfaces, en faisant varier l'orientation de la pièce par rapport à l'éclairage, afin de "mieux voir" les anomalies. Une de ces techniques, appelée *Polynomial Texture Mappings*, souvent utilisée dans le domaine de l'archéologie et de la conservation, permet de voir la surface avec un niveau de détail que la vision "classique" (images et traitement) ne permet pas. Nous proposons de mettre en œuvre cette technique dans le cadre de l'analyse d'aspect des produits à haute valeur ajoutée, afin d'apporter une aide aux experts visuels, en particulier lors de l'étape de détection du contrôle visuel. Le chapitre 4 présente nos réalisations les travaux réalisés dans cette direction.

## 4 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter un état de l'art de différentes approches de la qualité des surfaces :

- L'approche *humaine*, basée sur l'analyse sensorielle
- L'approche *géométrique*, basée sur la mesure et son interprétation
- L'approche *lumière*, basée sur la modélisation et l'interprétation des interactions surface/environnement lumineux.

L'approche humaine est aujourd'hui le premier moyen d'analyse de l'aspect d'une surface. Elle repose sur la perception visuo-tactile des produits. Dans le cadre industriel, la faculté de l'humain à analyser son environnement visuel a permis de mettre en œuvre le contrôle d'aspect des surfaces pour les produits à haute valeur ajoutée, c'est l'*analyse sensorielle*.

Le développement et la formalisation des méthodologies, à la manière de ce qui est réalisé en contrôle dimensionnel, a permis de réduire sensiblement la variabilité inhérente du contrôle humain. On parle de *métrologie sensorielle*. Actuellement, cette approche est très répandue dans les entreprises du fait de la relative simplicité de mise en œuvre, de la flexibilité de cette approche vis à vis de la typologie des produits et des anomalies d'aspect à analyser, et malgré les inconvénients et particulièrement les coût de non-détection et/ou de sur-qualité liés à la variabilité de cette méthode.

L'approche géométrique de l'analyse de l'aspect des surfaces est aujourd'hui quant à elle très peu utilisée, mis à part dans certains domaines d'application spécifiques. Cependant, les capacités grandissantes des moyens de mesure, en terme de points de mesure, d'étendue de mesure, et de temps d'acquisition des données, ouvrent progressivement la voie à ce type d'approche. L'objectif est d'identifier des critères objectifs liés à la géométrie de la surface, en lien direct avec l'impact visuel des anomalies de surface. La seconde partie de ce premier chapitre a permis de présenter la chaîne de mesure, de l'acquisition des données jusqu'à la définition et le choix d'indicateurs géométriques de surface en lien avec la qualité d'aspect. Nous présentons dans le chapitre 2 nos travaux relatifs à cette approche, basés sur un nouveau paramétrage des surfaces qui permet notamment d'envisager le calcul des courbures de façon plus robuste.

L'interaction des surfaces avec la lumière peut aussi permettre d'établir des critères objectifs en lien avec le rendu visuel. La troisième partie de ce premier chapitre a permis de présenter les différentes modélisations de l'interaction entre une surface et son environnement lumineux. Nos travaux sur cette approche visent à répondre spécifiquement à la problématique de détection, ce que l'approche géométrique ne permet pas de réaliser aujourd'hui dans le contexte industriel des produits à haute valeur ajoutée dans un temps raisonnable. Nous décrivons dans le chapitre 4 l'intérêt et la mise en œuvre de la technique *Polynomial Texture Mappings* pour aider à détecter les anomalies d'aspect, et ainsi permettre de segmenter les surfaces en zones critiques.

## Approche géométrique de la qualité d'aspect - De la mesure au comportement visuel des surfaces

### *Objectif du chapitre*

*Après avoir effectué un état de l'art sur la caractérisation de l'aspect d'une surface, nous présentons dans ce chapitre une approche géométrique de l'analyse de la qualité d'aspect d'une surface. Nous montrons d'abord comment décomposer efficacement une surface mesurée, pour isoler les composantes pertinentes dans le cadre de ces travaux. Nous montrons ensuite comment interpréter les résultats de décomposition obtenus, puis comment extraire de ces informations des critères objectifs, liés à la géométrie des surfaces, permettant d'évaluer la qualité d'aspect.*

## 1 Introduction

Pour répondre à la problématique de l'analyse de la fonction aspect d'une surface par une approche géométrique, Legay propose la définition suivante, dans le cadre de ses travaux sur la caractérisation morphologique des défauts d'aspect [Legay 05a] :

« *Un défaut d'aspect traduit une rupture de continuité de forme sur la surface* »

Au niveau du vocabulaire, nous avons montré dans le chapitre 1 qu'il est souhaitable de privilégier le terme *anomalie* au terme *défaut*. En effet, le terme défaut dans son usage usuel fait référence à une non-qualité du produit, généralement considéré par suite comme non acceptable. Le terme anomalie ne préjuge pas de sa criticité : une anomalie peut être acceptable ou non acceptable. De plus, si la définition précédente permet de décrire dans une très large majorité les anomalies de surfaces locales (de type coups, impacts, pollutions locales et marques), il est nécessaire de l'adapter pour le cas des anomalies *globales*, de type hétérogénéité entre différentes surfaces, ou éventuellement entre différentes zones d'une même surface.

Nous proposons donc les définitions suivantes :

- (i) | Une anomalie locale d'aspect traduit une rupture de continuité de forme sur la surface
- (ii) | Une anomalie globale d'aspect traduit une hétérogénéité entre différentes surfaces (ou parties d'une même surface)

D'un point de vue géométrique, une *rupture de continuité de forme* correspond à une variation locale forte de la géométrie de la surface et peut être vue au niveau des altitudes, des pentes, ou des courbures sur la surface. De plus, une variation locale de géométrie sur une surface est par définition *non-périodique*. Ainsi, selon les ordres de défauts surfaciques tels que définis dans le chapitre 1, les composantes géométriques liées à la fonction aspect d'une surface sont essentiellement de l'ordre de la rugosité, i.e. de l'état de surface.

L'objectif de l'approche développée dans cette section est de caractériser les composantes géométriques de la surface correspondant aux anomalies d'aspect, afin d'apporter une aide lors du processus de contrôle de la qualité visuelle des surfaces, pour mieux détecter, et/ou mieux évaluer, et/ou mieux décider de la conformité de la surface ou non. Pour répondre à cette problématique, nos travaux s'organisent selon les cinq actions suivantes :

- **Décomposer** (de façon multi-échelle) la surface mesurée, à partir d'une méthode liée à la périodicité afin de filtrer les composantes de forme et d'ondulation, très généralement non liées à la fonction visuelle de la surface
- **Caractériser** le résidu de la décomposition, non périodique, i.e. la composante de rugosité de la surface
- **Isoler** dans la composante de rugosité les éléments surfaciques liés à l'aspect de la surface, en filtrant les composantes liées au bruit de mesure et si possible à la texture de la surface
- **Analyser ces données** afin d'évaluer l'impact visuel des anomalies caractérisées sur la surface, notamment au moyen de l'analyse des champs de pentes et de courbures (calculés par dérivation(s) de l'information en altitudes)
- **Évaluer** la criticité des anomalies d'aspect identifiées, afin de décider de l'acceptabilité ou non de la surface à partir de critères objectifs liés à la géométrie de la surface

Nous développons dans la suite les réponses apportées autour de ces 5 actions.

## 2 Décomposition multi-échelle des surfaces

Le premier axe de recherche développé dans ces travaux consiste à procéder à une décomposition multi-échelle des surfaces, afin d'isoler la composante liée à l'état de surface contenant l'information liée à la fonction aspect, i.e les anomalies ayant un impact sur la perception visuelle de la surface. De nombreuses méthodes de décomposition multi-échelle existent dans la littérature, et notamment la décomposition en ondelettes, la décomposition en cosinus, ou la **Décomposition Modale Discrète** (DMD), détaillées dans la section 2.1. Le tableau 2.1 présente une classification non exhaustive des

principaux paramétrages de surface existants, proposée par Favrelière [Favrelière 09] dans le cadre de ses travaux sur le paramétrage modal.

	Paramétrage Local	Paramétrage Global
Description	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Transformée en cosinus discrète (DCT) appliquée au JPEG</li> <li>– décomposition sous structurale</li> </ul>	<p><b>Par des descripteurs <i>a priori</i> :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– décomposition de Fourier</li> <li>– décomposition en cosinus</li> <li>– Harmoniques sphériques</li> <li>– Polynômes de Zernike</li> <li>– Polynômes de Chebyshev</li> <li>– décomposition en Ondelettes</li> <li>– décomposition modale</li> </ul> <p><b>Par des descripteurs <i>a posteriori</i> :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Analyse en Composantes Principales</li> <li>– décomposition Modale Empirique</li> </ul>
Reconstruction	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Courbes et surfaces paramétrées</li> <li>– Modèles de contours actifs</li> <li>– Modèle local basé sur des superquadriques</li> <li>– Surfaces fractales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Surfaces de niveaux</li> <li>– Modèle basé sur des superquadriques</li> <li>– Enveloppe convexe</li> <li>– Construction de formes technologiques</li> </ul>

Tableau 2.1 – Classification des principaux paramétrages de surface, selon [Favrelière 09]

La méthode choisie dans le cadre de ces travaux est la Décomposition Modale Discrète. Comme indiqué dans le tableau précédent, cette méthode est définie à partir de descripteurs *a priori*, i.e. non dépendants de la mesure de la surface considérée. Dans le cas de la DMD, ces descripteurs sont issus de la mécanique vibratoire, et sont appelés modes. Ils constituent un ensemble, ou une base de formes élémentaires qui permettent de décrire explicitement les différentes composantes d’une surface (le paramétrage modal est dit *descriptif*). Par nature, les descripteurs de la DMD sont donc intrinsèquement liés à la notion de périodicité, essentielle dans le cadre de ces travaux.

Les travaux préalables de Perpoli [Perpoli 04], Samper [Samper 06, Samper 07b, Samper 07a], Formosa [Formosa 05] et Favrelière [Favrelière 07b, Favrelière 07a, Favrelière 08], ont permis de définir les principes de cette méthode, initialement dédiée à la caractérisation du défaut de forme. Nous détaillons dans la suite de cette partie comment cette méthode a été généralisée afin de s’appliquer à des nuages de points mesurés plus denses, et de décrire les composantes sur une large gamme de pseudo-fréquences, de la forme à la rugosité. Nous montrons comment cette méthode permet d’extraire de façon performante l’ensemble des composantes périodiques d’une surface, pour caractériser la micro-rugosité, non périodique, qui correspond souvent à l’information utile dans le cadre de l’analyse de l’aspect d’une surface.

## 2.1 La Décomposition Modale Discrète

### 2.1.1 Principe

La **D**écomposition **M**odale **D**iscrète (DMD) est une méthode de décomposition des surfaces utilisables pour tous types de géométrie de référence (profils ou surfaces). La DMD a dans un premier temps été développée pour caractériser les variations de forme, voire d'ondulation [Formosa 05, Favrelière 09]. Cette application de la méthode est l'objet d'une normalisation (norme française en cours de rédaction). L'application de la méthode au cadre de l'analyse de l'aspect des surfaces a nécessité sa généralisation à l'ensemble des variations géométriques d'une surface, de la forme à la rugosité. Un exemple d'application sur surfaces de prothèses de hanche est présenté dans [Grandjean 11].

Dans le contexte de ces travaux, l'intérêt principal de cette méthode est de pouvoir isoler très efficacement les composantes non-périodiques des autres composantes (périodiques ou pseudo-périodiques), i.e. les composantes de forme, d'ondulation, de rugosité. Ainsi, la méthode permet à la fois de réaliser un filtrage en *fréquence spatiale* (ou en longueurs d'ondes) et d'isoler les composantes non-périodiques d'une surface, souvent essentielles pour analyser l'aspect.

La DMD consiste à décomposer un signal dans une famille de fonctions discrètes définie a priori, de la même manière que la transformée de Fourier discrète, la transformée en Cosinus [Lecompte 10], ou la transformée en ondelettes discrètes (voir Section 2.1.2).

Dans la DMD, le signal correspond à la surface mesurée, qui peut être de forme de référence quelconque (plane, cylindrique, sphérique, etc.). La famille de fonctions discrètes peut en effet être calculée en amont à l'application de la DMD pour tous types de géométries de référence.

Pour les mesures de topographies, une mesure réalisée sur une zone suffisamment réduite de la géométrie peut être caractérisée de façon générique en utilisant l'ensemble des descripteurs calculés à partir d'un plan. Dans ce cas, les premières composantes de la décomposition correspondent à la géométrie de l'élément mesuré (par exemple une portion de forme sphérique), puis les modes suivants permettent d'identifier tour à tour les variations de forme, d'ondulation, et de rugosité.

La DMD décompose une surface dans une famille de descripteurs (fonctions discrètes) appelés modes ou déformées modales (d'où le nom de la méthode). Cette famille de fonctions est définie à partir des modes de vibration de l'élément géométrique de référence, calculés par résolution de l'équation (2.2). L'ensemble de descripteurs calculés à partir de la géométrie de référence est appelé *base modale*. Cette base est calculée de façon préalable au calcul de la décomposition de la surface étudiée. On peut envisager dans certains cas d'application de la méthode de modifier par exemple les conditions limites lors du calcul des modes de vibration de la géométrie, afin de mieux correspondre à la morphologie des données à décomposer. De plus, cette méthode, présentée ici dans le cadre de nuages de points surfaciques (champs d'altitudes), est applicable de façon analogue à de nombreux types de données, par exemple des champs de température ou des images (champs de réflectance/niveaux de gris).

### 2.1.2 Opération de décomposition

Une fois la base modale définie, l'opération de décomposition consiste à exprimer de manière unique la surface mesurée ( $^{mes}V$ ) sous la forme d'une combinaison linéaire des vecteurs de la base

(Eq. 2.1), c'est à dire des modes de vibrations de l'élément géométrique de référence.

$${}^{mes}V = \sum_{i=1}^{N_q} \lambda_i Q_i + \epsilon(N_q) \quad avec \quad \begin{cases} N_q : & \text{Nombre de modes de décomposition choisis} \\ \epsilon : & \text{Résidu de la décomposition} \end{cases} \quad (2.1)$$

La détermination des modes  $Q_i$  est obtenue à partir d'une analyse modale du modèle géométrique de référence, dont la structure mécanique est caractérisée par une matrice de raideur  $K$  et une matrice de masse  $M$ . Par défaut, les conditions aux limites sont choisies de type libre-libre. Les descripteurs  $Q_i$  de la base modale sont les modes propres, i.e. les modes naturels de la structure mécanique. Ils sont obtenus par résolution d'un problème classique de mécanique vibratoire (Eq. 2.2) :

$$K \cdot q + M \cdot \ddot{q} = 0 \quad avec \quad \begin{cases} M : & \text{Matrice de masse généralisée} \\ K : & \text{Matrice de raideur généralisée} \\ q : & \text{Vecteur déplacement} \end{cases} \quad (2.2)$$

Ce problème peut être résolu analytiquement dans des cas simples (voir [Leissa 69]), ou, plus usuellement de façon numérique, par une approche éléments finis (voir [Zienkiewicz 02]), d'où le nom de Décomposition Modale Discrète. Il est possible d'ajouter aux modes naturels de la structure mécanique de référence des modes dits *technologiques*. Ces modes supplémentaires correspondent à des formes prédéfinies, et peuvent parfois permettre d'enrichir la méthode.

Pour obtenir la combinaison linéaire 2.1, l'opération de décomposition consiste à réaliser une projection vectorielle (Eq. 2.3) de la mesure  ${}^{mes}V$  dans l'espace vectoriel ( $Q$ ) constitué des modes naturels de vibrations (vecteurs  $Q_i$ ) :

$$Q^{*T} \cdot V = ((Q^T \cdot Q)^{-1} \cdot Q^T) \cdot V = \lambda \quad (2.3)$$

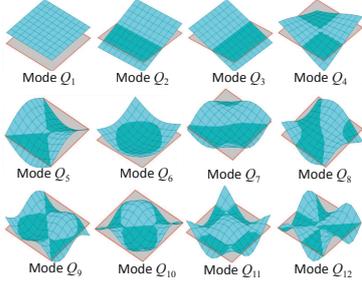
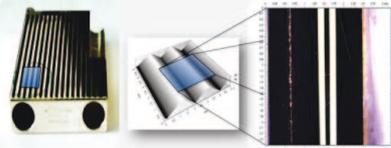
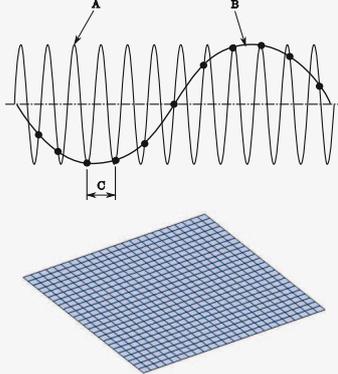
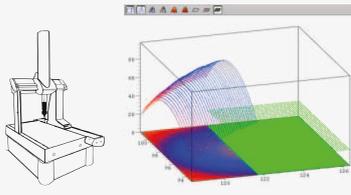
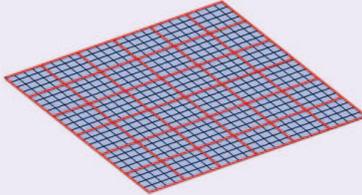
Le vecteur résultat  $\lambda$  représente alors l'ensemble des contributions  $\lambda_i$  de chacun des modes ( $Q_i$ ) de la base vectorielle ( $Q$ ). Les composantes  $\lambda_i$  sont appelées coordonnées modales ou coefficients modaux. La base modale étant non orthonormale, il est nécessaire d'utiliser la base duale  $Q_i^*$ .

Les vecteurs ( $Q_i$ ) sont normés avec la norme infinie ( $\|Q_i\|_\infty = 1$ ), afin d'obtenir les contributions modales  $\lambda_i$  en valeur métrique, de façon homogène avec la surface mesurée.

## 2.2 Généralisation de la méthode : de la forme à la rugosité

Comme mentionné précédemment, cette méthode a initialement été développée pour paramétrer le défaut de forme d'une géométrie. L'analyse du lien entre géométrie et rendu visuel d'une surface nécessite de mesurer les surfaces finement, et d'appliquer la décomposition à des nuages de points conséquents (de l'ordre de  $10^7$  points mesurés). La taille des anomalies d'aspect peut en effet être très réduite ( $< 10^{-3}$  mm) relativement à l'impact visuel produit, ce qui implique une mesure fine des surfaces. Pour traiter des données de cette densité et caractériser (décomposer) les composantes de la surface sur une large gamme de longueur d'onde, il est nécessaire d'adapter la méthode. L'évolution proposée consiste à généraliser la DMD à la caractérisation des composantes de l'ordre de la rugosité, et à adapter l'algorithme à la dimension des données mesurées.

Le tableau 2.2 décrit les différentes étapes de la DMD généralisée, et présente les apports réalisés dans le cadre de ces travaux. Chaque étape et sa mise en œuvre dans le cadre particulier de l'analyse de la fonction aspect est ensuite détaillé.

Étapes		Description	Illustration	Dimension
E0	Construction de la base de descripteurs	Construction de la base modale naturelle de l'élément géométrique de référence, généralement un plan (si l'on souhaite caractériser l'état de surface)		$N$ lignes $\times$ $M$ colonnes $\times p$ modes
E1	Identification des surfaces ou sous-surfaces fonctionnelles (Aspect des surfaces)	Extraire les surfaces, ou zones fonctionnelles à caractériser et identifier leur typologie dans la classification des éléments géométriques idéaux (plan, cylindre, etc.)		
E2	Choix du niveau « modal » & Discretisation de(s) surface(s) identifiées (création du maillage)	Déterminer le nombre de points de mesure nécessaire pour décrire la complexité du défaut recherché (critère de Nyquist) et Construction d'un réseau de points sur la (ou les) surface(s) fonctionnelle(s)		$n$ lignes $\times$ $m$ colonnes
E3	Mesure : Choix du moyen & Acquisition	Choisir un moyen de mesure permettant d'acquérir les points sur le maillage de mesure, et exporter les données (coordonnées XYZ des points mesurés)		$n$ lignes $\times$ $m$ colonnes
E4	Sous-échantillonnage	Sous-échantillonnage de la mesure ( $n \times m$ ) à la taille des éléments de la base de descripteurs ( $N \times M$ ), par interpolation au point mesuré le plus proche		$N$ lignes $\times$ $M$ colonnes

suite sur la prochaine page...

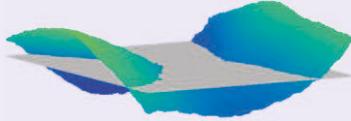
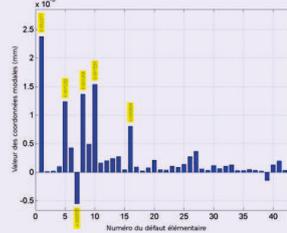
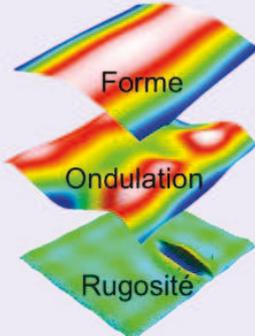
Étapes		Description	Illustration	Dimension
E5	Association	Calcul des écarts en chaque point de la surface sous-échantillonnée par rapport à l'élément géométrique de référence (exemple : critère des moindres carrés)		$N$ lignes $\times$ $M$ colonnes
E6	Décomposition (DMD)	Projection des écarts résiduels interpolés ( $N \times M$ ) dans la base des descripteurs ( $N \times M \times p$ )		Contributions modales ( $p \times 1$ )
E7	Visualisation & caractérisation	Exploiter les résultats issus de la DMD, et caractériser les composantes de Forme, Ondulation et Rugosité		$N$ lignes $\times$ $M$ colonnes
E8	Interpolation & Filtrage	Interpolation des composantes caractérisées ( $N \times M$ ) à la dimension des surface mesurées		$n$ lignes $\times$ $m$ colonnes
E9	Interprétation des résultats	Analyser les modes prépondérants, les composantes caractérisées en relation avec la fonction considérée		

Tableau 2.2 – Etapes de la décomposition Modale discrète généralisée

**Légende** (tableau 2.2)

-  étape réalisé en amont de la méthode
-  étapes liées à la *Mesure*
-  étapes liées au *Traitement* des mesures
-  étape d'*Interprétation* des résultats

Nous développons dans la suite de cette section les différentes étapes de cette méthode, ainsi que son application au cadre de l'analyse de l'aspect.

### 2.2.1 Etape E0 : Construction de la base des descripteurs

Nous avons montré préalablement qu'il est nécessaire de disposer d'une densité importante de points afin de pouvoir caractériser à la fois l'état de surface et sa qualité d'aspect à partir de caractéristiques géométriques. La composante de forme de la surface apporte généralement peu d'information pertinente en terme d'analyse de la qualité d'aspect. De façon générale, nous préconisons ainsi de se servir d'une base de formes élémentaires calculées à partir d'un plan (en amont de la décomposition), les descripteurs de la base de décomposition sont alors les modes naturels de vibration d'une plaque calculés avec une condition aux limites libre-libre. La figure 2.1 présente les représentations des premiers modes de la base modale.

Dans ce cas, les premiers modes de la décomposition caractérisent à la fois la forme (sphère, cylindre, etc.) et le défaut de forme de la surface analysée. Si on souhaite la forme de la géométrie de référence des variations de forme, on peut associer à la surface l'élément géométrique de référence (ex : sphère associée aux moindres carrés), préalablement à la décomposition. Les premiers modes de la décomposition obtenus caractériseront alors uniquement les variations de forme de la géométrie par rapport à la référence associée.

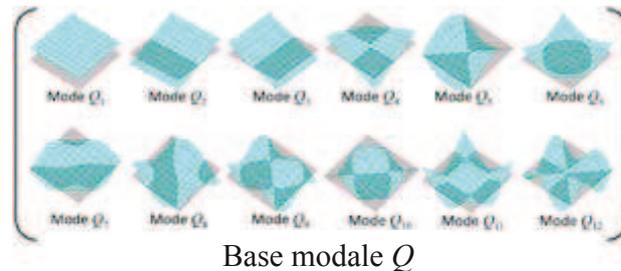


Figure 2.1 – Représentation des premiers descripteurs de la base vectorielle utilisée pour la DMD

### 2.2.2 Etape E1 : Identification des surfaces ou des sous-surfaces fonctionnelles

Dans ses travaux sur le paramétrage modal et la caractérisation des variations de forme, Favrelière [Favrelière 09] donne des indications pour le choix des surfaces fonctionnelles en fonction notamment du type de géométrie de référence considérée. Pour l'analyse de la qualité d'aspect d'une surface, il faut différencier les cas des anomalies locales et globales. De façon générale, nous préconisons dans ces travaux de séparer détection et évaluation des anomalies. Dans le cas d'anomalies d'aspect *locales*, la détection doit être réalisée en amont afin de définir les zones critiques à analyser, et ainsi de segmenter les surfaces. Une proposition en ce sens est décrite dans le chapitre 4. Dans le cas des anomalies d'aspect *globales*, les échantillons de surface à analyser et à comparer pour évaluer l'homogénéité des surfaces peuvent être choisis sur la(les) surface(s) considérée(s) en s'appuyant sur des critères statistiques.

### 2.2.3 Etape E2 : Choix du niveau modal & Discrétisation des surfaces identifiées

En fonction de la complexité de la variation géométrique que l'on cherche à caractériser, le nombre de points à mesurer sur la surface doit être adapté. De la même façon que pour une décomposition en séries de Fourier, les formes élémentaires constituant la base modale sont périodiques. En fonction du nombre d'ondulations de la variation à caractériser, on détermine l'échantillonnage minimum de la surface nécessaire pour caractériser un ordre de défaut surfacique,

à partir du critère de Nyquist. Ce critère préconise un minimum de 3 points de mesure pour décrire une ondulation. Favrelière [Favrelière 09] préconise en métrologie des surfaces d'utiliser la relation suivante, sur chacun des axes  $(x, y)$ .

$$N = 6 \times N_0 + 1 \quad (2.4)$$

où  $N_0$  représente le nombre de périodes, et  $N$  le nombre de points de mesure associés (préconisés), dans le cas d'un profil ouvert.

### 2.2.4 Etape E3 - Mesure : Choix du moyen, Acquisition & Exportation

Nous avons détaillé dans le chapitre 1 les différents moyens de mesures existants et l'influence du choix du moyen de mesure sur le type d'analyse envisagé. Cette étape consiste dans un premier temps à choisir le moyen de mesure adapté en termes de densité de points de mesure et de résolution, notamment à partir du maillage de mesure défini dans l'étape E2. Les différents critères de choix détaillés dans la section 2.1.1 (Chapitre 1) doivent aussi être pris en compte (réflectivité, type de données obtenus, contact ou sans contact, etc.).

Dans le cadre de ces travaux, nous avons principalement utilisé une machine de mesure de surface basée sur une technique optique sans contact, appelée *focalisation à champs étendu*. Les raisons de ce choix sont la capacité à acquérir un très grand nombre de points dans un temps court, la résolution latérale et verticale adaptée à la taille des anomalies à détecter et évaluer, et la capacité à mesurer des surfaces dont la réflectivité est variable. Les inconvénients liés à ce type de technique sont dans le contexte de l'analyse de l'aspect liés à l'étendue verticale assez restreinte en fonction de la sonde utilisée, et la difficulté à mesurer dans les fortes pentes. De plus, il est illusoire de réaliser avec ce type de machine la détection d'anomalies sur une pièce complète ou sur une surface trop étendue, car le temps d'acquisition est alors prohibitif.

Les données obtenues contiennent pour chaque point sa position  $(x,y)$  et son altitude  $(z)$ . Il est possible que ces fichiers ne soient pas complets, i.e. que certains points du maillage de mesure n'aient pu être acquis. Un codage spécial est attribué à ces points afin de pouvoir les identifier comme des points non-mesurés lors de traitements ultérieurs.

### 2.2.5 Etape E4 - Sous-échantillonnage

Nous disposons à ce stade d'un fichier de points mesurés, correspondant pour un plan à un maillage de taille  $n \times m$ . Dans le cas de l'analyse du défaut de forme d'une géométrie, un nombre de points restreints sur la géométrie est suffisant. Il n'est alors pas nécessaire de sous-échantillonner la surface. Dans le cas de l'analyse de l'aspect d'une surface, et plus généralement lorsque l'on souhaite caractériser l'état de surface, le maillage de mesure doit être dense. Cependant, si un nombre de points minimum est nécessaire, un trop grand nombre de points mesurés sur la surface complexifie inutilement le calcul. Nous proposons ainsi de **sous-échantillonner** la surface mesurée afin d'effectuer les opérations d'association, de décomposition, et de visualisation des différentes composantes (E5 - E6 - E7). L'opération E8 (Interpolation) permet de réaliser l'opération inverse de l'étape de sous-échantillonnage, et de recalculer les composantes de la surface, à la dimension initiale de la surface mesurée. On peut alors filtrer les différentes composantes (soustraction points par points), et visualiser les différents résidus de la DMD. L'opération de sous échantillonnage  $(n \times m)$  est réalisée par une interpolation de la mesure à la dimension de la grille interpolée  $(N \times M)$ . De nombreuses méthodes d'interpolation existent (interpolation linéaire, polynomiale, etc.) pour faire ce sous échantillonnage. En raison de la densité importante des points mesurés

par les machines de mesure de surface actuelles, nous avons simplement choisi d'interpoler la grille sous-échantillonnée au point le plus proche.

Cette méthode rend possible la mise en œuvre de la méthode pour des surfaces comportant un grand nombre de points mesurés dans un temps non prohibitif dans le contexte industriel (de l'ordre de quelques secondes). Ainsi, cette opération permet d'appliquer la méthode pour caractériser l'état de surface (i.e. la composante de rugosité), en filtrant l'ensemble des composantes périodiques de la surface, d'où le nom de *DMD généralisée*.

### 2.2.6 Etape E5 - Association

Cette étape consiste à associer au nuage de points mesurés un élément géométrique de référence, afin de calculer les écarts par rapport à la géométrie de référence. De nombreuses méthodes d'association peuvent être utilisées pour procéder à cet opération. La norme ISO 5459 [ISO-5459 11] différencie le critère de Tchebychev relatif à la forme de l'élément et le critère tangence matière. Les travaux sur l'impact du filtrage mécanique sur l'association des surfaces en métrologie 3D de Linares et al. [Linares 05] indiquent que si les points sont répartis avec une densité de probabilité gaussienne, alors il convient d'utiliser un critère de type moindres carrés. Dans la pratique, le critère des moindres carrés est souvent utilisé car il présente l'avantage d'être robuste pour des surfaces avec un grand nombre de points mesurés. Ce critère consiste à associer au nuage de points mesurés un élément géométrique tel que la somme des carrés des distances des points mesurés à l'élément associé soit minimale. Il est aussi appelé critère de Gauss.

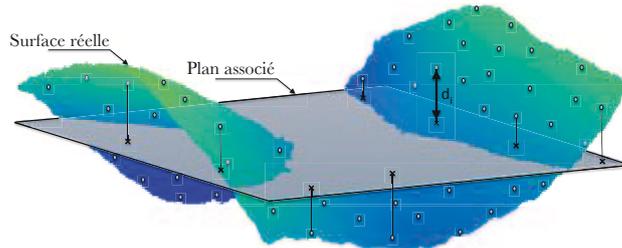


Figure 2.2 – Association par le critère de Gauss (Moindres carrés) :  $\sum d_i^2$  minimal

### 2.2.7 Etape E6 - décomposition (DMD)

L'opération effectuée dans cette étape est centrale dans la méthode, puisque la décomposition permet de déterminer les contributions de chaque forme élémentaire de la base modale dans la surface mesurée. Cette opération est réalisée par projection de la mesure dans la base modale, et est décrite plus en détail dans la section 2.1.2.

Ici, on décompose la mesure, si nécessaire préalablement sous échantillonnée à la taille des éléments de la base de descripteurs ( $N \times M$ ). On obtient ainsi un vecteur appelé *vecteur des contributions modales*, qui représente les contributions de chaque forme élémentaire présente dans la base modale. La taille de ce vecteur correspond au nombre de descripteurs présent dans la base de décomposition, c'est à dire au nombre de modes. La figure 2.3 montre une représentation de ce vecteur sous la forme d'un *spectre modal des amplitudes*.

On peut alors exprimer la surface sous sa forme décomposée (Equation 2.1), analyser les défauts prépondérants, ou caractériser les différentes composantes en recomposant une partie du spectre modal. On parle alors de *filtrage modal*.

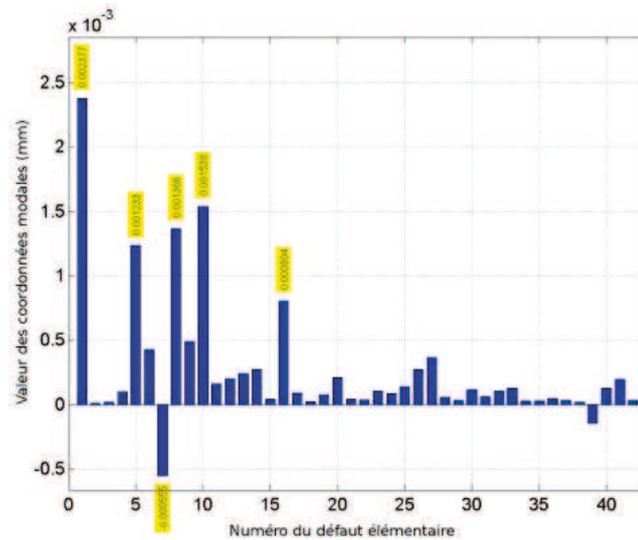


Figure 2.3 – Exemple de spectre modal des amplitudes

### 2.2.8 Etape E7 - Visualisation et caractérisation

Comme mentionné précédemment, on peut à ce point séparer les différentes composantes de la surface, en recomposant une partie du spectre de contributions modales. Le principe de cette opération est donné en figure 2.4. Les seuils  $N_f$  et  $N_o$  sont fixés par l'utilisateur de la méthode. Il peut faire varier ces seuils et visualiser en temps réel l'évolution des différentes composantes, ce qui permet d'ajuster les valeurs de  $N_f$  et  $N_o$ . En remarque, la normalisation ne préconise à ce jour pas de règle pour définir ces seuils. Dans la littérature, Raja et al. [Raja 02] apportent des éléments de réponse à ce sujet, pour les méthodes multi-échelle et le cas de la décomposition en ondelettes.

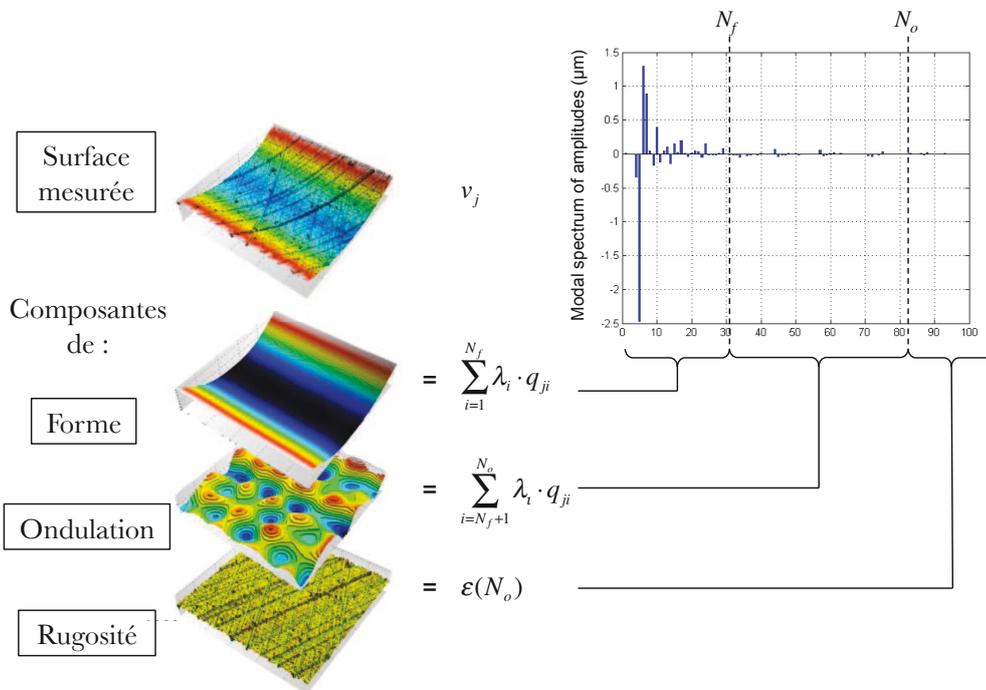


Figure 2.4 – Séparation des composantes de forme, ondulation et rugosité

### 2.2.9 Etape E8 - Interpolation

Les étapes E6 et E7 ont permis de caractériser les composantes de forme d'ondulation et de rugosité de la surface mesurée. Afin de pouvoir filtrer ces composantes, et exporter les surfaces résidu, il est nécessaire de faire l'opération inverse de sous échantillonnage décrite dans l'étape E4 (2.2.5) afin d'interpoler les différentes composantes à la dimension de la mesure initiale. De la même façon que pour l'étape E5, différentes méthodes d'interpolation existent. Nous avons choisi d'interpoler en utilisant des fonctions de forme d'ordre 3 (interpolation *cubique*).

### 2.2.10 Etape E9 - Interprétation des résultats

L'application de cette méthode permet de caractériser les différentes composantes de la surface, et éventuellement les défauts prépondérants de la surface par rapport à un élément géométrique de référence. En fonction du type d'analyse menée, on pourra interpréter différents résultats de la méthode, afin de caractériser un procédé, de mesure ou de fabrication, ou bien encore de vérifier la conformité d'une surface à une spécification. Nous développons dans ces travaux le cas particulier de l'analyse de la fonction aspect d'une surface, où le résidu de la DMD contient souvent l'information utile. Nous montrons aussi dans la suite de ce document d'autres applications de la méthode, notamment pour apporter une aide à la calibration d'une machine de mesure en caractérisant sa *signature modale*.

## 3 Application de la DMD à l'analyse de l'aspect visuel de surfaces

### 3.1 Principe

L'analyse de la qualité d'aspect d'une surface nécessite de considérer deux types d'anomalies distinctes [Baudet 11, Baudet 12] :

- (i) Les anomalies **globales** : Souvent, ce type d'anomalies concerne des phénomènes d'hétérogénéité entre surfaces ou entre différentes zones d'une même surface. Il s'agit donc de procéder à une étude de lots de surfaces afin de les discriminer en s'appuyant sur l'analyse des signatures modales. Localement, les composantes correspondant aux de forme sont aléatoires car elles dépendent de la position des zones de mesure. On ne peut comparer les composantes de forme que si ces positions sont maîtrisées, par exemple en utilisant un système de prise d'un référentiel automatiques des pièces ou en mesurant l'intégralité des surfaces.

Dans le cadre de l'analyse de l'aspect, la comparaison des résultats de la DMD porte donc essentiellement sur les composantes d'ondulation et de rugosité. Le cas des anomalies d'aspect globales est développé dans la section 3.3

- (ii) Les anomalies **locales** : ce type d'anomalies concerne l'essentiel des anomalies dans le contexte du contrôle d'aspect industriel. La problématique se pose pour les trois étapes du contrôle visuel, qui sont la détection, l'évaluation et la décision finale d'acceptabilité. Comme indiqué précédemment, l'approche *géométrique* de l'aspect des surfaces ne peut pas apporter des solutions à ces trois étapes simultanément du fait des contraintes techniques liées au temps de mesure d'une pièce complète, et du traitement équivalent à une telle quantité de données. Nous proposons donc dans ces travaux de décomposer le processus de contrôle visuel et d'apporter des solutions pour chacune des 3 étapes séparément. Ainsi, on cherche, pour ce type d'ano-

malies, à apporter une aide significative pour évaluer les anomalies visuelles en définissant des critères objectifs liés à la géométrie, qui facilitent l'évaluation de son *impact visuel*.

L'approche développée pour les anomalies locales est basée sur les deux hypothèses de travail suivantes :

- (a) *Une anomalie locale d'aspect est très souvent non périodique (cas des coups, marques, etc.)*
- (b) *Une anomalie locale d'aspect traduit une rupture dans la continuité de la forme de la surface*

Ces deux hypothèses ont conduit au choix de la DMD et aux développements présentés précédemment pour les raisons suivantes :

- (a) *Non périodicité des anomalies locales d'aspect* : Par nature, la DMD est construite sur une base de descripteurs périodiques. L'utilisation de ce paramétrage permet donc de caractériser avec précision l'ensemble des composantes périodiques de la surface, sur une large gamme de longueur d'ondes. Ainsi, cette méthode permet d'isoler les composantes non périodiques de la surface, en filtrant l'ensemble des composantes calculées par la décomposition modale, i.e. en analysant le résidu de la DMD. Les composantes non-périodiques de la surface contiennent aussi des éléments liés au bruit de mesure, et particulièrement des *points aberrants*. La DMD permet aussi de filtrer ces points, qui perturbent sensiblement l'interprétation des résultats. Cet aspect de la méthode est développée en détail dans la section 2. Le choix de cette méthode permet donc de séparer très finement les composantes non-périodiques de la surface des autres composantes, ce qui facilite la caractérisation géométrique, et donc l'évaluation des anomalies d'aspect locales sur les surfaces.
  
- (b) *Rupture de continuité de forme* : une rupture de continuité de forme sur une surface se traduit d'un point de vue **géométrie** par une *variation forte de courbure*. D'un point de vue **lumière** elle se traduit par une *variation forte de réflectivité*. Un objectif de ces travaux est donc d'aller au delà de l'information en altitudes en apportant des éléments nouveaux sur le lien entre courbure et aspect d'une surface. Les cartographies en courbures sont obtenues par deux dérivations successives de l'information en altitude de la surface. Nous montrons dans la suite de ces travaux que la DMD facilite les opérations de dérivation, tout en filtrant efficacement le bruit de la surface, qui perturbe fortement la dérivation.

Le cas des anomalies d'aspect locales est développé à travers des exemples d'application dans la section 3.2.

La figure 2.5 synthétise notre stratégie d'analyse d'aspect de surfaces pour ce qui concerne l'approche géométrique.

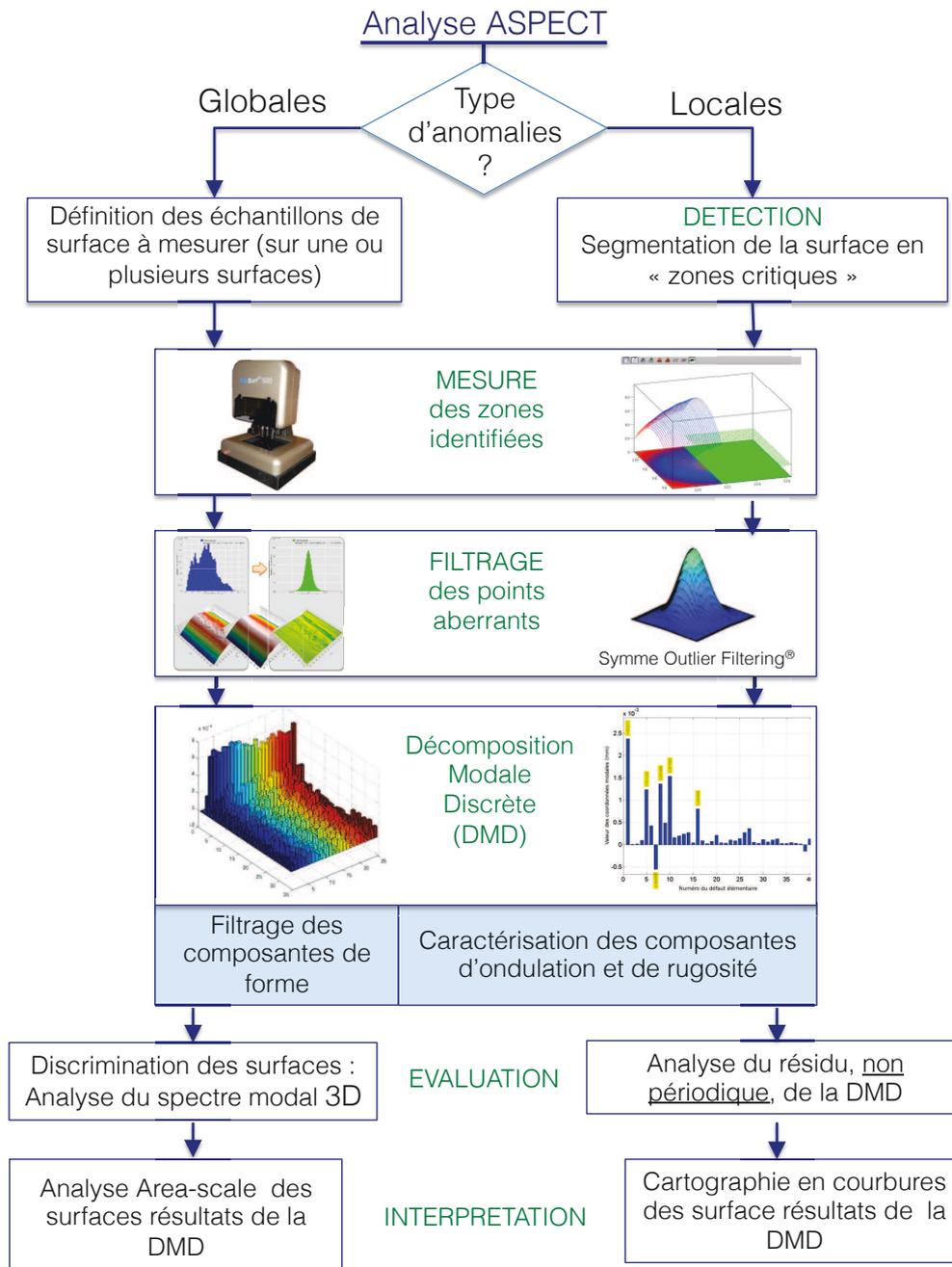


Figure 2.5 – Mise en œuvre de la DMD pour l'analyse de la fonction *aspect de surface*

## 3.2 Cas des anomalies d'aspect *locales*

### 3.2.1 Échantillons

Nous avons choisi deux exemples d'applications de la méthode (Figure 2.6) dans le cas d'anomalies d'aspect *locales*. Il s'agit de produits à haute valeur ajoutée pour lesquels la qualité d'aspect des surfaces est essentielle. L'étude est menée de façon analogue pour les deux échantillons.

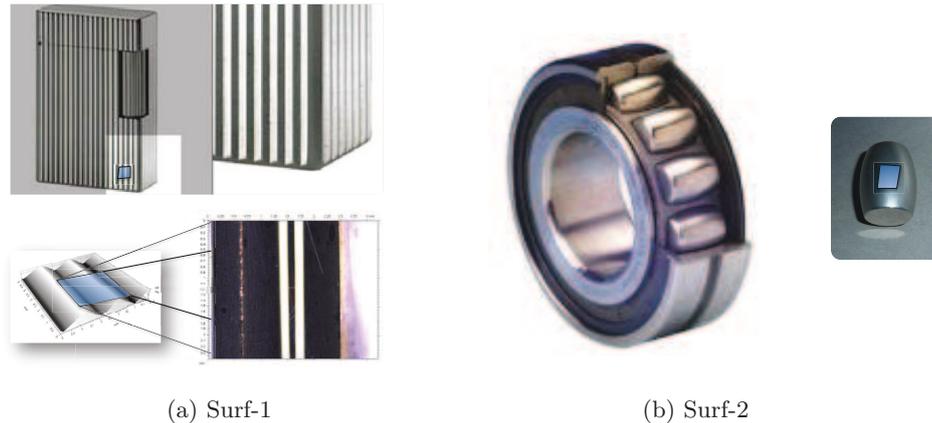


Figure 2.6 – Exemples d'application de la méthode pour des anomalies d'aspect *locales*

**Surf-1** : Briquet de prestige, face latérale. Il s'agit d'un briquet à haute valeur ajoutée dont les surfaces latérales sont décorées par des lignes de *guilloche*<sup>1</sup>. Après l'opération de guillochage, les briquets sont laqués avec un métal précieux puis polis afin d'obtenir l'aspect de surface requis. De nombreuses opérations sont réalisées à la main et nécessitent au total jusqu'à 100 heures de travail.

Cette surface présente des anomalies de surface de type *marque*, liées à un arrachement de matière en fond de lignes lors de l'opération de guillochage. Ces anomalies de taille très réduite sont difficiles à détecter et représentent pour l'entreprise une préoccupation particulière. En effet, elles apparaissent en cours de processus de fabrication, avant les opérations d'ajout de métaux précieux (laquage), qui amplifient son impact visuel. De plus, ce type d'anomalies ne peut pas être corrigé par des retouches de type polissage du fait de sa position en fond du motif de guilloche. Actuellement, ces anomalies sont détectées uniquement par un contrôle visuel humain. On compte parfois jusqu'à 300 opérations de contrôle sur ce type de produits avant sa mise sur le marché.

**Surf-2** : Élément roulant de roulement, surface latérale (diamètre). Il s'agit d'un rouleau de forme *tonneau* dont les surfaces sont associées à la fonction principale du roulement. Un contrôle d'aspect visuel est réalisé pour évaluer la qualité de l'état de surface des produits, et prévenir une altération trop rapide du roulement. Ce contrôle est effectué au cours du processus de fabrication (fournisseur), puis à la réception du roulement par le client pour certaines utilisations spécialement critiques (domaine aéronautique par exemple). L'objectif de ce type d'étude est d'apporter une aide aux experts visuels pour *détecter* et *évaluer* la qualité d'aspect des surfaces et particulièrement évaluer la criticité des anomalies d'aspect locales.

Cette surface présente des anomalies de surface de type *coup*, liées principalement aux manipulations des pièces durant la fabrication, le contrôle et le montage des roulements.

### 3.2.2 Mesure

De nombreux procédés de mesure mécaniques et optiques permettent de mesurer finement la topographie d'une surface (voir chapitre 1). Pour les deux échantillons, les surfaces ont été mesurées

1. *Guillochage*. Opération de gravure de motifs précis et réguliers composés de lignes droites, brisées ou courbes sur des pièces planes ou bombées. Il existe deux types principaux de machines à guillocher : celles (appelées *ligne droite*) permettant de graver des lignes droites ou brisées et celles (appelées *tour à guillocher*) permettant de graver des motifs circulaires

avec une machine de mesure<sup>2</sup> basée sur la microscopie confocale [Udupa 00a, Udupa 00b] à champ étendu, équipée d'une sonde optique confocale chromatique<sup>3</sup> de profondeur de champ de  $300\ \mu\text{m}$ , et de précision axiale en  $Z$  de  $0.06\ \mu\text{m}$ . Le principe de cette technique de mesure optique sans contact est rappelé dans le tableau 1.5a.

Le tableau 2.3 synthétise l'ensemble des paramètres de mesures utilisés pour l'acquisition des surfaces *Surf-1* et *Surf-2*. Une représentation 3D des surfaces mesurées sur les deux échantillons est donnée en Figure 2.7.

	Moyen de mesure	Zone de mesure	Pas en X	Pas en Y
Surf-1	Altisurf 520 + sonde CL2 ( $330\ \mu\text{m}$ )	$486 \times 751$ points	$2\ \mu\text{m}$	$2\ \mu\text{m}$
Surf-2	Altisurf 520 + sonde CL2 ( $330\ \mu\text{m}$ )	$3037 \times 7288$ points	$0.986\ \mu\text{m}$	$0.986\ \mu\text{m}$

Tableau 2.3 – Principaux paramètres de mesure, pour les surfaces Surf-1 et Surf-2

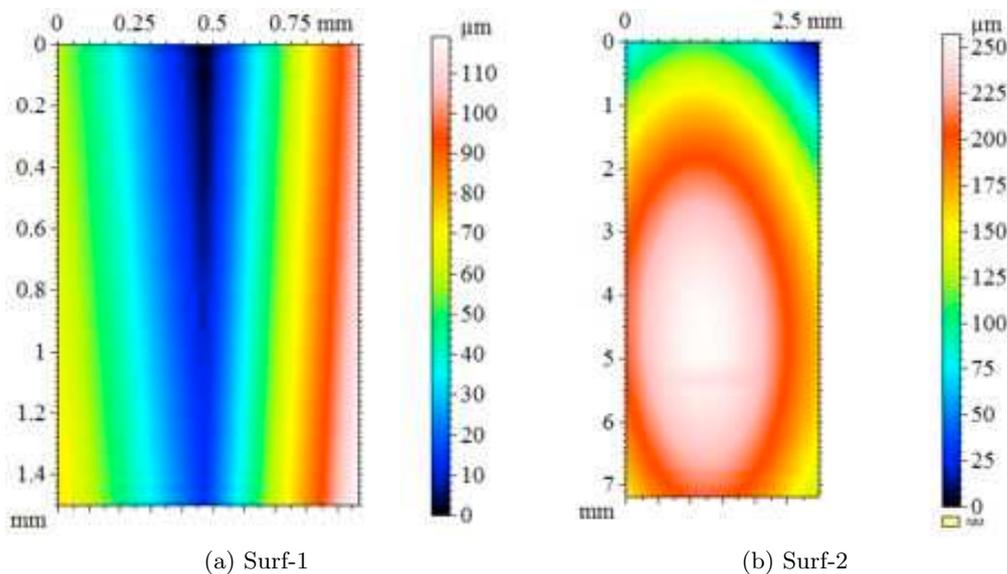


Figure 2.7 – Représentation des surfaces mesurées sur les 2 échantillons

### 3.2.3 Filtrage des points aberrants

On constate souvent dans les données mesurées la présence de points anormalement éloignés de l'ensemble des données ou de leur voisinage. Ces points aberrants, parfois nombreux, prennent généralement la forme de pics sur les surfaces mesurées (type Dirac). Ils sont par nature apériodiques. Dans le cadre de l'analyse de l'aspect des surfaces et particulièrement dans le cas d'anomalies *locales*, ces points perturbent l'analyse d'aspect en polluant l'information *utile*, souvent contenue dans la composante de rugosité, ou d'état de surface. Cette étape de préparation initiale des surfaces est d'autant plus essentielle dans le cas où on met en œuvre des analyses liées à la dérivation de l'information en altitude, de type cartographie en pentes ou en courbures de la surface. Nous proposons une nouvelle méthode d'identification et de traitements de ces points aberrants, décrite en détail dans le chapitre 3 (section 2). La figure 2.8 montre les surfaces avant et après filtrage des points aberrants, ainsi que différents paramètres de filtrage utilisés pour l'identification des points aberrants sur les échantillons de surface *Surf-1* (Figure 2.8a) et *Surf-2* (Figure 2.8b).

2. Altisurf 520, équipée d'une sonde confocale chromatique CL2, Société *Altimet*, [www.altimet.fr](http://www.altimet.fr)

3. Société *Still*, [www.stillsa.com](http://www.stillsa.com)

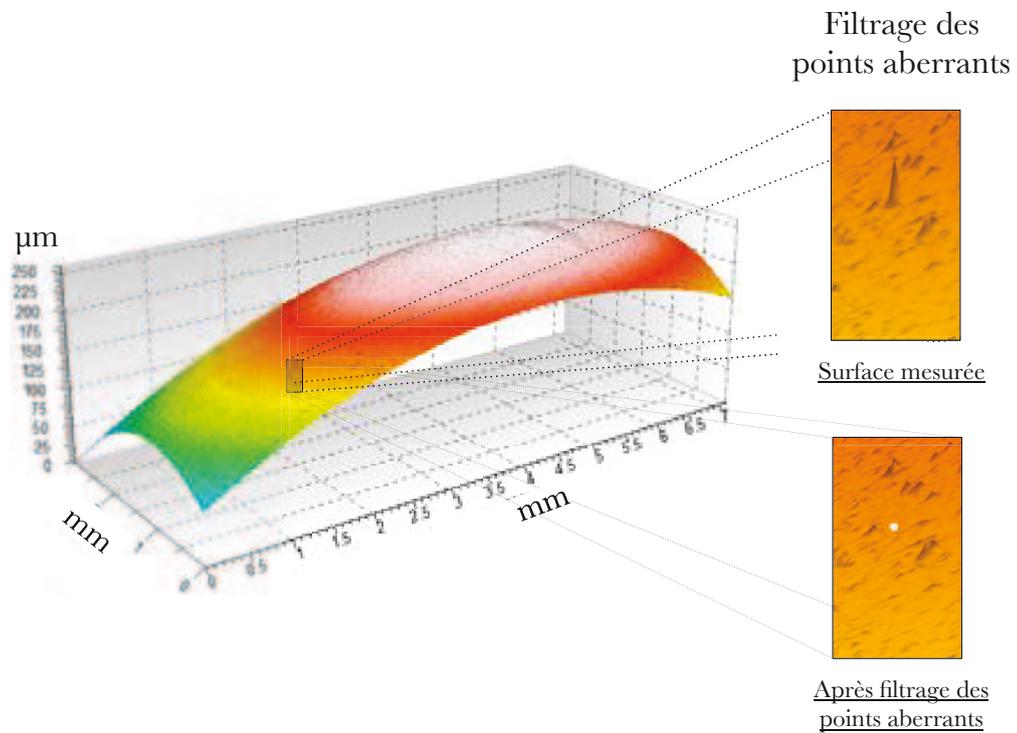
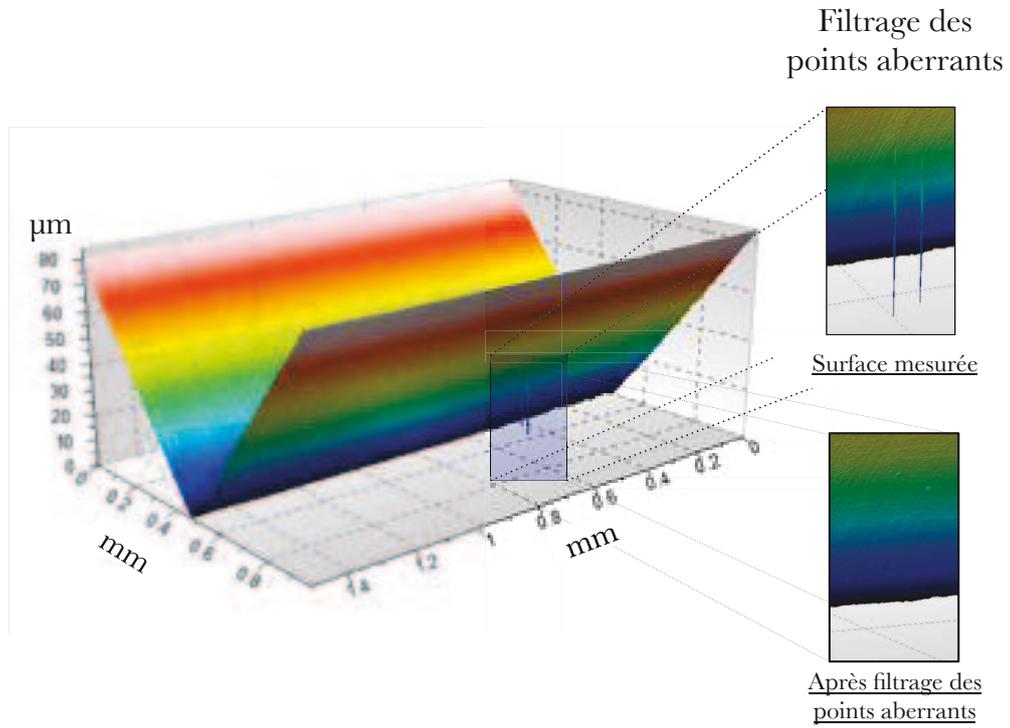


Figure 2.8 – Etape de filtrage des points aberrants

### 3.2.4 Décomposition multi-échelle par la méthode modale (DMD)

On montre ici comment est mis en œuvre la **D**écomposition **M**odale **D**iscrète sur les surfaces d'application, dans le cadre de l'analyse de la qualité d'aspect des surfaces. L'objectif est de séparer les différentes composantes de la surface en fonction de leur pseudo-fréquence (forme/ondulation/rugosité) et de leur typologie (Composantes périodiques, de classe  $C_1$  ou plus / Composantes non périodiques, de classe  $C_0$ ). Ces opérations de filtrage facilitent l'identification et la caractérisation des anomalies d'aspect locales sur les surfaces mesurées.

#### 3.2.4.a Opération d'association

Avant de décomposer la surface par la méthode modale, il est nécessaire d'associer au nuage de points mesurés une géométrie de référence. Si elle est connue, on peut envisager d'associer à la géométrie sa forme nominale, et ainsi calculer les écarts par rapport à cette référence. Cette méthode présente l'avantage de séparer le défaut de *taille* des variations surfaciques de forme obtenues à partir des premiers modes de la DMD.

Par exemple, dans le cas d'une surface de forme sphérique on peut associer à la surface considérée une sphère, puis calculer l'écart de diamètre par rapport aux spécifications de la pièce (défaut de *taille*). On obtient alors les écarts résiduels entre chacun des points de mesure et la sphère associée. Si la méthode d'association est le critère de Gauss (moindres carrés), alors ces écarts résiduels sont obtenus par minimisation de la somme des écarts quadratiques. La surface obtenue (appelée *surface associée*) minimise la distance par rapport aux points de mesure.

Ici, les formes nominales des surfaces de référence sont plus complexes (motif de guillochage et forme en "tonneau"). L'élément de référence choisi pour l'association est donc simplement un plan, et la méthode d'association le critère de Gauss (*redressement moindres carrés*). Les surfaces obtenues sont représentées figure 2.9. Le tableau 2.4 indique les corrections de pentes calculées par la méthode des moindres carrés et appliquées pour redresser chaque surface.

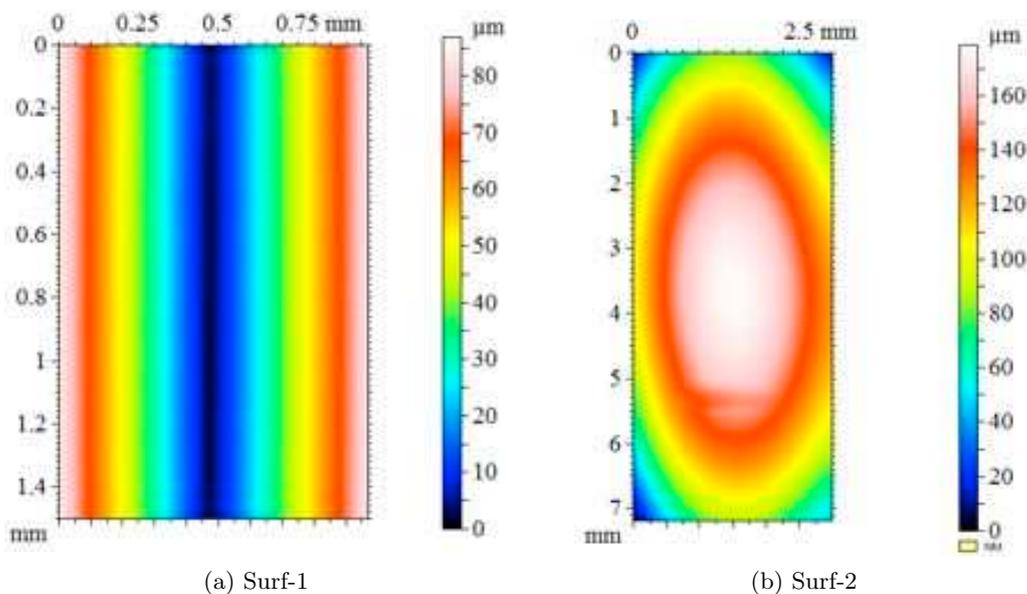


Figure 2.9 – Redressement par la méthode des moindres carrés, des surfaces *Surf-1* et *Surf-2*

Corrections	Axe X (angle)	Axe Y (angle)	Axe Z (déplacement vertical)
Surf-1	1.28 °	0.788 °	8.7 $\mu m$
Surf-2	2.54 °	0.57 °	16 $\mu m$

Tableau 2.4 – Association d'un plan par le critère des moindres carrés

### 3.2.4.b Opération de décomposition

La **D**écomposition **M**odale **D**iscrète est l'étape centrale de la méthode modale (voir section 2). Pour rappel, il s'agit de décomposer la surface  $^{meas}V$  dans une famille de descripteurs qui dérivent de la mécanique vibratoire, et sont les modes naturels de vibration de la géométrie de référence, ici un plan. Cette famille de descripteurs forme un espace vectoriel, appelé *base modale*. L'opération de décomposition est réalisée par projection vectorielle des surfaces dans la base de descripteurs. Elle permet d'obtenir les contributions de chacune des forme élémentaires de la base modale, appelées *contributions modales*. Les surfaces peuvent alors être exprimées sous forme de sommes des différentes contributions modales (périodiques) et du résidu de la décomposition (non périodique) (2.5).

$$^{meas}V = \sum_{i=1}^{N_q=500} \lambda_i Q_i + \epsilon(N_q = 500) \quad (2.5)$$

avec  $\begin{cases} \lambda_i : & \text{Contributions modales} \\ Q_i : & \text{Vecteurs de la base modale} \end{cases}$

Les paramètres de la DMD, pour l'opération de décomposition sont :

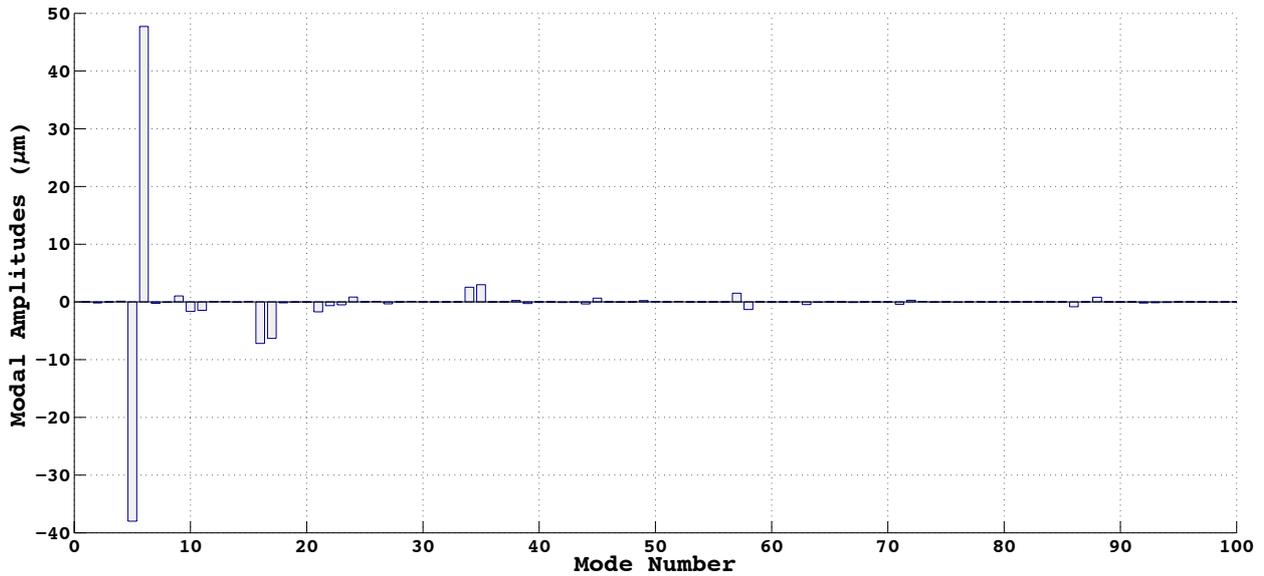
- *Le nombre de modes ( $N_q$ )* : il s'agit de la dimension de la base, c'est à dire du nombre de formes élémentaires (ici les modes naturels de vibration d'un plan) pour lesquelles on calcule les contributions modales. Plus ce nombre est élevé, plus on caractérise les variations géométriques sur une large gamme de longueur d'ondes. Si  $N_q$  est choisi suffisamment grand, la méthode permet de caractériser l'ensemble des composantes périodiques de la surface. Les composantes non périodiques, correspondant à la *micro-rugosité*, sont alors obtenues en calculant le résidu  $\epsilon(N_q)$  de la DMD (soustraction entre la surface mesurée et la surface reconstruite à partir de l'ensemble des modes de décomposition).

Dans le cas de cette application, le nombre de modes de décomposition a été choisi à  $N_q = 500$ .

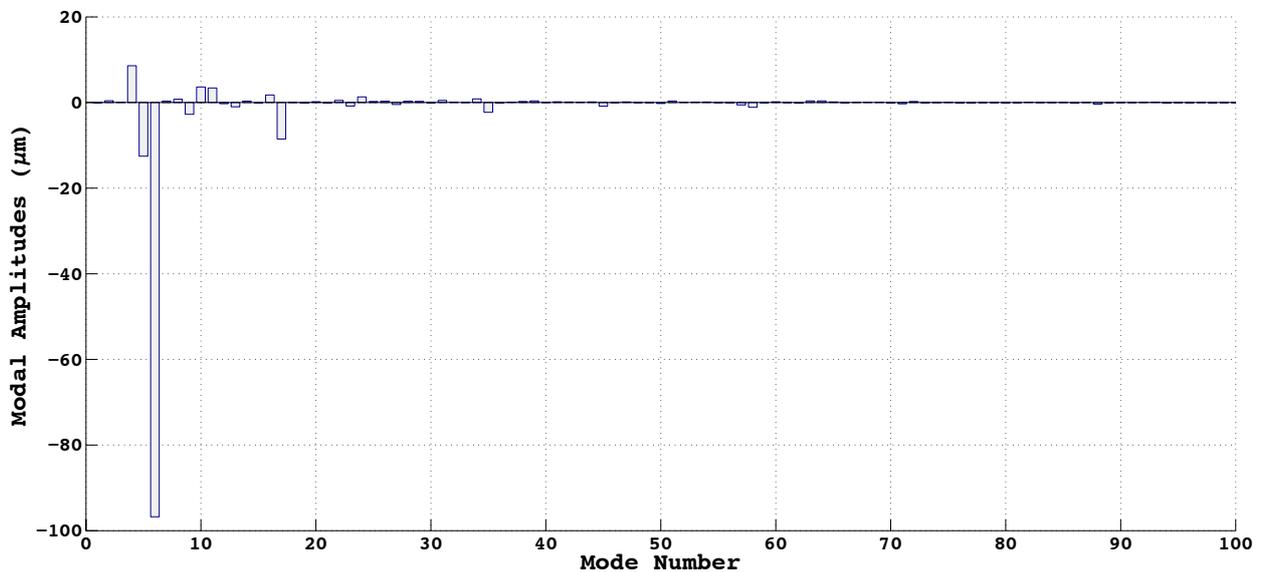
- *Les niveaux de sous-échantillonnage* : Pour accélérer le calcul dans le cas de mesures contenant un grand nombre de points ( $> 10^6$ ), il est utile de sous-échantillonner les surfaces sur chacun des axes avant de procéder à l'opération de décomposition. Le sous-échantillonnage des surfaces permet aussi de visualiser en temps réel les différentes composantes de la surface lorsque que l'utilisateur fait varier les seuils forme/ondulation et ondulation/rugosité. Un nombre de points minimum sur les surfaces échantillonnées est nécessaire pour caractériser l'ensemble des contributions correspondantes aux descripteurs de la base de décomposition. Par défaut (paramètres utilisés dans cette étude), la dimension des surfaces sous échantillonnées pour décomposer une surface mesurée dans une base de 500 modes a été fixée à  $250 \times 250$  (points). L'application du critère décrit dans la section 2.2.3 montre que ce nombre de points est permet de caractériser des variations de forme avec jusqu'à 35 ondulations sur chacun

des axes  $x$  et  $y$ , ce qui est suffisant compte tenu du nombre d'ondulations maximum des descripteurs de la base modale.

Une fois l'opération de décomposition réalisée, on peut visualiser les valeurs des contributions modales sous la forme du *spectre modal des amplitudes*. La figure 2.10 montre une représentation partielle des spectres obtenus pour les surfaces *Surf-1* et *Surf-2* afin de faciliter la lecture (modes  $\in [0, 100]$ ).



(a) Surf-1



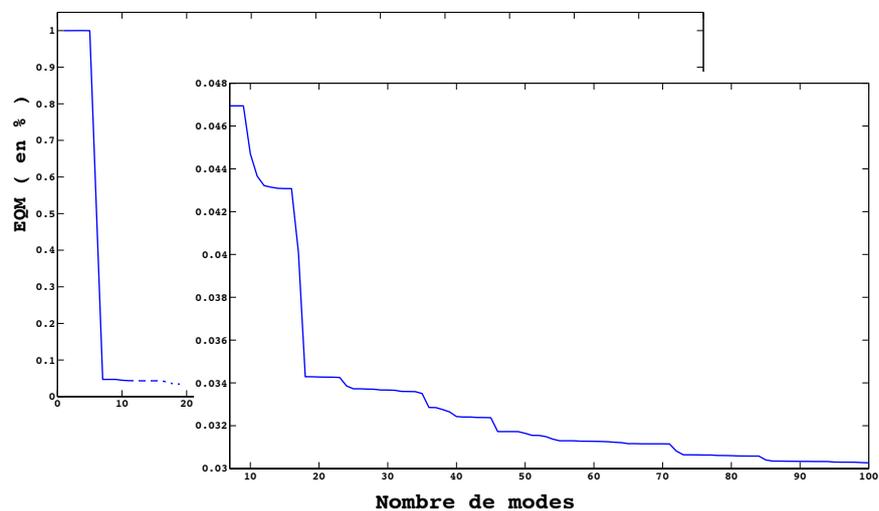
(b) Surf-2

Figure 2.10 – Représentation du spectre modal des amplitudes, pour les modes  $[0, 100]$

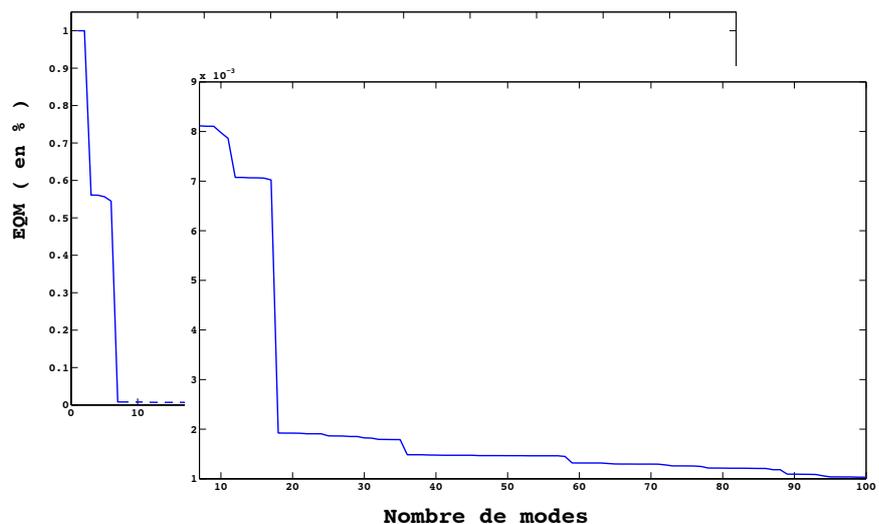
Tout d'abord, on constate que les contributions modales décroissent rapidement dans l'intervalle  $[0, 100]$ , et que plus on avance dans la décomposition, plus les contributions modales sont d'amplitudes faibles. Ainsi, les modes ( $Q_i$ ) sont triés par ordre de fréquence, mais la forme de l'enveloppe contenant les spectres modaux montre qu'ils sont aussi globalement triés simultanément par amplitude.

Cette caractéristique entraîne deux constats :

- un faible nombre de paramètres permet de décrire avec une bonne approximation les surfaces mesurées. Cette remarque est corroborée par la figure 2.11, qui montre l'évolution des écarts quadratiques moyens (EQM) entre la surface décomposée, et sa reconstruction "modale", en fonction du nombre de modes considéré, pour les surfaces *Surf-1* et *Surf-2*. D'un point de vue plus global, le faible nombre de descripteurs nécessaire pour décrire une surface permet de confirmer la pertinence de la DMD pour décrire les variations géométriques des surfaces. La vérification de cette caractéristique du spectre modal permet ainsi, de façon générale, de détecter un dysfonctionnement lors de la mise en œuvre de la méthode, ou la non pertinence de la méthode pour la surface considérée.
- le nombre de modes de décomposition, choisi initialement à  $N_q = 500$  est suffisant pour décrire cette surface avec une bonne approximation, et permet de caractériser l'ensemble des composantes périodiques de la surface. Le résidu de la DMD permet donc pour ces deux surfaces de caractériser les composantes de *micro-rugosité*.



(a) Surf-1



(b) Surf-2

Figure 2.11 – évolution des écarts quadratiques moyens (EQM) en fonction du nombre de modes de décomposition, en pourcentage de l'EQM initial

### 3.2.4.c Filtrage Modal

La Décomposition Modale Discrète permet de calculer les contributions correspondant à chacune des formes élémentaires de la base de descripteurs utilisée. Une fois cette opération (de projection vectorielle) réalisée, on peut alors reconstruire partiellement les composantes périodiques de la surface, en ne prenant en compte que les contributions associées à la gamme de fréquence choisie. D'autre part, on a montré que si le nombre de modes de décomposition est suffisamment important, alors on peut considérer que l'ensemble des composantes périodiques des surfaces décomposées est caractérisé par la DMD. Ainsi, le résidu de la DMD, noté ( $\epsilon$ ), permet de séparer les composantes périodiques et continues ( $C_1$ ), des composantes non périodiques et non continues ( $C_0$ ) de la surface.

Le filtrage modal peut donc être mis en œuvre en *fréquences*, pour caractériser les variations surfaciques de forme, d'ondulation et de rugosité d'une surface mesurée, et dans le même temps permettre de séparer les composantes non périodiques de la surface. Le principe général de cette technique de filtrage est illustré dans la figure 2.12.

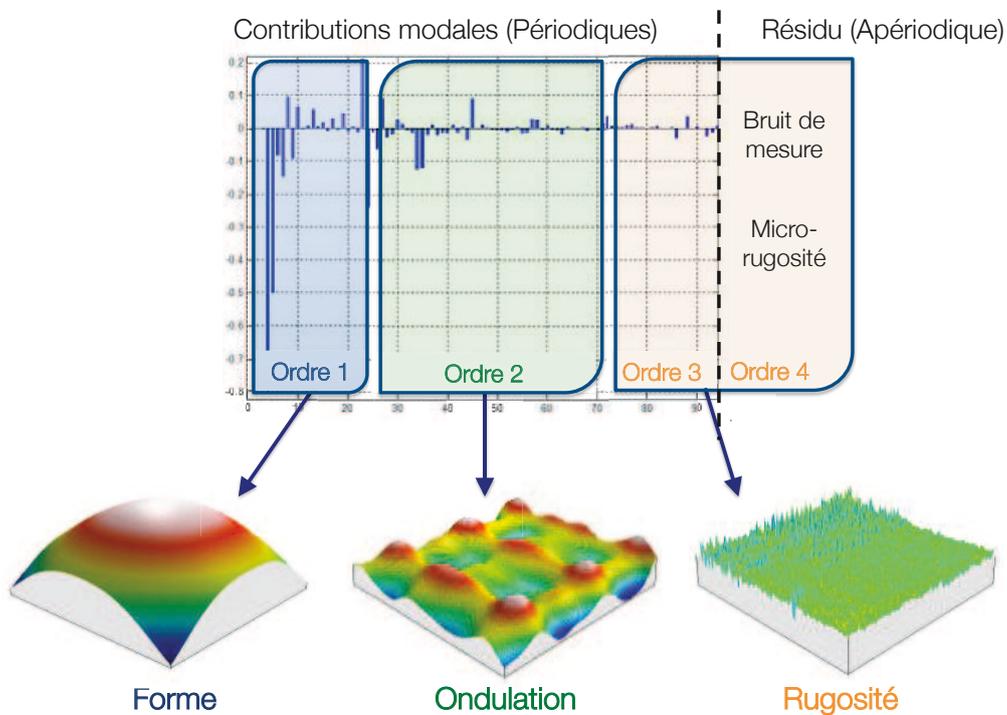


Figure 2.12 – Filtrage modal

(a) Filtrage en fréquence : *Forme* - Ondulation - Rugosité

Les composantes de forme, d'ondulation et de rugosité sont obtenues par recombinaison d'une partie du spectre modal suivant les expressions suivantes (2.6) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{form}V = \sum_{i=1}^{N_f} \lambda_i Q_i \\ \text{ondu}V = \sum_{i=N_f+1}^{N_o} \lambda_i Q_i \\ \text{rugo}V = \sum_{i=N_o+1}^{N_q} \lambda_i Q_i \end{array} \right. \quad (2.6)$$

Les paramètres de la DMD, pour l'opération de décomposition sont :

- *Le seuil Forme/Ondulation ( $N_f$ )* : Ce seuil permet de reconstruire partiellement la surface en ne retenant que les modes antérieurs à  $N_f$ , de longueur d'onde importante . On caractérise et on reconstruit ainsi uniquement les variations de *forme* de la surface. Pour les surfaces d'application de la méthode *Surf-1* et *Surf-2*, le seuil Forme/Ondulation a été choisi à  $N_f = 40$ .
- *Le seuil Ondulation/rugosité( $N_o$ )* : Ce seuil, strictement supérieur à  $N_f$ , permet de reconstruire partiellement la surface en ne retenant que les modes contenus dans l'intervalle à  $[N_f, N_o]$ , dont les longueurs d'ondes correspondent à des variations géométriques de type *ondulation* sur la surface. Ce seuil permet aussi de reconstruire les variations correspondantes aux modes de l'intervalle  $[N_o, N_q]$ , de longueur d'ondes plus faibles (type *rugosité*). Pour les surfaces d'application de la méthode *Surf-1* et *Surf-2*, le seuil Forme/Ondulation a été choisi à  $N_o = 100$ .

Le choix des deux seuils Forme/Ondulation ( $N_f$ ) et Ondulation/rugosité ( $N_o$ ) a une influence forte sur les résultats. Les normes ne définissent pas clairement comment placer ces seuils, même si il existe dans la littérature des travaux sur la séparation de ces composantes pour des applications particulières [Raja 02]. Nous n'avons à ce jour pas apporté d'avancées significatives vers la définition *automatiquement* de ces seuils. Il s'agit cependant d'une perspectives de ces travaux. Nous envisageons d'apporter une aide à la définition de ces seuils par couplage de la DMD avec d'autres méthodes multi-échelle.

La méthode a été développée dans l'environnement de programmation Matlab, puis une application autonome a été réalisée. L'utilisateur de la DMD peut aisément faire varier les seuils  $N_f$  et  $N_o$  à la manière de curseurs, et visualiser en temps réel les reconstructions partielles obtenues. Il définit ainsi pour chaque surface ce qu'il considère comme des variations de forme, d'ondulation, ou de rugosité.

Les figures 2.13a & 2.13b montrent les reconstructions des composantes de forme, d'ondulation et de rugosité obtenues par la méthode modale pour les deux surfaces étudiées.

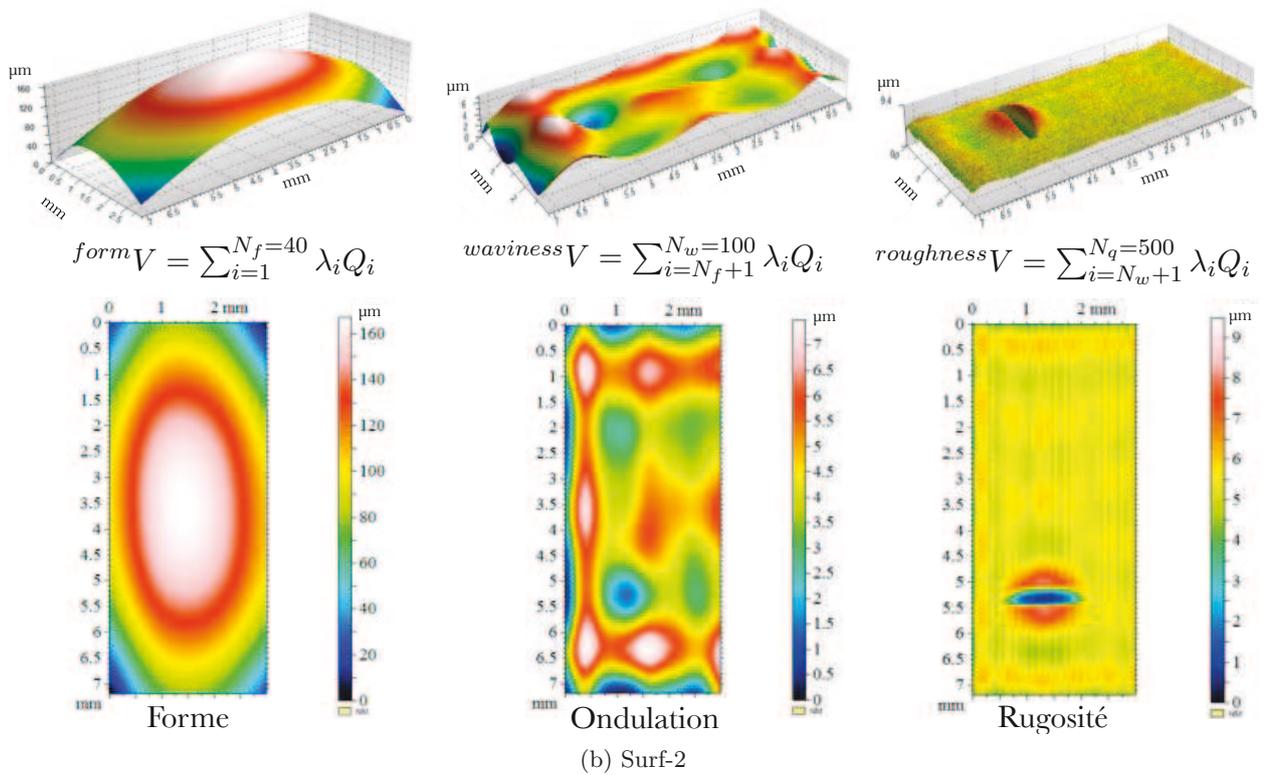
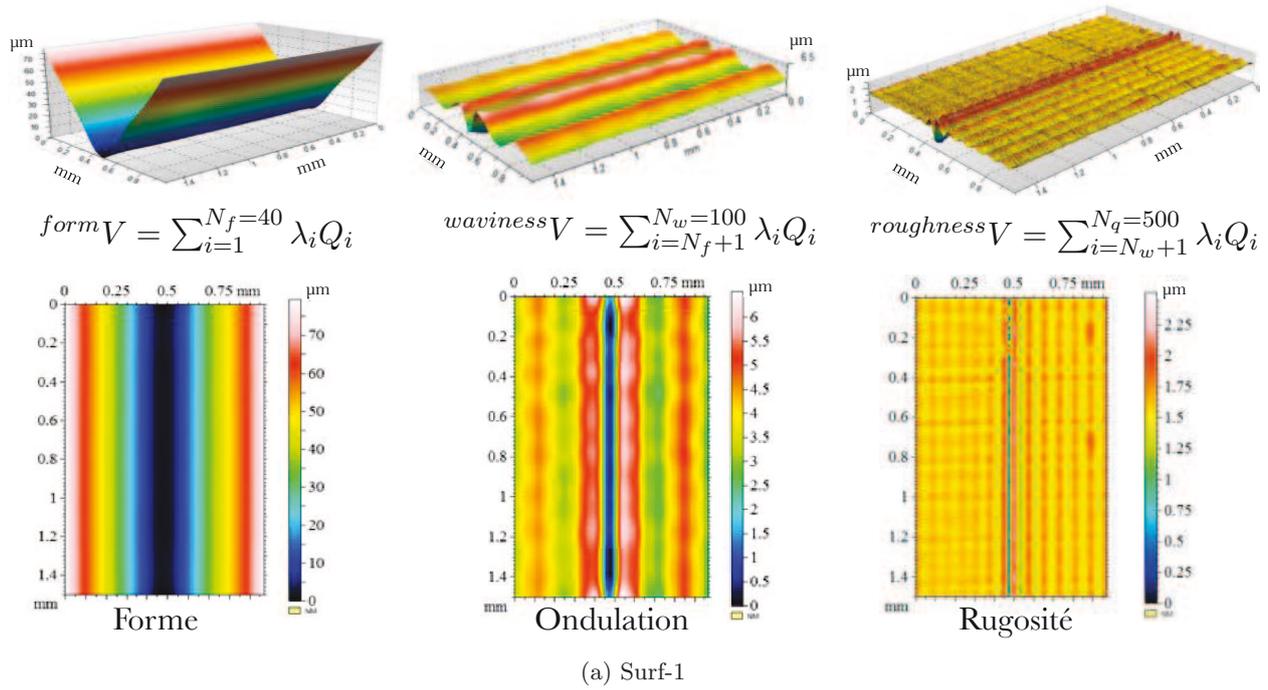


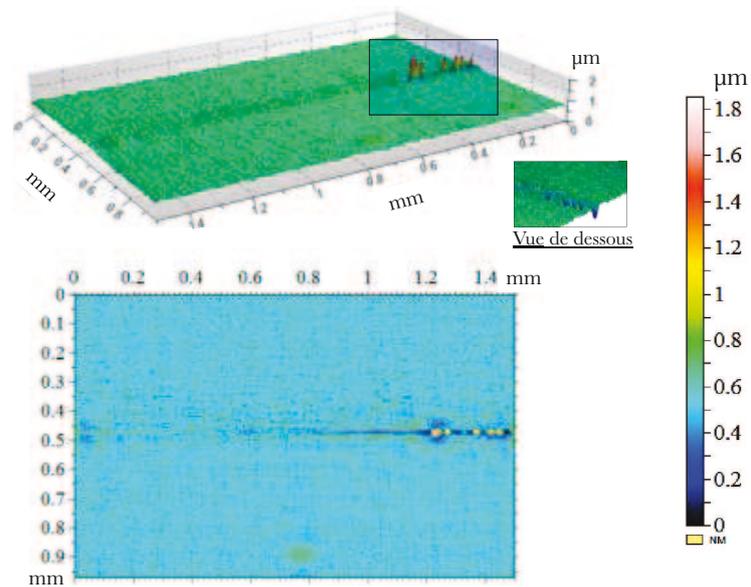
Figure 2.13 – Analyse multi-échelle par la méthode modale, avec  $N_f = 40$ ,  $N_w = 100$  et  $N_q = 500$

### 3.2.4.d Caractérisation des composantes non périodiques : Analyse du résidu de la DMD

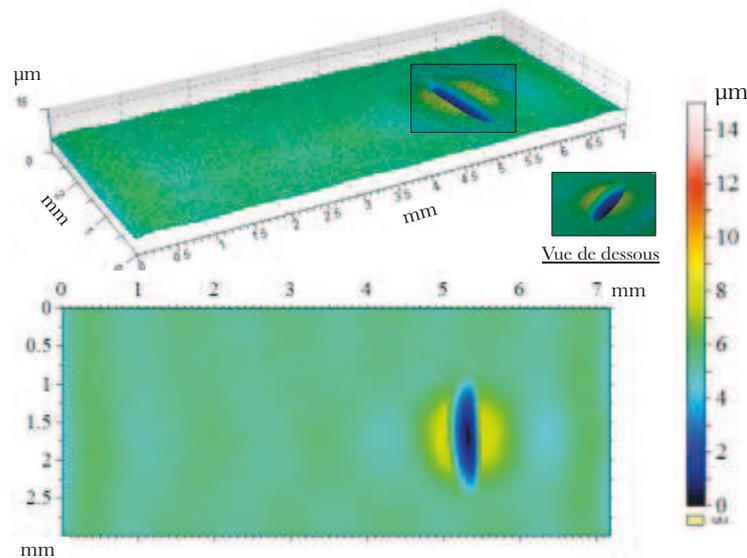
Le résidu, noté  $(\epsilon)$ , permet de comparer la surface mesurée avec la surface reconstruite à partir de l'ensemble des modes de la décomposition. En fonction de l'ordre de grandeur, on peut ainsi évaluer la pertinence du paramétrage modal et la qualité de l'approximation réalisée avec le nombre de modes de décomposition  $N_q$  choisi. Le résidu de la DMD est obtenu par soustraction (Equation 2.7) entre la mesure  $^{mes}V$  et la surface reconstruite à partir de l'ensemble des modes de la DMD ( $\sum_{i=1}^{N_q} \lambda_i Q_i$ ).

$$\epsilon(N_q = 500) = ^{mes}V - \sum_{i=1}^{N_q} \lambda_i Q_i \quad (2.7)$$

Une représentation des résidus de la DMD obtenus pour les surfaces *Surf-1* et *Surf-2* est donnée figure 2.14a & 2.14b.



(a) Surf-1



(b) Surf-2

Figure 2.14 – Reconstruction des résidus de la DMD, pour les surfaces *Surf-1* et *Surf-2*

Pour ces deux exemples d'anomalies d'aspect locales de dimensions et de typologies très différentes, la séparation des composantes apériodiques du reste des composantes contenues dans la surface permet de mettre en relief les anomalies d'aspect. On visualise très clairement les variations surfaciques locales liés aux arrachements de matière en fond de motif de guilloche de la surface *Surf-1*, et le coup sur la surface latérale du roulement de forme "tonneau". On peut aussi à partir des reconstructions évaluer précisément leurs amplitudes, de l'ordre de  $\pm 0.6 \mu m$  pour l'arrachement de matière sur la surface guillochée du briquet, et de l'ordre de  $8 \mu m$  pour le coup sur la surface du rouleau.

En remarque, pour la surface *Surf-1*, la visualisation du résidu permet de mettre en évidence une différence d'état de surface entre les deux faces du motif de guillochage en "v" (Vue 2D, figure 2.14a). Cette variation peut s'expliquer par l'opération d'usinage des surfaces, réalisé dans le sens montant sur une face, et dans le sens descendant sur l'autre.

Le calcul du résidu de la DMD corrobore une des hypothèses de recherche initiale sur lien entre aspect et géométrie : la non (ou faible) périodicité des anomalies d'aspect *locales*. La méthode modale, de par la nature de sa base de descripteurs, permet facilement de calculer ces composantes et est spécialement pertinente pour ce type d'étude. D'autre part, cette mise en évidence des anomalies d'aspect locales permet d'envisager l'interprétation du résidu de la DMD pour évaluer et de décider de l'acceptabilité de l'anomalie, et à plus large échelle de la surface analysée. Cette étape d'interprétation est l'objet de la section 3.2.5.

Enfin, l'amplitude du résidu relativement à la taille des surfaces analysées permet de confirmer la performance de la décomposition modale pour caractériser les composantes périodiques des surfaces : hors anomalies locales, la DMD permet de filtrer efficacement les composantes de forme, d'ondulation et de rugosité de la surface.

### 3.2.5 Interprétation des résultats de la DMD

L'analyse des surfaces par la méthode modale permet de réaliser une analyse multi-échelle des surfaces, i.e. de caractériser les composantes de forme, d'ondulation, et de rugosité. Le filtrage est alors dit *fréquentiel*, du fait que les formes élémentaires de la base modale, issues de la mécanique vibratoire, sont elles même naturellement triées par ordre de fréquence. La méthode permet d'isoler les composantes de la surface correspondantes aux anomalies d'aspect, et facilite ainsi la caractérisation et l'évaluation. On remarque que les anomalies d'aspect *locales* sont souvent de l'ordre de la rugosité. En fonction de l'échelle d'analyse ou du type d'anomalies, il est aussi possible de rencontrer des anomalies d'aspect de l'ordre des variations de forme ou d'ondulation. Ce type de configuration moins courante est illustré à travers un exemple dans la section 3.2.6.

De plus, la méthode permet de séparer l'ensemble des composantes périodiques et non périodiques d'une surface, sous réserve de réaliser la décomposition dans un espace de descripteurs suffisamment grand. C'est donc deux types de filtrages qui peuvent être réalisés simultanément à partir de la DMD. Les résultats obtenus par le filtrage dit *périodique* permettent de corroborer l'hypothèse de non-périodicité des anomalies d'aspect locales. Pour des anomalies de type coups, marques, arrachements de matière, etc., cette caractéristique permet à partir du résidu de la DMD de facilement isoler et mettre en évidence les anomalies d'aspect locale de la surface décomposée.

L'interprétation de ce résidu peut permettre d'évaluer l'intensité des anomalies à partir de leur

nombre (approche quantitative), de leur amplitude et/ou de leur extension. En effet, dans certains cas (exemple de la surface *Surf-1*), le moyen de production est susceptible de générer certaines anomalies de façon répétitive. En lien avec les experts visuels, on peut alors segmenter les surfaces et évaluer à partir des résultats obtenus.

La figure 2.15 met ainsi en évidence les anomalies d'arrachement de matière en fond de motif de guillochage dont l'amplitude est supérieure à  $1 \mu\text{m}$  (surface *Surf-1*). On peut évaluer la surface à partir de ce type de représentation. Ce type d'interprétation est quantitatif, et ne permet généralement pas d'évaluer la perception des anomalies. Nous montrons dans la section 4 d'autres possibilités d'interprétation des résultats de la DMD, en vue de déterminer l'intensité des anomalies d'aspect en terme d'impact visuel.

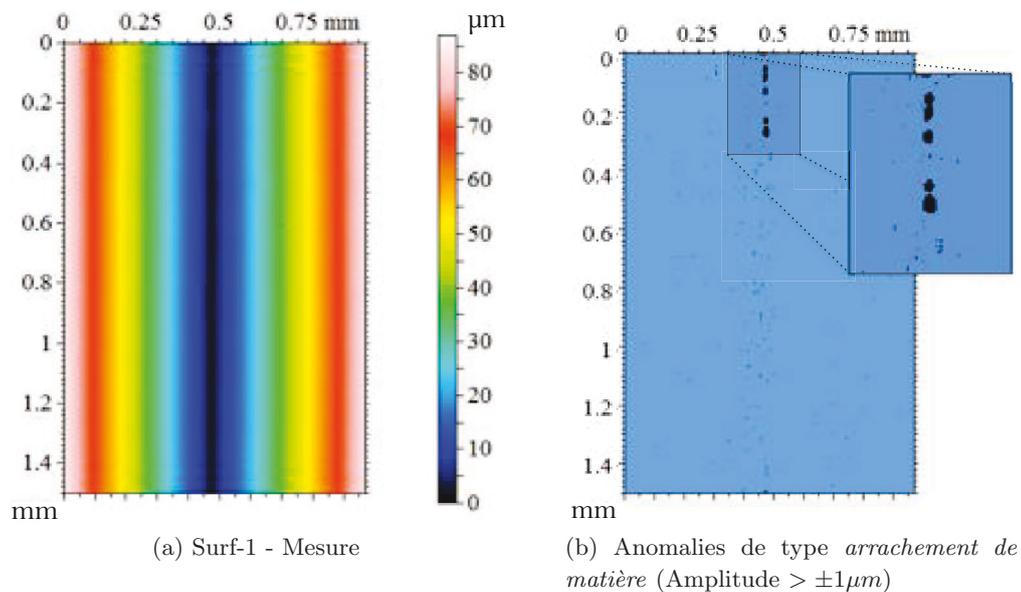


Figure 2.15 – Interprétation quantitative par seuillage à partir du résidu de la DMD (*Surf-1*)

Enfin, les résultats de la DMD montrent qu'il est possible d'envisager l'usage d'une telle méthode pour apporter une aide lors de l'étape de détection des anomalies d'aspect. En effet, la séparation des composantes de forme, d'ondulation et de rugosité permet de mettre en évidence les anomalies éventuelles d'une surface dans l'une ou l'autre de ces trois composantes. Cependant, à l'heure actuelle et dans un cadre d'application industriel, le temps d'acquisition des mesures ne permet pas d'envisager en pratique cette solution. Le développement rapide des moyens de mesure et par exemple, des capteurs "lignes" en remplacement des capteurs ponctuels permettra probablement, à moyen terme, la mise en œuvre ce type d'analyse, à la fois pour la détection et l'évaluation des anomalies d'aspect.

### 3.2.6 Autre exemple (particulier) d'anomalie d'aspect locale

L'analyse développée précédemment pour les surfaces *Surf-1* et *Surf-2* montre l'intérêt de faire apparaître les composantes de rugosité (faibles longueur d'onde) et/ou les composantes non-périodiques des surfaces, afin de caractériser et d'évaluer les anomalies d'aspect locales sur une surface, notamment quand il s'agit de coups, ou de marques. Cependant, certaines anomalies d'aspect locales peuvent être de longueur d'onde plus importantes, c'est à dire de l'ordre de la variation de forme ou d'ondulation. Cette variété dans la typologie des anomalies d'aspect rencontrées est une difficulté supplémentaire. Pour répondre à cette problématique, il est nécessaire d'utiliser une

méthode multi-échelle, et c'est aussi en ce point que la DMD apporte une réponse pertinente à la problématique de l'analyse de l'aspect des surfaces par une approche géométrique.

Nous présentons ici un exemple particulier d'anomalie d'aspect locale qui n'est pas de la même typologie que précédemment. La surface considérée présente en effet une anomalie d'aspect locale de l'ordre de la variation de forme dont la détection et l'évaluation est spécialement délicate. La surface considérée est du même type que celle de l'échantillon *Surf-1* (guillochage en lignes verticales sur un briquet). Afin d'illustrer l'aspect multi-échelle de la méthode, l'analyse est réalisée sur l'ensemble de la face du briquet. La mesure a été réalisée par le même moyen de mesure que pour les échantillons de surface *Surf-1* et *Surf-2*.

La surface présente différentes anomalies d'aspect (notamment des légers coups) mais surtout une anomalie liée à une opération de retouche effectuée sur la surface, qui n'apparaît que dans des conditions d'observations très particulières. L'opération de retouche consiste ici à re-polir une portion de surface, afin de tenter de "gommer" les anomalies d'aspect locales mineures (coups, rayures, etc.). Une difficulté de cette opération manuelle est de polir suffisamment la surface pour supprimer efficacement les anomalies mineures de la surface tout en ne modifiant pas l'aspect visuel local de la surface. Un polissage trop important peut par exemple faire apparaître le matériau sous la couche laquée (surface *ajaunie* : anomalie de couleur) ou créer une variation de forme locale qui modifie l'aspect de la surface. L'étude sur cet échantillon a été réalisée de façon analogue à la méthode présentée pour les échantillons *Surf-1* et *Surf-2* et décrite dans la figure 2.5. La figure 2.16 synthétise les surfaces résultats correspondantes aux différentes étapes de la méthode pour l'échantillon *Surf-3*.

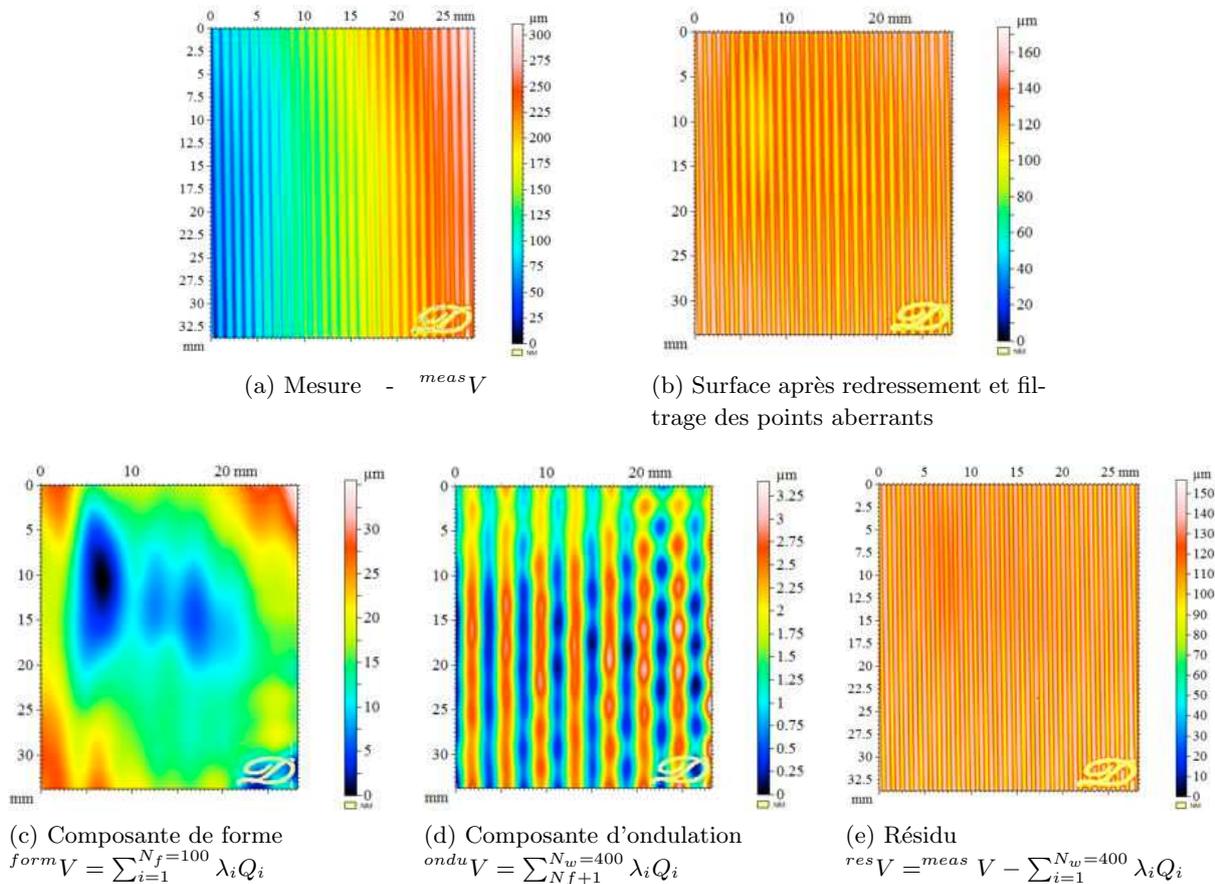


Figure 2.16 – Reconstruction des surfaces résultats pour l'échantillon *Surf-3*

La composante de forme caractérisée par la DMD met en évidence une variation de forme générale de type cuvette, probablement liée aux retouches de polissage effectuées. Cette variation est d'une amplitude de l'ordre de  $15 \mu m$ . Cette anomalie est assez homogène sur la surface et n'est pas visible par les experts visuels. Ce n'est donc pas un défaut en terme d'aspect.

On remarque aussi, en plus de cette variation de forme générale sur la surface, des zones où la variation est plus marquée (en bleu sur la figure 2.16c), l'amplitude atteint alors environ  $30 \mu m$ . Ce sont ces variations, plus marquées, qui sont détectées par les experts visuels. La méthode permet de les isoler du motif de guillochage, et de les évaluer en termes géométriques.

En synthèse, la méthode permet dans une même analyse d'évaluer les surfaces à différentes échelles, et de caractériser les variations de forme, d'ondulation et de rugosité d'une surface. Etant donné la grande variabilité des anomalies d'aspect en terme de typologie ou de dimension, et qu'elles soient locales ou globales (voir section 3.3), la DMD généralisée permet une évaluation multi-échelle des surfaces, et permet la caractérisation d'un grand nombre d'anomalies d'aspect potentielles.

### 3.3 Cas des anomalies d'aspect *globales*

#### 3.3.1 Echantillons

Pour cette section, nous avons choisi d'appliquer la méthode à des échantillons de surfaces à haute valeur ajoutée du domaine horloger. Les surfaces sont obtenues en finition par sablage et présentent une hétérogénéité d'aspect liée au procédé d'obtention. L'objectif est de :

- (i) Discriminer les surfaces entre elles selon leur rendu visuel
- (ii) Corréler l'aspect aux les paramètres du moyen d'obtention des surfaces, à savoir par exemple la taille des grains, ou encore la vitesse de projection lors de l'opération de sablage.

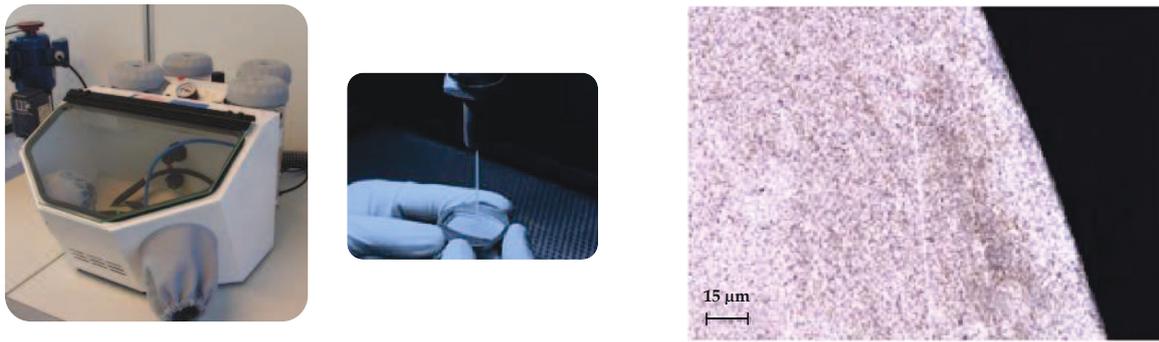
L'étude est menée simultanément pour les deux échantillons de surface choisis en reprenant les différentes étapes de la méthode développée dans la section précédente (3.2).

**Surf-G1 - Surf-G2** : Echantillons de surface provenant de deux produits différents, dont les surfaces ont été réalisées en finition par *sablage*<sup>4</sup>. En fonction du sablage, l'aspect des surfaces varie sensiblement notamment au niveau de la couleur ressentie. C'est le cas des échantillons *Surf-G1* et *Surf-G2*. La problématique industrielle est ici de maîtriser l'ensemble des paramètres de la technique de sablage afin que toutes les surfaces obtenues respectent les spécifications d'aspect.

Un exemple de machine de sablage utilisée dans le domaine horloger ainsi qu'une image de la surface de provenance de l'échantillon *Surf-G1* sont présentés dans la figure 2.17.

---

4. La technique de sablage en horlogerie est une étape de finition des surfaces, qui permet de donner à la surface un aspect *mat*. Elle peut aussi permettre de faire disparaître des défauts mineurs liés à l'usinage de la surface. La technique consiste à pulvériser sur la surface une matière abrasive en poudre. Les principaux paramètres du sablage sont le matériau (abrasif) choisi, la taille des grains, la vitesse et la distance de pulvérisation. Cette technique est parfois aussi appelée *microbillage*



(a) Machine de sablage pour le domaine horloger

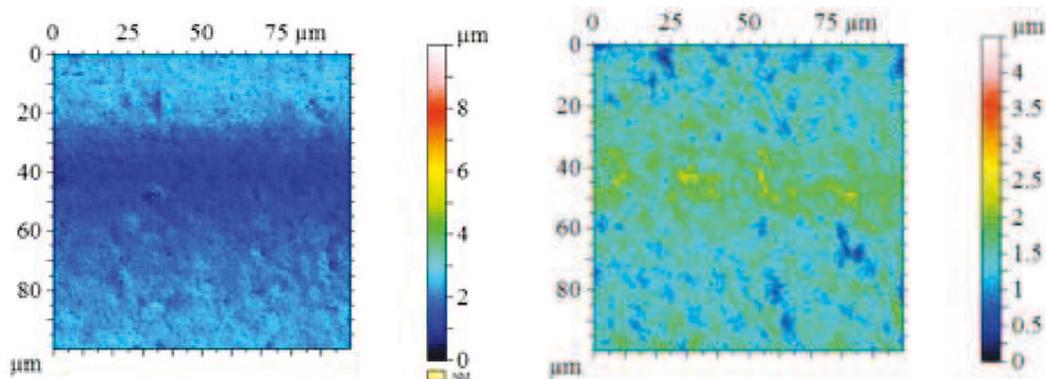
(b) Image d'une portion de surface en finition par sablage

Figure 2.17 – Technique de sablage pour les surfaces horlogères

### 3.3.2 Mesure

Les mesures ont été obtenues par le même moyen de mesure que pour les surfaces *Surf-1* et *Surf-2*, c'est à dire une machine de mesure<sup>5</sup> à champ étendu, équipée d'une sonde optique confocale chromatique de profondeur de champ de  $110 \mu\text{m}$  et de précision axiale en Z de  $0.02 \mu\text{m}$ . Le tableau 2.5 synthétise l'ensemble des paramètres de mesure utilisés pour l'acquisition des surfaces *Surf-G1* et *Surf-G2*. Une représentation des surfaces mesurées est donnée en Figure 2.18.

Moyen de mesure	Zone de mesure	Pas en X	Pas en Y
Altisurf 520 + sonde CL1 ( $110 \mu\text{m}$ )	$491 \times 491$ points	$0.204 \mu\text{m}$	$0.204 \mu\text{m}$

Tableau 2.5 – Principaux paramètres de mesure, pour les surfaces *Surf-G1* et *Surf-G2*

(a) Surf-G1

(b) Surf-G2

Figure 2.18 – Représentation des surfaces mesurées sur les deux échantillons

### 3.3.3 Filtrage des points aberrants

On peut constater sur les représentations des mesures *Surf-G1* et *Surf-G2* (figure 2.18) que l'on n'utilise pas l'intégralité de la gamme de couleur. C'est souvent un signe de présence de points aberrants, très éloignés de l'ensemble du reste des données. La figure 2.19 présente les surfaces

5. Altisurf 520, équipée d'une sonde confocale chromatique CL1

obtenues après filtrage des points aberrants, par la méthode décrite dans le chapitre 2. Les points aberrants identifiés sont ici remplacés par des points *non-mesurés* sur les surfaces.

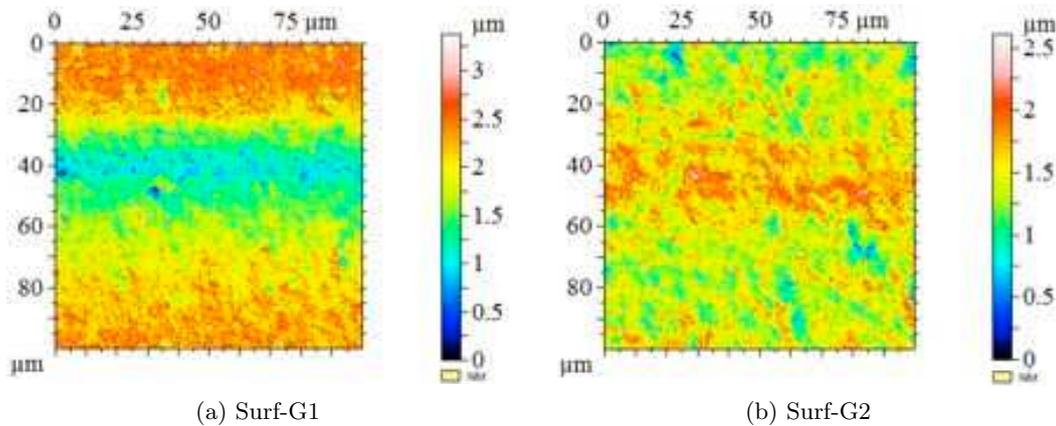


Figure 2.19 – Etape de filtrage des points aberrants

### 3.3.4 Décomposition multi-échelle par la méthode modale (DMD)

Tout d'abord, on observe sur les surfaces la présence d'une variation géométrique de type ondulation orientée selon l'axe  $y$  (vertical). Sur les mesures similaires réalisées, on observe systématiquement ce phénomène. Le fait que les pièces ont été placées et orientées sur la machine de mesure de façon aléatoire, et que ces ondulations soient répétées sur les différentes mesures indiquent que ces variations sont probablement générées ou liées au moyen de mesure, et non à une variation intrinsèque de la surface. Il est donc nécessaire de calibrer ces variations et, si possible de les corriger afin de ne pas perturber les analyses. C'est l'objet de la partie 1 du chapitre 3.

Ici, l'objectif est de caractériser et de discriminer les états de surface provoquant une variation de teinte. Les variations de forme et d'ondulations (longueur d'onde élevées) dépendent à la fois de la géométrie intrinsèque de la surface, mais aussi de la position des échantillons et des variations générées par le moyen de mesure évoquées ci-dessus. ces variations ne sont pas du même ordre que le motif géométrique généré par l'étape de finition en sablage, et ne sont donc pas liées à la variation d'aspect de la surface que nous cherchons à caractériser. La DMD est donc ici mise en œuvre pour caractériser l'état de surface des échantillons, et les discriminer. Le principe consiste à filtrer les composantes de longueur d'onde importantes de la surface, afin d'isoler les variations géométriques de l'ordre de la rugosité, i.e. l'état de surface.

#### (a) Opération d'association.

Cette opération est réalisée de la même façon que celle décrite pour les surfaces *Surf-1* et *Surf-2* (association d'un plan, critère des moindres carrés). Les surfaces étant initialement très proches des surfaces obtenues après redressement, nous avons donc choisi de ne pas les représenter.

#### (b) Opération de décomposition.

L'opération de décomposition est réalisée suivant la méthode décrite précédemment. Les paramètres de la DMD pour l'opération de décomposition sont :

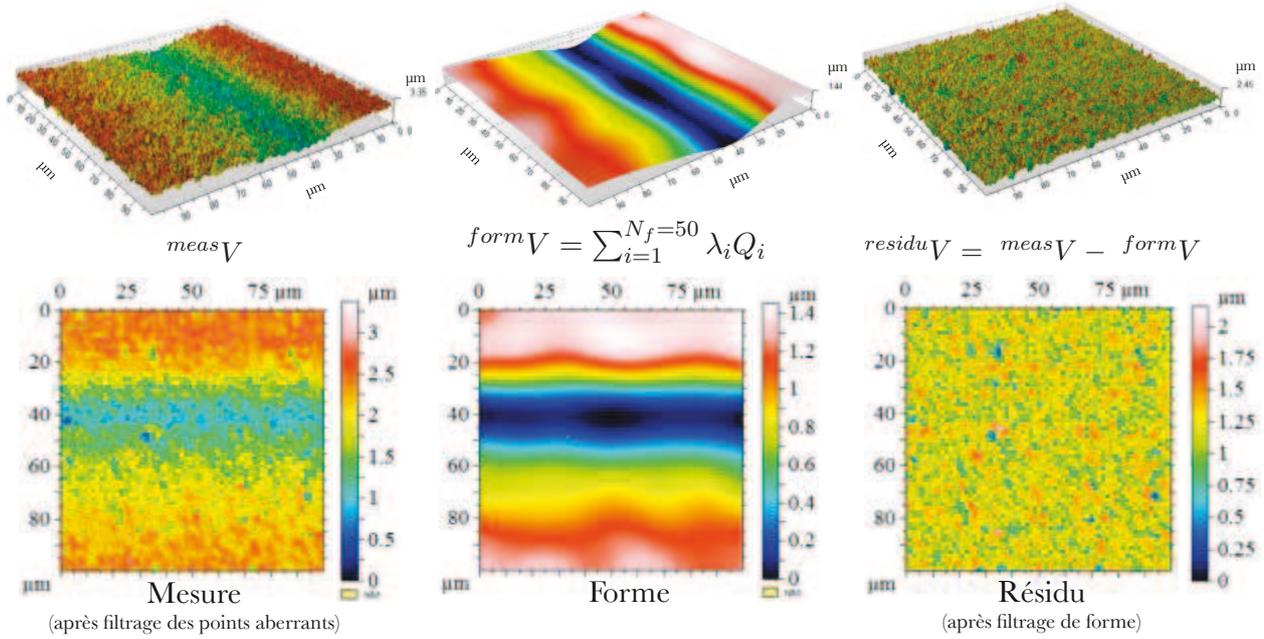
- *Le nombre de modes ( $N_q$ )* : ici,  $N_q$  a été choisi à 50 car on souhaite uniquement filtrer les composantes de longueur d'onde importantes.
- *Les niveaux de sous-échantillonnage* : Le nombre de points de mesures ne nécessite pas ici de sous-échantillonner les surfaces.

(c) **Filtrage Modal.**

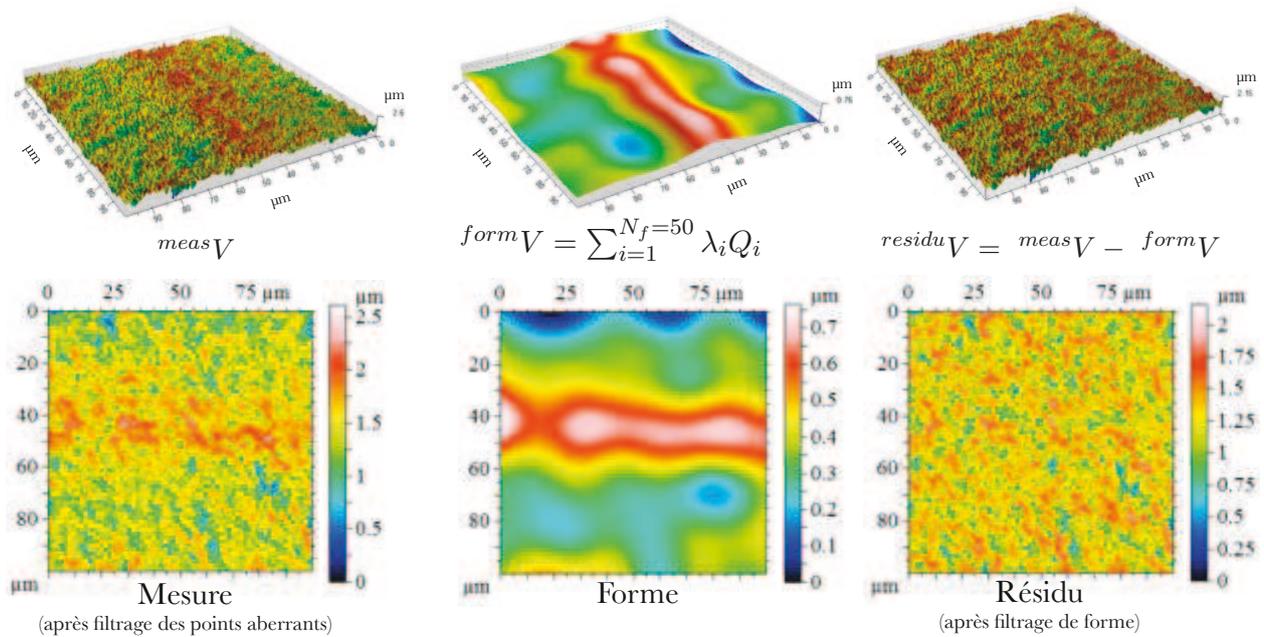
Comme mentionné précédemment, la DMD est ici mis en œuvre uniquement pour identifier les variations de forme de la surface, afin de les filtrer. Le paramètre pour cette opération est :

- *Le seuil Forme/Ondulation ( $N_f$ )* Pour les surfaces d'application de la méthode *Surf-G1* et *Surf-G2*, le seuil Forme/Ondulation a été choisi à  $N_f = N_q = 50$ .

Les figures 2.20a & 2.20b montrent les reconstructions des surfaces avant filtrage, des composantes de forme identifiées, et des surfaces après filtrage de forme pour les surfaces *Surf-G1* et *Surf-G2*.



(a) Surf-G1



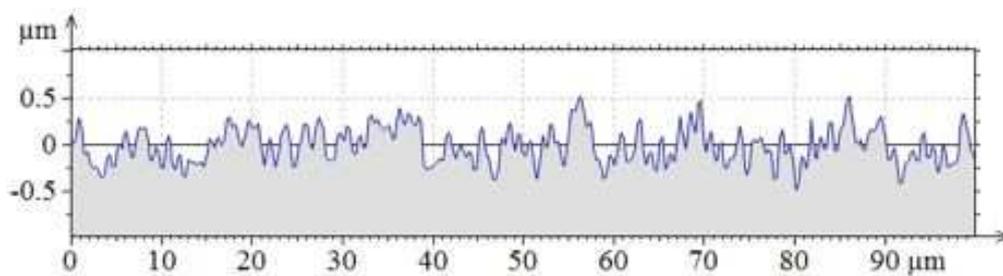
(b) Surf-G2

Figure 2.20 – Filtrage de forme par la méthode modale, avec  $N_f = 50$ ,  $N_q = 50$

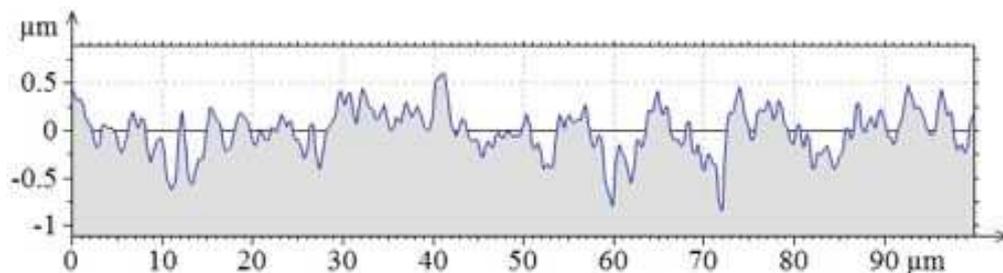
### 3.3.5 Interprétation des résultats de la DMD

Plusieurs éléments se dégagent des surfaces obtenues en déployant la DMD :

- (i) Il n'est pas possible, graphiquement, de différencier l'état de surface des échantillons *Surf-G1* et *Surf-G2* directement à partir des surfaces mesurées, même après avoir filtré les points aberrants. En effet, à ce stade, la différence essentielle entre les surfaces est une variation de forme, qui perturbe l'évaluation de l'état de surface des échantillons choisis. Il est donc nécessaire de filtrer les composantes de forme sur les surfaces, afin d'isoler et ainsi de mieux évaluer l'état de surface résultant de l'opération de sablage.
- (ii) La caractérisation des variations de forme par reconstruction des composantes de longueurs d'ondes importantes de la surface fait apparaître des variations orientées selon les axes de mesure, ce qui semble indiquer qu'elles sont liées ou générées par le moyen de mesure. Cette observation est confirmée en changeant lors des mesures l'orientation des surfaces. D'autre part, on constate que si ces variations sont stables en terme de longueur d'onde, leur position et leur amplitude varie de façon conséquente. Ce type de variations géométriques (longueur d'onde stable, amplitude variable + déphasage) sont identifiées et filtrées sans difficulté par la méthode modale, ce qui conduit à envisager l'utilisation de cette technique pour corriger et calibrer les moyens de mesure. Cette application de la méthode modale pour l'amélioration de la qualité des mesures est développée plus en détail dans le chapitre 3 (Section 1).
- (iii) Les surfaces obtenues après filtrage de forme sur les échantillons *Surf-G1* et *Surf-G2* font apparaître de façon isolée les états de surface des composantes de forme, ce qui facilite l'évaluation. En effet, si l'amplitude du motif créé par l'opération de sablage est très proche, on remarque que l'état de surface diffère, notamment par la taille et la dimension des pics et des vallées sur les surfaces, ce qui explique la différence de rendu visuel entre les surfaces d'où proviennent les échantillons. Afin de mieux visualiser cette différence au niveau de l'état de surface des échantillons, la figure 2.21 montre une représentation d'un profil extrait horizontalement sur chacune des surfaces.



(a) Surf-G1



(b) Surf-G2

Figure 2.21 – Extraction de profil(Ouest-Est) sur les échantillons *Surf-G1* et *Surf-G2*

- (iv) Le tableau 2.6 présente une synthèse des principaux paramètres de surface définis par la norme ISO 25178 [ISO-25178-3 08]. Il est intéressant de noter que pour les deux échantillons de surface les indicateurs de hauteur  $S_a$  et  $S_q$  ne permettent pas de différencier les états de surface. Cependant, l'observation faite graphiquement sur la différence en terme de taille et de dimension des motifs créés par le sablage sur les deux surfaces se retrouve sur certains indicateurs *fonctionnels*, notamment  $S_{pd}$  (densité de pics). Certains indicateurs semblent donc mieux adaptés pour discriminer ces deux échantillons de surface.

ISO 25178				
Indicateurs de hauteur				
Indicateur	Surf-G1	Surf-G2	Unité	Description
$S_q$	0.237	0.238	$\mu m$	Hauteur quadratique moyenne
$S_a$	0.185	0.188	$1/\mu m^2$	Hauteur arithmétique moyenne
Indicateurs fonctionnels				
$S_{pd}$	0.240	0.160	$1/\mu m$	Densité des pics
$S_{pc}$	5.77	3.55	$\mu m^2$	Courbure arithmétique moyenne aux sommets
$S_{da}$	4.05	6.13	$\mu m^2$	Aire moyenne des creux
$S_{ha}$	4.05	6.13	$\mu m^2$	Aire moyenne des saillies
$S_{dv}$	4.03	5.93	$\mu m^3$	Volume moyen des creux
$S_{hv}$	0.102	0.123	$\mu m^3$	Volume moyen des saillies

Tableau 2.6 – Indicateurs d'états de surface

En synthèse, ces observations ne permettent en général pas de corréler directement un paramètre, ou un ensemble de paramètres, à la variation de rendu visuel des surfaces. En effet, ce type d'étude nécessite :

- de mesurer des lots d'échantillons de surfaces assez nombreux pour être représentatifs, et si possible, ne faire varier pour chaque surface qu'un faible nombre de paramètres lors de l'opération de finition de la surface.
- d'utiliser une méthode statistique pour établir la corrélation entre la fonction et les paramètres analysés. La technique *area-scale* permet par exemple de discriminer efficacement des surfaces entre elles, et d'analyser les corrélations entre certains paramètres et la fonction souhaitée, en fonction de l'échelle d'analyse. La figure 2.22 montre une représentation de l'aire relative en fonction de l'échelle pour deux lots de 3 surfaces du type de *Surf-G1* et *Surf-G2*, et même si il serait avantageux de mener cette étude avec un plus grand nombre d'échantillons, on remarque que l'analyse *area-scale* permet de discriminer les groupes de surfaces efficacement. De plus, cette méthode permet de déterminer l'échelle d'analyse la plus pertinente pour discriminer les surfaces, i.e l'échelle d'analyse où les surfaces sont le mieux corrélées aux paramètres permettant de faire le lien avec la fonction aspect.

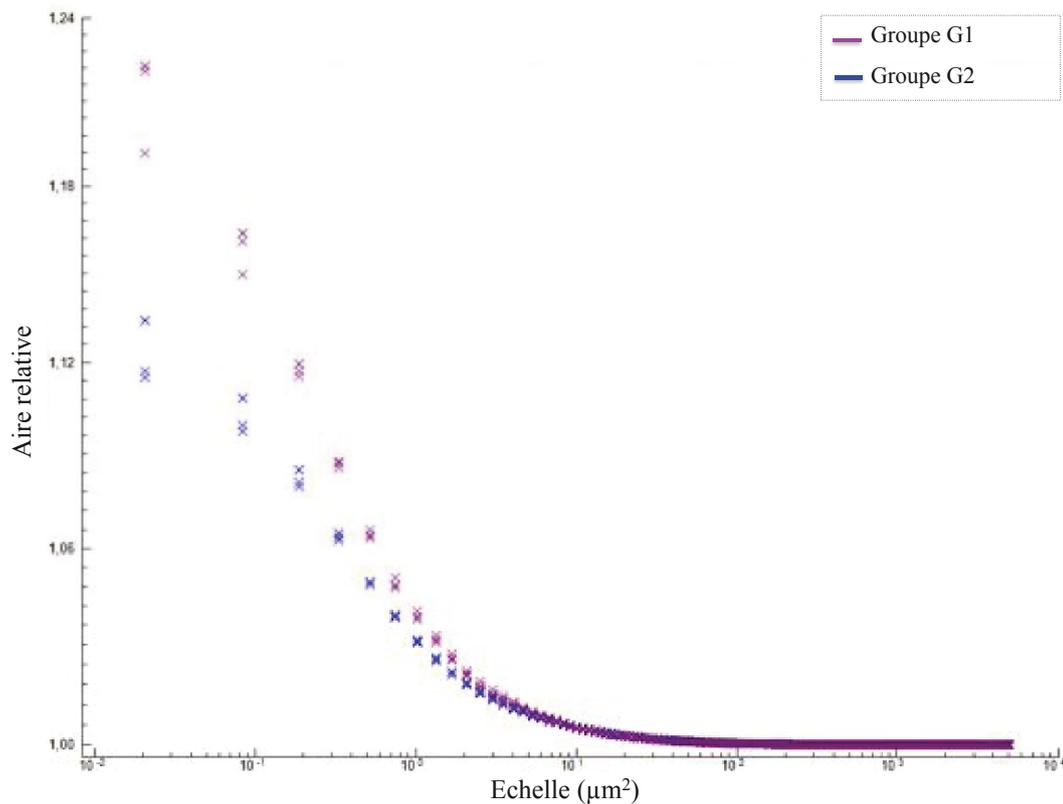


Figure 2.22 – Analyse *area-scale* de deux lots de surfaces obtenues par sablage

### 3.4 Synthèse et perspectives

Afin d'identifier des critères objectifs liés à la géométrie pour évaluer l'aspect des surfaces, nous avons mis en œuvre une approche basée sur une analyse multi-échelle des surfaces. La technique utilisée est la Décomposition Modale Discrète, initialement dédiée à la caractérisation des variations de forme. Pour pouvoir être appliquée à l'analyse de l'aspect des surfaces, cette technique a été généralisée à la caractérisation des variations d'ondulation et de rugosité.

Cette méthode permet d'identifier et de caractériser des anomalies d'aspect *locales* ou *globales*, sans connaissance *a priori* de la typologie de la surface ou de ses anomalies. Dans certains cas, cette caractérisation permet de procéder à une analyse *quantitative* des anomalies sur la surface, et ainsi d'évaluer leur criticité.

De plus, cette méthode de décomposition possède une caractéristique essentielle, qui est l'*additivité*, i.e. que les composantes obtenues par décomposition ajoutées les unes aux autres permettent de retrouver la surface initialement décomposée. Cette caractéristique permet en particulier d'envisager le calcul des courbures d'une surface par une approche simplifiée et robuste. C'est l'objet de la section 4.

## 4 Interprétation avancée : Analyse en courbures

### 4.1 Introduction

A ce stade de notre approche, l'information brute en altitude issue de la mesure des surfaces a été conditionnée. Les apports proposés pour le conditionnement des mesures sont l'identification et l'exclusion si nécessaire des points aberrants, et la correction des variations géométriques systématiques liées au moyen de mesure. Cette correction est réalisée par une approche modale, en identifiant la *signature machine* dans le spectre modal des amplitudes. C'est l'objet du chapitre 3. Nous avons ensuite présenté une méthode d'analyse multi-échelle des surfaces, aussi basée sur le paramétrage modal, qui permet de séparer et caractériser les différentes composantes de la surface selon les longueurs d'ondes. La surface reconstruite composée de l'ensemble des modes de décomposition permet d'isoler l'ensemble des composantes périodiques et inversement, le calcul de résidu de la DMD permet d'isoler les composantes non-périodiques d'une surface.

La méthode a ainsi mis en évidence un ensemble d'informations et de caractéristiques sur les surfaces, qui permettent d'aider à détecter et évaluer les anomalies en lien avec la qualité d'aspect souhaitée. L'objet de cette section de compléter cette approche *géométrique* en définissant des **critères objectifs** pour aider les experts à évaluer les anomalies. Ces travaux sont basés sur l'*analyse en courbures* des surfaces.

En effet, à travers la présentation des travaux de recherche existants et de certaines réalisations industrielles (section 2.2.3, chapitre 1), nous avons montré qu'il existait un lien fort entre courbure et aspect d'une anomalie. Nous présentons ici nos apports au niveau du processus de calcul des pentes et des courbures d'une surface, basés sur l'utilisation d'une caractéristique centrale de la DMD, qui est l'**additivité**. Nous présentons ensuite les résultats obtenus sur une surface d'application, puis l'intérêt et les spécificités des différents indicateurs de courbure présentés dans le chapitre 1, pour mieux interpréter, représenter et lier anomalies de surface et impact visuel.

### 4.2 Décomposition Modale Discrète & calcul de courbure

La DMD permet d'exprimer une surface mesurée sous la forme d'une somme de composantes périodiques de classe  $C_2$  et du résidu de la DMD, composé des variations de surface non périodiques et du bruit de mesure. L'expression de cette décomposition est rappelée dans l'équation 2.8.

$${}^{meas}V = \sum_{i=1}^{N_q} \lambda_i Q_i + \epsilon(N_q) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \lambda_i : & \text{Contributions modales} \\ Q_i : & \text{Vecteurs de la base modale} \end{cases} \quad (2.8)$$

L'information en courbures est obtenue par deux opérations de dérivation successives à partir des altitudes. L'expression des surfaces obtenue après la DMD (Equation 2.8) permet d'exprimer les courbures sous une forme similaire, i.e une somme de dérivées secondes de chacune des composantes modales. On obtient alors, par exemple pour la composante  $K_{xx}$  du tenseur de courbure, l'expression suivante (equation 2.9) :

$$\begin{aligned}
K_{xx}V &= \frac{\partial^2 \text{mes}V}{\partial x^2} = \frac{\partial^2(\sum_{i=1}^{N_q} \lambda_i Q_i)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \epsilon(N_q)}{\partial x^2} \\
&= \sum_{i=1}^{N_q} \lambda_i \frac{\partial^2 Q_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \epsilon(N_q)}{\partial x^2} \\
&= \sum_{i=1}^{N_q} \lambda_i K_{xx_i} + \frac{\partial^2 \epsilon(N_q)}{\partial x^2}
\end{aligned} \tag{2.9}$$

De la même façon, on peut exprimer les composantes  $K_{xy}$  et  $K_{yy}$  du tenseur de courbure sous la forme (2.10) et (2.11) :

$$\begin{aligned}
K_{xy}V &= \frac{\partial^2 \text{mes}V}{\partial x \partial y} = \sum_{i=1}^{N_q} \lambda_i \frac{\partial^2 Q_i}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \epsilon(N_q)}{\partial x \partial y} \\
&= \sum_{i=1}^{N_q} \lambda_i K_{xy_i} + \frac{\partial^2 \epsilon(N_q)}{\partial x \partial y}
\end{aligned} \tag{2.10}$$

$$\begin{aligned}
K_{yy}V &= \frac{\partial^2 \text{mes}V}{\partial y^2} = \sum_{i=1}^{N_q} \lambda_i \frac{\partial^2 Q_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon(N_q)}{\partial y^2} \\
&= \sum_{i=1}^{N_q} \lambda_i K_{yy_i} + \frac{\partial^2 \epsilon(N_q)}{\partial y^2}
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Les composantes du tenseur de courbure peuvent ainsi être exprimées sous forme d'une somme des dérivées secondes des descripteurs de la base modale pondérés des contributions modales, et de la dérivée seconde du résidu de la DMD. Cette approche du calcul des courbures en lien avec l'analyse multi-échelle des surfaces par la méthode modale présente les avantages suivants :

(i) **Calcul.**

Il est possible de calculer en amont une *base de courbure* à partir des dérivées d'ordre deux des descripteurs de la base modale. En pratique, cette base se décline en trois ensembles vectoriels, pour chacune des composantes du tenseur de courbure  $k_{xx}$ ,  $k_{xy}$  et  $k_{yy}$ . A partir de la base de courbure et des contributions modales obtenues (précédemment) suite à la DMD de la surface considérée, on obtient de manière instantanée une information en *courbure multi-échelle* pour chacune des composantes de la surface.

(ii) **Evaluation multi-échelle des courbures.**

La méthode permet très simplement de comparer les composantes en courbures des différentes composantes, afin par exemple d'identifier les composantes où sont présentes des anomalies d'aspect et de les évaluer. On peut alors, à la manière de la méthode présentée pour la DMD, faire varier les seuils forme/ondulation et ondulation/rugosité, et isoler l'information en courbure de la composante pertinente.

(iii) **Conditionnement des mesures avant dérivation.**

Si le nombre de modes de décomposition est suffisamment important, on a montré à travers la représentation des **E**carts **Q**uadratiques **M**oyens (EQM) et du résidu de décomposition que la DMD permet d'obtenir une très bonne approximation de la surface mesurée. La surface ainsi reconstruite à partir de l'ensemble des contributions modales est de classe  $C_2$ , et peut

être exprimée sous la forme d'une somme des modes pondérés par les contributions modales ( $\lambda_i Q_i$ ). L'information en courbure s'exprime alors de la même manière, i.e. sous forme d'une somme des dérivées secondes des modes ( $\partial^2 Q_i$ ) pondérés par les contributions modales ( $\lambda_i$ ) de la DMD. On obtient ainsi un comportement sur les données en  $z$  de type *filtrage passe-bas*, qui permet le conditionnement de l'information *brute* avant dérivation. Cette approche permet donc de s'affranchir des phénomènes de perturbation de l'information en courbures liés aux composantes haute-fréquence des données mesurées (en altitudes).

Le tableau 2.7 illustre les descripteurs de la base modale, et ceux obtenus pour les trois espaces vectoriels formant les trois bases de courbures, représentés pour les modes 5, 10, 20, 50 et 100.

Une fois le calcul des bases de courbure effectué à partir des descripteurs de la base modale, on peut recomposer et représenter les surfaces correspondantes aux différents indicateurs de courbure présentés dans le chapitre 1. Les résultats de cette approche sont présentés pour les surfaces d'application *Surf-1* et *Surf-2* (section 3.2).

Indice	Base modale	Base de courbure		
		$Kxx_i$	$Kxy_i$	$Kyy_i$
5				
10				
20				
50				
100				

Tableau 2.7 – Descripteurs de la base de courbure, calculés à partir de la base modale, pour les modes 5, 10, 20, 50 et 100

La stratégie générale proposée dans le cadre de ces travaux pour l'analyse en courbure est présentée dans la figure 2.23. L'approche n'a été mis en œuvre que pour les anomalies d'aspect *locales*, le cas non traité des anomalies d'aspect globales est une perspective à court terme de ces travaux.

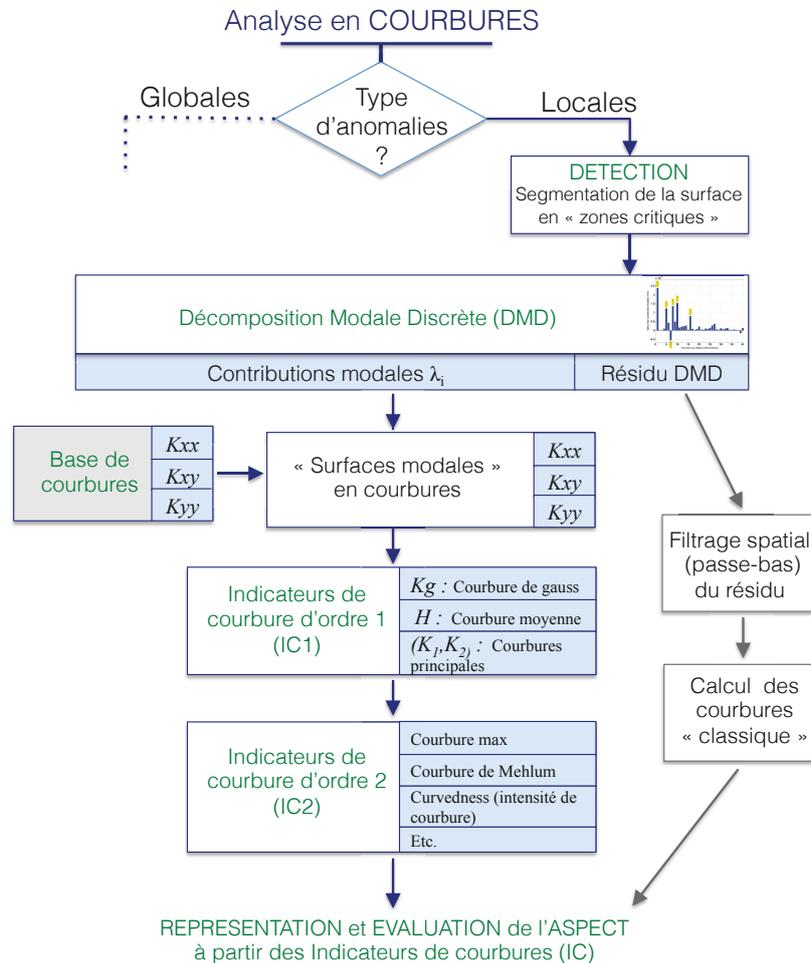


Figure 2.23 – DMD et stratégie d'analyse en courbures

#### 4.3 Exemples d'application de l'approche *courbure* sur des surfaces comportant des anomalies d'aspect locales

La démarche présentée dans la figure 2.23 est appliquée à une portion de surface de l'échantillon *Surf-1*, afin de faciliter la représentation des résultats obtenus. Pour rappel, l'objectif de cette approche est d'apporter une aide aux experts visuels en mettant à leur disposition un critère objectif pour évaluer les anomalies en lien avec l'impact visuel produit.

La méthode proposée permet d'obtenir les cartographies en courbure pour chaque composante caractérisée par la DMD (forme, ondulation, rugosité). Elle permet aussi d'obtenir les cartographies en courbure de la surface reconstruite à partir de l'ensemble des modes, i.e l'*approximation modale* la plus proche de la surface avec le nombre de modes de décomposition choisi. Nous présentons dans cette section les résultats en courbures correspondants à la surface reconstruite à partir de l'ensemble des modes de la DMD.

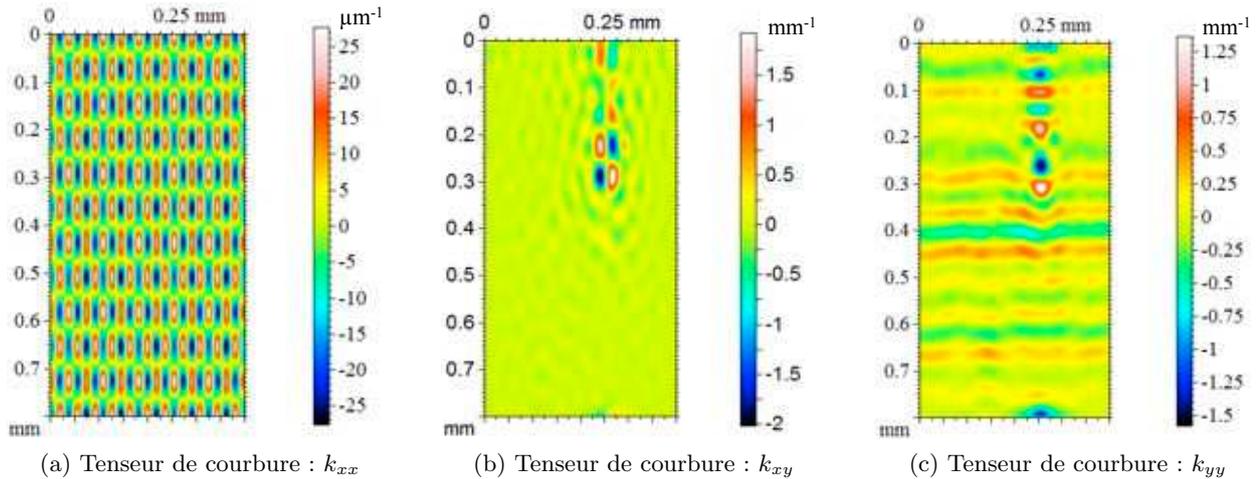


Figure 2.24 – Surf-1 : Composantes du tenseur de courbure

La figure 2.24 présente les représentations des trois composantes du tenseur de courbure  $k_{xx}$ ,  $k_{xy}$  et  $k_{yy}$  obtenues pour l'échantillon *Surf-1*. Les Indicateurs de Courbures d'ordre 1 et 2 (IC1 et IC2) dérivent des composantes du tenseur de courbure. Les représentations des résultats pour les indicateurs  $k_{gauss}$ ,  $h$  (courbure moyenne) et  $k_{mehlum2}$  sont données dans la figure 2.25.

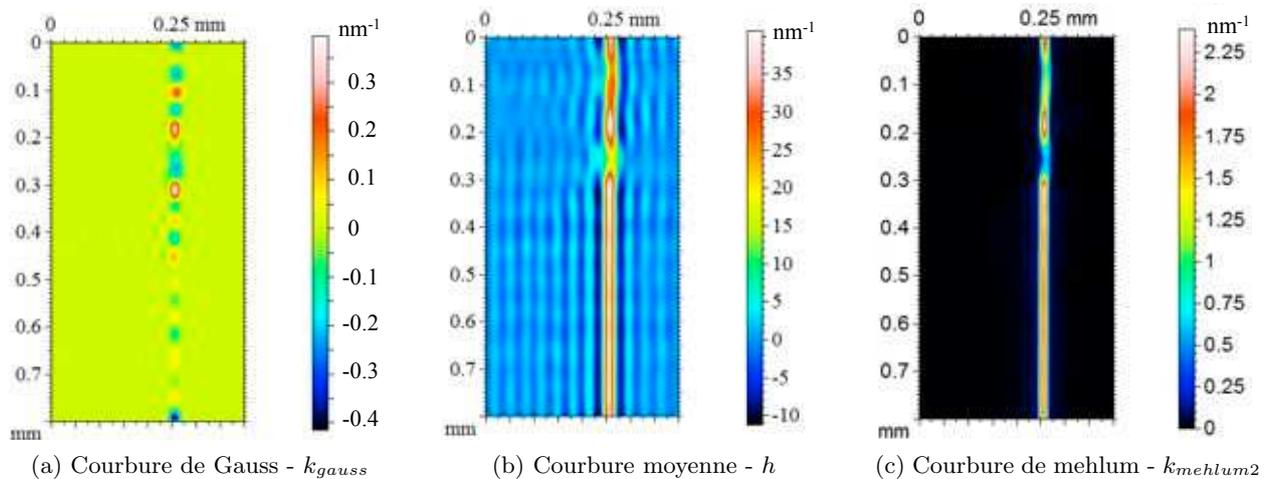
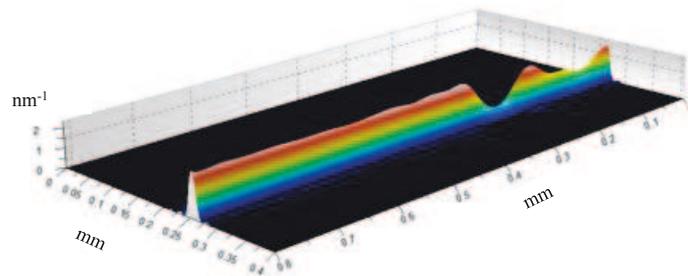


Figure 2.25 – Surf-1 : Principaux indicateurs scalaires de courbure

Pour cette surface, le concepteur a souhaité que les *fonds de guilloche* soient bien marqués visuellement, c'est à dire qu'ils dégagent une impression visuelle de ligne *nette*. On retrouve cette intention à travers l'analyse de l'information en courbures de la surface. Les valeurs importantes relativement au reste de la surface sont situées en fond du motif de guilloche, et on observe à l'endroit des arrachements de matière une diminution nette des intensités de courbures. Celle-ci traduit une sensation visuelle de perte de netteté en fond de ligne de guilloche, et l'intention du concepteur n'est plus réalisée. Les courbures sont ainsi directement liées à l'apparence des surfaces. Cette observation est spécialement marquée pour l'indicateur de courbure de Mehlum d'ordre 2, dont la figure 2.26 présente une représentation 3D.

Figure 2.26 – Surf-1 - Courbure de Mehlum de 2<sup>nd</sup> ordre

Il est aussi possible à partir de notre approche de calculer et de représenter les surfaces en courbures principales. Les représentations sont plus difficiles à interpréter, mais l'information obtenue est plus complète. En effet, on dispose à la fois de la direction et de l'intensité des courbures en chaque point d'une surface. L'échantillon *Surf-2* cartographié en courbures principales est présenté dans la figure 2.27.

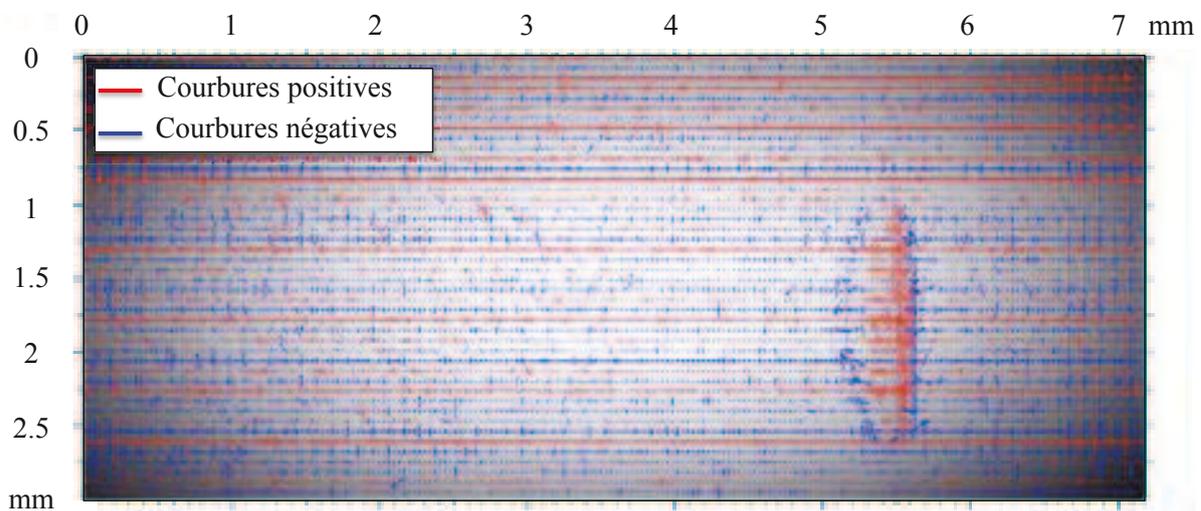


Figure 2.27 – Surf-2 - Représentation en courbures principales

#### 4.4 Synthèse et perspectives

Les cartographies en courbure permettent d'apporter une information supplémentaire en lien direct avec l'impact visuel produit par les anomalies. Cette information constitue ainsi un critère objectif pour évaluer les anomalies.

Cependant, il est nécessaire de maîtriser le moyen d'obtention des courbures. En particulier, il faut lors du conditionnement des mesures d'altitudes pour la dérivation trouver un compromis entre un filtrage performant du bruit de mesure et des composantes haute-fréquence, et une perte d'information par diminution de la résolution, ou lissage. C'est particulièrement important pour l'analyse de la qualité d'aspect des surfaces, où les anomalies ont souvent une longueur d'onde faible comparé à l'ensemble des variations géométriques des surfaces.

La méthode proposée permet d'obtenir les cartographies en courbure de manière instantanée, robuste et systématique à partir des contributions modales de la DMD et des bases de courbures.

Ces bases sont obtenues par deux dérivations successives des descripteurs de la base modale. Pour bien approximer les surfaces dans les zones comportant les anomalies et pouvoir les analyser en courbures par la méthode proposée, il est cependant nécessaire de décomposer les surfaces avec un nombre de modes important. Si la détection a été effectuée séparément, on peut par exemple décomposer les sous-surfaces obtenues par segmentation de la surface initiale, ce qui a le même effet que d'augmenter le nombre de modes de décomposition appliqué sur la surface complète.

Il est nécessaire de disposer d'un nombre de modes important

Les résultats obtenus apportent une information pertinente et nouvelle dans le cadre de l'analyse de l'aspect des surfaces. Les perspectives de cette approche sont la poursuite des travaux sur le choix des indicateurs, et notamment l'étude du lien entre la typologie des anomalies d'aspect et les différents indicateurs de courbures présentés. De plus, une poursuite envisagée est d'appliquer la méthode au cas des anomalies globales.

## 5 Conclusion

L'approche géométrique de l'analyse de l'aspect des surfaces est aujourd'hui très peu utilisée mis à part dans certains domaines d'application spécifiques (par exemple dans l'automobile, ou dans l'aéronautique). Cependant, les capacités grandissantes des moyens de mesure en terme de nombre de points de mesure, d'étendue et de temps d'acquisition des données ouvrent progressivement la voie à ce type d'approche.

Nous avons montré que la *DMD généralisée* permet de séparer efficacement les différents ordres de variations géométriques d'une surface, et ainsi d'isoler et de mettre en évidence les anomalies d'aspect. Cette méthode permet également d'identifier et de caractériser les anomalies *locales* ou *globales* sans connaissance *a priori* de la typologie de la surface ou de ses anomalies. Cette caractérisation permet dans certains cas de procéder à une analyse *quantitative* des anomalies, suffisante pour évaluer leurs criticités.

Enfin, un des objectifs de l'approche *géométrique* est de définir des critères objectifs pour aider les experts à évaluer les anomalies d'aspect. La méthode proposée permet de mettre en œuvre le calcul des courbures sur une surface de façon simplifiée et robuste. Les courbures peuvent être caractérisées composante par composante, i.e globalement (forme/ondulation) ou localement (rugosité). On montre que l'attribut géométrique de courbure permet de mieux appréhender les anomalies locales d'une surface en lien avec le rendu visuel produit.

## Approche géométrique de la qualité d'aspect - Préparation des surfaces mesurées

### *Objectif du chapitre*

*Le chapitre 2 a mis en évidence l'importance de la qualité des données sources pour analyser la qualité d'aspect par une approche géométrique. L'objectif de ce chapitre est d'apporter une contribution à l'amélioration de la qualité des données mesurées sur une surface. Cette contribution se matérialise à travers deux approches. Nous présentons d'abord une nouvelle technique de calibration d'un moyen de mesure basée sur la méthode modale, afin d'améliorer les performances métrologiques. La seconde approche présentée vise à proposer une nouvelle méthode d'identification et de filtrage des points aberrants, spécifique au cas des mesures de surface, sur lesquelles les méthodes générales ne sont pas performantes.*

## 1 Calibration d'une machine de mesure par la méthode modale

### 1.1 Introduction

Le chapitre 2 a permis de présenter le paramétrage modal et les évolutions apportées dans le cadre de ces travaux à la méthode de décomposition associée. De plus, nous avons montré que l'approche géométrique permet de décrire efficacement les variations de forme, d'ondulation et de rugosité d'une surface, et d'établir un lien avec le rendu visuel. Cependant, on remarque sur certaines surfaces mesurées (exemple de *Surf-G1* et *Surf-G2*) des variations de forme et d'ondulation orientées selon les axes de mesure, qui semblent être générées par le moyen de mesure et non intrinsèques à la surface. Les mesures de surfaces sont une combinaison des variations *intrinsèques* de la surface et des variations générées par le moyen de mesure, et la difficulté est de séparer ces composantes, pour les caractériser indépendamment.

L'objectif de cette section est ainsi de mieux maîtriser et si possible d'améliorer la qualité géométrique des surfaces mesurées. Notre approche consiste en deux étapes principales :

- (1) **Identifier les variations géométriques systématiques** liées au système de micro-positionnement
- (2) **Déterminer la surface de correction** à appliquer pour corriger ces variations. Cette surface est estimée à l'aide du paramétrage modal.

Ces travaux sont appliqués sur le moyen de mesure utilisé pour les différents échantillons de surfaces présentés précédemment. Il s'agit d'une machine de mesure par microscopie confocale [Udupa 00a, Udupa 00b] à champ étendu<sup>1</sup>. La sonde optique est positionnée en  $z$  (axe vertical) puis reste immobile durant la mesure. La pièce mesurée est positionnée sur un montage XY, constitué de deux tables mécaniques de micro-positionnement (Figure 3.1). De cette manière, un faisceau de lumière blanche parcourt la zone à mesurer (ligne par ligne) définie par l'utilisateur. La lumière réémise en chaque point de la surface est alors analysée (spectromètre) afin de déterminer les altitudes des points balayés.

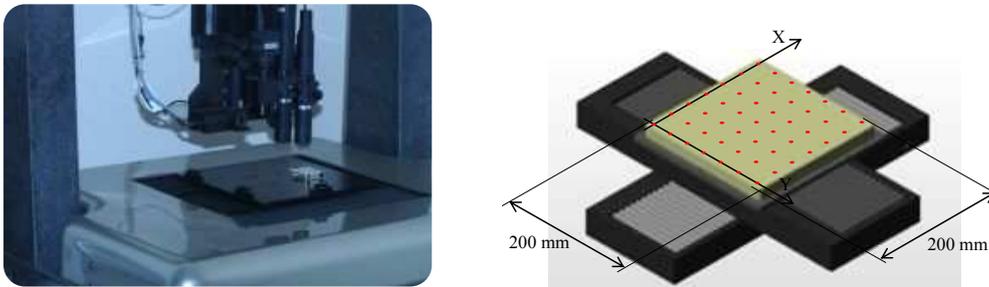


Figure 3.1 – Système de micro-positionnement XY

Le capteur optique est fixe durant la mesure et d'une très grande précision ( $u = 0.06 \mu m$  pour la sonde utilisée). Il s'agit donc ici particulièrement de chercher à corriger les variations géométriques systématiques induites par le système de positionnement de la pièce à mesurer sur les axes X et Y. De plus, ces travaux sont ici présentés et appliqués sur un moyen de mesure en particulier. Ils peuvent cependant être aisément déployés de façon analogue pour tout autre moyen de mesure ou de fabrication qui met en œuvre un système de positionnement équivalent d'un point de vue mécanique. En remarque, il existe sur ce moyen de mesure un mode appelé *3D tracking*, qui permet de modifier la position de la sonde en  $z$  durant la mesure. On peut alors mesurer avec une étendue de mesure en  $z$  plus importante. Dans ces travaux, nous ne nous plaçons pas dans la configuration où la sonde se déplace verticalement durant la mesure.

Ces travaux sur la calibration d'un montage XY de micro-positionnement par une approche modale ont été en partie présentés et diffusés dans [Favrelière 11].

## 1.2 Protocole de mesure et de calibration

Nous décrivons dans cette partie les différents aspects du protocole de calibration proposé, ainsi que les caractéristiques du lot de surfaces à mesurer pour déployer cette méthode.

- (i) **Étalon de calibration.** Afin de séparer les variations géométriques intrinsèques à la surface mesurée et celles induites par le moyen de mesure, nous proposons de réaliser la calibration à partir d'un étalon de planéité. Nous avons choisi d'utiliser un plan de verre, de dimension  $200 \times 200$  mm, calibré à  $\lambda/10$ , soit un défaut de planéité équivalent de l'ordre de  $60$  nm.

1. Altisurf 520, équipée d'une sonde confocale chromatique CL2, Société *Altimet*, [www.altimet.fr](http://www.altimet.fr)

(ii) **Mesure et Échantillonnage.** Pour la calibration, la dimension choisie de la zone de mesure est de  $100 \times 100$  mm. La zone de mesure est positionnée au centre de la zone complète du moyen de mesure. Ce choix est lié à notre usage du moyen de mesure, ainsi qu'à la typologie des surfaces (produits généralement de petite taille) que nous traitons.

Afin de disposer d'un échantillon représentatif, nous avons choisi de mesurer successivement 10 surfaces sur l'étalon de planéité. En remarque, l'environnement thermique du moyen de mesure doit être maîtrisé durant le protocole de calibration, car les variations de températures influent sensiblement sur la mécanique des tables de positionnement (dérive en température). Les surfaces sont échantillonnées selon une grille homogène en  $x$  et  $y$  de dimension  $201 \times 201$  points, soit un pas équivalent de  $0.5$  mm sur les axes  $x$  et  $y$ . Ce choix a été effectué pour les raisons suivantes :

- Les variations géométriques que l'on cherche à caractériser sur les surfaces sont de l'ordre de la forme, voire de l'ondulation. Ceci s'explique notamment par le montage des tables (variations de forme), et la technologie mécanique du système de guidage (variations de l'ordre de l'ondulation).
- Nous souhaitons proposer une méthode de calibration pouvant être mis en œuvre dans un temps industriel. On pourra cependant (en fonction du besoin) ré-effectuer périodiquement la calibration du moyen de mesure.

(iii) **Préparation des mesures.** L'objectif est de caractériser les variations géométriques de forme et d'ondulation. Avant de procéder à cette caractérisation, il est nécessaire de s'affranchir de la pente liée au positionnement de la pièce sur les tables XY. Nous proposons donc de façon préalable de redresser les surfaces obtenues (association d'un plan par le critère des moindres carrés).

De plus, les mesures peuvent contenir des points anormalement éloignés de l'ensemble des données de la surface, appelés points aberrants. La présence de ces points peut être liée à du bruit de mesure, ou par exemple à la présence de poussières sur l'étalon de planéité. La méthode d'identification et de filtrage des points aberrants mise en œuvre est décrite dans la section 2.

La figure 3.2 montre la représentation d'une mesure réalisée sur l'étalon de calibration, après redressement et filtrage des points aberrants 3.2b.

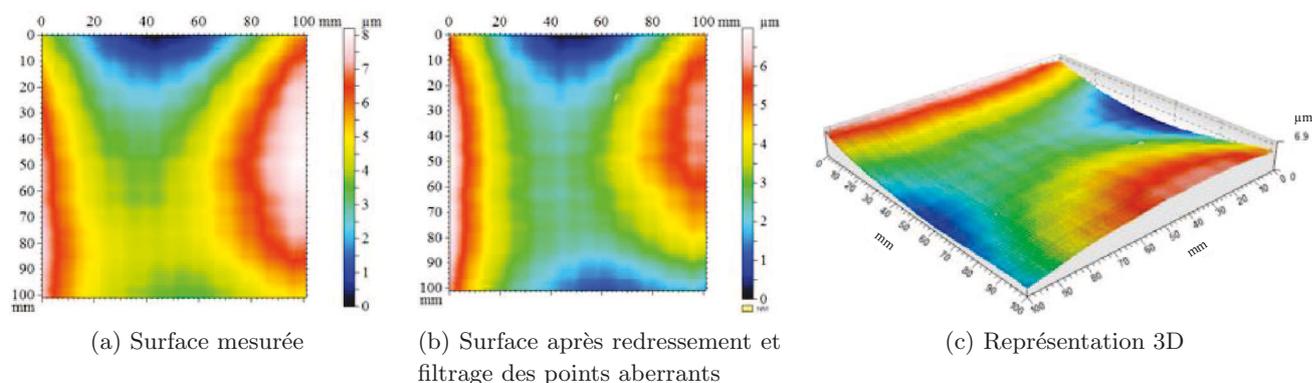


Figure 3.2 – Représentation d'une mesure de calibration

On observe un défaut de forme de  $6.9 \mu\text{m}$  sur la surface. Compte tenu du défaut de planéité du plan de verre (de l'ordre de  $60 \text{ nm}$ ), ces variations de forme confirment l'existence de variations générées par le moyen de mesure, liée au système de micro-positionnement.

### 1.3 Caractérisation des variations géométriques

L'objectif est de caractériser les variations géométriques systématiques (répétables) du moyen de mesure afin de pouvoir corriger les résultats obtenus en soustrayant aux mesures une **surface de correction**. La méthode de caractérisation des composantes géométriques est d'abord présentée pour un échantillon du lot de surface, puis appliquée au lot complet de mesures.

#### 1.3.1 Caractérisation des variations pour une surface mesurée

Dans cette section, il s'agit de déterminer pour un échantillon du lot si l'approche envisagée permet de caractériser efficacement les variations géométriques de la surface. La méthode mise en œuvre est basée sur la **Décomposition Modale Discrète** (voir section 2, chapitre 2).

La DMD est appliquée avec  $N_q = 500$  descripteurs. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 3.3.

Les composantes obtenues mettent en évidence les points suivants :

- (i) L'amplitude du résidu indique que la DMD a permis d'approximer de façon très fine la surface mesurée. Cette méthode est donc pertinente dans ce cas d'application. Elle peut alors être appliquée pour caractériser les variations géométriques du lot complet de surfaces mesurées sur l'étalon de planéité. C'est l'objet de la section 1.3.2.
- (ii) La comparaison de la composante de forme avec la surface mesurée montre qu'un faible nombre de paramètres ( $N_f = 25$ ) permet de décrire en amplitude environ 90% des variations géométriques mesurées sur le plan de verre. La calibration des tables de micro-positionnement XY doit donc en premier lieu permettre de corriger ces variations, puis dans la mesure du possible, les variations d'ondulation. Il faut pour cela séparer parmi ces composantes celles qui sont **systématiques** et celles qui sont **aléatoires**.

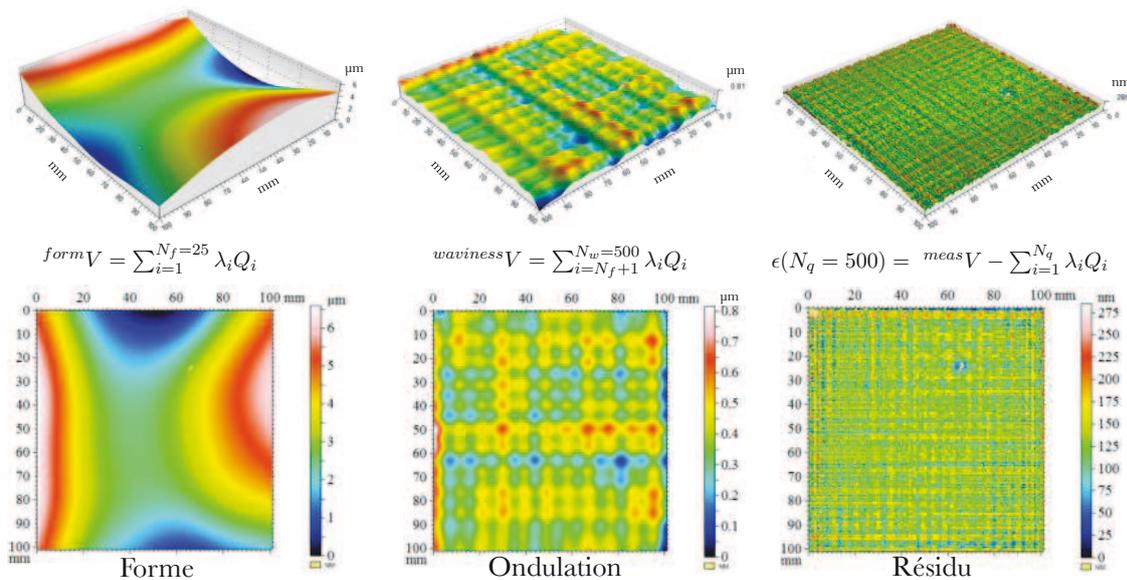


Figure 3.3 – Décomposition Modale Discrète d'une mesure de plan de verre

### 1.3.2 Caractérisation des variations géométriques du lot de surfaces de calibration

Après avoir montré sur une surface que la DMD permet de caractériser avec précision ce type de variations géométriques, nous présentons dans cette section comment sont séparées les variations géométriques aléatoires des variations systématiques. Une fois cette séparation réalisée, une *surface de correction* est générée à partir des variations géométriques identifiées comme répétables.

La DMD permet de caractériser les composantes d'une surface, en l'exprimant sous la forme d'une somme de composantes élémentaires, à la manière de la Décomposition de Fourier. On peut ainsi visualiser le *spectre modal des amplitudes*, qui illustre les contributions modales correspondantes à chacun des descripteurs de la base modale de la surface une fois décomposée. La figure 3.4 présente le spectre modal des amplitudes obtenu pour le lot de surfaces mesurées sur l'étalon de planéité lors du protocole de calibration décrit dans la section 1.2. Pour faciliter la représentation et la lecture, on ne représente ici que les contributions associées aux 50 premiers modes de décomposition.

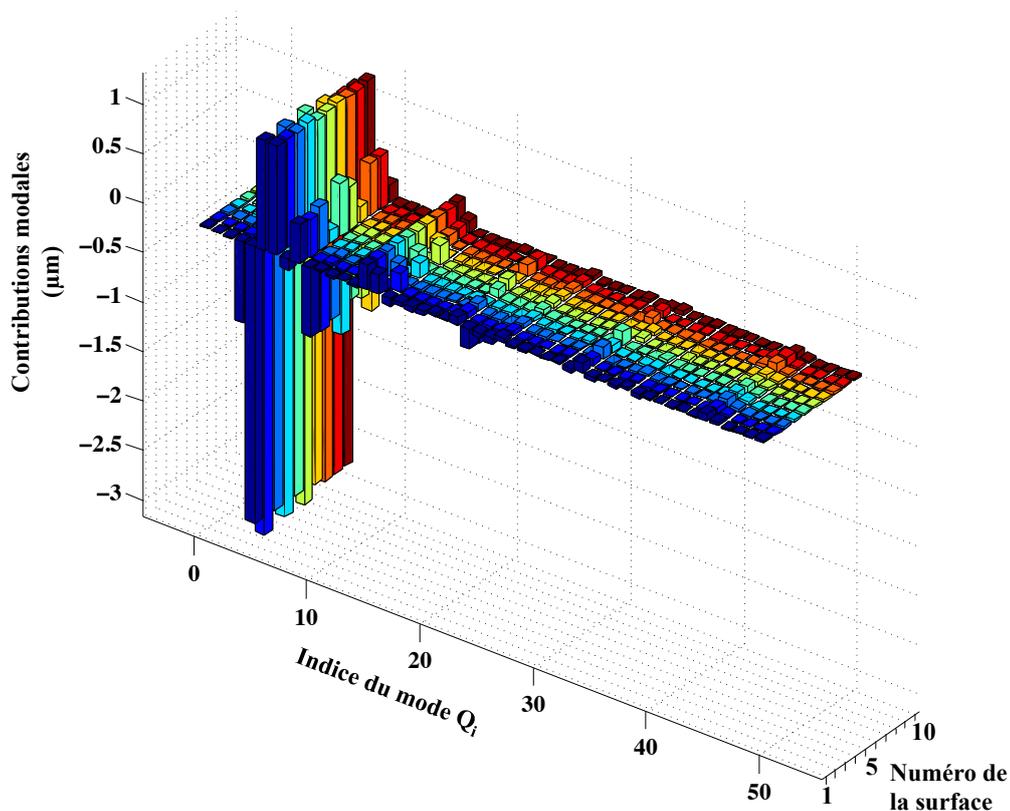


Figure 3.4 – Spectre modal des amplitudes pour le lot de mesures de calibration

La représentation des contributions modales du lot indique que les variations observées sont globalement répétables. On peut donc envisager leur correction. Cependant, il est nécessaire avant de mettre en œuvre la méthode de mener une analyse plus détaillée de la répétabilité des variations caractérisées.

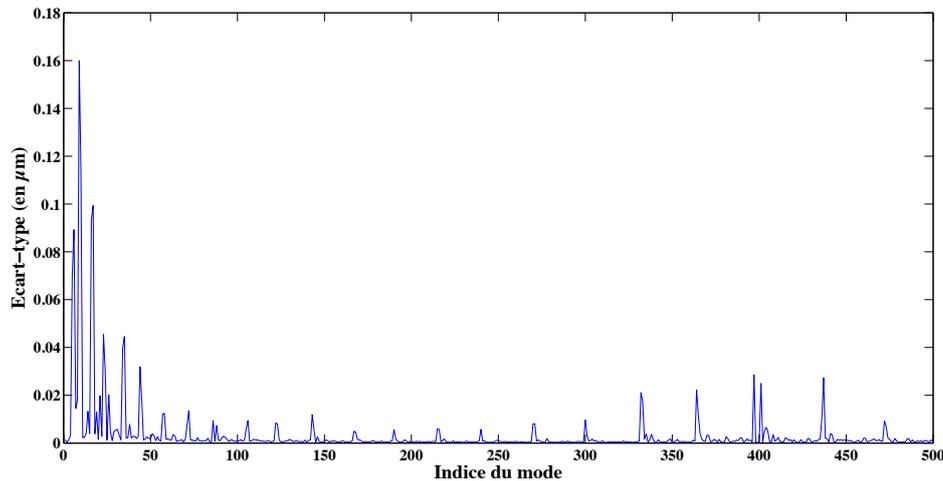
Nous proposons dans un premier temps d'observer l'évolution de l'écart-type calculé pour chacun des modes de la décomposition modale des dix surfaces mesurées sur l'étalon de planéité.

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 3.5a. On observe des variations importantes d'écart-type, et des valeurs spécialement importantes pour certains modes. En comparant les indices des modes où apparaissent ces valeurs avec le spectre modal moyen des surfaces (figure 3.6), il apparait que ces valeurs anormalement importantes coïncident avec les modes prépondérants de la décomposition. Elles ne permettent donc pas de conclure à une variation importante de la valeur du mode considéré sur le lot de surfaces.

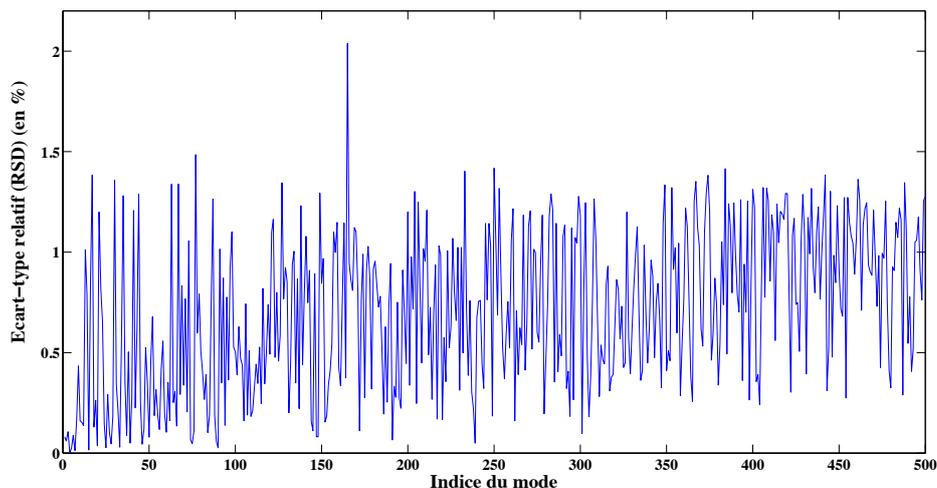
Nous proposons donc dans un seconde temps d'utiliser un indicateur statistique qui prend en compte l'amplitude des modes, appelé *coefficient de variation*, ou sa forme en valeur absolue appelée *écart-type relatif* (RSD). Cet indicateur permet de pondérer la valeur de l'écart-type par l'amplitude moyenne du mode considéré (Equation 3.1). On obtient ainsi une estimation représentative de la répétabilité pour chacune des contributions modales calculées sur le lot de mesures de calibration.

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} C_v : \text{Coefficient de variation} \\ \sigma_r : \text{Ecart-type relatif} \\ \sigma : \text{Ecart-type} \\ \mu : \text{Moyenne} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{|\mu|}$$



(a) Ecart-type



(b) Ecart-type relatif

Figure 3.5 – Estimation des variations de chaque composante de la DMD, pour le lot de surfaces mesurées

La valeur de l'écart-type relatif est contenue dans l'intervalle  $[0\%, 2\%]$  pour l'ensemble des modes décomposés. Les variations géométriques de la surface caractérisées par la DMD sur le lot de mesures de calibration peuvent donc être qualifiées de *systématiques*, pour l'ensemble des modes de la décomposition ( $N_q = 500$ ).

### 1.3.3 Surface de correction

Après avoir caractériser les variations géométriques systématiques sur le lot de surfaces, on calcule la *surface de correction*, i.e. la surface à soustraire aux données mesurées afin d'éliminer les variations générées par le moyen de mesure, et ainsi d'améliorer ses performances métrologiques.

Pour l'ensemble des modes de décomposition, nous avons montré que les variations géométriques des surfaces peuvent être considérées comme répétables. Pour déterminer la surface de correction, l'approche proposée consiste à calculer le spectre modal des amplitudes moyen pour le lot de surfaces de calibration, puis à reconstruire la surface à partir de l'ensemble des contributions modales du spectre moyen. La figure 3.6 illustre le spectre moyen des amplitudes obtenu à partir du lot de surfaces de calibration.

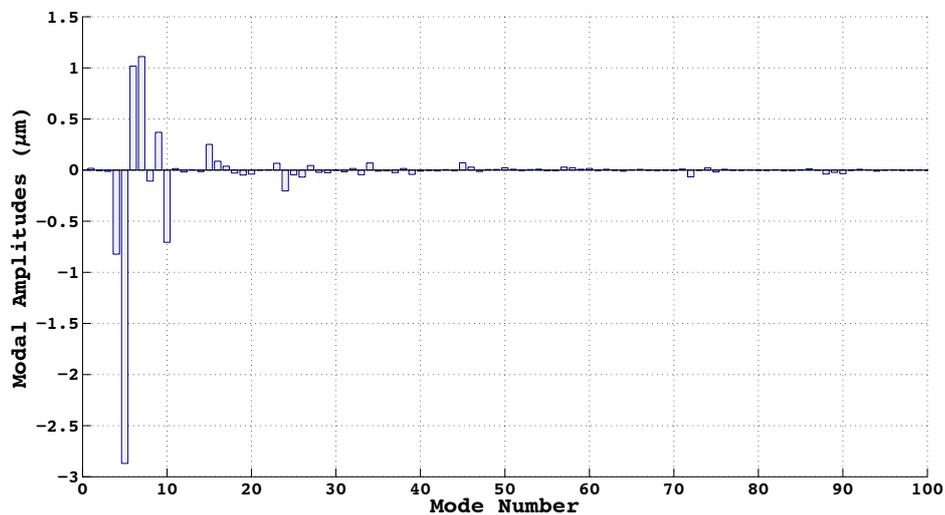


Figure 3.6 – Spectre modal *moyen* des amplitudes pour le lot de mesures de calibration

La *surface de correction* est obtenue par recombinaison de l'ensemble des contributions modales du spectre moyen des amplitudes. La figure 3.7 illustre les variations géométriques avant et après correction par l'approche proposée, ainsi que la reconstruction de la surface de correction.

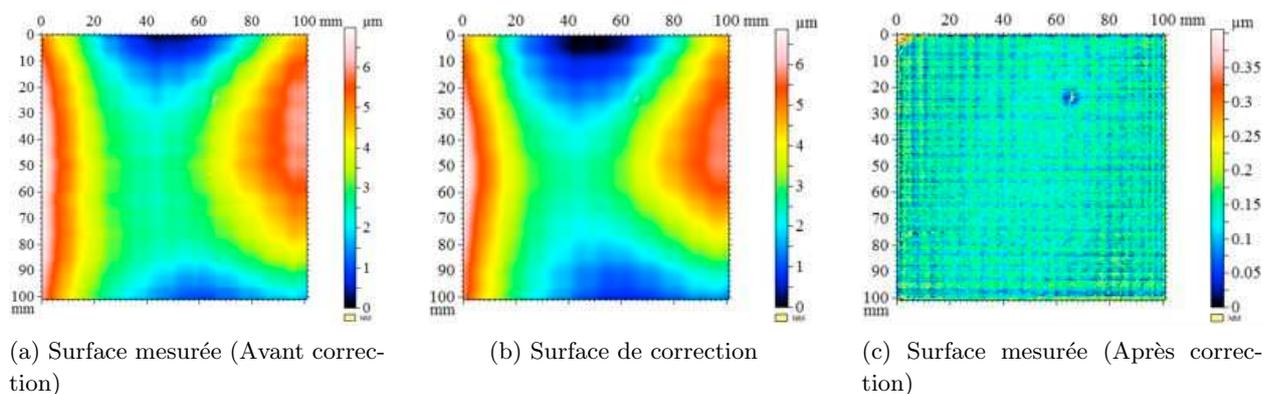


Figure 3.7 – Correction d'un système de micro-positionnement XY par l'approche modale

### 1.3.4 Conclusion et perspectives

Cette méthode permet de corriger l'ensemble des variations de forme et une très large partie des variations d'ondulation induites par le système mécanique de micro-positionnement. Ainsi, l'intégration de cette correction dans le logiciel de pilotage du profilomètre optique *Altisurf* permet de compenser ces variations géométriques en temps réel pendant la mesure. Une telle approche permet d'améliorer sensiblement les performances métrologiques en identifiant la **signature** du moyen de mesure. De plus, elle présente l'avantage d'être systématique et simple à mettre en œuvre quel que soit le moyen ou le procédé de mesure utilisé.

La méthode apporte des résultats intéressants pour évaluer la signature d'un procédé de mesure. Une perspective de ces travaux serait donc d'élargir l'approche aux procédés de fabrication, afin de mieux piloter les moyens de production, ou de détecter plus facilement et rapidement les dérives potentielles liées par exemple à une détérioration de l'outil d'usinage. Cependant, une telle approche nécessite de pouvoir mesurer régulièrement et avec précision les surfaces usinées durant la production, ce qui présente des difficultés.

Dans le cadre de l'analyse de l'aspect des surfaces, on a montré dans le chapitre 2 que la qualité des données sources est essentielle pour réaliser une analyse de la qualité d'aspect des surfaces par une approche métrologique. Dans ce cadre, l'amélioration de la calibration du moyen de mesure et de ses performances métrologiques constitue un apport important. Dans la même direction, les acquisitions réalisées par les moyens de mesure actuels, et notamment par les méthodes optiques sans contact comportent souvent des points aberrants. Ces points perturbent les analyses des surfaces mesurées et doivent donc être identifiés puis si nécessaire exclus des données de façon préalable à toute étude et/ou interprétation. Le filtrage des points aberrants sur les surfaces mesurées est l'objet de la seconde partie de ce chapitre (Section 2).

## 2 Filtrage des points aberrants

### 2.1 Introduction

Le chapitre 2 a permis de montrer l'intérêt de l'approche *géométrique* pour analyser la qualité d'aspect d'une surface, et apporter aux experts des critères objectifs d'évaluation. Cette approche est basée sur le traitement et l'interprétation des mesures de surfaces, généralement de type mesures topographiques (mesures en altitudes). Il est essentiel de maîtriser la qualité des données sources de cette approche, afin de ne pas perturber les traitements et analyses qui permettent de faire le lien entre certains attributs géométriques et l'apparence des surfaces.

Dans la première partie de ce chapitre (section 1), nous avons présenté une nouvelle méthode de calibration des moyens de mesure afin d'améliorer les performances métrologiques. La méthode proposée consiste à identifier les variations géométriques générées par le moyen de mesure (*signature machine*) et ainsi corriger les données mesurées.

Dans cette partie, nous proposons d'améliorer la qualité des données mesurées en identifiant les points anormalement éloignés de l'ensemble des autres points mesurés, et particulièrement des points de leur voisinage. Ces points sont appelés *points aberrants*. Ils sont ensuite si nécessaire exclus afin de ne pas perturber l'interprétation et les analyses ultérieures réalisées à partir des données mesurées.

En contrôle d'aspect, les mesures des produits à haute valeur ajoutée sont souvent réalisées par des techniques optiques sans contact, pour ne pas endommager les surfaces (contrôle *non destructif*). Les données mesurées par ce type de techniques permettent d'obtenir un grand nombre de points mesurés dans un temps raisonnable, mais contiennent souvent des points aberrants. Ceux-ci prennent la forme de pics locaux sur les surfaces mesurées (type Dirac), et sont intrinsèquement de nature apériodique. Ainsi, lorsque l'on sépare les composantes périodiques (ou pseudo-périodiques) des composantes non-périodiques pour isoler les anomalies d'aspect (voir section 3, chapitre 2), l'information obtenue est fortement perturbée par la présence des points aberrants. De plus, certains traitements réalisés pour interpréter les résultats sont très sensibles à la présence de ce type de points. C'est le cas par exemple de l'analyse en courbures lorsqu'elle est réalisée à partir d'une mesure de topographie (voir section 4, chapitre 2). Ces points représentent donc une problématique importante dans le cadre de ces travaux.

De nombreuses méthodes ont été développées pour le traitement des points aberrants dans le cas *général*, i.e. quand les données sont un ensemble d'observations *non ordonnées* dans le temps et/ou dans l'espace. Dans le cas spécifique des surfaces, les données sont ordonnées sur 2 axes  $(x, y)$ , et les altitudes  $z(x, y)$  ne sont a priori pas distribuées selon une loi normale. L'application des méthodes existantes à cette configuration spécifique des données ne permet pas une identification efficace des points aberrants.

Nous proposons donc ici une nouvelle méthode d'identification des points aberrants dédiée aux mesures de topographie de surface, dont les principes pourront facilement être transposés à l'ensemble des mesures de champs (images, champs de température, etc.).

## 2.2 Historique et principe

Peirce [Peirce 52] fut le premier à établir une règle d'exclusion formelle, i.e. un critère objectif pour identifier les points aberrants d'un lot de données. Ses travaux, basés sur des calculs de probabilités à partir d'un modèle de distribution normale des données, ont inspiré la majorité des méthodes actuelles, et notamment au 18<sup>ème</sup> siècle celles de Chauvenet [Chauvenet 68], de Wright [Wright 84], ou encore plus récemment la méthode de Grubbs [Grubbs 69, Stefansky 72]. Nous présentons dans la section 2.3.2.a les principaux concepts de cette méthode de référence, et comment la mettre en œuvre avec les moyens actuels de traitements. Cependant, les limites de cette méthode en terme de temps de calcul et pour des échantillons de données importants rendent son application à la problématique de la métrologie des surfaces difficile.

L'approche proposée pour les mesures de surfaces utilise la méthode de Grubbs (aussi appelé *test de Grubbs*). Cette technique présente l'avantage d'avoir un critère d'exclusion lié au risque  $\alpha$  (risque d'erreur d'identification d'un point aberrant) et non classiquement à un écart arbitraire des données par rapport à la moyenne. Le principe est de comparer les valeurs absolues des écarts réduits par rapport à une valeur limite, dérivée des valeurs critiques de la distribution  $T$  de Student [Student 08, Hotelling 31].

Cependant, ce test est valable si l'hypothèse de normalité sur les données est vérifiée, ce qui n'est pas le cas des données mesurées brutes sur les surfaces. D'autre part, il ne tient pas compte du fait que les données (altitudes) sont ordonnées dans l'espace. Pour mieux spécifier les besoins liés au traitement de mesure de surfaces, nous proposons de répondre aux questions définies par Barnett [Barnett 78] dans ses travaux sur la problématique des points aberrants :

- (a) Quelles sont les causes possibles des valeurs aberrantes dans les données statistiques ?
- (b) De quelle manière les valeurs aberrantes influencent elles l'analyse des données ?
- (c) Quel modèle de probabilité peut être employé pour expliquer la présence de valeurs aberrantes ?

Auxquelles nous répondons :

- (a) Les causes expliquant la présence de points aberrants sur les mesures de surfaces peuvent être nombreuses. De façon globale, les points aberrants sont soit directement liés au moyen de mesure (i.e palpeur mécanique, sonde optique, algorithme d'interprétation des altitudes), soit à la présence d'altérations superficielles sur l'échantillon mesuré (poussières, traces, saletés). Ce point n'est pas l'objectif de ces travaux, et n'est donc pas développé plus en détail dans ce document. A contrario, les questions (2) et (3) sont centrales pour notre approche.
- (b) Avant de traiter les données aberrantes, il est nécessaire de souligner l'influence de ces points sur les analyses et traitements ultérieurs, particulièrement dans le cas des mesures de surfaces. Ainsi, de nombreux indicateurs surfaciques des normes [ISO-8785 98] et [ISO-25178-3 08] ne sont pas robustes à la présence de ces points anormaux. De la même façon, de nombreuses méthodes d'analyse des surfaces sont très sensibles à la présence ces points. On peut par exemple citer l'exemple d'une analyse des surfaces par la méthode *area-scale* [ASME-B46.1 09, Brown 94], pour discriminer des surfaces entre elles [Jordan 06, Scott 05], ou pour établir des corrélations avec leur comportement [Brown 01, Berglund 10], ou encore le moyen d'usinage [Cantor 09]. Cette méthode d'analyse fonctionne ainsi généralement mieux après le filtrage des points aberrants, même s'il existe des cas où cette préparation des données préalable n'est pas nécessaire [Brown 10, Vessot 12].

- (c) Le modèle de probabilité utilisé pour modéliser les données est essentiel pour l'identification de points aberrants. En métrologie des surfaces, l'hypothèse d'une distribution normale des points mesurés n'est de façon générale pas vérifiée. Les méthodes d'identification basées sur une telle hypothèse ne sont donc pas directement performantes sur les mesures de surface. Cependant, il est possible d'appliquer une transformation aux données afin de se placer dans le cadre de l'hypothèse de normalité. Dans ces travaux, nous proposons de filtrer les variations géométriques de forme des surfaces, ce qui permet de se rapprocher sensiblement de l'hypothèse de normalité des données. L'identification est alors réalisée sur le résidu du filtrage de forme, par un test statistique basé sur la méthode de Grubbs.

Enfin, nous avons montré dans ces travaux l'importance de prendre en compte le caractère multi-échelle des surfaces. Pour l'identification des points aberrants, cette caractéristique se traduit par le fait qu'un point aberrant est défini par rapport à son environnement proche, i.e. qu'il est très éloigné de ses voisins, et non forcément de l'ensemble des observations (points mesurés) sur la surface. Ainsi, nous proposons de prendre en compte l'aspect multi-échelle en appliquant la méthode à travers une *fenêtre d'analyse*, qui parcourt récursivement l'ensemble de la surface, et dont la taille varie. Afin de faciliter la lecture, nous désignerons un(les) *Point(s) Aberrant(s)* par l'abréviation *PA* dans la suite de cette section.

## 2.3 Définition et méthodes pour identifier les points aberrants

### 2.3.1 Définition

La littérature dans le domaine propose de nombreuses définitions. Une des principales est celle proposée par Grubbs :

Une *observation aberrante* est une observation qui apparaît dévier nettement des autres observations de l'échantillon dans lequel elle se produit [Grubbs 50, Grubbs 72].

La norme ISO 16269 sur la détection et le traitement des valeurs aberrantes propose une variante de cette définition :

Un *point aberrant* est un membre d'un petit sous-ensemble d'observations qui semble être incompatible avec le reste des observations d'un échantillon donné [ISO-16269-4 10].

Nous proposons de compléter la définition d'un PA dans le cas particulier des surfaces, en soulignant que, à la différence de données "générales", les données sur une surface ne sont pas indépendantes, dans le sens où elles sont ordonnées, i.e liées par leurs positions sur les axes (x,y). Ainsi, un point aberrant sur une surface se définit aussi par rapport à son environnement sur la surface, et est défini à une échelle d'analyse donnée. Il n'est donc pas forcément défini par rapport à l'ensemble de la surface, nous proposons alors de parler de *point aberrant local*.

### 2.3.2 Méthodes existantes

Les méthodes pour identifier et éliminer ce type de points sont nombreuses, et très utilisées dans le domaine académique ou industriel. L'objectif est ici de formaliser une méthode spécifique au cas des surfaces mesurées, afin de maîtriser le procédé de préparation des mesures, et l'influence sur les résultats des analyses et traitements ultérieurs. Notre approche s'inscrit dans la norme [ISO-16269-4 10], en respectant le cadre de la stratégie générale pour la gestion des points aberrants illustrée dans la figure 3.8. En remarque, cette stratégie montre que si les méthodes d'analyses et

traitements ultérieurs sont robustes aux PA, alors il n'est bien sûr pas nécessaire de les filtrer. Dans notre contexte, il est certain qu'il existe des traitements de surface robustes aux PA. Cependant, la difficulté est qu'il existe très peu d'information sur cet aspect de la métrologie des surfaces.

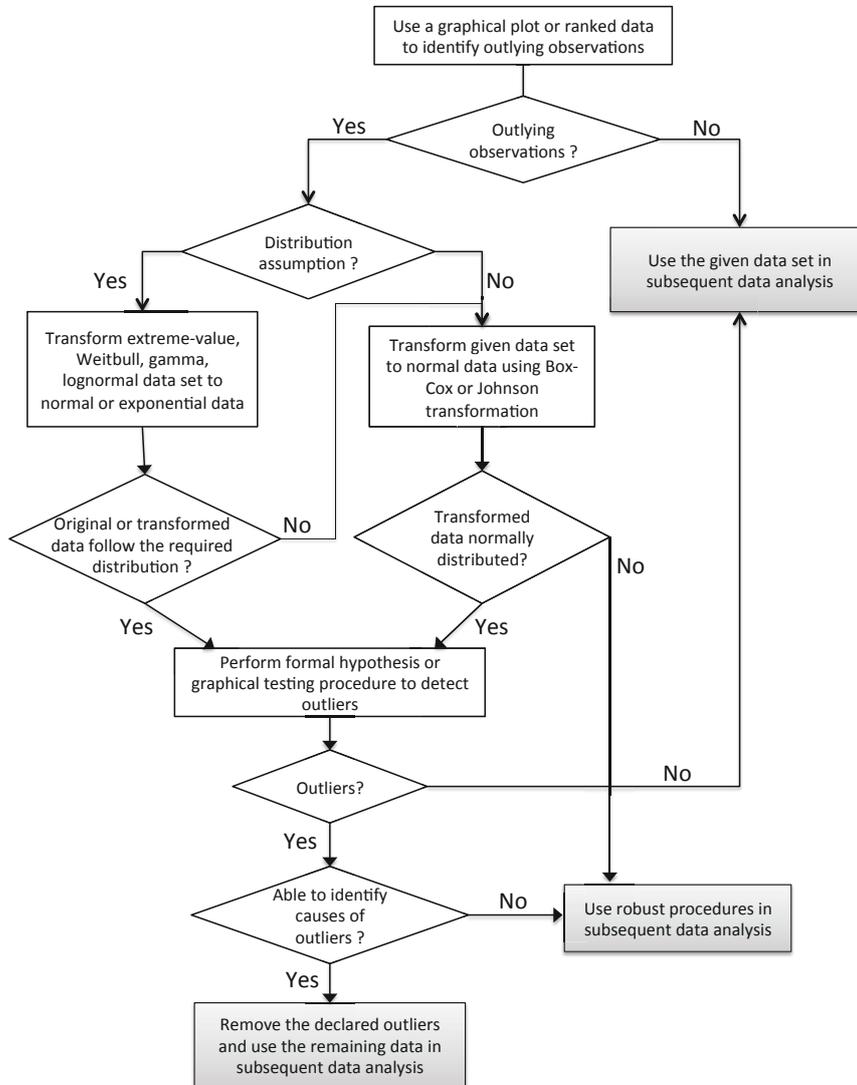


Figure 3.8 – Flow chart - détection et traitement des PA, selon la norme ISO-16269-4

En 1805, le mathématicien français A. M. Legendre [Legendre 05] essaye de déterminer l'orbite des comètes à partir de 3 observations de latitude et de longitude. Confronté à des points anormaux, il propose déjà d'exclure les données *trop grandes pour être admissibles*, le critère d'exclusion restant subjectif. En 1852, Peirce [Peirce 52] est le premier à formaliser le problème d'identification des points aberrants, en établissant une règle d'exclusion basée sur l'utilisation d'un modèle de distribution gaussienne, et un calcul de probabilité à partir de ce modèle. Dans le domaine des points aberrants, ces travaux font référence car ils ont inspiré les principales méthodes utilisées aujourd'hui. Nous détaillons dans la section 2.3.2.a comment peut être mis en œuvre de façon pratique ce critère d'exclusion.

Enfin, plusieurs stratégies sont possibles pour traiter les PA d'un ensemble de données. Dans leur ouvrage, Barnett et al. [Barnett 94] proposent une revue des différentes approches, et différencient quatre stratégies :

- l'*Accommodation* : Protéger une analyse ultérieure des valeurs aberrantes
- l'*Incorporation* : Remplacer le modèle initial par un autre modèle, par rapport auquel les observations apparaissent comme discordantes
- l'*Identification* : Tester formellement si un point est aberrant ou non
- l'*Exclusion* : Supprimer les points aberrants des données

On peut ajouter à ces stratégies le *marquage* des PA (*labelling* en anglais), qui signale les PA potentiels d'un ensemble de données, en vue d'une analyse ultérieure [Iglewicz 93]. Cette stratégie peut être spécialement adaptée quand ces points constituent l'information utile d'une surface, et non simplement des erreurs de mesure. Un exemple de ce type peut être une surface hétérogène en terme de réflectivité, où les PA permettent de détecter les zones très (et/ou trop peu) réfléchissantes. La stratégie choisie dans ces travaux consiste à *identifier*, et *exclure* si nécessaire les PA identifiés.

En synthèse, la revue des différentes méthodes et tests d'exclusion proposés par la littérature permet de mieux comprendre les approches de gestion des PA pour des données "générales", et de déterminer dans quelle mesure ces méthodes peuvent apporter des éléments de réponse pertinents dans le cadre des mesures de surface. Dans le cadre de la métrologie des surfaces, il ressort que les méthodes habituelles ne peuvent être directement appliquées pour 3 raisons principales :

- (i) Dans le cas général, les mesures de surfaces ne sont pas distribuées selon une loi normale (cf. section 2.4.2).
- (ii) Les données sont positionnées sur les axes (x,y), et donc non indépendantes.
- (iii) Les surfaces mesurées comportent souvent un nombre important d'observations ( $> 10^7$  *points*).

### 2.3.2.a Critère d'identification de Peirce

Benjamin Peirce fait le constat que dans une série d'observations réelles, certaines d'entre elles peuvent différer fortement de l'ensemble des observations. Ces observations inexplicables sont de plus très éloignées des modèles théoriques utilisés, au point qu'elles sont généralement considérées comme des erreurs, et exclues de l'ensemble des données. Ainsi, les géomètres ont par exemple pris l'habitude de rejeter ces observations *anormales* des données mesurées, bien qu'aucun critère objectif n'existe pour procéder à une telle opération.

Pour la première fois (en 1852), Peirce propose une règle d'exclusion formelle pour traiter les observations anormales, basée sur des calculs de probabilités.

Sa règle d'exclusion est définie par le principe suivant :

« *The proposed observations should be rejected when the probability of the system of errors obtained by retaining them is less than the probability of the system of errors obtained by their rejection multiplied by the probability of making so many, and no more, abnormal observations* »

Ainsi, la règle d'exclusion de Peirce est basée sur un modèle de distribution normale des points, et compare pour chaque observation les probabilités d'avoir des PA dans les données avant et après exclusion de l'observation inspectée.

Gould [Gould 55] reprend dans sa correspondance avec le Professeur A. D. Bache en 1855 les travaux de Peirce en vue de faciliter leur mise en application. Il définit notamment des tables de calcul

logarithmique et des fonctions spéciales permettant, avec les moyens disponibles en fin du 19<sup>ème</sup> siècle, de procéder à l'identification des points aberrants par le critère de Peirce.

Nous reprenons ici les équations écrites par Gould afin de montrer comment déterminer l'écart critique  $x_{peirce}$  à partir duquel une observation est identifiée comme étant aberrante.

Tout d'abord, l'écart critique  $x_{peirce}$  est fonction de  $N$ , le nombre total d'observations,  $k$ , le nombre de PA à rejeter, et  $m$ , le nombre d'observations considérées comme douteuses. L'équation (3.2), définie par Gould permet d'obtenir une première définition de  $R(x)$  :

$$R(x) = e^{\frac{1}{2}(x^2-1)} \cdot \psi(x) \quad \text{avec : } \psi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\Pi}} \cdot \int_x^\infty e^{-\frac{1}{2}t^2} dt \quad (3.2)$$

$\psi(x)$  correspond à la probabilité qu'une variable normale centrée réduite ( $\mu = 0, \sigma = 1$ ) prenne une valeur n'appartenant pas à  $[-x, x]$ . Cette fonction correspond donc à la *probabilité d'avoir une observation anormale* dans un lot de données, dans l'énoncé du critère de Peirce.

La combinaison des équations (3.3a) et (3.3b), données par Gould, permet d'obtenir une nouvelle équation définissant  $R$  en fonction de  $x$  (3.4) :

$$\lambda^2 = \frac{N - m - kx^2}{N - m - k} \quad (3.3a)$$

$$\lambda^{N-k} \cdot R^k = Q^N \quad (3.3b)$$

$$R(x) = Q^{N/k} \cdot \left( \frac{N - m - kx^2}{N - m - k} \right)^{\frac{-(N-k)}{2k}} \quad (3.4)$$

On peut alors résoudre le système, constitué par les équations (3.2) et (3.4). On obtient la valeur critique  $x$ , notée  $x_{peirce}$  (écart critique). Numériquement, cette valeur peut être approximée efficacement par la méthode de Newton. On obtient ainsi la valeur de  $x$  correspondant à l'écart critique  $x_{peirce}$ , permettant d'identifier les PA sur un lot de données, définie en fonction de  $N$  (nb. total d'observations),  $k$  (nb. de PA à rejeter), et  $m$  (nb. d'observations douteuses). Le critère est appliqué initialement pour  $k = 1$ , puis de façon récursive tant que l'on identifie des points aberrants.  $m$  est généralement choisi à 1 (identification des PA point à point).

$$|x_i - x_m|_{max} = x_{peirce} \times \sigma \quad (3.5a)$$

$$|x_i - x_m| > x_{peirce} \times \sigma \Leftrightarrow x_i \text{ est un point aberrant} \quad (3.5b)$$

$$\text{avec } \begin{cases} |x_i - x_m|_{max} & \text{Ecart maximum acceptable} \\ x_{peirce} & \text{Valeur critique de Peirce} \\ \sigma & \text{Ecart-type de l'ensemble des observations} \\ x_i & \text{Observation évaluée} \\ x_m & \text{Moyenne de l'ensemble des observations} \end{cases}$$

Ainsi, un ratio d'*écart maximum acceptable* est calculé (Equation 3.5a) et permet d'identifier les PA du lot de données. Ross [Ross 03] montre un exemple de mise en œuvre pratique de ce principe, en utilisant les tables définies par Gould. La méthode décrite précédemment permet de recalculer ces tables, pour un échantillon quelconque.

Pour la problématique de détection des PA, la méthode de Peirce constitue un apport initial fondamental : Il définit les principes généraux de détection des PA et propose un critère formel efficace pour la détection des observations aberrantes. Pour un nombre significatif d'observations, le calcul de l'écart critique  $x_{peirce}$  (approximation par la méthode de Newton), de façon récursive, rend cette méthode difficilement applicable à des échantillons plus conséquents de données, et donc non adaptée dans le cadre de ces travaux, i.e. la détection des PA sur les surfaces mesurées. Nous montrons dans la suite les évolutions de cette méthode, et comment prendre en compte les spécificités des surfaces.

### 2.3.2.b Autres méthodes d'identification

Chauvenet [Chauvenet 68] propose quelques années plus tard une nouvelle formalisation du problème de détection des PA. Sa méthode est très proche de celle proposée par Peirce mais moins générale. Cependant, plus facile à mettre en œuvre, elle est aujourd'hui assez souvent utilisée. Plus récemment, le test de Grubbs [Grubbs 69, Stefansky 72], aussi appelé *Maximum Normed Residual Test* permet de définir un écart maximum acceptable directement lié au risque d'erreur dans l'identification (risque  $\alpha$ ). La forme généralisée du test de Grubbs (Tietjen-Moore test [Tietjen 72]) permet d'appliquer la méthode dans le cas d'un nombre connu de PA. Enfin, Rosner [Rosner 83, Paul 91] propose une méthode appelée *generalized Extreme Studentized Deviate test* (ESD test) spécialement adaptée dans le cas d'un nombre inconnu de PA dans les données.

Ainsi, différentes méthodes permettent d'identifier efficacement ces points sur des données générales, i.e à une dimension et non ordonnées. De plus, ces méthodes s'appliquent dans le cadre de l'hypothèse de normalité, ce qui rend difficile et peu efficace leur application directe dans le cas des surfaces mesurées, d'autant plus quand celles ci possèdent un grand nombre de points mesurés.

La méthode proposée permet de rendre applicable le test de Grubbs (méthode générale) au cas spécifique des surfaces. De plus, nous montrons comment améliorer l'efficacité du filtre en le rendant sensible à l'échelle d'analyse des surfaces mesurées. Enfin, la méthode proposée a été développée dans le cadre général de la stratégie définie dans la norme existante pour le traitement et l'identification des points aberrants (voir Figure 3.8).

## 2.4 Proposition d'une nouvelle méthode d'identification dédiée à la métrologie des surfaces

### 2.4.1 Échantillons et moyen de mesure

Pour illustrer la méthode, nous nous appuyons sur deux mesures de surface.

**Surf-4** L'échantillon Surf-4 est une surface mesurée d'un plan de verre calibré à  $\lambda/5$ , ce qui correspond à un écart de planéité d'environ  $0.1 \mu m$  sur la surface. Cette mesure a été effectuée dans le cadre de nos travaux sur la calibration d'un moyen de mesure par une approche modale [Favrelière 11], présentés dans la section 1.

Le moyen de mesure utilisé est basé sur la microscopie confocale à champ étendu. La sonde optique confocale chromatique utilisée a profondeur de champ de  $300 \mu m$ , et une précision axiale en Z de  $0,06 \mu m$ . La dimension de la mesure est de  $1001 \times 1001$  ( $\approx 10^8$  points), avec des pas sur les axes X et Y de  $0.2 mm$ . Après une analyse visuelle rapide (cf. figure 3.9), on constate la présence de quelques valeurs aberrantes. Une représentation 3D de la mesure ainsi qu'une vue rapprochée d'une zone comportant des PA sont présentés dans la figure 3.9.

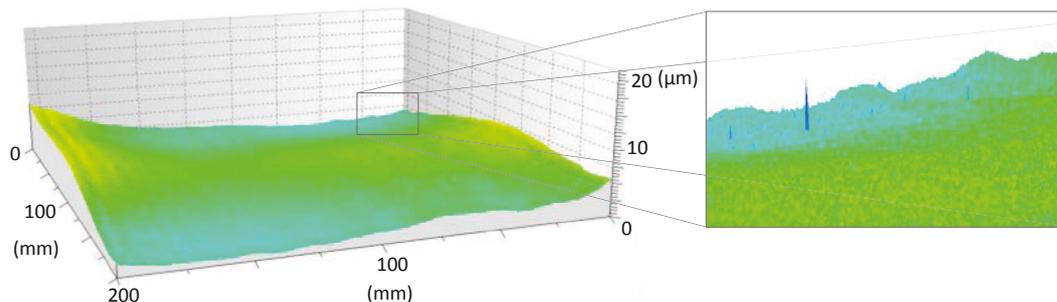


Figure 3.9 – échantillon *Surf-4* - Représentation 3D de la mesure d'un étalon de planéité

**Surf-5** L'échantillon Surf-5 est une surface mesurée d'une portion de la carre d'un ski. L'étude de cette surface est faite dans l'objectif de l'amélioration de la modélisation de la liaison contact ski-neige, à l'échelle de la rugosité.

La mesure a été effectuée avec un microscope laser 3d (Olympus Lext 3000), équipé d'un objectif 100x. Cette surface présente des pentes et des changements de réflectivité qui rendent la mesure difficile, et expliquent notamment la présence de nombreux points aberrants sur les données obtenues. La zone de mesure est de  $1024 \times 1024$  points, et les pas de mesure sur les axes X et Y sont de  $0.125 \mu\text{m}$ . Une représentation 3D de la mesure, ainsi qu'une vue rapprochée d'une zone comportant des points aberrants sont donnés Figure 3.10.

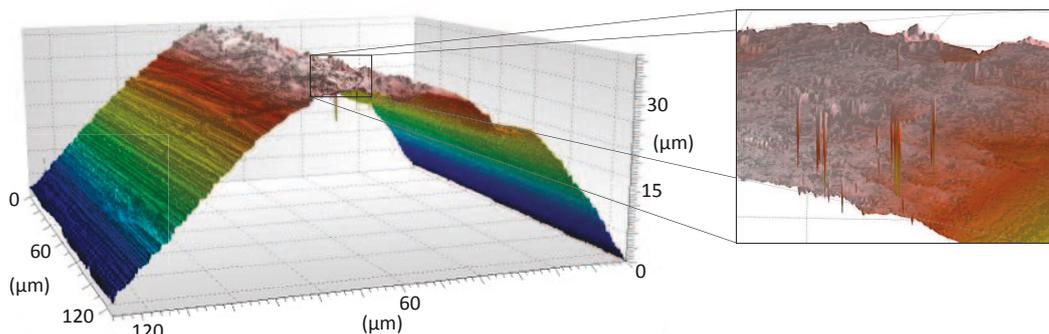


Figure 3.10 – échantillon *Surf-5* - Représentation 3D d'une mesure de la carre d'un ski

### 2.4.2 Distributions

Pour Estler [Estler 99], le résultat d'une mesure est *une distribution de probabilité qui fournit un codage sans ambiguïté d'un état de connaissances de la grandeur mesurée*. Il définit ainsi la métrologie comme étant une interprétation statistique des données issues de la mesure. Pour procéder à cette interprétation, il est donc utile de façon préalable à toute autre analyse de déterminer la nature des données dont nous disposons, et particulièrement de déterminer si les données mesurées vérifient ou non l'hypothèse de normalité (voir section 2.3.2).

La figure 3.11 montre les distributions des 2 échantillons choisis pour illustrer cette étude, ainsi qu'une représentation de la loi normale la plus proche des données mesurées. On constate pour ces 2 surfaces que les données sont très éloignées d'une loi normale. On peut aussi remarquer que les lois normales approximées sont centrées en zéro. Cela vient du fait que les mesures ont été redressées (critère des moindres carrés) avant analyse.

A ce stade, on ne peut donc pas appliquer un critère d'identification des PA lié à l'écart type. Nous proposons dans une première étape (Section 2.4.3.b) d'appliquer à ces données une transformation permettant de respecter l'hypothèse de normalité.

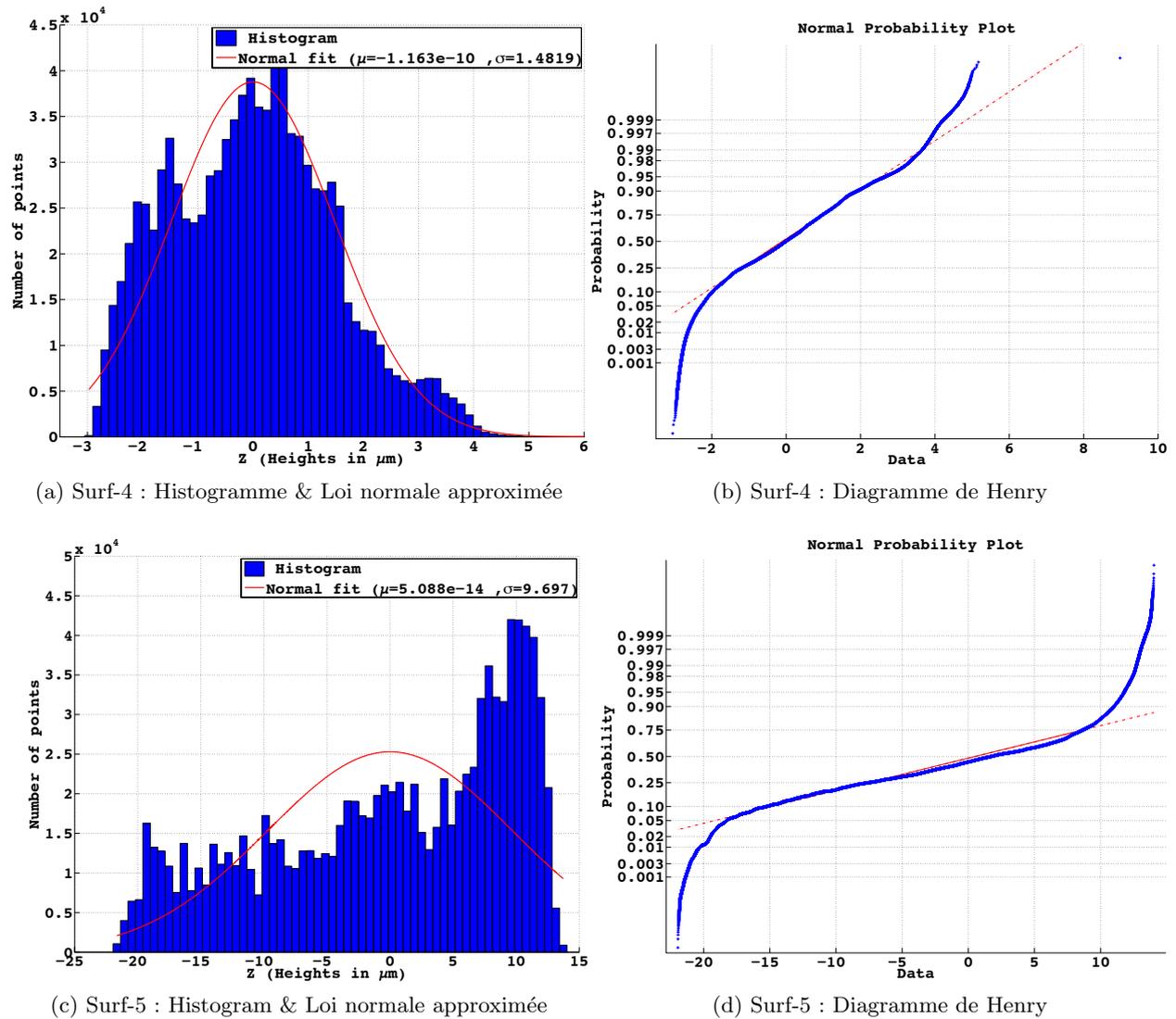


Figure 3.11 – Test de normalité sur les surfaces mesurées

### 2.4.3 Méthode proposée pour le traitement des mesures de surface

#### 2.4.3.a Hypothèse de normalité

Suite au constat de non-normalité fait dans la partie précédente (Section 2.4.2), nous détaillons ici une méthode permettant de se ramener à une distribution de points proche de celle du modèle de loi normale.

Dans un premier temps, nous proposons ainsi de caractériser les variations géométriques de forme des surfaces, puis de les filtrer et d'identifier les PA à partir du résidu de ce filtrage. Les PA identifiés sont alors substitués par des points non-mesurés dans les surfaces initiales. La méthode proposée pour filtrer la forme sur les surfaces est détaillée dans la section 2.4.3.b.

#### 2.4.3.b Filtrage de forme

Cette méthode est basée sur la technique de **D**écomposition **M**odale **D**iscrete des surfaces [Favrelière 09] décrite dans la section 2.1 (chapitre 2). La figure 3.12 présente les surfaces obtenues aux différentes étapes de la DMD, ainsi que les spectres d'amplitude modaux associés aux deux surfaces d'application. De plus, la visualisation des spectres modaux (Figure 3.13a et Figure 3.13b)

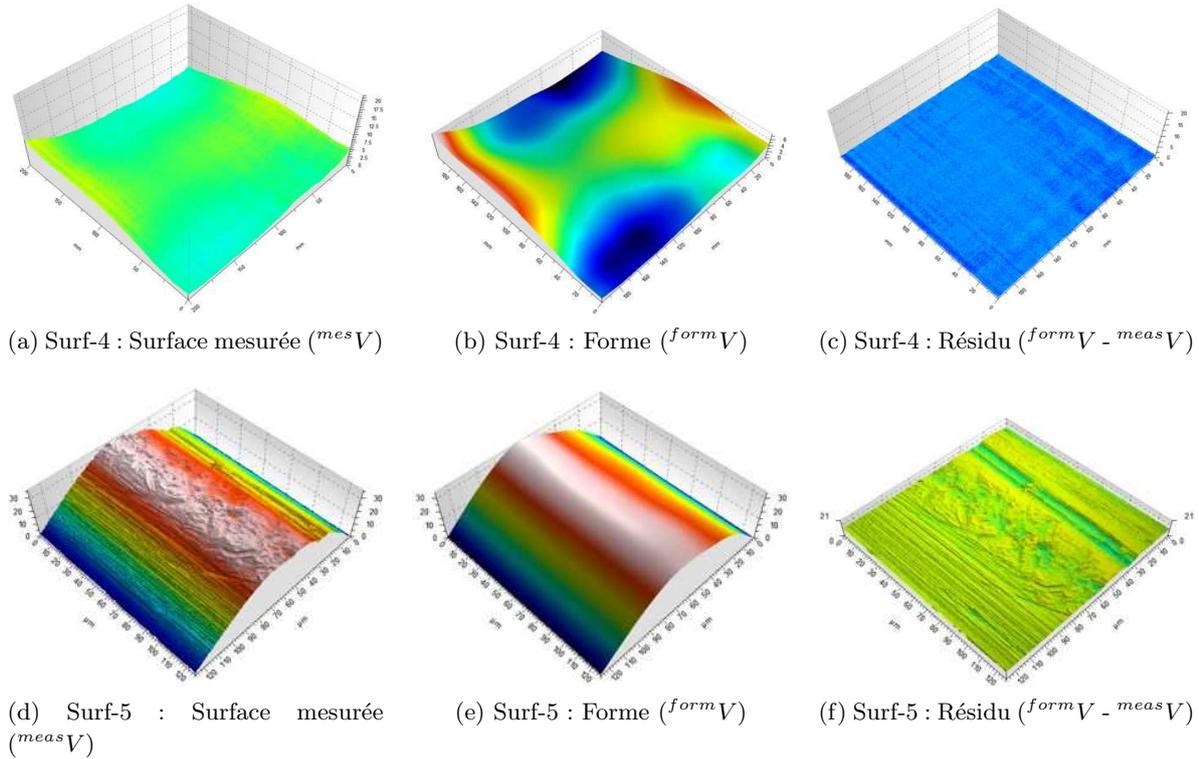


Figure 3.12 – Filtrage de forme par l'approche modale

indique que le choix d'un nombre de modes ( $N_q$ ) de filtrage égal à 50 est suffisant pour filtrer l'ensemble des variations géométriques de forme des surfaces analysées, sans connaissance *a priori* de la topographie des surfaces décomposées. En synthèse, l'approche modale permet d'appliquer un filtrage de forme performant et générique, i.e. sans adaptation pour chaque surface des paramètres du filtre. Les figures 3.12b et 3.12e représentent les variations géométriques reconstruites à partir des 50 premiers modes de la DMD, filtrées par la méthode.

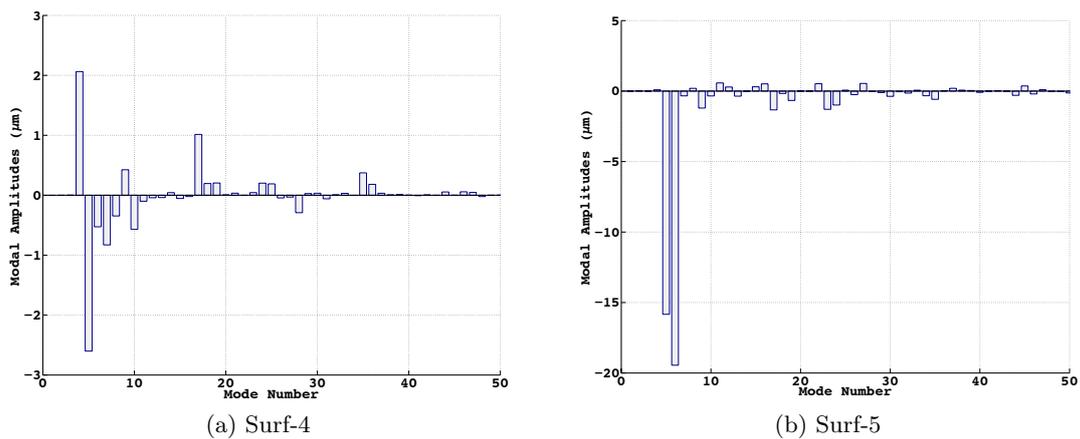


Figure 3.13 – Spectre modal des amplitudes

Les figures 3.14a et 3.14c présentent les histogrammes des données obtenus après filtrage de forme et la représentation de la loi normale la plus proche. On observe que les distributions après filtrage sont très proche d'être distribuées selon une loi normale. Les figures 3.14b et 3.14d montrent les droites de Henry (diagrammes Q-Q plot) des données pour chacune des surfaces d'application.

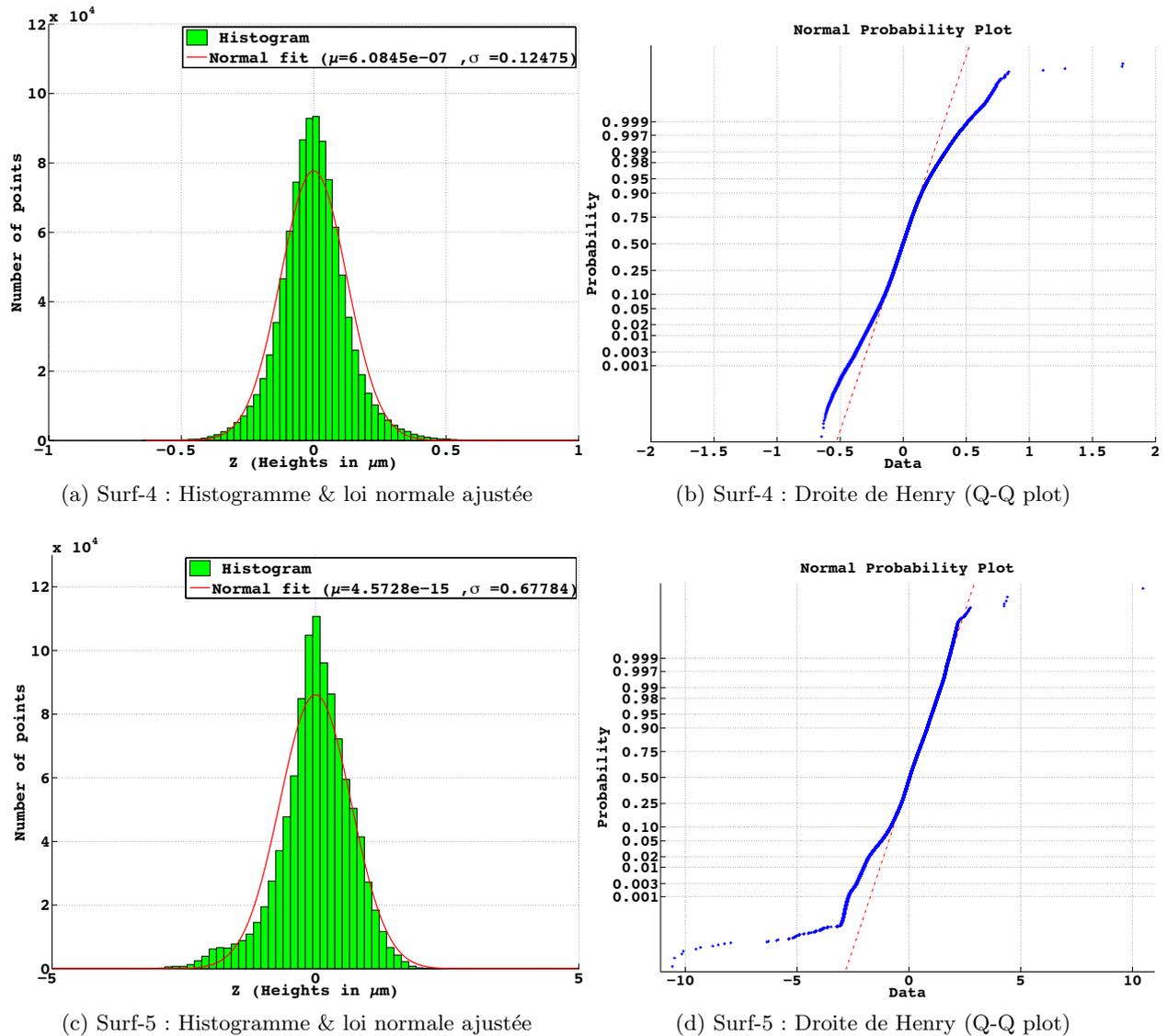


Figure 3.14 – Test de normalité après filtrage des composantes de forme par la méthode modale

Cette représentation permet d'estimer plus finement la distribution des données (Figure 3.11b et 3.11d), et l'écart par rapport à une distribution normale. On observe qu'une large majorité des points est située à proximité de la droite de Henry. Cette observation est confirmée par la représentation des distributions. On peut donc considérer que les données vérifient globalement l'hypothèse de normalité. Il est alors possible de mettre en œuvre un critère d'identification des PAs basé sur cette hypothèse, et qui utilise un critère de probabilité lié à l'écart-type, défini avec ce modèle de distribution.

#### 2.4.3.c Critère d'identification et approche multi-échelle pour le traitement des PA

##### a) Critère lié à l'écart-type

La transformation des données par filtrage des variations géométriques de forme a permis d'obtenir des données distribuées selon une loi normale. A partir de ce modèle, on peut alors identifier les PA à partir d'une règle basé sur un indicateur statistique, de type écart-type. De nombreux critères basés sur des calculs de probabilités existent pour réaliser cette identification 2.3.2. Un des plus complet et performant est le critère de Peirce. Cependant, le nombre d'observations souvent

très important avec les moyens de mesure actuels ( $> 10^6$  points mesurés) rend son application coûteuse en terme de temps de calcul, principalement en raison des nombreuses opérations de récursivité. Nous avons choisi pour l'opération d'identification d'utiliser le test de Grubbs. En effet, cette méthode est reconnue pour son efficacité et sa rapidité, particulièrement dans le cas de données volumineuses.

Afin de prendre en compte les spécificités des mesures de surface, ce test est appliqué sur une fenêtre d'analyse glissante (pour parcourir l'ensemble de la surface), dont les dimensions varient, et de façon récursive sur la surface (Section 2.4.3.c.b). Le caractère multi-échelle des surfaces est ainsi mieux pris en compte. Ainsi, cette méthode permet d'identifier efficacement et rapidement les PA, tout en minimisant le risque d'erreur dans l'identification.

Le test de Grubbs [Grubbs 69] est un test statistique basé sur le rapport écart-étalement des données. A partir de données distribuées selon une loi normale, le principe de ce test est de calculer pour chaque observation (point mesuré) une valeur numérique  $G_i$  (appelée *Critère d'échantillon*, voir Equation 3.6a), et de la comparer avec une valeur  $G_{lim}$  calculée à partir des valeurs critiques de la distribution T de Student (voir Equation 3.6b). Si  $G_i > G_{lim}$ , alors l'observation évaluée est identifiée comme un PA et exclue des données (remplacée par un point non-mesuré). Le test est alors renouvelé jusqu'à ce qu'aucun point de la fenêtre d'analyse ne soit identifié comme aberrant. La valeur de  $G_{lim}$  correspond à un calcul de probabilité basé sur la modélisation des données par une distribution normale.  $G_{lim}$  dépend notamment du risque  $\alpha$  (*niveau de confiance*), qui peut être choisie par l'utilisateur. Le risque  $\alpha$  peut aussi être vu comme le risque de rejeter par erreur une observation douteuse. Plutôt que de fixer un seuil arbitraire d'écart-type à partir duquel les points sont identifiés comme étant aberrants, calculé par rapport à un nombre de points donné, la méthode de Grubbs se base sur un niveau de risque pour fixer le seuil limite d'identification.

$$G_i = \frac{\text{Max}(|X_i - \bar{X}|)}{\sigma} \quad (3.6a)$$

$$G_{lim} = \frac{(N-1)}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{t_{(\alpha/N, N-2)}^2}{N-2 + t_{(\alpha/N, N-2)}^2}} \quad (3.6b)$$

où  $G_i$  est le *Critère Echantillon*,  $G_{lim}$  est le seuil du test de Grubbs, défini pour un risque  $\alpha$ , et  $t_{(\alpha/N, N-2)}$  la valeur critique de Student, pour un échantillon de taille  $N$ , à  $N-2$  degrés de liberté.

Pour chaque observation, on vérifie si  $G_i$  est supérieur à  $G_{lim}$ . Si c'est le cas,  $X_i$  est considérée comme une valeur aberrante : on le retire de l'échantillon et on réitère la procédure, jusqu'à ne plus identifier de PA sur la surface, ou la partie de surface analysée.

Compte tenu de la typologie des données issues des mesures de surface, il est préférable de choisir un niveau de risque très faible pour l'identification des PA. Par défaut, nous proposons de prendre une valeur de risque  $\alpha$  égale à 0.001, soit un niveau de confiance équivalent de 99.9 %. L'utilisateur peut régler ce paramètre dans le cas de surfaces spécifiques ou d'exigences particulières.

#### b) Méthode multi-échelle

Un PA sur une surface se définit principalement par rapport à ses *voisins proches*, et non forcément par rapport à l'ensemble des points mesurés de la surface (voir section 2.3.1). La notion de *voisin proche* correspond à une échelle d'analyse sur les surfaces : nous proposons de procéder

à l'identification des PA sur une zone d'analyse de taille variable, pour prendre en compte cette spécificité des surfaces mesurées. Le critère (voir Section 2.4.3.c.a) est appliqué dans un premier temps à une échelle globale (fenêtre d'analyse égale à la taille de la surface source), puis la taille de la fenêtre d'analyse est réduite progressivement jusqu'à une taille minimale (échelle locale). La fenêtre parcourt l'ensemble de la surface (fenêtre glissante), et pour chaque taille et chaque position de la fenêtre, une nouvelle identification est effectuée sur la sous-surface, et les points identifiés remplacés par des points non-mesurés. La figure 3.15 montre l'évolution du nombre de PA supprimés (en pourcentage du total de points identifiés) en fonction de la taille de la fenêtre d'analyse pour les échantillons *Surf-4* et *Surf-5*. Ces graphiques confirment l'importance de faire varier l'échelle d'analyse pour détecter les PA sur des mesures de surface.

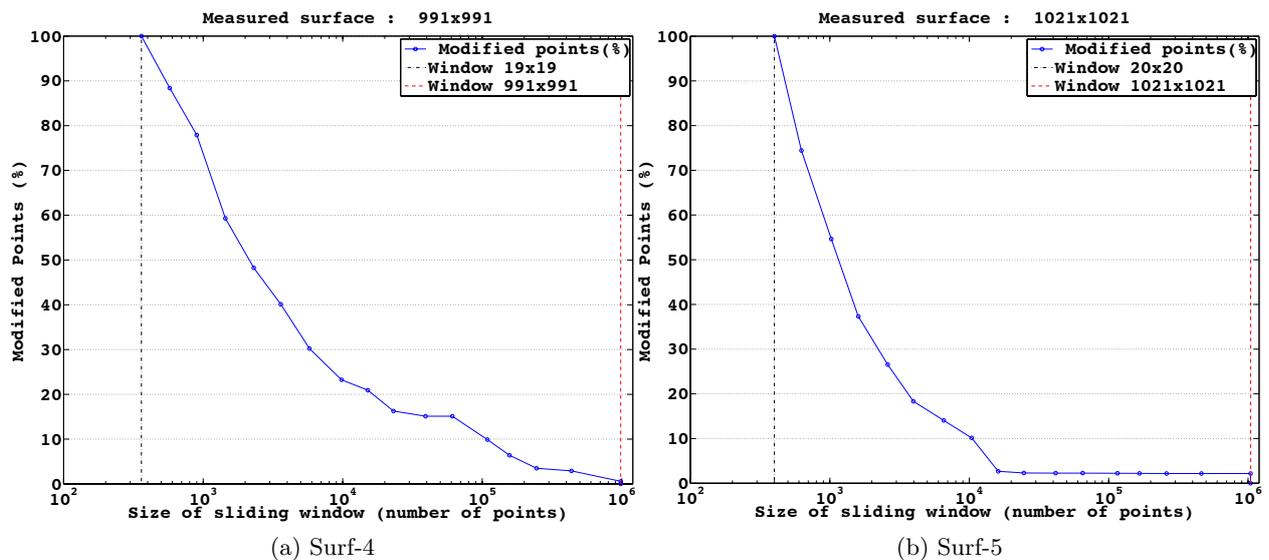


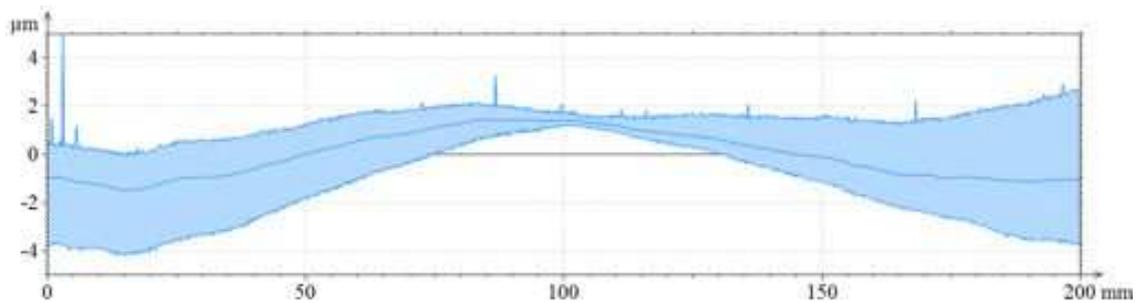
Figure 3.15 – Evolution du pourcentage de points modifiés à chaque diminution de la taille de la fenêtre d'analyse

Nous détaillons dans la suite les différents paramètres de réduction et de déplacement de la fenêtre d'analyse de ce filtre. Ces paramètres ont été choisis expérimentalement, le critère de choix étant le temps de filtrage, à efficacité du filtre constante.

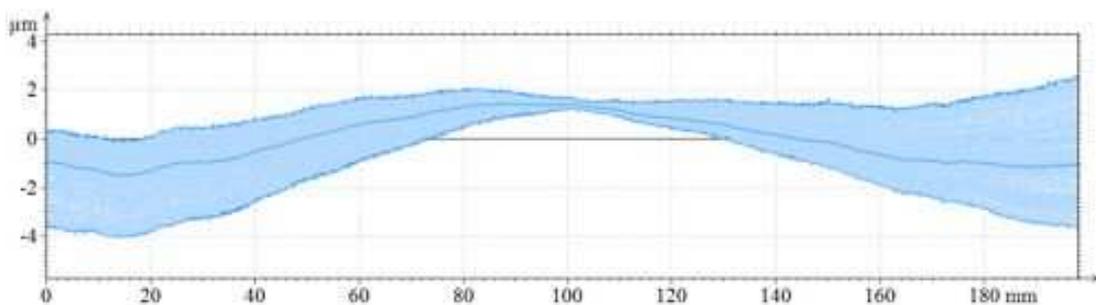
- Le **facteur de diminution d'échelle** est le facteur de diminution de la taille de la fenêtre d'analyse. Il a été choisi à 5 % (calculé par rapport à la taille de la fenêtre précédente) à chaque itération. Ce choix permet d'avoir une évolution non linéaire de la taille de la fenêtre glissante (diminution plus rapide pour les dimensions de fenêtre *globales*, et plus progressive pour les dimensions de fenêtres *locales*). Les courbes d'évolution du nombre de PA identifiés (voir Figure 3.15a & 3.15b) indiquent que le choix expérimental du facteur de diminution d'échelle permet d'obtenir une bonne répartition du nombre de points identifiés sur l'ensemble des échelles d'analyse.
- Le **taux de recouvrement** est le second paramètre de la fenêtre glissante et de taille variable. Pour les mêmes raisons, nous avons choisi un facteur non linéaire, proportionnel à l'échelle d'étude : le déplacement de la fenêtre pour chaque itération est fixé à 50 % de sa dimension sur chacun des axes  $(x, y)$ .

- La **dimension minimale de la fenêtre** d'analyse : il est nécessaire de toujours disposer d'un échantillon de la surface d'étude suffisamment représentatif. Nous avons donc fixé expérimentalement une taille minimale de la fenêtre d'analyse à 100 points. Pour éviter une identification trop coûteuse en temps de calcul, cette valeur est fixée à  $1/50^{eme}$  de la taille initiale de la surface pour les surfaces avec un grand nombre de points mesurés.
- Le **pourcentage minimal de points valides** : les points identifiés comme aberrants étant remplacés lors de l'identification par des points non mesurés, nous proposons de vérifier à chaque itération le pourcentage de points valides sur la sous-surface, et de définir un pourcentage de points valides minimal, fixé à 90 %.

Les différentes étapes de mise en œuvre du filtrage des PA sont détaillées dans la figure 3.18. Les figures 3.16 & 3.17 montrent une représentation d'une série de 120 profils Est-Ouest pris sur les surfaces des échantillons *Surf-4* et *Surf-5*, avant et après filtrage. Le pourcentage total de points modifiés sur ces échantillons est très faible : 0.0174 % pour la surface *Surf-4*, 0,0607 % pour la surface *Surf-5*. On observe cependant sur les figures que les PA ont été filtrés efficacement par la méthode proposée. De plus, on observe que les points filtrés sont caractéristiques des points aberrants sur une surface, c'est à dire souvent isolés (forme de pics), et localement fortement éloignés de la forme de la surface avoisinante.

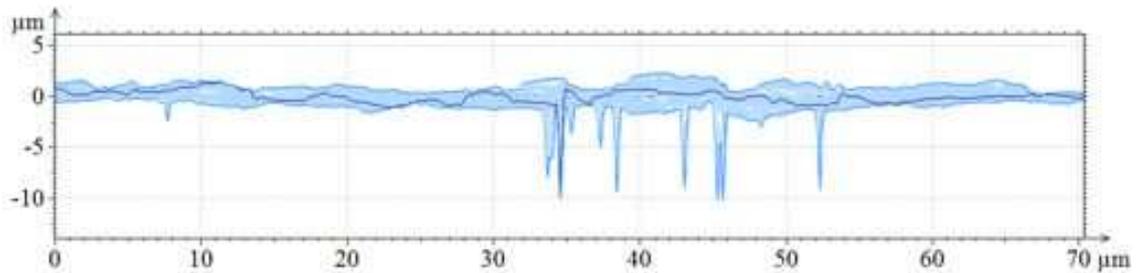


(a) Surface mesurée

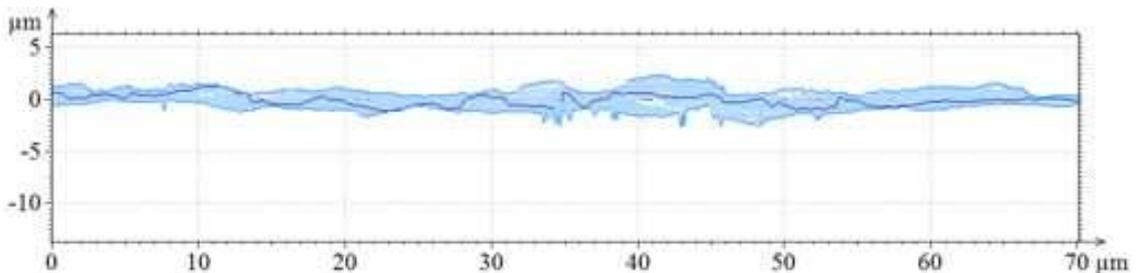


(b) Après filtrage des PA

Figure 3.16 – Série de profils issus de l'échantillon *Surf-4*



(a) Surface mesurée



(b) Après filtrage des PA

Figure 3.17 – Séries de profils issus de l'échantillon *Surf-5*

#### 2.4.4 Proposition d'une méthode dédiée à la métrologie des surfaces : synthèse

Nous avons cherché à apporter une réponse appropriée au cas particulier des surfaces mesurées (données multivariées, grand nombre d'observations, distributions non-normales, prise en compte du caractère multi-échelle des surfaces), tout en respectant le cadre général de la norme 16269. La figure 3.18 synthétise les différentes étapes de la méthode proposée, en reprenant la représentation de la stratégie de la norme (figure 3.8).

Le filtre utilise un filtrage de forme par la méthode modale pour se ramener à une distribution proche d'une distribution normale, l'identification des PA est faite à l'aide d'un critère basé sur le test de Grubbs dont la valeur  $G_{lim}$  varie en fonction du nombre de points du jeu de données, appliqué à une échelle d'analyse variable, ce qui le rend particulièrement efficace pour ce type de données.

Enfin, une interface utilisateur a été développée pour faciliter l'usage du filtre : elle permet de visualiser les résultats et les indicateurs (distributions, droite de Henry, évolution du % de points modifiés, % total de points modifiés, représentations 3D des surfaces aux différentes étapes du filtrage) aux différentes étapes du traitement, et de sauvegarder les surfaces obtenues au format souhaité, après identification et exclusion des PA. Ils sont, dans les surfaces filtrées, remplacés par des points non-mesurés. Ceci permet dans les logiciels de traitement des mesures de surfaces à l'utilisateur de décider s'il souhaite ou non, et par quelle méthode, interpoler la valeur de ces points manquants.

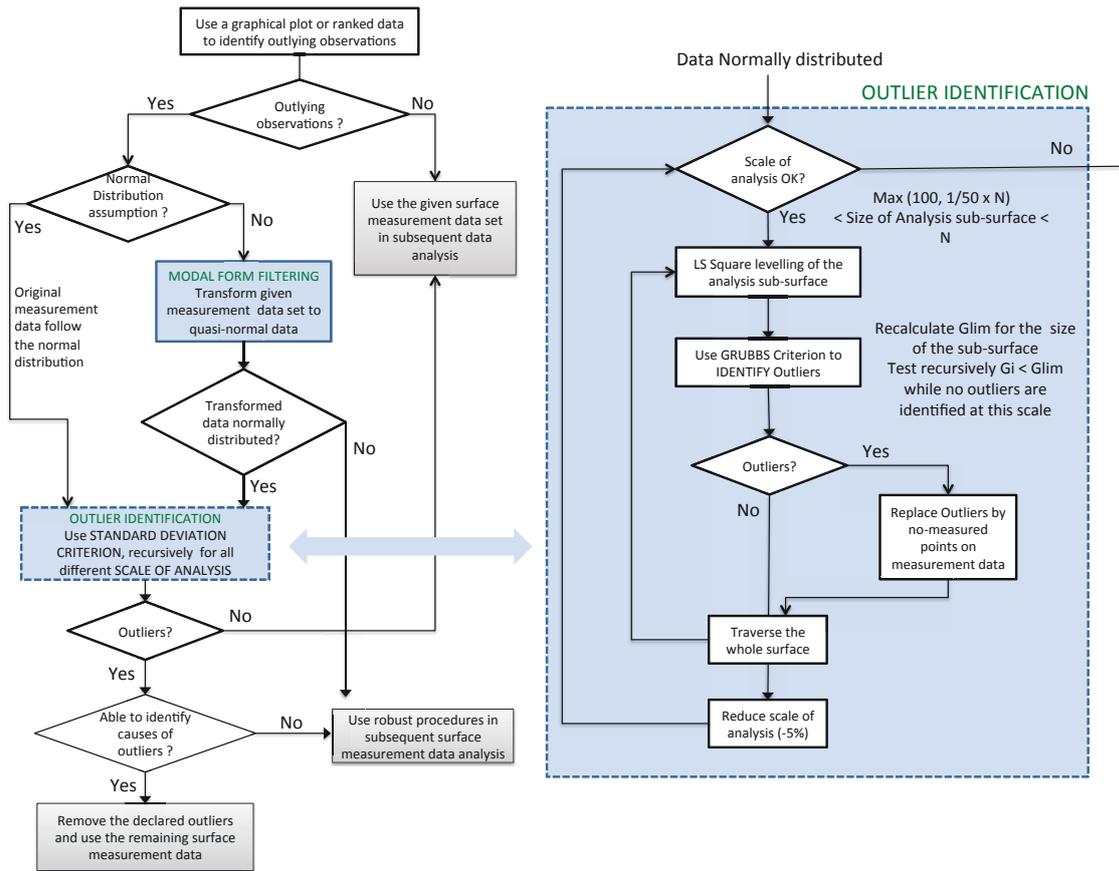


Figure 3.18 – Proposition d’une méthode de traitement des PA dédiée à la métrologie des surfaces

## 2.5 Conclusion

Le chapitre 2 a mis en évidence que la qualité des données sources est essentielle pour pouvoir analyser la qualité d’aspect à partir de la géométrie de la surface. En effet, l’analyse et l’interprétation des données mesurée permet de lier certains paramètres géométriques des surfaces à leur comportement *visuel*, i.e à la fonction aspect des surfaces.

Parmi ces analyses et traitements réalisés sur les mesures de surface, de nombreuses méthodes ne sont pas robustes à la présence des PA. De plus, les méthodes ”générales” ne permettent pas directement d’identifier ces points dans le cas des mesures de surfaces. Celles-ci se caractérisent par une distribution des points qui ne vérifie pas l’hypothèse de normalité. De plus les mesures de surfaces sont multi-variables et ordonnées, et comportent souvent un nombre d’observations élevé (et potentiellement de nombreux PA). Nous proposons donc une nouvelle méthode d’identification adaptée aux spécificités de la métrologie des surfaces, robuste et systématique quelle que soit la mesure à analyser :

- (i) Une transformation des données est réalisée afin de se rapprocher du modèle utilisé pour évaluer si un point est aberrant sous l’hypothèse d’une distribution normale des données. Nous proposons de réaliser cette transformation par un filtrage de forme, basé sur la DMD, peu sensible aux points aberrants.
- (ii) L’identification des points aberrants elle-même est réalisée à partir du test de Grubbs. Ce test permet de maîtriser le risque pris lors de l’identification des points aberrants sur les données.

- (iii) L'application du test de Grubbs n'est efficace que si l'on considère la notion de *point aberrant local* sur la surface. Nous proposons ainsi d'identifier les points aberrants à différentes échelles d'analyse (fenêtre d'analyse glissante et de taille variable).
- (iv) La méthode s'inscrit dans le cadre global de la méthodologie pour la détection des points aberrants développée dans la norme ISO-16269-4.

La méthode est appliquée sur deux échantillons de mesure de surface, sur lesquels nous avons mis en évidence à l'aide d'indicateurs graphiques et statistiques l'intérêt et l'efficacité des différentes étapes de cette nouvelle méthode.

### 3 Préparation des mesures : Conclusion

La métrologie des surfaces fait appel à des machines de mesure de haute précision, qui permettent d'acquérir un ensemble de données statistiques sur la surface. Leur interprétation permet d'appréhender les différents ordres de défaut, notamment la forme, l'ondulation, la rugosité et la micro-rugosité sur les surfaces mesurées. Elle permet aussi de déterminer des indicateurs correspondants aux caractéristiques des surfaces ou de procéder à des analyses plus avancées sur ces données pour, par exemple, discriminer des surfaces entre elles (analyse *area-scale*). Certaines analyses permettent aussi de lier les variations géométriques d'une surface à un comportement, et notamment à la fonction aspect.

Dans ce cadre, la qualité des données sources est essentielle pour pouvoir analyser la qualité d'aspect à partir de la géométrie de la surface. Lors de la mise en œuvre des analyses et interprétations des données géométriques présentées dans le chapitre 2, les résultats obtenus ont mis en évidence deux nécessités particulières :

- La correction des variations géométriques potentielles induites par le moyen de mesure
- L'identification et le filtrage des points aberrants.

Ce chapitre a permis de présenter ces deux axes de travail.

Les chapitres 2 et 3 de ces travaux sont complémentaires, et ont permis de présenter nos travaux sur l'approche géométrique de la qualité d'aspect des surfaces de façon globale, i.e. de la mesure *brute* des surfaces à l'interprétation des données, préalablement conditionnées, en lien avec l'aspect des surfaces. Les capacités grandissantes des moyens de mesures ouvrent progressivement la voie à ce type d'approche, et les travaux présentés dans le chapitre 2 et 3 montrent que l'approche *géométrique* apporte des réponses pertinentes pour les étapes d'évaluation de la criticité des anomalies, et de décision.

Une difficulté non levée de ce type d'approche est comment détecter les anomalies, i.e. comment localiser les anomalies et segmenter une surface en *zones d'analyse*. En effet, une mesure suffisamment fine des surfaces pour à la fois détecter et évaluer les anomalies est aujourd'hui trop coûteuse en temps d'acquisition et en volume de données à traiter. Nous proposons donc de lier les travaux sur l'approche géométrique à une technique dédiée à la détection des anomalies. Ce lien est développé dans le chapitre 5. L'approche proposée pour aider à la détection des anomalies est basée sur l'analyse de l'interaction entre la surface et son environnement lumineux, et appelée approche *lumière*. Elle est présentée dans le chapitre 4.



## Approche Lumière de la qualité d'aspect d'une surface

### Objectif du chapitre

*Les chapitres 2 et 3 ont montré comment certains paramètres issus de la géométrie des surfaces peuvent aider à évaluer le comportement visuel des surfaces. Il est cependant difficile en pratique d'assurer la détection des anomalies par cette approche. Dans ce chapitre, nous présentons des travaux spécialement dédiés à la détection des anomalies d'aspect sur les surfaces. Ces travaux sont basés sur l'analyse et l'interprétation de l'interaction entre les surfaces et leur environnement lumineux. Nous présentons d'abord la technique mise en œuvre, puis le dispositif correspondant d'aide à la détection réalisé dans le cadre de ces travaux. Enfin, ces travaux sont appliqués sur différentes surfaces à haute valeur ajoutée, et pour différents types d'anomalies d'aspect.*

## 1 Introduction

Les capacités grandissantes des moyens de mesures ouvrent progressivement la voie à une approche *géométrique* de l'analyse de la qualité d'aspect des surfaces (voir chapitre 2), et les travaux présentés dans le chapitre 2 et 3 montrent que cette approche apporte des réponses pertinentes pour les étapes d'évaluation de la criticité des anomalies, et de décision.

La difficulté majeure de l'application de l'approche géométrique dans un contexte industriel est la détection des anomalies (comment localiser les anomalies d'aspect, et segmenter les surfaces en *zones critiques* comportant des anomalies à évaluer). En effet, la détection des anomalies d'aspect par une approche *géométrique* est basée sur la mesure de la topographie de la surface, et il en résulte des temps de mesure et des volumes de données à interpréter souvent prohibitif. Nous proposons donc une approche complémentaire pour répondre spécialement à cette problématique, de détection des anomalies d'aspect dans un contexte industriel.

L'idée à l'origine des travaux présentés dans ce chapitre est basée sur l'observation de comment se déroule la détection des anomalies lorsqu'elle est réalisée de façon *manuelle*, i.e. dans le cadre du contrôle *sensoriel* de l'aspect des surfaces (cf. section 1, chapitre 1).

Le constat effectué est le suivant :

- (i) Les opérateurs prennent les pièces à inspecter dans la main, et font varier les angles d'observation et les angles d'incidence de la lumière sur les surfaces, en modifiant l'orientation de la pièce.
- (ii) Certaines configurations spéciales d'angles d'incidence de la lumière et d'angles d'observation des surfaces sont recherchées. Il s'agit des trois *effets lumières*, présentés dans la section 1.4.1 (chapitre 1).
- (iii) La recherche de ces 3 configurations spéciales permet principalement à l'opérateur de s'assurer d'avoir parcouru une large gamme de configurations possibles, ce qui limite le risque de non-détection de certaines anomalies d'aspect sur les surfaces.

Lorsque les opérateurs modifient l'orientation de la pièce pour faire varier les angles d'incidence et d'observation, ils font varier les trois repères de la *scène d'observation* :

- Le repère lié à l'observateur
- Le repère lié à la pièce
- Le repère lié à la(les) source(s) lumineuse(s)

Il est donc difficile de parcourir l'ensemble des configurations possibles, et de maîtriser ce processus d'exploration. Par exemple, quand l'opérateur agit sur le *repère pièce* pour voir la surface sous un autre angle, il modifie aussi l'angle d'incidence de la lumière sur la surface, et inversement.

Notre démarche consiste d'une part à analyser et modéliser l'interaction des surfaces avec leur environnement lumineux et d'autre part à apporter aux experts visuels un outil d'aide à la détection des anomalies utilisable lors du contrôle de la qualité d'aspect industriel. Le dispositif devra idéalement permettre de :

- Détecter les anomalies sur les surfaces sans manipuler les pièces
- Faire varier les angles d'éclairage sur une surface, de façon analogue à ce qui est réalisée dans l'étape d'exploration du contrôle sensoriel
- Localiser rapidement (contexte industriel) les anomalies d'aspect sur une surface, quelles que soit leur typologie.

Dans une première partie, nous présentons les principes de la technique mise en œuvre dans cette approche, appelée *Polynomial Texture Mapping* (PTM). Nous présentons ensuite le dispositif réalisé dans le cadre de ces travaux pour apporter aux experts visuels une aide aux experts lors du contrôle de la qualité d'aspect de produits à haute valeur ajoutée. Enfin, nous présentons sur des surfaces d'applications les résultats obtenus, et les perspectives d'applications industrielles et de recherche de ces travaux.

## 2 La technique *Polynomial Texture Mapping* (PTM)

La partie 3 du premier chapitre a permis de présenter les concepts fondamentaux, et les principales modélisations de l'interaction surface/lumière. Nous avons montré que pour les surfaces opaques, la description la plus fine et complète de la réémission de la lumière par une surface est donnée par la *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF). Il existe deux façons d'obtenir l'information en réflectance, pour caractériser la BRDF d'une surface :

- Par une **mesure directe** de la réflectance. Cette approche nécessite, de façon analogue à l’approche géométrique, un temps d’acquisition important. De plus, elle conduit aussi à traiter un volume important de données. Elle est donc incompatible avec une application dans le contexte industriel du contrôle de la qualité d’aspect des surfaces.
- Par une **modélisation** de la réflectance simplifiée, à partir de données échantillonnées. C’est l’objet des travaux développés dans ce chapitre.

Cette modélisation peut être réalisée :

- (i) A partir d’un modèle : l’objet et son rendu visuel sont modélisés à partir de paramètres empiriques peu nombreux. On parle alors de **model-based rendering**<sup>1</sup>.
- (ii) A partir d’un lot d’images d’une surface : les images permettent d’obtenir une information échantillonnée de la réflectance d’une surface. Le rendu visuel de la surface est calculé par interpolation, afin de pouvoir par exemple simuler n’importe quelle position d’éclairage. On parle pour ce type d’approche de **image-based rendering**. Généralement, l’objet de ce genre d’approche est de proposer un rendu photo-réaliste des surfaces. Les applications peuvent être par exemple du type commerce électronique, musée virtuel, ou encore la photométrie (reconstruction 3D à partir d’un lot d’images).

L’objectif de l’approche *lumière* présentée dans ce chapitre est d’apporter aux experts un outil d’aide à la détection des anomalies significatif, facile à déployer (le plus proche possible des pratiques actuelles) et rapide. L’approche choisie est basée sur l’acquisition d’un lot d’images. L’intégration des données contenues dans le lot d’images permet alors d’approximer la fonction réflectance en chaque point de la surface (*image-based rendering*). Ces travaux sont basés sur la technique *Polynomial Texture Mapping*, présentée dans la section 2.1.

## 2.1 Historique et Principe

La technique *Polynomial Texture Mappings* a été développée initialement par l’équipe de Tom Malzbender (Laboratoires *Hewlet Packard*<sup>2</sup>, Palo Alto). L’objectif initial est alors essentiellement d’améliorer le rendu photo-réaliste en imagerie 3D, particulièrement dans le domaine des jeux vidéos, et notamment la gestion du rendu en fonction de l’éclairage et de la zone focalisée sur une image en rendu 3D. De façon plus globale, la technique PTM vise à simuler le rendu visuel d’une scène, quelle que soit la direction de l’éclairage, ou sa profondeur de champ (focus). La mise en œuvre de la technique consiste à photographier une scène en faisant varier les conditions d’éclairage (ou la zone de focalisation) puis d’intégrer l’ensemble des données acquises en un seul fichier, appelé *PTM*, dont le calcul et la structure sont décrits dans le document [Malzbender 01b].

En 2001, Malzbender et al. [Malzbender 01c] présentent (et publient) pour la première fois sur la technique PTM, et détaillent les principes et la mise en œuvre de cette nouvelle approche. Parallèlement, les brevets relatifs à la technique *Polynomial Texture Mappings* sont déposés en 2000 et 2001 par [Malzbender 00b, Wolters 00, Malzbender 01a], puis complétés par l’entreprise *hp* à partir de 2004 [Ritter 04, Malzbender 05, Horton 06] puis l’entreprise *Pixar* en 2006 [Kraemer 06].

---

1. En fonction du modèle choisi, le rendu n’est alors pas forcément photo-réaliste. Ce type d’approche est par exemple mis en œuvre dans les jeux vidéos, les films d’animation, ou encore dans le domaine mécanique en CAO par exemple

2. <http://www.hpl.hp.com/research/ptm/>

### 2.1.1 Protocole d'acquisition

La technique *Polynomial Texture Mappings* permet de modéliser comment est réémise la lumière sur une surface, à partir d'un lot d'images d'une *scène*, prises en faisant uniquement varier la position des sources lumineuses qui éclairent la surface.

Une *scène*, au sens photographique, est définie par trois repères : Le repère lié à l'objet, ou la surface photographiée, le repère lié à la source lumineuse qui éclaire l'objet, et le repère lié à l'observateur, ou au système de prise de vue.

Pour la technique PTM, le repère lié à l'objet photographié et le repère lié à l'observateur, ou au système de prise de vue sont choisis fixes l'un par rapport à l'autre, lors des différentes prises de vues. Généralement, on choisit de positionner le repère observateur orthogonalement à la surface d'intérêt de la surface photographiée. Ce choix simplifie grandement les calculs et traitements des données issues des images. En effet, il n'est pas nécessaire de corrélérer les images entre-elles, pour déterminer la position des pixels sur les différentes images. Par contre ce choix nécessite un positionnement suffisamment rigide et stable du système de prises de vues pour garantir que l'objet observé ne se déplace pas par rapport à la résolution de l'appareil (bruit géométrique). De plus, le fait que le repère pièce et le repère observateur soient liés et fixes l'un par rapport à l'autre permet d'appliquer la technique PTM à tous types de surfaces, et particulièrement à des surfaces non texturées, ou transparentes, à la différence des techniques de type stéréovision par exemple.

Ainsi, pour chaque image du protocole d'acquisition, seul le repère lié à la source lumineuse varie :

- Les sources lumineuses sont toujours dirigées vers le centre de la surface d'intérêt, i.e orientées suivant les rayons d'une sphère centrée sur la surface analysée.
- La distance entre les sources lumineuses et la surface est fixe, afin d'éviter les variations d'intensité, et de simplifier le modèle de réémission de la lumière par les surfaces
- Pour chaque image, les angles  $(\theta_i, \phi_i)$  liés à la source lumineuse varient (figure 4.1) . L'idéal est de pouvoir disposer d'images de la surface dont les angles d'éclairément sont répartis de façon homogène sur la demi-sphère formée par l'ensemble des positions potentielles des sources lumineuses.

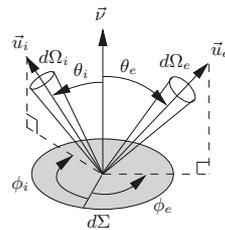


Figure 4.1 – Définition des angles  $\theta_i, \phi_i, \theta_e, \phi_e$  selon [Durou 07a]

La figure 4.2 illustre un dispositif simple, où les sources lumineuses sont disposées au sommets d'un isocaèdre. Dans le domaine de l'archéologie, et plus largement lorsque la taille des surfaces à analyser est importante, on peut aussi placer manuellement les sources lumineuses pour chaque prise de vue, par exemple à l'aide d'un fil tenu au centre de la surface.



Figure 4.2 – Définition des positions des sources lumineuses sur les sommets d’un isocaèdre, selon [Malzbender 01c]

### 2.1.2 Calcul des Polynomial Texture Mappings

A partir du lot d’images acquises suivant le protocole décrit dans la section précédente, nous disposons de l’ensemble de l’information nécessaire au calcul des PTMs. Dans un premier temps, nous nous plaçons dans le cadre d’images en niveaux de gris de la scène. Nous montrons ensuite comment le procédé de calcul des PTMs est généralisable, de façon simple, au cas des photographies en couleur.

Les procédés technologiques permettant de passer de l’énergie lumineuse reçue par le capteur du système de prise de vue au niveau de gris sont nombreux et variés. Le procédé est par exemple très différent entre une photographie argentique et une photographie acquise numériquement. Durou [Durou 07a] montre qu’il existe globalement une relation de proportionnalité entre le niveau de gris  $\mathcal{G}$  d’une photographie et la luminance  $L(\vec{u}_c)$  dans la direction du centre optique, même s’il existe des non-linéarités, liées par exemple à des phénomènes de surexposition. On peut alors exprimer le niveau de gris d’une photographie sous la forme suivante (Equation 4.1) :

$$\mathcal{G} = k \times g \quad (4.1)$$

$$\text{avec} \quad g = L(\vec{u}_c) \quad (4.2)$$

$k$  est le facteur de proportionnalité, et  $g$  est alors appelé *niveau de gris normalisé*. On appelle l’équation 4.2 *équation du niveau de gris* [Durou 07a].

Il y a donc un lien direct entre niveau de gris et luminance dans la direction du centre optique. L’appareil photographique permet ainsi de faire une mesure de la luminance d’un ensemble de facettes, constituées par les pixels des photographies réalisées. Le principe de la technique *Polynomial Texture Mappings* est d’obtenir pour chaque pixel un ensemble de valeurs de luminance correspondantes aux différents angles d’éclairages. La figure 4.3 représente pour un pixel de coordonnées  $(i, j)$  choisi, les niveaux de gris ( $\mathcal{G}$ ) obtenus pour chacune des images, en fonction de la position des sources lumineuses  $(L_u, L_v)$ .

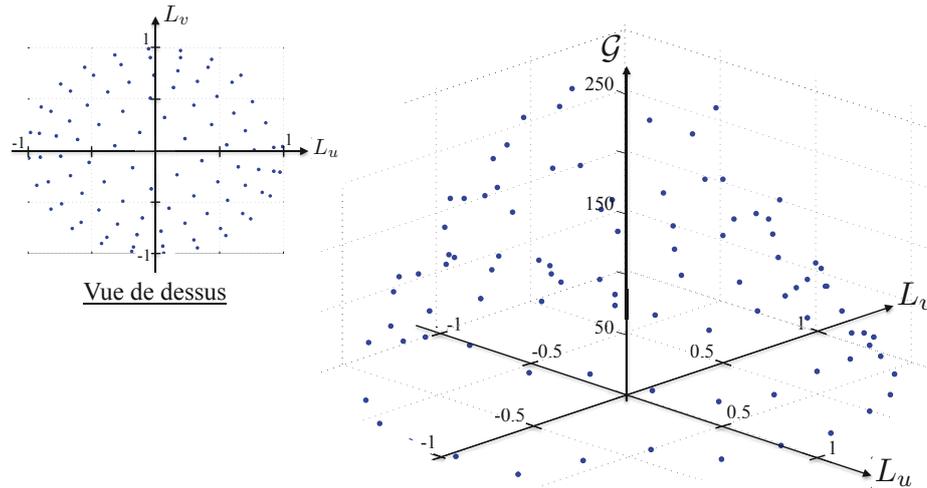


Figure 4.3 – Niveaux de gris d'un pixel en fonction de la position de la source lumineuse

La *réflectance* décrit comment est réémise la lumière dans toutes les directions sur une surface, ou sur une facette de surface. La technique *Polynomial Texture Mappings* consiste à approximer la fonction bidirectionnelle de réflectance à partir des informations discrètes obtenues sur chacune des images, afin de modéliser une information continue. L'approximation est réalisée en calculant la surface polynomiale d'ordre 2 qui minimise les écarts avec l'ensemble des informations discrètes de luminance, "mesurées" par les photographies. Le nom de la méthode vient ainsi directement du modèle utilisé pour calculer la surface de réflectance de chaque pixel. La figure 4.4 montre une représentation de cette surface approximée, pour le même pixel que celui choisi pour la figure 4.3.

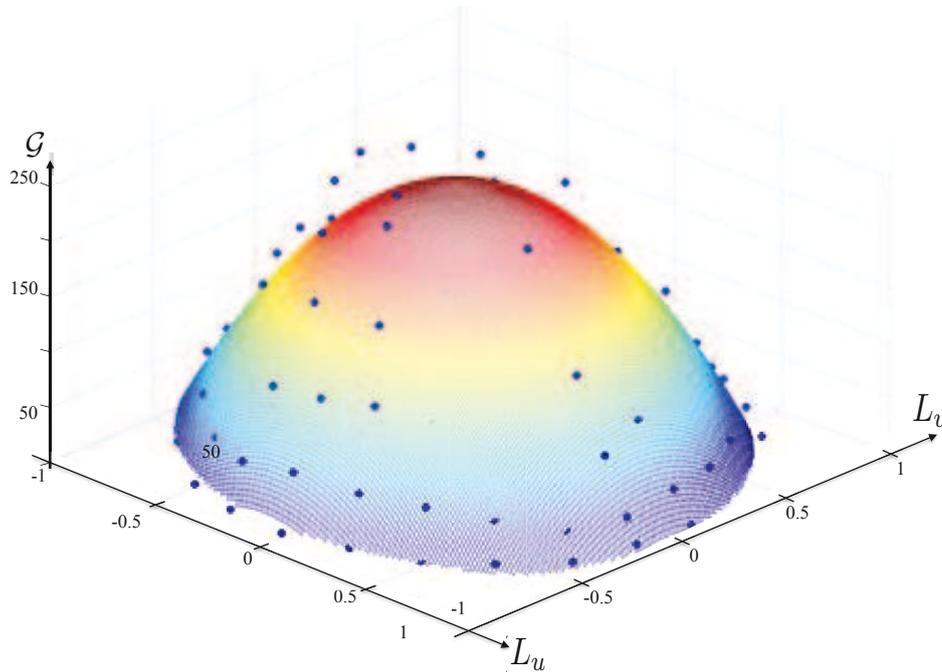


Figure 4.4 – surface réflectance approximée par un polynôme de degré 2

Pour chaque pixel, on détermine les 6 coefficients ( $a_0 - a_5$ ) de la surface polynomiale de degré 2, définie par l'équation 4.3. Cette opération est réalisée par régression linéaire multiple (estimateur des moindres carrés), à partir du système d'équations 4.4.

$$L(l_u, l_v) = a_0 l_u^2 + a_1 l_v^2 + a_2 l_u l_v + a_3 l_u + a_4 l_v + a_5 \quad (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} l_{u0}^2 & l_{v0}^2 & l_{u0}l_{v0} & l_{u0} & l_{v0} & 1 \\ l_{u1}^2 & l_{v1}^2 & l_{u1}l_{v1} & l_{u1} & l_{v1} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ l_{uN}^2 & l_{vN}^2 & l_{uN}l_{vN} & l_{uN} & l_{vN} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 \\ L_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ L_N \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

De cette façon, à chaque pixel sont associés les six coefficients de la surface polynomiale d'ordre deux qui modélise la façon dont est réémise la lumière dans toutes les directions. On peut alors calculer le niveau de gris de chaque pixel pour n'importe quelle direction d'éclairage, et reconstruire le rendu visuel de l'image entière ("*torche virtuelle*") de façon instantanée.

La figure 4.5 montre les images reconstruites correspondantes à différents angles d'éclairage, obtenues par la technique Polynomial Texture Mappings à partir d'un lot de photographies.

(a)  $\theta_i = 0^\circ, \phi_i = 15^\circ$ (b)  $\theta_i = 135^\circ, \phi_i = 15^\circ$ (c)  $\theta_i = 225^\circ, \phi_i = 15^\circ$ (d)  $\theta_i = 90^\circ, \phi_i = 45^\circ$ 

Figure 4.5 – Rendus visuels sous différents éclairages, obtenus par la technique PTM

*Remarque* : les images obtenues ne sont pas un rendu exact par rapport à une scène éclairée selon une des incidences équivalentes. Par exemple, les queues des feuilles n'ont pas d'ombre. L'interpolation de l'ensemble des images lisse ce type d'ombre distante, alors que les ombres *proches* des surfaces concernées ont un rendu très proche de celui que nous aurions en observant la scène selon l'éclairage proposé. Ces artefacts ne sont pas gênant pour nos observations.

## 2.2 Etat de l'art et applications de la technique

### 2.2.1 Domaines d'application

Depuis l'invention des *Polynomial Texture Mappings* par l'équipe de T. Malzbender, cette technique a été appliquée et développée pour différents domaines d'applications, et particulièrement dans le domaine de l'archéologie [?, Mudge 08, Earl 10b, Earl 10a, Duffy 10] et de la conservation [Padfield 05, Dellepiane 06] où l'emploi des PTMs permet de mettre en évidence la micro-géométrie de surfaces de peintures ou d'objets sculptés. Ainsi, Artal-Isbrand, Klausmeyer et Murray [Artal-Isbrand 11] montrent comment la technique PTM peut permettre de déterminer quelles techniques de décoration ont été mises en œuvre sur une surface de vase grec ancien du *Worcester Art Museum*<sup>3</sup>. La figure 4.6 montre une illustration d'une image reconstruite par la technique PTM dans le cadre de ces travaux (figure 4.6a), ainsi que le dispositif d'acquisition utilisé (figure 4.6b).



(a) Image reconstruite par la technique PTM d'une portion de surface de vase grec ancien, à partir de [Artal-Isbrand 11]



(b) Dispositif d'acquisition des PTMs

Figure 4.6 – Polynomial Texture Mappings au *Worcester Art Museum* (Massachusetts, Etats-Unis)

### 2.2.2 Acquisition et visualisation des PTMs

Différents dispositifs d'acquisition des PTMs peuvent être mis en œuvre, selon le protocole d'acquisition décrit dans la section 2.1.1.

Si les surfaces à analyser sont de dimensions importantes, l'acquisition peut être manuelle : les sources lumineuses sont positionnées à égale distance de la surface à l'aide d'un fil, tenu au centre de la surface d'analyse. L'opération est répétée jusqu'à avoir un nombre suffisant d'images de la scène, sous différents angles d'éclairage. Un exemple d'acquisition de ce type réalisée au *Cultural Heritage Imaging*<sup>4</sup> est présenté dans la figure 4.7a. Ce système est simple à mettre en œuvre, mais le temps pour une acquisition est conséquent. Un autre système d'acquisition pour des surfaces de taille importante consiste à disposer les sources lumineuses sur un arc motorisé, en rotation autour de la pièce. Ce système a l'avantage d'utiliser un nombre réduit de sources lumineuses, mais il est nécessaire de maîtriser précisément la position des sources lumineuses, et donc de piloter

3. <http://www.worcesterart.org/Collection/conservation/>

4. <http://culturalheritageimaging.org/Technologies/RTI/>

précisément l'orientation de l'arc lumineux. Un système de ce type utilisé à la *National Gallery of London*<sup>5</sup> est présenté dans la figure 4.7b.

Pour les pièces de dimensions moyennes ou petites, le système le plus simple est constitué d'un dôme, sur lequel sont positionnées des sources lumineuses. Le système de prise de vue est alors généralement placé à la verticale de la surface à analyser (exemples des figures 4.2 et 4.6b).

Le système que nous avons développé et mis en œuvre dans le cadre de ces travaux, en vue d'apporter une aide à la détection des anomalies lors du contrôle d'aspect *industriel* est présenté dans la section 3 de ce chapitre.



(a) Acquisition manuelle (*Cultural Heritage Imaging*)



(b) Arc Ptm (*National Gallery of London*)

Figure 4.7 – Acquisitions de PTMs sur des surfaces de dimensions importantes

A partir du lot d'images obtenues, le calcul du fichier PTM est réalisé, selon la méthode décrite dans la section 2.1.2. Ces fichiers peuvent alors être visualisés sur des logiciels dédiés, qui permettent de faire varier l'orientation de la lumière et d'observer le rendu visuel correspondant de la surface, de façon instantanée. Il existe deux principaux logiciels permettant de faire cette visualisation. Le premier logiciel<sup>6</sup> (*PTMviewer*) a été développé lors des travaux initiaux sur la technique PTM, aux laboratoires *hp*. Le second logiciel<sup>7</sup> de visualisation a été développé plus récemment par l'équipe du Cultural heritage Imaging(CHI), sous le nom de *RTIViewer* [*Cultural Heritage Imaging 10*].

### 2.2.3 Transformations et simulations d'effets lumière à partir des PTMs

De nombreuses transformations ont été développées à partir des *Polynomial Texture Mappings* afin de simuler un comportement particulier de la surface. Malzbender et al. [*Malzbender 00a*] montrent comment modifier la surface de réflectance modélisée pour chaque pixel afin de simuler une surface lambertienne (lumière réémise uniquement en diffusion). Inversement, il montre comment simuler le comportement d'une surface parfaitement spéculaire. En fonction du type de surfaces obtenues, ces transformations permettent de mettre en évidence la forme locale, i.e la micro-géométrie de la surface. La figure 4.8 illustre une transformation de la surface réflectance réalisée pour simuler le rendu d'une surface spéculaire sur une tablette ancienne [*Malzbender 00a*], appartenant à la Collection de Recherche Archéologique de l'université de Californie du Sud.

5. <http://www.hpl.hp.com/research/ptm/MakingPtmNew.htm>

6. PTMViewer (*hp*) <http://www.hpl.hp.com/ptm/downloads/PTMViewer.zip>

7. RTIViewer (*chi*) [http://culturalheritageimaging.org/What\\_We\\_Offer/Downloads/rtiviewer/RTIViewer\\_102\\_Setup.exe](http://culturalheritageimaging.org/What_We_Offer/Downloads/rtiviewer/RTIViewer_102_Setup.exe)



Figure 4.8 – Transformation de la surface réfléchente : simulation du rendu d'une surface spéculaire réalisé sur une tablette archéologique, selon [Malzbender 00a]

Afin de mettre en évidence les détails de la texture d'une surface, d'autres transformations ont été développées. Elles sont principalement liées au principe du *masque flou* (en anglais : unsharp masking). Le principe de cette technique se rapproche des travaux réalisés dans le chapitre 2 de séparation des différentes composantes des mesures de surface de topographie. En effet, il s'agit de filtrer les composantes de forme des images (en niveaux de gris, ou sur chacune des composantes RGB), afin d'amplifier les variations relatives entre les points de la surface, et ainsi de mettre en évidence le détail des textures des surfaces. Cette opération de filtrage est décrite par l'équation 4.5, issue de [Palma 10].

$$I_E = I + k(I - I_S) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} I : & \text{Image originale} \\ I_S : & \text{Image lissée (variations de forme)} \\ I_E : & \text{Image améliorée} \end{cases} \quad (4.5)$$

De façon analogue, Palma et al. [Palma 10] proposent une transformation qui permet de mettre en évidence les détails sur une surface en augmentant les différences relatives entre les normales d'une surface (*normal unsharp masking*). Le champ de normales est obtenu en calculant pour chaque pixel le maximum de la surface réfléchente (voir figure 4.4). Pour les *Polynomial Texture Mappings*, cette surface est modélisée par un polynôme de degré 2, défini par ses coefficients ( $a_0 - a_5$ ) (voir équation 4.3). Les projections des normales ( $n_u, n_v$ ) pour chaque pixel sont alors fonction des coefficients ( $a_0 - a_5$ ), et définies par les expressions (4.6) et (4.7).

$$n_u = \frac{a_2 a_4 - 2a_1 a_3}{4a_0 a_1 - a_2^2} \quad (4.6)$$

$$n_v = \frac{a_2 a_3 - 2a_0 a_4}{4a_0 a_1 - a_2^2} \quad (4.7)$$

Le vecteur normal  $\vec{N}$  en chaque pixel est alors défini par :

$$\vec{N} = (n_u, n_v, \sqrt{1 - n_u^2 - n_v^2}) \quad (4.8)$$

Le champ de normales corrigé est alors obtenu par la transformation suivante (équation 4.9) :

$$\vec{N}_E = \vec{N} + k(\vec{N} - \vec{N}_S) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \vec{N} : & \text{Image originale} \\ \vec{N}_S : & \text{Image lissée (variations de forme)} \\ \vec{N}_E : & \text{Image améliorée} \end{cases} \quad (4.9)$$

La figure 4.9 présente une surface avant et après transformation par la méthode du masque flou (*unsharp masking*), issue de [Palma 10].



Figure 4.9 – Transformation de la surface réflectance : mise en évidence des détails d’une surface par la technique du masque flou, selon [Palma 10]

### 2.3 Synthèse

Dans le cadre du contrôle d’aspect industriel des surfaces à haute valeur ajoutée, et dans l’objectif d’apporter une aide aux experts lors de l’étape de détection, la technique PTM nous apparaît comme pertinente et prometteuse pour différentes raisons :

(i) *Mise en évidence du détail.*

Dans les domaines où les PTMs sont appliqués, la technique permet d’obtenir des résultats significatifs en mettant en évidence la micro-géométrie des surfaces. Dans le domaine de la conservation, la technique permet par exemple de déterminer quelles techniques ont été mises en œuvre pour décorer ou peindre une surface, en mettant en évidence les traces des outils utilisés.

(ii) *Mémoire d’un état visuel à un instant donné.*

La technique permet aussi de conserver, dans un fichier unique, un état visuel d’une œuvre à un instant donné. Dans les domaines où les surfaces sont fragiles, et peuvent difficilement être manipulées, ou encore lorsque les surfaces peuvent être altérées par un éclairage sur une période importante, la technique PTM permet ainsi de rendre des œuvres fragiles accessibles au public (*musée virtuel*), tout en montrant un niveau de détail inaccessible par des images classiques de la surface.

(iii) *Parallèle entre la méthode PTM et le procédé de contrôle d’aspect sensoriel.*

Le principe de la méthode de faire varier les angles d’éclairage d’une surface est très proche de ce qui est réalisé ”manuellement” lors de l’étape de détection du contrôle d’aspect industriel. En effet, les opérateurs de contrôle d’aspect visuel font varier l’orientation des pièces pour modifier l’incidence de l’éclairage sur la surfaces, et ainsi mettre en évidence les anomalies d’aspect potentielles. Ce parallèle entre la technique PTM et les méthodes de contrôle sensoriel est très intéressant car il peut faciliter grandement l’appropriation de la méthode par les experts industriels.

(iv) *Simulations d'effets lumières par transformations des PTMs.*

Il existe, à partir des PTMs différentes opérations de transformations des surfaces de réflectance qui en simulant un comportement particulier de la surface vis à vis de la lumière permettent de mettre en évidence certains détails d'une surface invisibles sur des images classiques, et ainsi, de mieux les appréhender et les évaluer.

(v) *Temps de mise en œuvre.*

Dans le contexte industriel, le temps de détection et d'évaluation des anomalies est souvent très restreint. Même si la technique PTM nécessite de prendre un lot d'images, l'acquisition est globale sur les surfaces et peut être très rapide en comparaison avec une méthode d'acquisition ponctuelle. Le calcul des PTMs est ponctuel (pixel par pixel), mais peut être aussi très rapide (calcul en parallèle) avec les moyens informatiques actuels. Enfin, la visualisation du rendu visuel reconstruit par la technique PTM pour une direction d'éclairage choisie est instantanée.

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons nos travaux basés sur cette technique réalisés dans l'objectif d'apporter une aide aux experts lors de la détection des anomalies d'aspect. Dans la section 3, nous présentons le dispositif d'acquisition des PTMs développé et réalisé spécifiquement pour ces travaux, puis nous présentons les résultats et perspectives de cette approche (section 4).

### 3 Mise en œuvre d'un dispositif d'aide à la détection lors du contrôle d'aspect des surfaces

Dans cette section, nous présentons le dispositif développé et réalisé au laboratoire *SYMME* dans le cadre de ces travaux, pour aider les experts industriels à détecter les anomalies d'aspect. Pour faciliter la lecture, ce dispositif est désigné dans la suite de ce document par l'abréviation **SISD** (**S**urface **I**nspection **S**upport **D**evice).

Ce dispositif permet d'acquérir et de générer des fichiers PTMs. Il a été spécialement conçu pour apporter une aide lors de l'étape de détection du contrôle d'aspect sur des surfaces à haute valeur ajoutée, dans un contexte industriel. Un rapport technique expliquant la mise en œuvre du SISD et les technologies utilisées est accessible en téléchargement<sup>8</sup>. Nous reprenons ici les éléments essentiels de conception et de fonctionnement de ce dispositif, avec lequel ont été obtenus les résultats présentés dans la section 4 de ce chapitre.

#### 3.1 Objectif et principe général du SISD

L'objectif de ce système d'aide à la détection d'anomalies de surfaces est de faciliter le processus de contrôle de la qualité d'aspect des surfaces, et ainsi de diminuer la variabilité du contrôle d'aspect des surfaces. L'approche proposée est *semi-automatique* car elle est centrée sur l'expertise des contrôleurs visuels au sein des entreprises. En effet, le grand nombre de type d'anomalies d'aspect potentielles et la complexité du processus de décision (acceptation/non acceptation), du fait par exemple de la localisation des anomalies sur la pièce ou de leur répartition, rendent le contrôle souvent long, fastidieux, et peu reproductible (très dépendant de l'opérateur). De plus, les experts sont garants de la culture et du patrimoine de l'entreprise en terme d'aspect. Ils apportent ainsi une grande part de la valeur ajoutée aux produits. Ce patrimoine est difficile à formaliser, et il est donc nécessaire que les experts soient au cœur du processus de contrôle d'aspect. Il s'agit donc ici d'aider à la détection des anomalies, et non de détection automatique.

---

8. Documentation technique accessible à partir de <https://sites.google.com/site/gaetanlegoic/communications/articles>

Lors du contrôle d'aspect des surfaces, les opérateurs font varier l'orientation des pièces dans l'espace, afin notamment de modifier les angles d'incidence de la lumière sur l'objet ( $\theta_i, \phi_i$ ), et de mieux percevoir les anomalies sur la surface (voir figure 4.1). Le système proposé reprend ce principe général. L'observateur est matérialisé par un système de prise de vue (par exemple un **Appareil Photo Numérique**), des sources de lumière sont réparties de façon homogène sur la surface intérieure d'une demi-sphère opaque, et l'objet est situé à la verticale du système de prise de vue (repère *Système de prise vue/Pièce fixe*).

Les sources lumineuses sont allumées successivement, et pour chaque éclairage on prend une image de la scène. On obtient ainsi un ensemble d'images de l'objet, correspondantes aux différents éclairages (Figure 4.10). L'acquisition effectuée, un programme permet de générer à partir du lots d'images le fichier *PTM*, et de simuler le rendu de la surface quelle que soit la position de la source lumineuse qui l'éclaire. L'utilisateur peut alors mettre en évidence les anomalies en choisissant la/les directions d'éclairages les plus pertinentes, et en observant le rendu visuel correspondant.

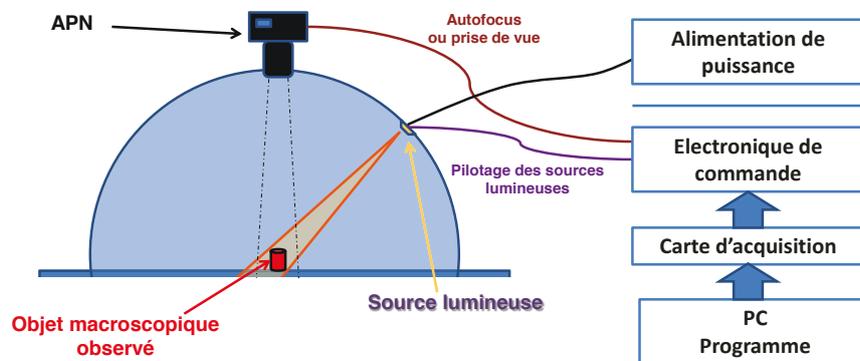


Figure 4.10 – Principe de fonctionnement du dispositif PTM

### 3.2 Etude du besoin

Pour la conception et le développement du SISD, l'étude du besoin et des différentes contraintes liés au contexte d'application de ces travaux est présentée sous forme de diagramme pieuvre, dans la figure 4.11. Le tableau associé 4.1 détaille les fonctions principales, les fonctions de services complémentaires et les fonctions de contraintes définies dans la figure 4.11.

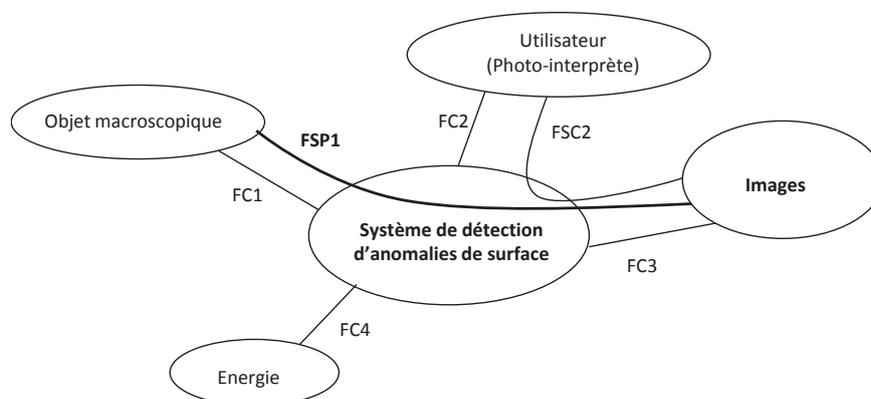


Figure 4.11 – Diagramme pieuvre

Fonctions	Description
FSP1	Le système doit permettre l'acquisition d'images de l'objet sous différents angles d'éclairage
FSC2a	L'utilisateur doit pouvoir accéder simplement et rapidement aux images
FSC2b	L'utilisateur doit pouvoir générer les fichiers PTMs à partir des images
FC1	Le système doit fonctionner avec une grande variabilité de surfaces (réflectivité, forme, dimension, couleur)
FC2	Le système doit être pilotable facilement
FC3	Le système doit effectuer le traitement d'images de haute définition
FC4	Le système doit fonctionner avec les sources d'énergies disponibles

Tableau 4.1 – Fonctions principales et fonctions de contraintes

FSP : Fonctions de service principales

FSC : Fonctions de service complémentaires (améliorent, facilitent ou complètent le service rendu)

FC : Fonctions de contrainte

### 3.3 Solutions techniques retenues

Les solutions techniques principales concernent l'architecture générale, le choix du système de prise de vues, le choix des éclairages, et le moyen de pilotage du SISD.

**Architecture générale** L'architecture choisie est représentée dans la figure 4.10. Le SISD est constitué d'un dôme opaque, pour isoler le dispositif de la lumière extérieure. Des sources lumineuses sont fixées sur la surface intérieure du dôme, réparties de façon homogène sur la surface du dôme, et un système de prises de vues est disposé au sommet du dôme. Cette architecture est adaptée pour des surfaces de taille moyenne (< dimensions feuille A4).

**Système de prise de vues** Nous avons choisi d'utiliser un **Appareil Photographique Numérique** (APN) équipé d'un objectif macro, afin d'avoir une qualité d'image (résolution) et une vitesse d'acquisition adaptée à nos besoins. Il s'agit du Nikon D300s, dont les principales caractéristiques sont :

- Capteur 12,3 mégapixels
- Cadence de prise de vue 7 images/seconde
- Démarrage 130 ms et déclenchement 49 ms
- Double slot carte mémoire CF/SDHC

**Sources lumineuses** Nous avons choisi pour les sources lumineuses des leds de puissance. Cette solution permet d'obtenir :

- une forte luminosité (pour avoir un temps de cycle rapide). En effet, plus la luminosité à l'intérieur du dôme est forte, plus le temps d'ouverture de l'obturateur de l'appareil photo pourra être court. On peut alors suivre la cadence de l'APN (7 images/sec en mode continu haute vitesse).
- un spectre proche de la lumière naturelle (choix dicté par la pratique des experts visuels)
- l'éclairage de l'objet macroscopique sous différents angles d'éclairage à l'intérieur du dôme
- un encombrement faible
- une longue durée de vie
- une variabilité faible du spectre émis entre les sources lumineuses
- un coût modéré

**Pilotage du dispositif** Le SISD est globalement piloté par une architecture *Labview* (Système de prise de vues et Leds), afin d'avoir un maximum de flexibilité pour le développement et l'utilisation du dispositif en laboratoire.

Les solutions techniques retenues sont synthétisées dans le tableau 4.2.

Fonctions	Critères d'appréciation	Niveau	IF
FSP1	Pilotage Sources lumineuses et APN	Programmable Carte d'acq. 96 E/S TTL5V + Carte élec. Liaison DAQ ↔ APN par Câble de commande MC22	0
	Qualité d'image	Choix système de prise vue & résolution APN Nikon D300s (12.6 Mp)	1
	Luminosité	Forte (> 300 lm) Technologie Leds de puissance (Cree MC-E 320 lms)	0
	Spectre de lumière	Lumière blanche proche de la lumière naturelle Warm White (Temp. 4000K) + 1/2 sphère Ø90 cm opaque pour isoler de la lumière extérieure	0
	Nombre de sources lumineuses	Maillage assez dense pour permettre une modélisation des surfaces réflectance fine → Maillage éléments quadrangles à 95 sommets	2
FSC2a	Temps de cycle adapté usage industrie	< 30 secondes Leds : temps de réponse de l'ordre de quelques μs Acquisition rapide images : APN, vitesse > 7i/s +carte flash 90Mo/sec en écriture	2
FSC2b	Fichiers source (images) compatibles avec le logiciel de création de .ptm	JPEG, TIFF, PNG : OK avec APN D300s	2
FC1	Dimension de la zone image (surface maximale des échantillons)	Taille des échantillons ;feuille A4 Objectif macro 85mm	1
	Réflectivité	Tous types d'échantillons (réglages param. APN : Temps d'ouverture, Sensibilité)	1
	Forme, Couleur	Tous types d'échantillons : OK avec APN D300s	2
FC2	Gestion des modes de fonctionnement	2 Modes : autofocus (mise au point) et cycle d'acquisition PTM → Utilisation d'une E/S de la carte d'acquisition (choix manuel du mode AF ou Cycle PTM)	2
	Pilotage depuis un « bas niveau »	Interface utilisateur ergonomique Programmation Labview + interface Homme-machine	2
FC3	Acquisition/transfert rapide	Non contraignant /temps de cycle Carte Flash rapide Sandisk 90 MB/sec	1
FC4	Energie électrique	Input : 230 V	1
		Output : < 24V CC Alimentation 230V/24VCC	0

IF : Indice de flexibilité ( 0 = faible ; 1 = moyenne ; 2 = forte)

Tableau 4.2 – Solutions techniques retenues pour le dispositif d'acquisition des PTMs

Légende :

- Contraintes (limitations à la liberté du concepteur réalisateur)
- Solutions techniques (Réponse au CdC)

Le SISD réalisé dans le cadre de ces travaux pour apporter un support aux experts lors de l'étape de détection des anomalies d'aspect est présenté dans la figure 4.12.

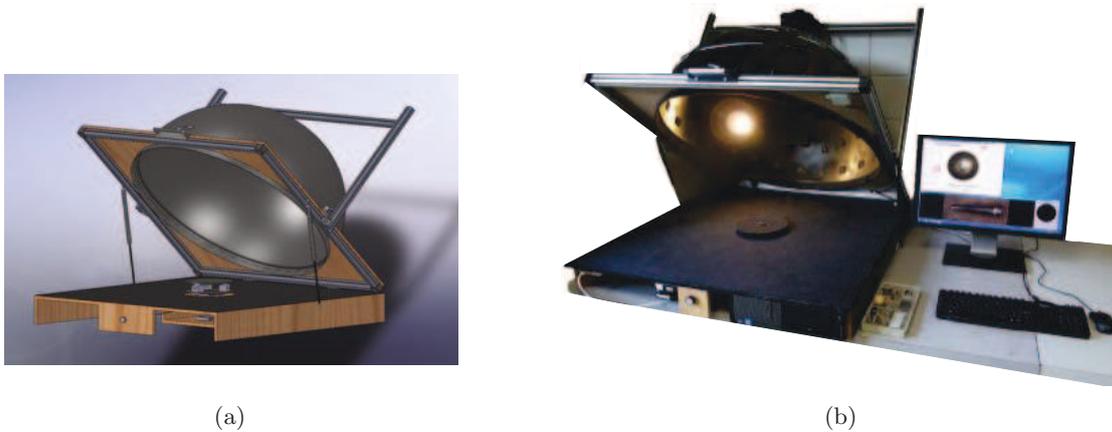


Figure 4.12 – Dispositif d'aide à la détection des anomalies développé et réalisé au laboratoire *Symme* (SISD)

### 3.4 Interface utilisateur

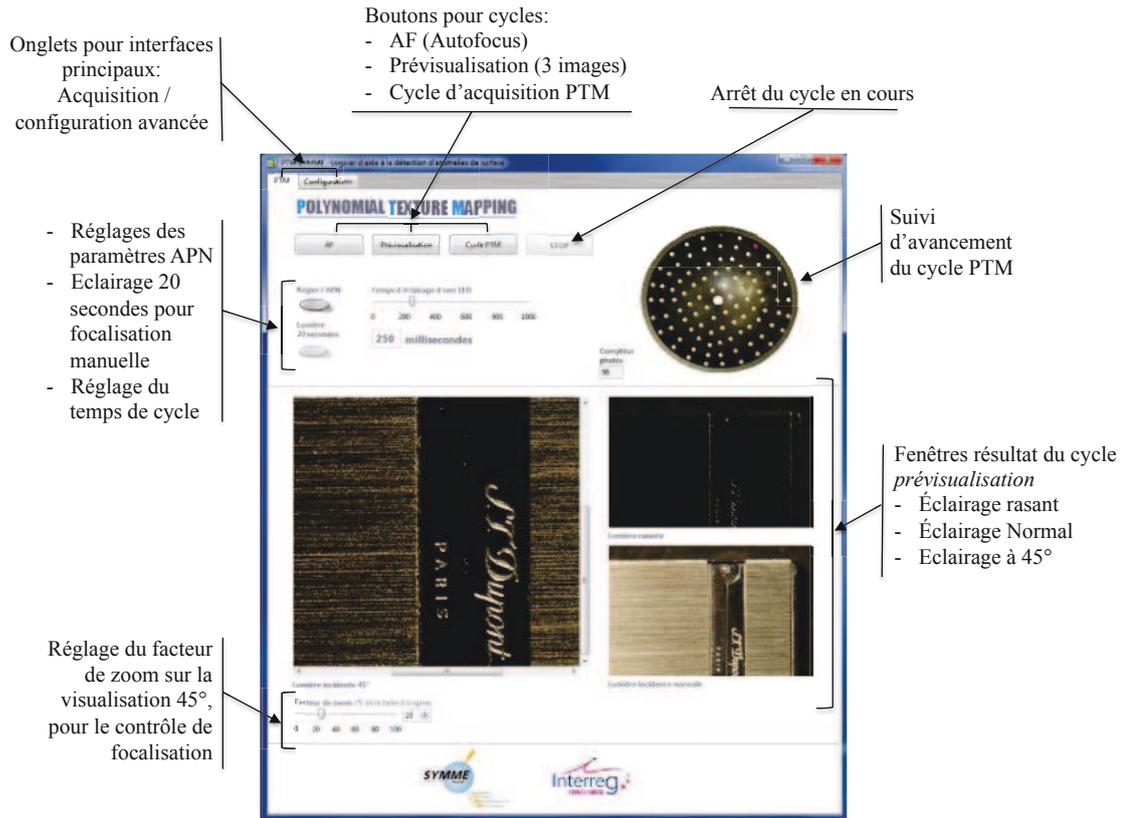
Une présentation ergonomique de l'outil permet son utilisation simplifiée. La lisibilité immédiate et l'accessibilité des commandes aident à formaliser le processus d'utilisation du système d'aide à la détection. L'objectif est d'automatiser au maximum le dispositif, pour faciliter l'acquisition des images, la création des fichiers PTM et leur visualisation.

L'interface a été réalisée dans l'environnement Labview, ce qui permet d'être très flexible vis à vis de nouveaux développements, ou de modifications des fonctionnalités du SISD. Elle est composée de deux onglets principaux, qui correspondent aux fonctions de pilotage du dispositif, et aux fonctions de configurations avancées.

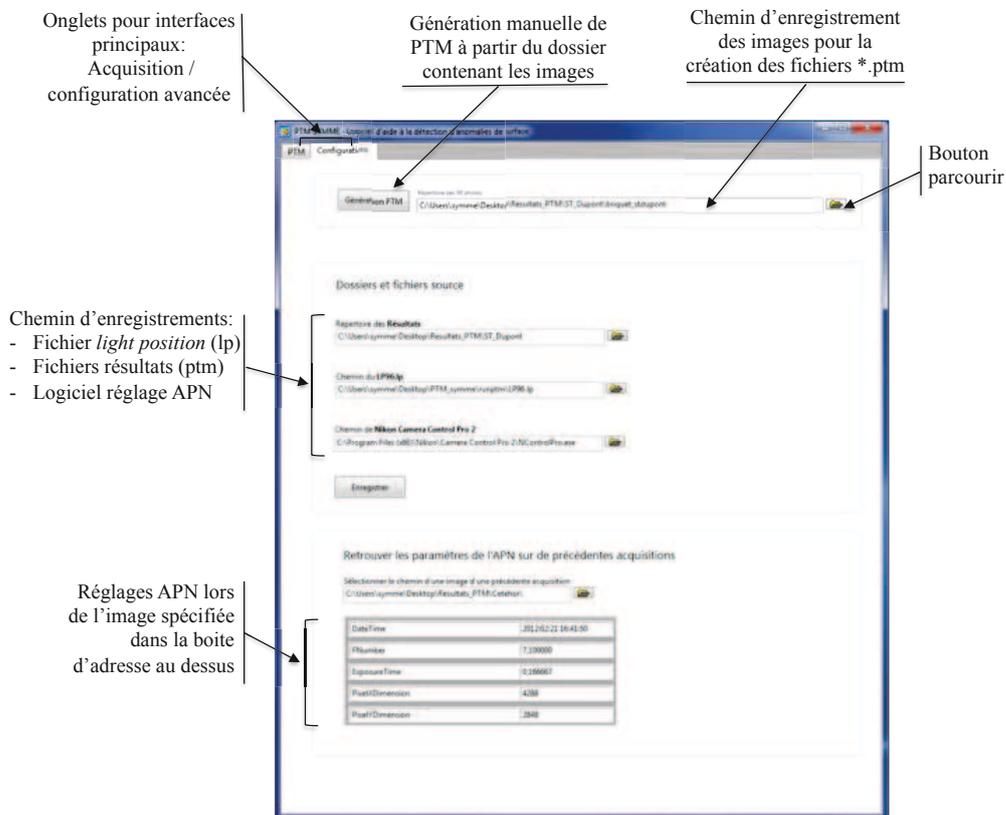
Trois actions de commandes principales sont accessibles directement sur l'interface de pilotage : l'autofocus (commande APN), la *pré-visualisation* de 3 images sous différents éclairages (vérification réglages APN : focalisation, ouverture et temps d'ouverture), et le cycle PTM (acquisition des images, création du fichier PTM, et visualisation).

Afin de faciliter le dépannage, toutes les commandes ont été rendues facilement accessibles sur l'interface en mode *manuel* : réglage des paramètres de l'APN, temps de cycle, génération du fichier PTM à partir de l'adresse du dossier contenant les images, etc.

La figure 4.13 présente les deux onglets principaux de l'interface, ainsi que les différentes actions et réglages accessibles sur ces deux onglets.



(a) Interface pour le cycle d'acquisition



(b) Interface de configuration avancée

Figure 4.13 – Interface utilisateur du SISD

## 4 Applications du SISD & résultats

Comme indiqué précédemment, l'objectif du SISD et de l'emploi de la technique *Polynomial Texture Mappings* dans le cadre de ces travaux est d'apporter une aide aux experts lors du processus de contrôle de la qualité d'aspect des surfaces, et particulièrement lors de l'étape de détection. Dans cette partie, nous appliquons cette approche à différentes surfaces à haute valeur ajoutée sur lesquelles sont présentes des anomalies d'aspect. Nous présentons ensuite les résultats obtenus sur ces différentes surfaces.

Dans un second temps, nous détaillons les perspectives d'application de cette approche dans le cadre de l'analyse de la qualité d'aspect des surfaces. Nous présentons notamment le lien entre PTM, reconstruction 3D et information en pentes et en courbures d'une surface. Nous montrons enfin comment cet outil peut être intégré dans le cadre d'une méthodologie globale d'analyse de la qualité d'aspect des surfaces.

### 4.1 Aide à la détection des anomalies lors du contrôle d'aspect des surfaces

#### 4.1.1 Performances du SISD : analyse de rayures normalisées

Afin d'évaluer les performances du dispositif et de comparer ce qu'il permet de voir par rapport à ce que l'humain détecte habituellement, nous proposons d'appliquer notre approche sur des pièces métalliques planes qui présentent des rayures dites *normalisées* (dimensions et caractéristiques géométriques connues). Ces pièces ont été réalisées dans le cadre des travaux de doctorat de T. Puntous, au Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS), par un système basé sur un nano-indenteur et une pointe diamant. Puntous et al. [Puntous 12] ont déterminé les limites de visibilité des rayures normalisées en fonction de leurs paramètres géométriques ( $a, b, c$ ), décrits dans la figure 4.14.

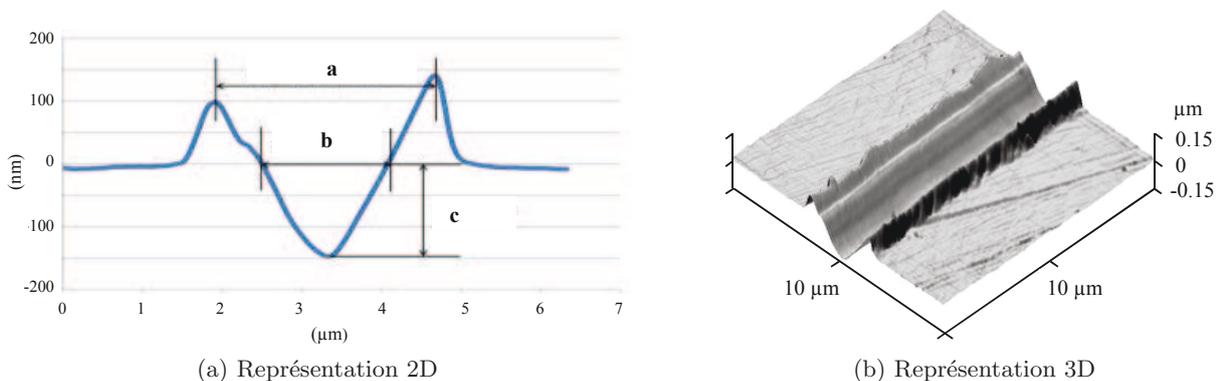
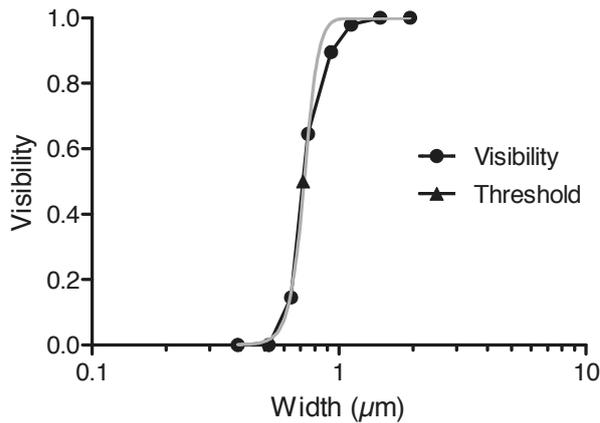


Figure 4.14 – Rayure normalisée sur une surface métallique, réalisée avec un effort normal de  $6600 \mu N$  (mesure AFM), à partir de [Puntous 12]

Les résultats de l'analyse sensorielle obtenus dans [Puntous 12] en terme de visibilité (détection) et d'acceptabilité sont synthétisés dans la figure 4.15.



(a) Visibilité vs Largeur

Dimension Parameter	Visibility Threshold	Acceptability Threshold
a	1.12 $\mu\text{m}$	1.40 $\mu\text{m}$
<b>b</b>	<b>0.73 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>0.88 <math>\mu\text{m}</math></b>
c	56 nm	69 nm

(b) Limites de visibilité et d'acceptabilité

Figure 4.15 – Visibilité en fonction des caractéristiques géométriques des rayures normalisées, à partir de [Puntous 12]

Nous appliquons notre approche sur 3 différents échantillons réalisés par Puntous au LTDS. Les acquisitions des fichiers PTMs correspondant à chacun des échantillons sont réalisées dans des conditions identiques (réglage APN, temps d'éclairage, etc.). La situation sur la surface métallique, les caractéristiques géométriques et la visibilité des 3 échantillons sont présentés dans le tableau 4.3.

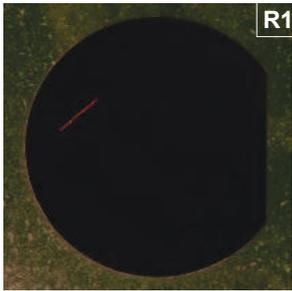
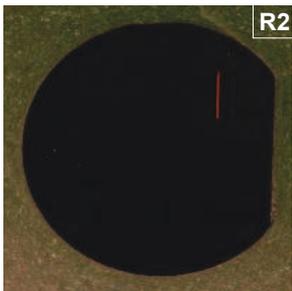
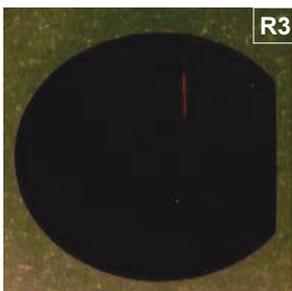
Echantillon	Caractéristiques
 R1	Force : 2800 ( $\mu\text{N}$ ) a : 1.47 ( $\mu\text{m}$ ) b : 0.93 ( $\mu\text{m}$ ) c : 72.83 (nm) Visibilité : 89.58 (%)
 R2	Force : 1200 ( $\mu\text{N}$ ) a : 0.98 ( $\mu\text{m}$ ) b : 0.93 ( $\mu\text{m}$ ) c : 43.53 (nm) Visibilité : 14.58 (%)
 R3	Force : 800 ( $\mu\text{N}$ ) a : 0.68 ( $\mu\text{m}$ ) b : 0.93 ( $\mu\text{m}$ ) c : 26.1 (nm) Visibilité : 0.00 (%)

Tableau 4.3 – Échantillons d'application R1, R2 et R3

La figure 4.16, 4.17 et 4.18 présentent les résultats obtenus sur ces 3 échantillons avec l'approche PTM. La technique consiste à faire varier virtuellement les angles d'éclairage sur la surface, pour mettre en évidence les anomalies d'aspect. Pour ces trois échantillons, en quelques secondes, on parvient aisément à détecter les anomalies d'aspect de type rayure, même lorsque celles-ci ne sont pas détectées par les experts visuels, à l'œil nu (cf. figure 4.18). Ainsi, pour ce type d'anomalies, la capacité du SISD est supérieure à celle du contrôle d'aspect visuel humain, sans grossissement.

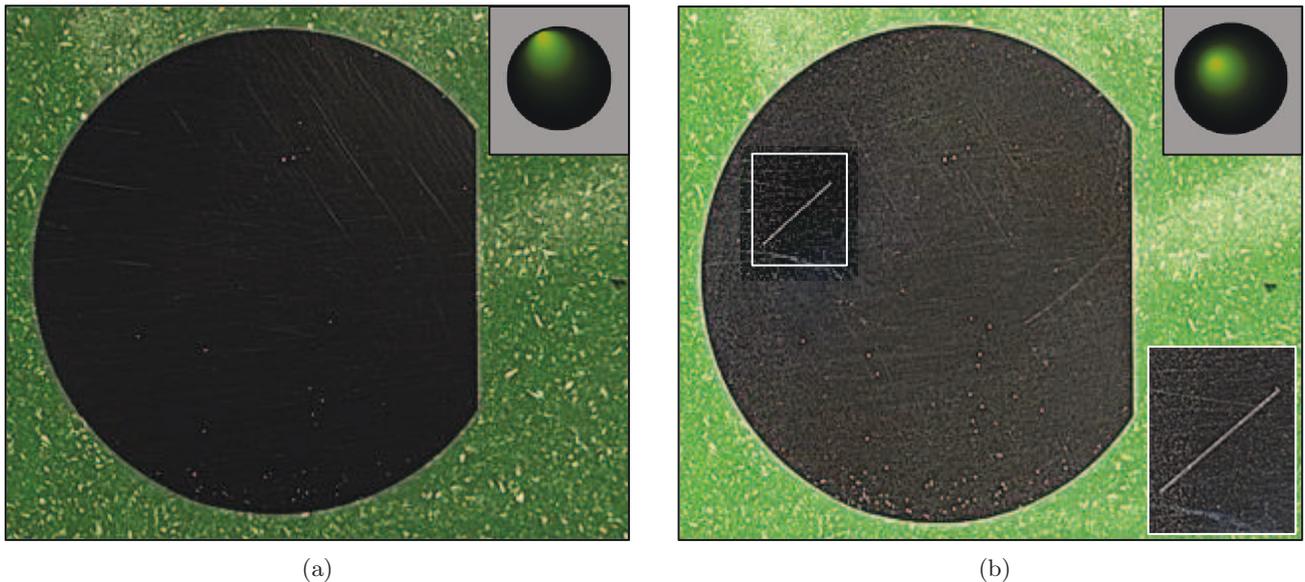


Figure 4.16 – Echantillon R1 - Reconstruction PTM du rendu visuel de la surface sous différents éclairages

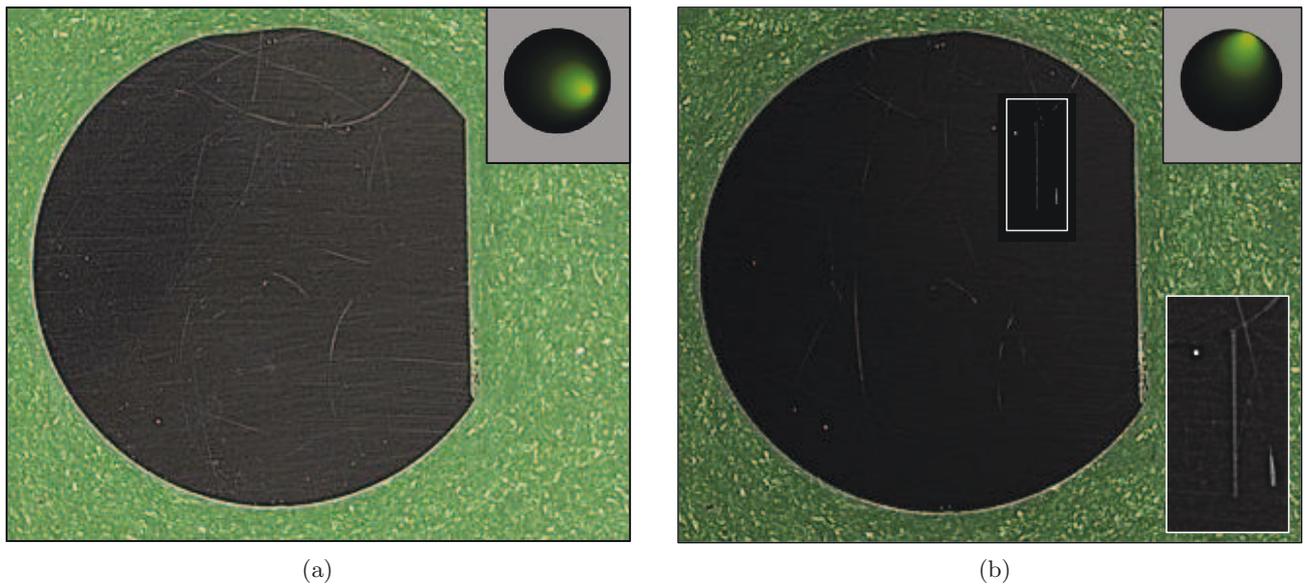


Figure 4.17 – Echantillon R2 - Reconstruction PTM du rendu visuel de la surface sous différents éclairages

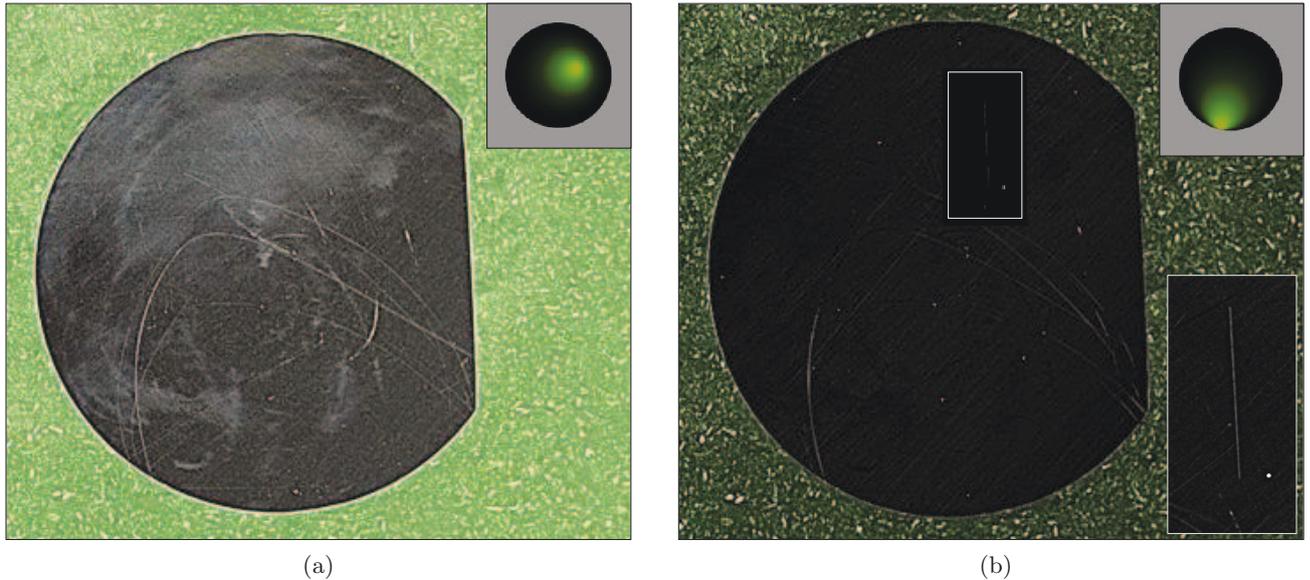


Figure 4.18 – Echantillon R3 - Reconstruction PTM du rendu visuel de la surface sous différents éclairages

Dans la suite de cette section, nous présentons les résultats de cette approche sur des surfaces de pièces "réelles", à forte valeur ajoutée, sur lesquelles le contrôle et particulièrement la détection des anomalies d'aspect est un enjeu industriel important.

#### 4.1.2 Applications de la méthode sur des surfaces de pièces *réelles*

La figure 4.19 synthétise les résultats obtenus pour différentes surfaces présentant des anomalies d'aspect. La description des produits et des anomalies de surface présentés dans cette figure est donnée ci-dessous.

(a) (figure 4.19a)

Il s'agit de la surface correspondante à la face principale de briquet décoré par gravure. Le briquet est réalisé en laiton, puis un plaquage en matière précieuse est réalisé sur l'ensemble de la surface (palladium). Ce produit présente une anomalie sur un de ses champs, qui a donné lieu à une opération de retouche manuelle par polissage. Suite au polissage trop important en retouche, la couche inférieure du plaquage apparaît localement ("*trop poli*"), ce qui induit une anomalie d'aspect de type couleur (on dit que la surface est *ajaunie*). De plus, ce type d'anomalie peut aussi induire à l'usage du produit des phénomènes de corrosion anormaux.

(b) (figure 4.19b)

Cette surface est la face de dessus d'un briquet, plaqué en argent. Les anomalies sont des rayures assez courtes, dues aux manipulations du briquet lors de la fabrication et de la décoration du briquet.

(c) (figure 4.19c)

Cet échantillon est une pièce d'horlogerie, dont la surface est décorée par un soleillage. L'anomalie est une rayure, qui contrairement au motif de soleillage, n'est pas orientée selon les rayons de la pièce.

(d) (figure 4.19d)

Ces deux pièces sont des rouleaux cylindriques. Un contrôle d'aspect est réalisé avant montage du roulement, pour ne pas détériorer les bagues intérieures et extérieures des roulements. Ici, les anomalies détectées sont des coups, dus à des chocs entre roulements lors du processus de fabrication et de contrôle des produits.

(e) (figure 4.19e)

Il s'agit de 4 touches d'un clavier de téléphone, dont les surfaces sont obtenues par sablage. Les anomalies sont des coups et des rayures, particulièrement difficiles à détecter du fait de l'amplitude du motif global de sablage des surfaces.

(f) (figure 4.19f)

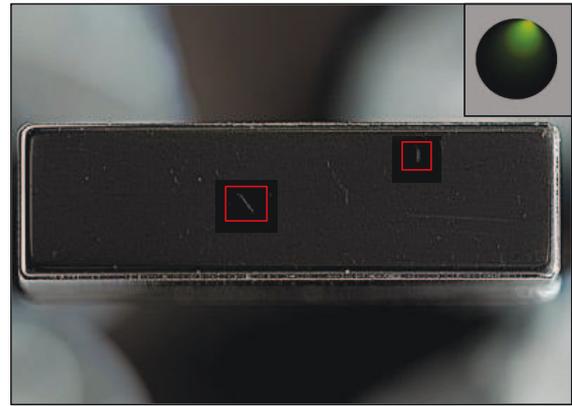
Cette pièce est un maillon de bracelet de montre dont la surface est *super-polie*. La difficulté est ici principalement liée à la forme bombée de la surface, et à l'état de polissage qui donne à la surface le comportement d'une surface spéculaire. L'anomalie d'aspect détectée est une rayure, située au centre du maillon.

On observe à travers les résultats obtenus et présentés dans la figure 4.19 que l'approche proposée permet de faciliter grandement le contrôle d'aspect des surfaces *réelles*, à forte valeur ajoutée, et facilite particulièrement l'étape de détection des anomalies. En effet, cette technique permet, dans un temps court, de pouvoir simuler le rendu visuel d'une surface sous l'éclairage souhaité, ou encore d'appliquer des transformations de réflectance qui facilitent la détection. Ces opérations permettent en quelques secondes de mettre en évidence l'ensemble des anomalies d'aspect d'une surface. De plus, elles sont réalisées sans manipulation des produits, ce qui limite le risque d'altération accidentelle des surfaces.

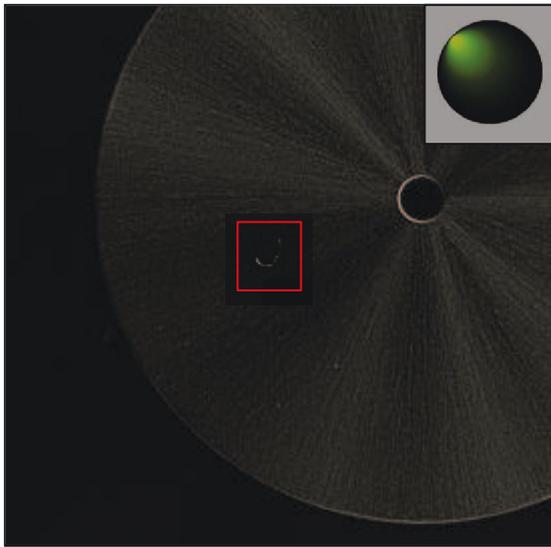
Ainsi, l'opérateur peut facilement détecter les anomalies sur les surfaces, et si nécessaire, segmenter les surfaces en *zones critiques*, pour une analyse plus approfondie (voir chapitre 2). Cette approche fonctionne pour une large fourchette d'anomalies d'aspect, qu'elles soient locales ou globales, et peut ainsi apporter une aide importante aux experts lors de l'étape de détection.



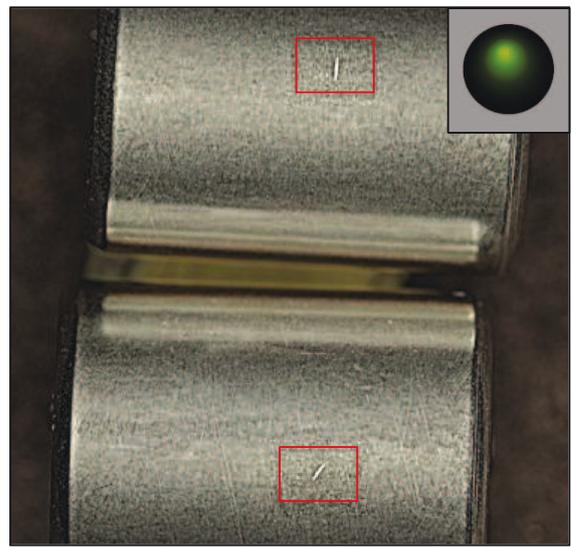
(a)



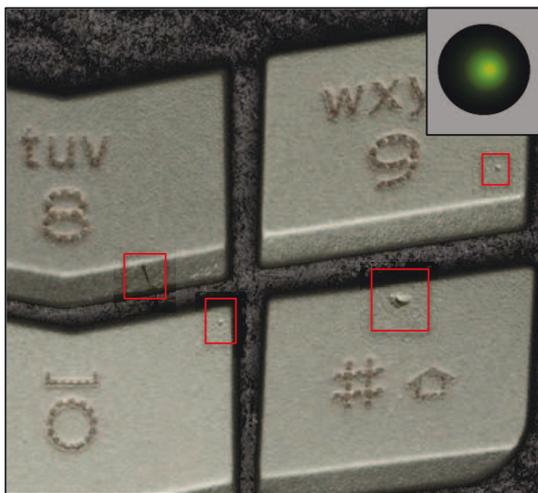
(b)



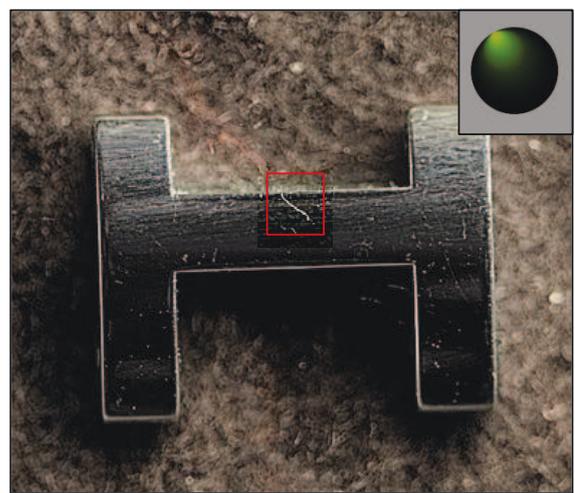
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure 4.19 – Aide à la détection des anomalies d’aspect par une approche PTM, sur des surfaces de produits à haute valeur ajoutée

## 4.2 Autres applications et perspectives du dispositif

La section 4.1 a permis de montrer comment le SISD peut permettre d'aider les experts sensoriels lors de l'étape de détection du contrôle de la qualité d'aspect sur des surfaces à haute valeur ajoutée. L'objet de cette section est de présenter les applications et utilisations complémentaires de cette approche, en lien avec le cadre de ces travaux.

### Outil de pédagogie et de formation pour le contrôle visuel

Une première application envisageable est de déployer cette approche dans le cadre de la formation des opérateurs au contrôle d'aspect des surfaces. L'outil peut ainsi servir à :

- Présenter, expliquer et expérimenter le contrôle d'aspect visuel sur les surfaces à inspecter, ainsi que les différents types d'anomalies que l'on retrouve le plus fréquemment
- Montrer l'intérêt de faire varier les angles d'éclairage et d'observation pour mettre en évidence les anomalies, et mieux maîtriser leur détection
- Présenter les 3 effets lumières
- Expérimenter et s'entraîner en groupe sur les mêmes surfaces

Cette application de la technique n'a pas été mise en œuvre dans les entreprises, même si les industriels ont montré un intérêt important pour cette approche. C'est une perspective à court terme de ces travaux.

### Vers la métrologie d'aspect : création de références de qualité d'aspect d'une surface

Une autre perspective d'application de cette approche est d'établir des références de qualité d'aspect, à la manière de ce qui est pratiqué en métrologie dimensionnelle. Une surface inspectée peut être archivée sous sa forme PTM, afin de conserver un état visuel de la surface à un instant donné. On peut aussi, par exemple après quelques cycles d'utilisation, ou lors des retours après vente des produits à l'entreprise comparer et évaluer l'évolution du rendu visuel des surfaces, à partir de PTMs acquis au cours du cycle de vie du produit. Cette application de l'approche présentée irait dans le sens d'une réelle *métrologie d'aspect*, en créant des étalons visuels.

### Détection automatisée : Segmentation des surfaces par traitements d'images

Dans l'approche proposée, l'expert visuel est au centre du processus de contrôle d'aspect, et le dispositif permet d'apporter un support lors de l'étape de détection. Dans certaines conditions, on pourrait envisager d'automatiser le processus, par exemple pour les anomalies d'aspect dont le caractère non acceptable ne font aucun doute. Cette semi-automatisation peut être réalisée à partir des résultats de l'approche présentée, en appliquant un échantillonnage des surfaces reconstruites pour l'ensemble des directions d'éclairage, et en segmentant les surfaces par traitement d'image. Cette perspective d'application pourrait être réalisée par exemple par une méthode du gradient sur le lot d'images échantillonnées à partir du PTM.

### Polynomial Texture Mapping, Pentas & Courbures

Le SISD permet d'obtenir pour chaque pixel des images réalisées une approximation de la surface de réflectance. Le maximum de cette fonction bidirectionnelle correspond à la direction dans laquelle la surface réémet le plus de lumière. Ainsi, cette direction est la normale à la facette (matérialisée par le pixel), et correspond donc directement à l'information en pentes de la surface. Ce champ de normales peut aussi être calculé à partir du lot d'images sous différents éclairages acquises par le dispositif, par des techniques de photométrie [Woodham 80, Christensen 94, Malzbender 06, Nayar 90]. MacDonald [MacDonald 11, MacDonald 10], dans sa comparaison entre les deux techniques (estimation des normales par le maximum de la surface réflectance calculée par la technique PTM *vs* estimation des normales par la technique

photométrique) montre qu'il est préférable d'utiliser les techniques photométriques, du fait du lissage des surfaces réflectance lors de l'approximation en chaque pixel par un polynôme de degré 2.

La figure 4.20 présente le champ de normales obtenu à partir des données acquises sur 2 surfaces : une montre, et la surface de clavier présentée dans la figure 4.19d. Les représentations en haut à droite de chacune des figures indiquent la répartition des normales, en projection dans le plan horizontal.

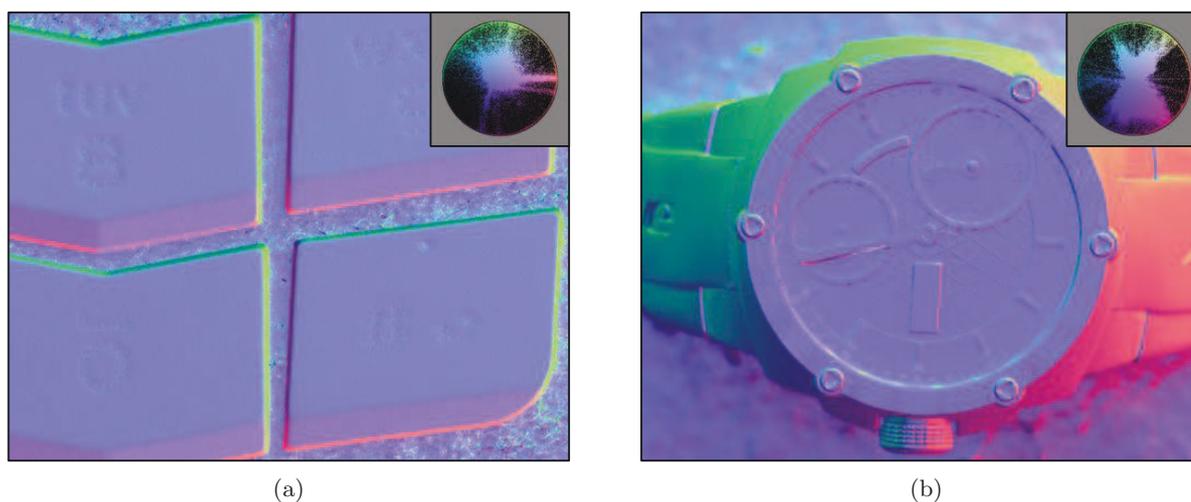


Figure 4.20 – Reconstruction du champ de normales d'une surface à partir des PTMs

A partir du champ de normales, i.e de l'information en pentes, il est alors possible de calculer les courbures de la surface, qui peuvent apporter une aide supplémentaire pour évaluer l'apparence des surfaces, et notamment l'impact visuel des anomalies (voir chapitre 2, section 4). En comparaison avec les mesures de topographie, cette approche permet de ne dériver qu'une seule fois les données pour obtenir l'information en courbures, ce qui limite l'effet du bruit "de mesure" sur les résultats obtenus. C'est une perspective prometteuse de cette approche, qui permettrait d'allier détection rapide et évaluation basée sur des critères objectifs de la criticité des anomalies d'aspect.

Les 2 perspectives d'applications présentées ci-dessous sont des perspectives sur lesquelles des recherches ont été engagées dans le cadre de ces travaux.

#### **Aide à l'évaluation : Du PTM à la reconstruction 3D de l'état de surface**

On a montré précédemment que les informations PTMs permettent d'obtenir l'information en pentes, et par dérivation, les courbures des surfaces analysées. Inversement, on peut intégrer les pentes (champ de normales) pour reconstruire la topographie de la surface. Il existe de nombreuses méthodes d'intégration des champs de normales [Durou 07b, Durou 09], liées aux travaux sur la photométrie. En effet, cette technique permet de reconstruire la topographie d'une surface à partir d'un lot d'images sous différents éclairages, en calculant puis en intégrant les normales d'une surface. Cependant, pour chaque pixel, ou zone de la surface, il est nécessaire de réaliser le calcul des altitudes uniquement à partir des images favorables, i.e de s'assurer que les pixels ne sont ni à l'ombre, ni saturés. La figure 4.21 montre les premières reconstructions obtenues par cette approche pour deux surfaces : un trièdre en bois 4.21a, et la surface de clavier 4.21b déjà présentée en figure 4.19d et 4.20a.

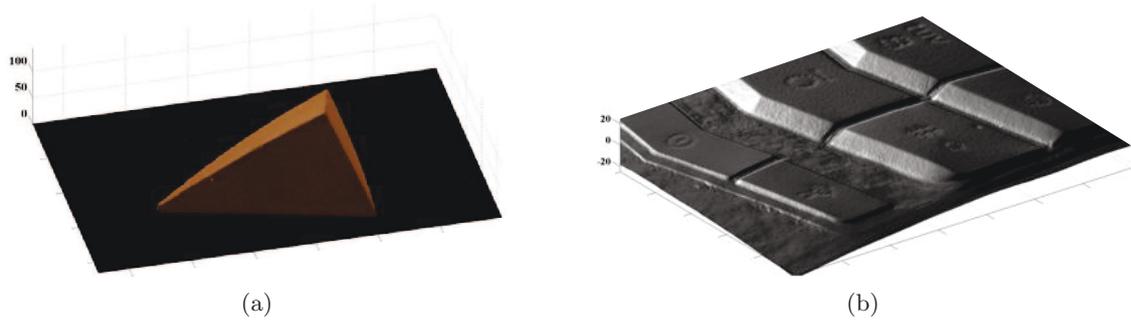
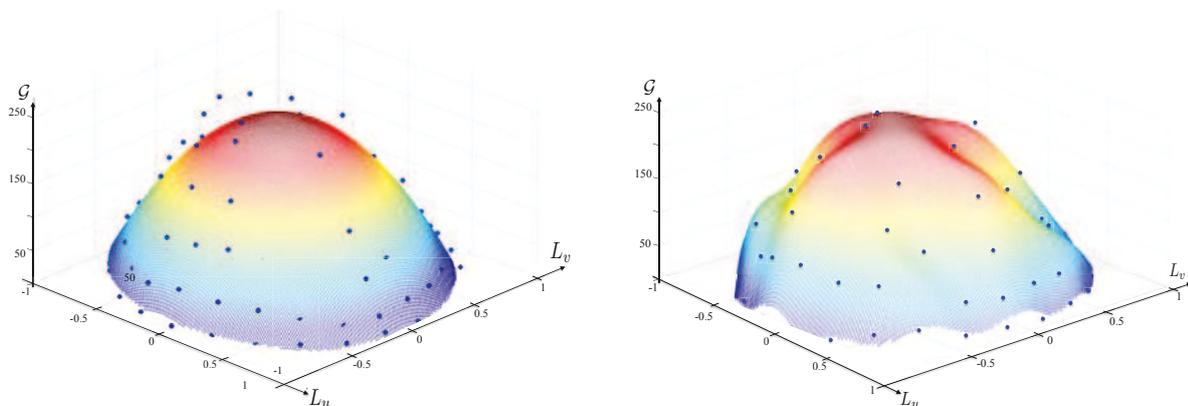


Figure 4.21 – Reconstruction des topographies à partir des PTMs

Les poursuites de ces travaux consisteront à calibrer la topographie obtenue en fonction du dispositif, à corriger les erreurs et distorsions potentielles liées au système optique utilisé, et à améliorer la robustesse du calcul de la topographie, en prenant notamment en compte les différences de réflectivité entre les surfaces. Cette application est particulièrement intéressante car elle permettra d'obtenir dans un temps court une information 3D en altitudes. De plus, elle permettra de lier directement l'approche *géométrique* (chapitre 2) et l'approche *lumière*, et ainsi d'apporter une aide aux experts à la fois pour la détection et pour l'évaluation.

#### Amélioration de la qualité des PTMs : *Modal Texture Mappings*

Les fichiers PTMs sont basés sur l'approximation pour chaque pixel des surfaces de réflectance par un polynôme d'ordre 2. L'avantage de cette approximation est qu'elle est très rapide, et qu'elle permet de limiter la taille des fichiers générés (6 coefficients par pixel). Cependant, un inconvénient est lié au fait que les surfaces réflectance de chaque pixel sont lissées par la méthode d'approximation polynomiale. L'effet de ce lissage est que les anomalies visibles dans un cône d'éclairage trop restreint peuvent ne pas apparaître dans le fichier PTM généré. De plus, cette méthode d'approximation ne permet pas le calcul précis des maximums des surfaces de réflectance, et donc les normales aux surfaces, pour calculer leur topographies. Nous proposons donc une autre méthode d'approximation, plus précise, pour caractériser les surfaces réflectance de chaque pixel. Cette méthode est basée sur la Décomposition Modale Discrète. Le calcul pour chaque pixel est, de la même façon que pour les PTMs classiques, instantané. La figure 4.22 présente les premiers résultats obtenus, pour un pixel.



(a) surface réflectance approximée par un polynôme de degré 2 (6 paramètres)

(b) surface réflectance approximée par la méthode modale dans un espace de 20 descripteurs

Figure 4.22 – Méthodes d'approximation des surfaces de réflectance en chaque pixel

On peut observer la différence entre l'approximation polynomiale et l'approximation *modale* des surfaces de réflectance. Les perspectives de cette application sont d'améliorer la qualité générale des PTMs, et ces travaux nécessitent de réaliser un nouveau visualisateur de PTM correspondant à la méthode d'approximation modale des surfaces de réflectance.

## 5 Conclusion

Nous avons montré que l'approche géométrique présentée dans le chapitre 2 permet d'apporter une aide aux experts lors du processus d'évaluation des anomalies d'aspect, en définissant des critères objectifs liés à l'apparence des surfaces. Cependant, la difficulté de ce type d'approche est la détection des anomalies, i.e. comment localiser les anomalies d'aspect sur les surfaces, et éventuellement segmenter une surface en *zones critiques* afin d'évaluer leur criticité dans un second temps d'analyse. Il s'agit donc ici d'apporter une réponse à la problématique spécifique de la détection des anomalies.

L'approche proposée dans ce chapitre est basée sur l'observation de comment se déroule la détection des anomalies lorsqu'elle est réalisée de façon *manuelle*, où les opérateurs manipulent les produits, en faisant varier les angles d'observation et d'incidence de la lumière sur les surfaces, afin de mettre en évidence les anomalies potentielles.

Le dispositif et la méthode associée permettent une meilleure formalisation du processus de contrôle de la qualité d'aspect, et de moins manipuler les produits. Il est basé sur la technique *Polynomial Texture Mappings*. Cette technique permet à partir d'un lot d'images de la surface sous différents éclairages de modéliser la façon dont la surface réémet la lumière, on parle de fonction *réflectance* de la surface. Cette modélisation permet de simuler (rendu photo-réaliste) le rendu visuel d'une surface sous un éclairage choisi, de façon instantanée. Ainsi, on peut orienter *virtuellement* dans toutes les directions la source lumineuse qui éclaire la surface, de façon analogue à ce qui est préconisé dans le contrôle d'aspect manuel. La technique présente l'avantage de ne pas manipuler les produits et de mieux maîtriser les conditions et angles d'éclairage de la surface. D'autre part, il est possible à partir de l'information PTM d'appliquer des transformations aux fonctions réflectances des surfaces, afin de simuler des comportements optiques particuliers, on peut par exemple simplement simuler une surface dont la lumière est uniquement réémise sous forme spéculaire. Ces transformations facilitent la détection en mettant en évidence la micro-géométrie de la surface.

La méthode appliquée sur des surfaces réelles montre que le SISD permet de détecter les anomalies d'aspect de façon plus aisée, rapide et robuste que lors d'une inspection visuelle classique. De plus, ces travaux ouvrent de larges perspectives en terme d'amélioration de la qualité des PTMs, ou encore pour reconstruire les champs de courbures et/ou la topographie d'une surface. Ces perspectives sont prometteuses car elles permettent de mieux lier les différentes approches présentées dans ces travaux, et de proposer une approche globale de l'analyse de la qualité géométrique et de l'aspect des surfaces basée sur un dispositif unique, de la détection à la décision finale d'acceptabilité.



## Synthèse : Proposition de méthodologies globales, de la détection à la décision

### *Objectif du chapitre*

*Ce chapitre synthétise l'ensemble des travaux présentés précédemment, et montre comment ils peuvent être déployés dans le cadre d'une approche globale de l'analyse de la qualité des surfaces, de la détection à la décision finale d'acceptabilité du produit. L'objectif est de montrer comment lier les différentes approches pour apporter un support performant aux experts lors du contrôle industriel de la qualité d'aspect des surfaces. Après avoir fait une synthèse des approches géométrique et lumière, nous montrons comment ces travaux peuvent s'articuler à travers trois cycles d'utilisation industrielle, dans le cadre d'une proposition de méthodologie globale.*

## 1 Introduction

Les chapitre 2 et 3 ont permis de présenter une approche de l'analyse de la qualité d'aspect basée sur les caractéristiques intrinsèques des surfaces analysées. Nous avons montré que certains indicateurs liés à la géométrie permettent de faire la liaison avec le comportement visuel des surfaces. Ainsi, la définition de critères objectifs liés à la géométrie des surfaces facilite l'évaluation de l'impact visuel des anomalies par les experts sensoriels.

Le chapitre 4 est basé sur l'analyse et la modélisation de l'interaction des surfaces avec leur environnement lumineux. Cette approche permet d'apporter une réponse à une problématique importante des industriels lors du contrôle de la qualité des surfaces, qui est la détection des anomalies. En effet, nous montrons que la modélisation des surfaces réflectance en chaque point d'une surface par une surface polynomiale (technique *Polynomial Texture Mappings*) permet de reconstruire un rendu photo-réaliste virtuel d'une surface quelle que soit la direction d'éclairage choisie. L'utilisation d'un système d'acquisition et de visualisation de cette information (appelé

*Surface Inspection Support Device*) permet de détecter aisément les anomalies d'aspect d'une surface.

Les objectifs de ce chapitre sont les suivants :

- Proposer une méthodologie globale pour l'analyse de la qualité d'aspect des surfaces, en liant les deux approches présentées précédemment, à travers 3 cycles industriels de déploiement potentiels de la méthode (section 2)
- Synthétiser les différents résultats présentés dans ces travaux et leurs applications dans le cadre de l'analyse de la qualité d'aspect des surfaces (section 3)

## 2 Proposition d'une méthodologie globale et déploiements potentiels de ces travaux

Il s'agit ici de montrer comment l'approche géométrique et l'approche lumière peuvent être intégrées dans le cadre d'une approche industrielle globale de l'analyse de la qualité d'aspect des surfaces. Si l'approche *géométrique* et l'approche *lumière* ont été présentées de façon indépendantes, des passerelles permettent de lier et d'associer ces deux axes de recherche.

Nous avons retenu trois déploiements potentiels de ces travaux, qui correspondent à différentes niveaux d'analyse et d'intégration des outils présentés précédemment :

### (i) Déploiement *simple* de l'approche lumière.

Ce premier niveau d'analyse consiste à déployer uniquement les travaux présentés dans l'approche lumière. De façon très analogue à ce qui est réalisé en contrôle sensoriel humain, l'expert s'appuie sur le SISD pour mieux détecter, évaluer et juger de l'acceptabilité des produits. Cette approche est présentée dans la section 2.1.

### (ii) Association séquentielle des approches dans une méthodologie globale.

Ce second niveau d'analyse permet d'associer l'approche *géométrique* et l'approche *lumière* pour couvrir l'ensemble des étapes du contrôle industriel de la qualité d'aspect. L'association est séquentielle : l'approche lumière est d'abord mise en œuvre à travers le SISD, pour apporter aux experts un support lors de l'étape de détection des anomalies. Puis l'approche géométrique est à son tour appliquée sur les zones d'analyse retenues lors de l'étape de détection. Cette proposition de méthodologie globale est présentée dans la section 2.2.

### (iii) Intégration des approches dans une méthodologie globale.

Ce troisième niveau, plus de l'ordre des perspectives, intègre l'approche *géométrique* et l'approche *lumière* dans un dispositif unique, qui permet à la fois l'analyse de l'aspect à travers les PTMs (détection), et à partir de la reconstruction de la topographie (évaluation). Cette perspective est présentée dans la section 2.2.3.

## 2.1 Analyse de niveau 1 : déploiement *simple* de l'approche lumière

Lors du contrôle visuel *manuel* de l'aspect des produits, les experts séparent le processus en trois étapes : la détection, l'évaluation et la décision (voir chapitre 1). Les principaux avantages du contrôle humain sont la très grande flexibilité vis à vis du type de surfaces ou d'anomalies, et

le temps d'inspection et de décision très rapide, qui permet de procéder à un contrôle continu des produits durant leur fabrication. Cependant, la variabilité des résultats obtenus est coûteuse pour l'entreprise, tant en terme de non-détection qu'en sur-qualité. L'objectif de cette approche est donc de proposer un support aux experts lors du contrôle de la qualité d'aspect.

### 2.1.1 Mise en œuvre

Ce support prend la forme d'un dispositif d'aide à l'inspection des surfaces, basé sur la technique Polynomial Texture Mapping, et appelé SISD (Surface Inspection Support Device).

Le SISD permet de simuler un éclairage virtuel sur la surface, à la manière de ce qui est réalisé par les opérateurs en contrôle manuel, afin de mettre en évidence les anomalies d'aspect. Il permet ainsi de faciliter la détection, mais aussi éventuellement l'évaluation et la décision, car il met en évidence la micro-géométrie des surfaces. Ce dispositif, et des résultats d'applications ont été présentés dans le chapitre 4.

En remarque, l'expert joue un rôle central dans cette méthode. En effet, les entreprises visées par ces travaux fabriquent des produits à haute valeur ajoutée, souvent en petite série. Il peut même s'agir de pièces uniques (production **High Variety Low Volume** [Nasri 11]). Il est alors très difficile de proposer un système flexible automatisé d'analyse de l'aspect de surfaces. De plus, les experts industriels possèdent le patrimoine de l'entreprise en terme d'analyse et de maîtrise de l'aspect des produits. Ce patrimoine génère une part importante de la valeur ajoutée des produits et il est donc essentiel de l'intégrer au processus.

Cette approche est simple à mettre en œuvre car le dispositif SISD est très proche des habitudes et des méthodes déjà utilisées lors du contrôle visuel humain. Elle est présentée sous forme de cycle dans la figure 5.1.

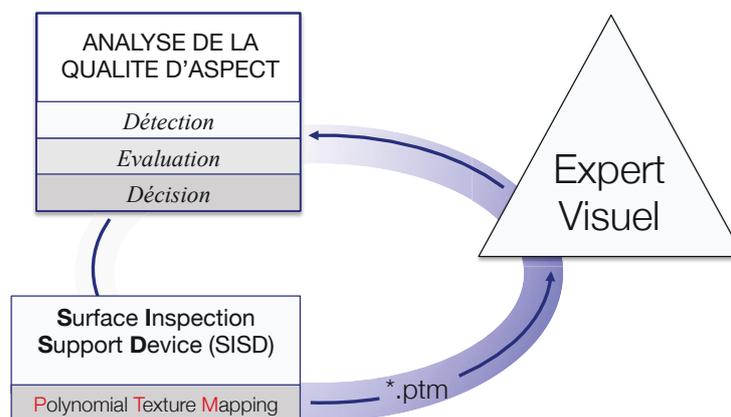


Figure 5.1 – Cycle 1 : déploiement *simple* de l'approche lumière

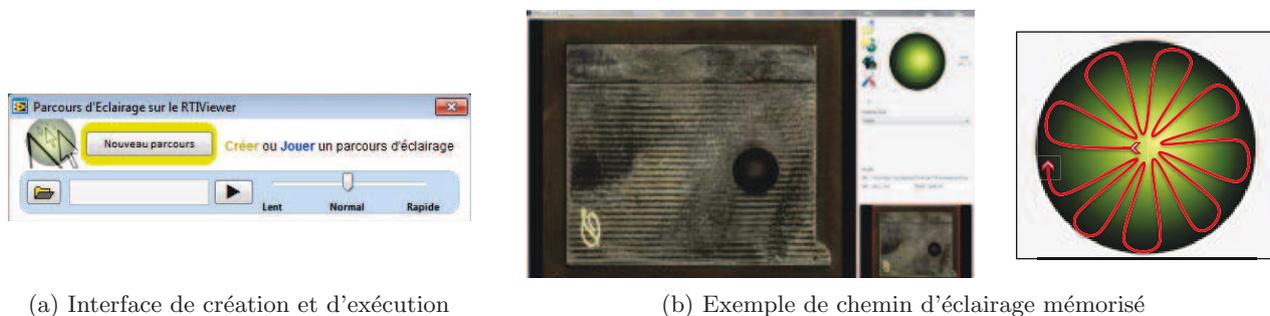
### 2.1.2 Perspectives

On a montré dans le chapitre 1 que la formalisation des méthodes de contrôle sensoriel de l'aspect des surfaces à permis de diminuer sensiblement la variabilité des résultats, et par conséquent les coûts pour l'entreprise. De la même façon, les perspectives de cette approche sont de formaliser l'usage du SISD par les experts. Deux pistes qui vont dans ce sens sont envisagées :

- (1) *Automatisation du chemin d'observation* : lors du contrôle d'aspect sensoriel, des *gammes de contrôle* préconisent un chemin d'observation lors de l'inspection des surfaces. Ce chemin est défini à partir de l'expérience des opérateurs, et parfois d'analyses statistiques sur la localisation des anomalies d'aspect sur les produits. De façon analogue, une perspective d'évolution de SISD serait de proposer un développement spécifique assurant le respect d'un chemin d'observation défini préalablement en fonction du type de produits ou d'anomalies à détecter prioritairement. Ce chemin d'observation pourrait être réalisé au moyen d'un fenêtre d'observation glissante sur les surfaces, intégrée dans le SISD.
- (2) *Automatisation du chemin d'éclairage* : de la même façon, l'automatisation du chemin d'éclairage permettrait de formaliser l'usage du dispositif, de faciliter la tâche des opérateurs du contrôle d'aspect, et ainsi de diminuer la variabilité des résultats obtenus. Un outil en ce sens a été réalisé sur le SISD :

Lors du contrôle sensoriel de la qualité d'aspect, la source lumineuse est souvent fixe et les opérateurs orientent successivement la surface selon différents angles d'incidence, de manière à mettre en évidence les anomalies. Ce *chemin d'éclairage* est le fruit de l'expérience des opérateurs, et est souvent globalement répété sur chaque produit.

Nous avons développé un outil qui permet à un expert d'enregistrer de façon simple un parcours d'éclairage sur le visualisateur de PTM. On peut alors rejouer le même parcours ou l'appliquer sur l'ensemble des produits d'un lot. On limite ainsi la variabilité du processus d'exploration entre les produits. La figure 5.2 présente l'interface de cet outil, ainsi qu'un exemple de chemin d'éclairage pouvant être mémorisé (figure 5.2b).



(a) Interface de création et d'exécution

(b) Exemple de chemin d'éclairage mémorisé

Figure 5.2 – SISD : Automatisation du chemin d'éclairage

Les deux propositions suivantes consistent à lier les travaux présentés précédemment sur l'approche *géométrique* et l'approche *lumière* dans une méthodologie globale de l'analyse de l'aspect des surfaces.

## 2.2 Analyse de niveau 2 : Association des approches dans une méthodologie globale *séquentielle*

Cette proposition consiste à associer les approches présentées précédemment, sous forme d'un cycle *séquentiel*. Il s'agit d'apporter un support aux experts lors des étapes de détection, d'évaluation et de décision du contrôle de la qualité d'aspect.

Le chapitre 4 présente une démarche d'aide aux experts pour l'inspection des surfaces, à travers la mise en œuvre de la technique PTM.

Le chapitre 2 présente une démarche d'analyse de la qualité d'aspect basée sur les caractéristiques intrinsèques des surfaces analysées. Certains indicateurs liés à la géométrie permettent de lier surface et comportement visuel, et facilitent l'évaluation de la criticité des anomalies relativement à l'impact visuel qu'elles produisent.

### 2.2.1 Mise en œuvre

Ces deux approches sont complémentaires, il s'agit donc de les associer pour faciliter à la fois la détection et l'évaluation des anomalies. Le cycle proposé est le suivant :

- (1) **Aide à la Détection** : de la même façon que dans le cycle présenté précédemment, la détection s'appuie sur le SISD et l'expertise des opérateurs de contrôle. A partir de l'information ptm, il est alors possible de segmenter les surfaces, de façon automatique (perspective : traitement d'image) ou semi automatique, ou l'expert sélectionne les zones critiques de la surface à l'aide du rendu obtenu par les PTMs.
- (2) **Aide à l'évaluation** : Les zones sélectionnées sont alors mesurées (chapitre 1) , conditionnées (chapitre 3) et interprétées (chapitre 2). Des critères objectifs liés à la géométrie sont alors extraits et fournis aux experts pour appuyer leur évaluation de la criticité des anomalies.
- (3) **Décision** : La décision d'acceptabilité des produits est prise par les experts sensoriels, en fonction par exemple de critère de gamme de produits, de localisation des anomalies, et bien sur de l'évaluation de leur criticité réalisée précédemment.

Cette approche est plus complète, et sa mise en œuvre nécessite notamment de pouvoir reprendre un référentiel pièce entre le SISD, et le système de mesure. Une solution est proposée dans la suite de cette section. Le cycle d'utilisation proposé est présenté dans la figure 5.3.

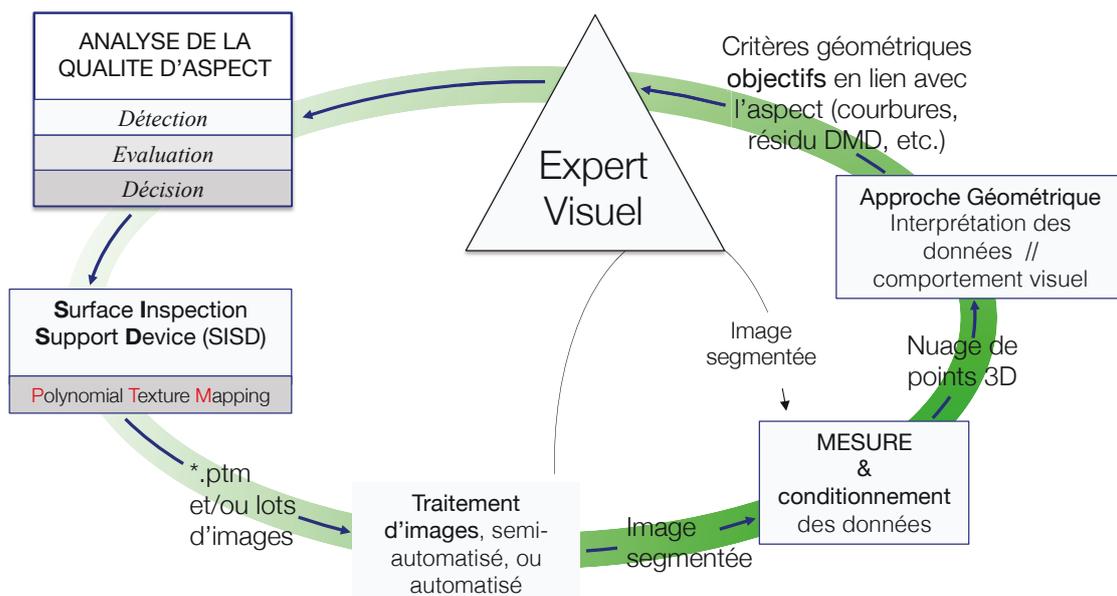


Figure 5.3 – Cycle 2 : proposition d'une méthodologie globale *séquentielle* pour l'analyse de la qualité d'aspect

### 2.2.2 Lien entre les deux approches : système de reprise de référentiel

Le SISD permet de façon automatique ou avec l'intervention de l'expert de détecter les anomalies, et ainsi de segmenter une surface en zones d'analyses à évaluer. Pour déployer l'approche géométrique présentée dans le chapitre 2, il est nécessaire de mesurer les zones d'analyse définies par avec le support du SISD. Il est donc nécessaire de disposer d'un système de reprise automatique de références en positionnement, pour que l'information (de position des zones à analyser) soit transmise du SISD au moyen de mesure.

Notre approche pour le choix et la réalisation d'un système de reprise de position est basé sur les travaux de Duret, Sergent, et Bui [Duret 10, Bui 11], réalisées dans le cadre de leurs investigations sur l'identification et la simulation des incertitudes de fabrication. Le montage choisi est le montage de Boys [Varadarajan 12], présenté dans la figure 5.4.

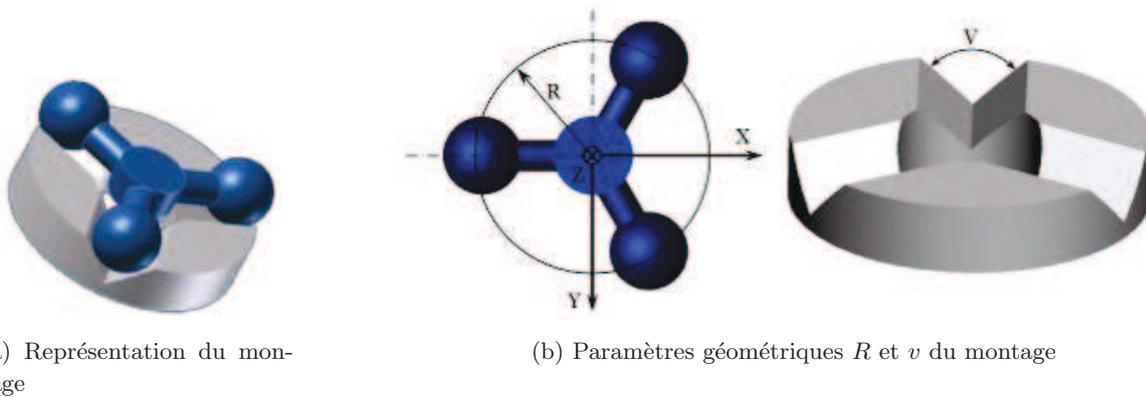


Figure 5.4 – Montage de positionnement de Boys, à partir de [Bui 11]

La figure 5.5 présente une illustration du système de positionnement intégré au SISD. La partie constitué des 3 vés disposé à  $120^\circ$  a été intégré sur la machine de mesure, en fixant directement les vés aux système de micro-positionnement XY. La répétabilité en position du système a été testée par un plan d'expérience. Elle est inférieure à  $1 \mu m$ .



Figure 5.5 – Système de positionnement intégré au SISD

### 2.2.3 Perspectives

Les perspectives pour cette approche sont liées au contexte industriel visé pour son déploiement. Un développement industriel consisterait par exemple à automatiser le passage des produits du SISD au moyen de mesure. Le système de reprise de positionnement présenté précédemment va dans ce sens.

D'un point de vue technologique, la perspective principale de cette proposition serait d'intégrer les approches *lumière* et *géométrique* en une seule approche. De cette façon, la pièce n'a plus à être déplacée et l'utilisation du dispositif est alors simplifiée. Cette approche intégrée est l'objet de la proposition de déploiement suivante.

### 2.3 Proposition d'une méthodologie globale *intégrée*

Cette proposition consiste à intégrer les approches présentées précédemment, afin d'apporter à partir d'un dispositif unique un support aux experts lors des trois étapes du contrôle de la qualité d'aspect.

Le chapitre 4 a permis de proposer aux experts une aide à l'inspection des surfaces, et spécialement à la détection des anomalies, à travers la mise en œuvre de la technique PTM. De plus, on a montré que cette le SISD pourrait permettre de reconstruire rapidement à la fois la topographie et les champs de courbures des surfaces, à partir des normales de la surface. Le champs de normale est alors obtenu soit par des techniques photométriques, soit par calcul du maximum des surfaces réflectance pour chaque pixel. Dans ce dernier cas de figure, il est préférable de mieux approximer les surfaces réflectance, nous proposons de mettre en œuvre une approche modale de la caractérisation de ces surfaces, et de générer ainsi des *Modal Texture Mappings*.

Cette perspective de méthodologie globale *intégrée* est présentée dans la figure 5.6.

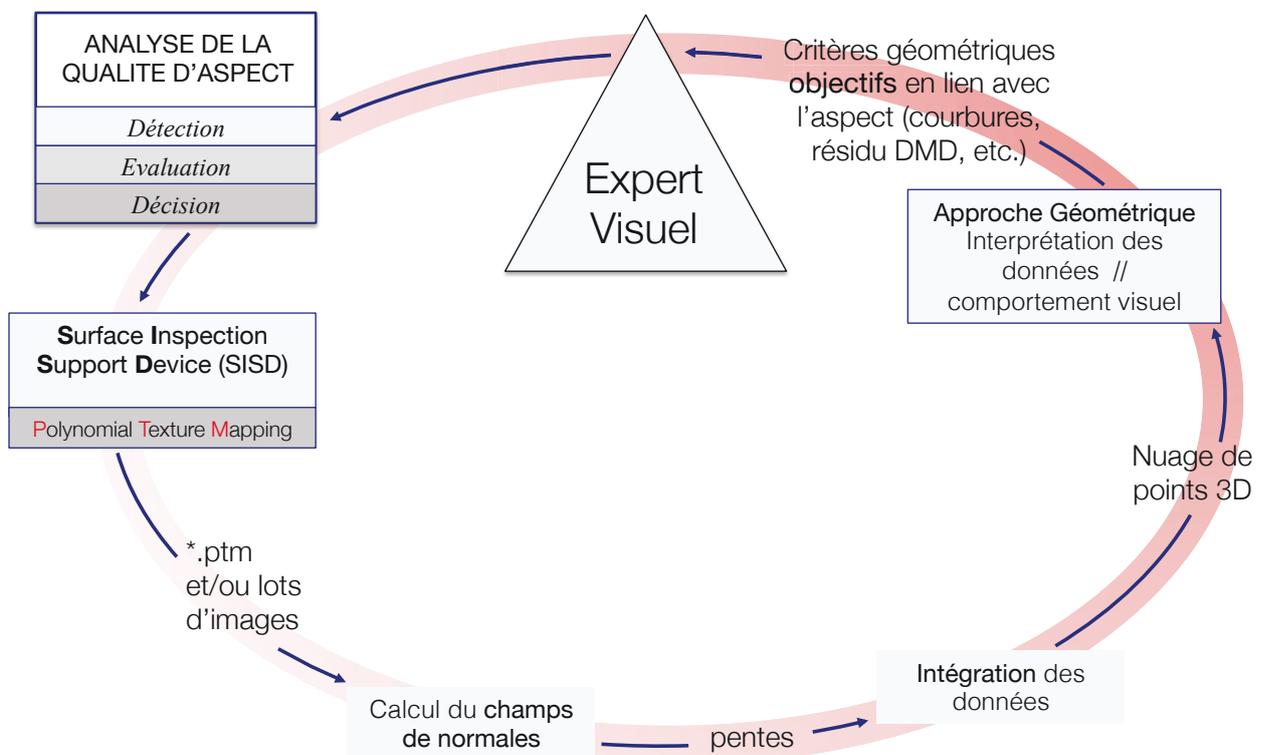


Figure 5.6 – Cycle 3 : perspective de méthodologie globale *intégrée* pour l'analyse de la qualité d'aspect

### 3 Synthèse et rôle de l'expert sensoriel

La figure 5.7 présente les 3 propositions de déploiement de ces travaux développés précédemment. On peut observer que quelque soit la proposition retenue, l'expert industriel joue un rôle central dans nos travaux. Il est le garant de la connaissance et du patrimoine de l'entreprise en terme de maîtrise de la qualité perçue des produits. C'est la qualité perçue qui permet au client de juger de l'esthétique d'un produit, mais aussi d'estimer ses fonctions techniques et technologiques. Ce savoir faire représente un levier de valeur ajoutée important pour les entreprises, et il est donc de notre point de vue nécessaire de faire en sorte d'intégrer au maximum les connaissances, l'expérience et les techniques des experts sensoriels.

Des dispositifs supports peuvent permettre de formaliser certaines étapes du contrôle de la qualité d'aspect des surfaces, et notamment les conditions d'inspection des produits. De plus, les manipulations des produits et par conséquent les risques d'altération sont limités par de tels dispositifs. Ces approches permettent de diminuer sensiblement la variabilité des résultats, et le coût de non détection et de sur-qualité correspondant.

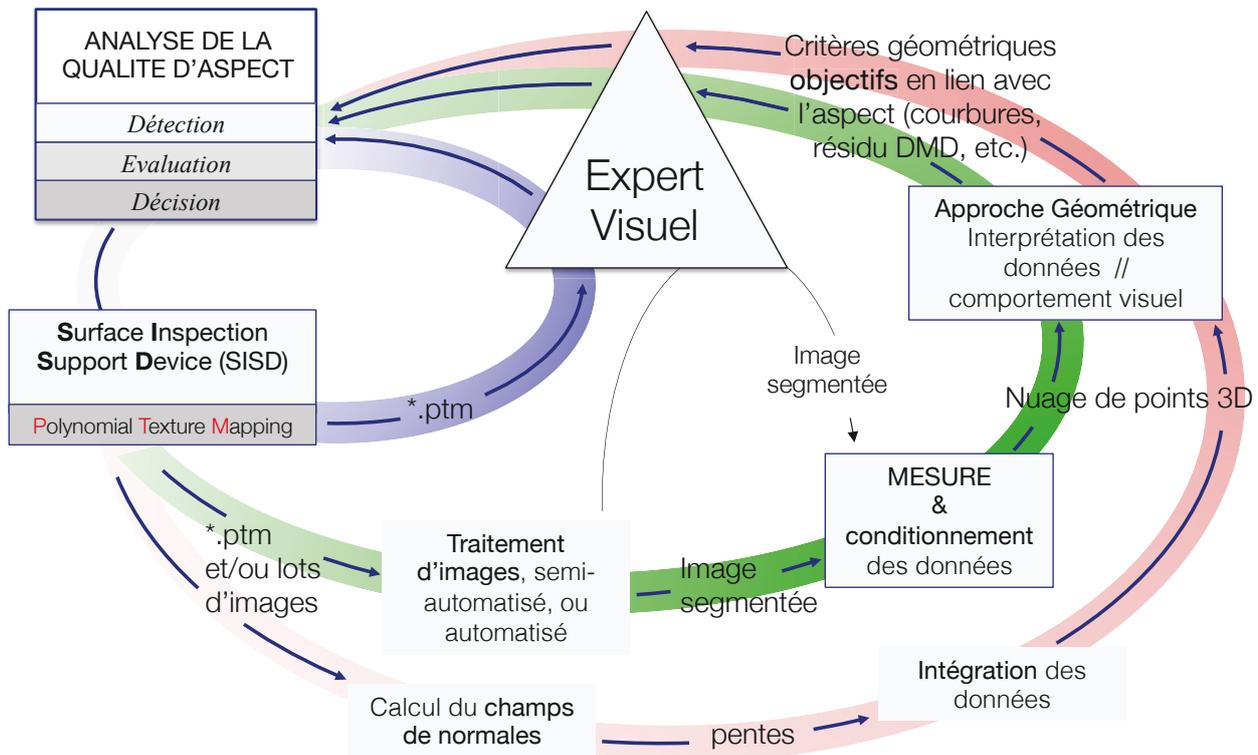


Figure 5.7 – Proposition d'une méthodologie globale : 3 cycles d'utilisations

## Conclusion et perspectives

Parmi tous les leviers à disposition des entreprises pour ajouter de la valeur aux produits, la prise en compte de la perception par les clients est aujourd'hui centrale dès la conception des produits. Le consommateur est aujourd'hui mieux informé et plus attentif à ce qu'il perçoit de la qualité d'un produit, et seule la qualité perçue permet au client de juger de l'esthétique d'un produit, mais aussi d'estimer ses fonctions techniques et technologiques. Dans le cadre industriel, la perception des produits s'inscrit dans une démarche qualité déployée dès la conception des produits. Durant la fabrication, la qualité perçue est souvent évaluée par des techniques d'analyse sensorielle, basée sur l'évaluation par des experts visuels. Cette méthode est très flexible, mais la variabilité des résultats obtenus, inhérente au contrôle humain, est souvent élevée. Elle se traduit par des coûts importants de non-détection et de sur-qualité pour l'entreprise. La problématique de la qualité d'aspect des surfaces est donc aujourd'hui un enjeu essentiel pour l'industrie.

Dans le cadre du projet *Interreg4-Aspect de surface*, deux axes de recherche ont été développés pour répondre à cette problématique, en lien avec des industriels partenaires :

- Le premier axe de recherche consiste à formaliser le contrôle sensoriel d'aspect, en mettant en place des outils méthodologiques de pédagogie et de support aux experts durant les étapes de détection, d'évaluation, et de décision du contrôle de la qualité d'aspect des surfaces. Un état de l'art de cette approche est donné dans le chapitre 1.
- Le second axe est basé sur la mesure et l'analyse des propriétés des surfaces. L'objectif est de définir (puis de fournir en support aux experts) des critères objectifs liés au comportement visuel des surfaces. C'est l'axe central de ces travaux.

La mise en œuvre de cette approche nécessite d'appréhender le processus de la perception, qui dépend à la fois de caractéristiques intrinsèques des surfaces et de leur interaction avec l'environnement lumineux. Après avoir présenté un état de l'art sur la caractérisation de l'aspect d'une surface, deux approches sont proposées :

- (1) L' **approche géométrique**. Cette approche consiste à analyser le lien entre certaines propriétés intrinsèques et le comportement visuel des surfaces. Les travaux présentés sont basés sur la caractérisation des variations géométriques de surfaces mesurées par une méthode basée sur la Décomposition Modale Discrète (DMD), généralisée dans le cadre de ces travaux à la caractérisation de l'ensemble des variations surfaciques, de la forme à l'état de surface.

Nous montrons que cette méthode permet d'isoler les anomalies d'aspect des autres variations géométriques des surfaces, et de les caractériser, qu'elles soient *locales* ou *globales*, et pour tous types de géométries. Cette caractérisation permet une analyse *quantitative* des anomalies parfois suffisante pour l'évaluation. Enfin, la méthode permet de mettre en œuvre le calcul des courbures sur une surface de façon simplifiée, robuste, et multi-échelle. On montre que l'attribut géométrique de courbure permet de mieux appréhender les variations de forme locales d'une surface en lien avec son apparence.

De plus, ces travaux ont mis en évidence l'importance de la qualité des données sources mesurées pour l'analyse et l'interprétation en lien avec la fonction aspect. Une contribution à l'amélioration de la qualité des données est proposée, à travers :

- une technique de calibration d'un moyen de mesure, basée sur la méthode modale. Cette nouvelle méthode permet d'améliorer globalement ses performances métrologiques du moyen de mesure
- une nouvelle méthode d'identification et de filtrage des points aberrants, spécifique au cas des mesures de surface, où les méthodes générales de traitement ne sont pas performantes

(2) **L'approche lumière.** Cette approche est basée sur l'analyse de l'interaction entre des surfaces avec leur environnement lumineux. Cette approche permet d'apporter une réponse à la problématique spécifique de détection des anomalies.

En effet, l'approche géométrique, spécialement pertinente pour l'évaluation des anomalies d'aspect, ne permet pas de réaliser la détection dans un temps compatible avec le contexte industriel. De façon analogue à ce qui est réalisé en contrôle d'aspect sensoriel, un dispositif a été réalisé afin de simuler le rendu photo-réaliste d'une surface sous un angle d'éclairage choisi par l'utilisateur. Ce dispositif appelé SISD est basé sur la technique *Polynomial Texture Mappings* et permet de mieux maîtriser les conditions et les angles d'éclairages lors de l'inspection des surfaces. L'application de la méthode montre que le SISD permet une détection des anomalies plus aisée, rapide et robuste qu'avec une inspection visuelle classique. De plus, ces travaux ouvrent de larges perspectives en terme d'amélioration de la qualité des rendus obtenus, ou encore pour reconstruire les champs de courbures et/ou de topographie d'une surface. Ces perspectives sont prometteuses car elles permettent de mieux lier les différentes approches présentées dans ces travaux 5, et de proposer une approche globale de l'analyse de la qualité géométrique et de l'aspect des surfaces basée sur un dispositif unique, de la détection à la décision finale d'acceptabilité.

Enfin, nous montrons comment les travaux réalisés sur l'approche géométrique et l'approche lumière peuvent se compléter dans le cadre d'une méthodologie globale de l'analyse de l'aspect des surfaces, de la détection à la décision. Trois propositions d'intégrations et de déploiement industriel sont ainsi présentées.

## Nos apports

Les apports de notre étude sont :

↔ *Qualité géométrique des surfaces* ↔

- ☞ La formalisation d'une méthode d'analyse de l'aspect des surfaces basée sur leur caractéristiques géométriques intrinsèques
- ☞ La généralisation de la Décomposition Modale Discrète à la caractérisation des variations de forme, d'ondulation et de rugosité
- ☞ L'expression d'une nouvelle méthode de calcul de courbures multi-échelle, rapide et robuste à partir du paramétrage modal
- ☞ L'expression d'une nouvelle méthode de calibration d'un moyen de mesure, qui améliore ses performances métrologiques
- ☞ L'expression d'une nouvelle méthode d'identification et de filtrage des points aberrants, qui prend en compte le caractère multi-échelle des surfaces.

↔ *Interaction surface/environnement lumineux* ↔

- ☞ La formalisation d'une méthode d'analyse de l'aspect des surfaces basées sur l'interaction entre les surfaces et leur comportement visuel
- ☞ Un dispositif d'aide à la détection des anomalies destinés à être un support aux experts industriels lors du contrôle de la qualité d'aspect des surfaces.
- ☞ L'expression d'une approche globale de l'analyse de l'aspect des surfaces, à travers trois cycles de déploiement, pour la détection (approche lumière) et l'évaluation des anomalies d'aspect sur une surface.

## Les perspectives

Plusieurs perspectives de poursuites de nos travaux sont envisagées :

↔ *Qualité géométrique des surfaces* ↔

- ☞ La formalisation de la méthode d'analyse de l'aspect basée sur une approche géométrique doit être poursuivie. En particulier, le lien entre certains paramètres géométriques et la fonction aspect des surfaces doit être précisé par une analyse de la corrélation avec les résultats obtenus par les experts visuels en analyse sensorielle.
- ☞ La généralisation de la Décomposition Modale Discrète à la caractérisation des variations de forme, d'ondulation et de rugosité a fait l'objet d'un développement informatique sous l'environnement Matlab. Le déploiement et la diffusion de cet outil rapide, simple d'utilisation, et efficace de caractérisation des variations géométriques d'une surface nécessite le

développement d'un outil informatique indépendant.

- ☞ La poursuite des développements autour de la méthode proposée de calcul de courbures multi-échelle à partir du paramétrage modal. En particulier, des travaux sur le choix des indicateurs de courbures en fonction de la typologie des anomalies concernées, et l'étude de la corrélation des résultats obtenus par l'indicateur de courbure avec ceux obtenus par analyse sensorielle sont des pistes de recherche qui nous semblent prometteuses.
- ☞ L'automatisation de la méthode de calibration, et sa généralisation à la caractérisation de variations géométriques répétées en terme d'amplitudes et de longueur d'ondes (non répétées en altitudes).
- ☞ De la même façon que pour la DMD, la méthode d'identification et de filtrage des points aberrants a fait l'objet d'un développement informatique sous l'environnement Matlab. La diffusion de cet outil nécessite un développement informatique indépendant et optimisé.

↔ *Interaction surface/environnement lumineux* ↔

- ☞ La poursuite de la formalisation de la méthode d'analyse de l'aspect basée sur l'approche lumière. En particulier, l'amélioration de la qualité des PTMs (approximation des surfaces réflectance de chaque pixel par l'approche modale), et le développement de nouveaux traitements et analyses des données acquises par le SISD, liées à reconstruction 3D et au calcul des courbures à partir de l'information PTM sont des axes de recherches qui viendront compléter la méthode.
- ☞ L'optimisation du dispositif d'aide à la détection des anomalies d'aspect (SISD) en terme d'automatisation (acquisition, transferts des données, génération PTM et traitements) mais aussi en terme d'élargissement du champs de vision (système à plusieurs caméras).
- ☞ L'expérimentation industrielle de l'approche globale de l'analyse de l'aspect des surfaces, et une étude de la corrélation des résultats obtenus par analyse sensorielle et avec le SISD.

## Bibliographie

- [Aluze 98] D Aluze. *Système de détection et de caractérisation de défauts d'aspects sur des surfaces parfaitement spéculaires et non planes : Application au contrôle qualité de produits destinés à l'emballage cosmétique*. Thèse de Doctorat, THESE, 1998.
- [Andersson 09] A Andersson. *Evaluation and visualisation of surface defects on auto-body panels*. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 2, pages 821–837, 2009.
- [Anselmetti 11] B Anselmetti. *Manuel de tolérancement. Volume 5. Métrologie avec les normes ISO*. Librairie Lavoisier, 2011.
- [Artal-Isbrand 11] P Artal-Isbrand, P Klausmeyer et W Murray. *An Evaluation of Decorative Techniques on a Red-Figure Attic Vase from the Worcester Art Museum using Reflectance Transformation Imaging (RTI) and Confocal Microscopy with a Special Focus on the "Relief Line"*. *MRS Proceedings*, vol. 1319, no. 1, 2011.
- [ASME-B46.1 09] ASME-B46.1. *Surface Texture (Surface Roughness, Waviness and Lay) - American National Standard*, 2009.
- [Balin 07] S Balin et V Giard. *La qualité des services et leurs processus de production*. Actes du 7e Congrès international de génie industriel, Trois-Rivières, Québec (Canada), pages 1–12, 2007.
- [Barnett 78] V Barnett. *The study of outliers : purpose and model*. *Applied Statistics*, vol. 27, pages 242–250, 1978.
- [Barnett 94] V Barnett et T Lewis. *Outliers in Statistical Data*. (Wiley Series in Probability & Statistics). Wiley, 3 édition, April 1994.
- [Bassereau 09] J F Bassereau, R Charvet-Pello et L Bonnamy. *Design sensoriel*. Techniques de l'Ingénieur, pages 1–18, 2009.
- [Baudet 11] N Baudet, M Pillet et J L Maire. *Visual inspection of products : a comparison of the methods used to evaluate surface anomalies*. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, vol. 2, no. 1, pages 31–38, 2011.
- [Baudet 12] N Baudet, M Pillet et J L Maire. *Proposition d'une approche méthodologique pour réduire la variabilité dans le contrôle visuel*

- à but esthétique. Proceedings of the International Conference On Surface Metrology ICSM'2012, Annecy, France, pages 1–11, 2012.
- [Beckmann 67] P Beckmann. *II Scattering of Light by Rough Surfaces*. Progress in Optics, vol. 6, pages 53–69, 1967.
- [Beckmann 87] P Beckmann et A Spizzichino. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. Artech House Inc, 1987.
- [Berglund 10] J Berglund, C A Brown, B G Rosèn et N Bay. *Milled die steel surface roughness correlation with steel sheet friction*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 59/1, pages 577–580, 2010.
- [Bigerelle 12a] M Bigerelle, T Mathia et S Bouvier. *The multi-scale roughness analyses and modeling of abrasion with the grit size effect on ground surfaces*. Wear, vol. 286-287, 2012.
- [Bigerelle 12b] M Bigerelle, D Najjar, T Mathia, A Lost, T Coorevits et K Anselme. *An expert system to characterise the surfaces morphological properties according to their tribological functionalities : The relevance of a pair of roughness parameters*. Tribology International, 2012.
- [Blackwell 59] H R Blackwell. *Specification of interior illumination levels*. Illuminating Engineering, vol. 54, no. 6, pages 317–353, 1959.
- [Bonzom 05] C Bonzom et E Fargier. *Erreurs de forme, de position, d'orientation, de battement. Partie 2*. Techniques de l'Ingénieur, pages 1–18, December 2005.
- [Bouchareine 99] P Bouchareine. *Méetrologie des surfaces*. Techniques de l'Ingénieur, pages 1–15, 1999.
- [Brown 94] C A Brown, W A Johnsen et P D Charles. *Method of quantifying the topographic structure of a surface*. United States Patent, 1994.
- [Brown 96] C A Brown, W A Johnsen et R M Butland. *Scale-Sensitive Fractal Analysis of Turned Surfaces*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1996.
- [Brown 01] C A Brown et S Siegmann. *Fundamental scales of adhesion and area-scale fractal analysis*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 41, no. 13-14, pages 1927–1933, 2001.
- [Brown 10] D R S Brown et C A Brown. *Investigation of surface topography differences in native and exotic invertebrates in the St. Lawrence River*. Scanning, vol. 32, no. 4, pages 250–255, 2010.
- [Bui 11] M H Bui. *Identification et simulation des incertitudes de fabrication*. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [Busin 12] L Busin, N Vandenbroucke et L Macaire. *Contrôle d'aspect par vision linéaire couleur*. Techniques de l'Ingénieur, pages 1–18, February 2012.
- [Cantor 09] G J Cantor et C A Brown. *Scale-based correlations of relative areas with fracture of chocolate*. Wear, vol. 266/5-6, pages 609–612, 2009.

- [Chauvenet 68] W Chauvenet. A treatise on the method of least squares or, The application of the theory of probabilities in the combination of observations. Philadelphia : J.B Lippincott & Co., 1868.
- [Chen 95] X Chen et J Raja. *Multi-scale analysis of engineering surfaces*. International Journal of Machine Tools Manufacturing, 1995.
- [Chen 99] Q Chen et S Yang. *Surface roughness evaluation by using wavelets analysis*. Precision Engineering, 1999.
- [Christensen 94] P H Christensen et L G Shapiro. *Three-dimensional shape from color photometric stereo*. International Journal of Computer Vision, vol. 13, no. 2, pages 213–227, 1994.
- [Colquhoun 64] W P Colquhoun. *Recent research in the psychology of inspection*. Textile Institute and Industry, vol. 2, pages 252–255, 1964.
- [Corbé 04] C Corbé. *La vision*. Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes, vol. 3, no. hors série 1, 2004.
- [Costell 02] E Costell. *A comparison of sensory methods in quality control*. Food Quality and Preference, vol. 13, no. 6, pages 341–353, 2002.
- [Coulon 12] J B Coulon, A Delacroix-Buchet, B Martin et A Pirisi. *Facteurs de production et qualité sensorielle des fromages*. INRA, Productions Animales, vol. 18, pages 49–62, 2012.
- [Courtier 03] J C Courtier et P Giacomo. *Vocabulaire de la mesure*. Techniques de l'ingénieur. Mesures et contrôle, vol. RB1, 2003.
- [Crochemore 04a] S Crochemore, D Nesa et S Couderc. *Analyse sensorielle des matériaux d'habitable automobile : toucher/vision*. Techniques de l'Ingénieur, 2004.
- [Crochemore 04b] S Crochemore, D Nesa et S Couderc. *Méthodes d'analyse sensorielle des matériaux plastiques*. Techniques de l'Ingénieur, 2004.
- [Cultural Heritage Imaging 10] Cultural Heritage Imaging. *Guide to RTIViewer*. Rapport technique, 2010.
- [Dana 99a] K J Dana et S K Nayar. *3D Textured Surface Modeling*. IEEE Workshop on the Integration of Appearance and Geometric Methods in Object Recognition, pages 46–56, 1999.
- [Dana 99b] K J Dana, B van Ginneken, S K Nayar et J J Koenderink. *Reflectance and Texture of Real-World Surfaces*. ACM Transactions on Graphics, vol. 18, pages 1–34, 1999.
- [Debrosse 10] T Debrosse, M Pillet, J L Maire et N Baudet. *Sensory perception of surfaces quality*. Proceedings of KEER 2010 - International conference on Kansei engineering and emotion research , Paris, France, pages 1–11, 2010.
- [Dellepiane 06] M Dellepiane, M Corsini, M Callieri et R Scopigno. *High quality ptm acquisition : Reflection transformation imaging for large objects*. In Proceedings of the 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, 2006.

- [Depledt 02] F Depledt et F Sauvageot. *Évaluation sensorielle des produits alimentaires*. Techniques de l'Ingénieur, 2002.
- [Drury 73] C G Drury et J L Addison. *An Industrial Study of the Effects of Feedback and Fault Density on Inspection Performance*. Ergonomics, vol. 16, no. 2, 1973.
- [Drury 75] C G Drury et J G Fox. Human reliability in quality control. Taylor & Francis Ltd., 1975.
- [Drury 92] C G Drury. Inspection performance . Handbook of industrial engineering, Wiley , New York, 1992.
- [Duffy 10] S M Duffy. *Polynomial Texture Mapping at roughing Linn rock art site* . International Archives of Photogrammetry, vol. 38, 2010.
- [Duret 10] D Duret, A Sergent et H Bui-Minh. *An investigation of indicators for controlling the quality of a fixture*. International Journal of Metrology and Quality Engineering, pages 1–12, 2010.
- [Durou 07a] J D Durou. *Shape from shading – Eclairages, réflexions et perspectives*. Rapport technique, 2007.
- [Durou 07b] J D Durou et F Courteille. *Integration of a Normal Field without Boundary Condition*. In Proceedings of the First International Workshop on Photometric Analysis For Computer Vision, 2007.
- [Durou 09] J D Durou, J F Aujol et F Courteille. *Integrating the Normal Field of a Surface in the Presence of Discontinuities*. Energy Minimization Methods in Computer Vision and Pattern Recognition, pages 261–273, 2009.
- [Earl 10a] G Earl, G Beale et K Martinez. *Polynomial texture mapping and related imaging technologies for the recording, analysis and presentation of archaeological materials*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 38, 2010.
- [Earl 10b] G Earl et K Martinez. *Archaeological applications of polynomial texture mapping : analysis, conservation and representation*. Journal of Archaeological Science, 2010.
- [Elias 05] M Elias. *La couleur, analyse et caractérisation*. In MESURExpo 2005, Paris, France, pages 1–27, 2005.
- [Estler 99] W T Estler. *Measurement as Inference : Fundamental Ideas*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 48, no. 2, pages 611–631, 1999.
- [Farin 96] G E Farin. Curves and Surfaces for Computer-Aided Geometric Design : A Practical Code . Academic Press, Inc. Orlando, FL, USA, 4 edition, 1996.
- [Favrelière 07a] H Favrelière, S Samper et P A Adragna. *Métrie et caractérisation des défauts d'une surface sphérique*. In Proceedings of the 5th international Conference in Integrated Design and Production, Rabat (Maroc), 2007.

- [Favrelière 07b] H Favrelière, S Samper, P A Adragna et M Giordano. *3D «statistical analysis and representation of form error by a modal approach»*. Computer Aided Tolerancing (CAT), Erlangen Allemagne, 2007.
- [Favrelière 08] H Favrelière, S Samper et Y Derickxsen. *Métrie modale et statistique appliquée à l'étude d'une calotte sphérique et d'un cylindre*. In Proceedings of AIP-Primeca Pays de la Loire, pages 1–4, 2008.
- [Favrelière 09] H Favrelière. *Modal Tolerancing : From metrology to specifications*. Thèse de Doctorat, Université de Savoie, 2009.
- [Favrelière 11] H Favrelière, G Le Goïc, S Samper et P Belin. *Flatness calibration of XY translation stages through modal parameterization*. Proceedings of 15th international congress of metrology, pages 1–7, 2011.
- [Faye 04] P Faye, D Brémaud, M Durand Daubin, P Courcoux, A Giboreau et H Nicod. *Perceptive free sorting and verbalization tasks with naive subjects : an alternative to descriptive mappings*. Food Quality and Preference, vol. 15, no. 7-8, pages 781–791, 2004.
- [Ferguson 74] D A Ferguson, G Major et T Keldoulis. *Vision at work visual defect and the visual demand of tasks*. Applied Ergonomics, vol. 5, no. 2, pages 84–93, 1974.
- [Formosa 05] F Formosa, S Samper et I Perpoli. *Modal expression of form defects*. In Proceedings of the 9th CIRP Seminar on Models for Computer Aided Tolerancing, pages 1–9, 2005.
- [Fukumura 04] M Fukumura, Y Yamasaki et D Inage. Finite element simulation of surface defects in the automobile door outer panel. AIP Conference Proceedings, 2004.
- [Gallwey 82] T J Gallwey. *Selection tests for visual inspection on a multiple fault type task*. Ergonomics, vol. 25, no. 1, 1982.
- [Gauss 27] K F Gauss. *General Investigations of curved surfaces of 1827 and 1825*. Presented to the Royal Society of Göttingen, pages 1–144, 1827.
- [Giordano 06] J-L Giordano. *L'approche qualité perçue*. Editions d'organisation, Groupe Eyrolles, 2006.
- [Goral 84] C M Goral, K E Torrance, D P Greenberg et B Battaile. *Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces*. Computer Graphics . . . , vol. 18, pages 1–10, 1984.
- [Gotlieb 94] J B Gotlieb, D Grewal et S W Brown. *Consumer satisfaction and perceived quality : Complementary or divergent constructs ?* Journal of Applied Psychology, vol. 79, pages 875–885, 1994.
- [Gould 55] B A Gould. *On Peirce's Criterion for the Rejection of Doubtful Observations, with tables for facilitating its application*. Astronomical Journal, vol. 4, no. 83, pages 81–87, 1855.
- [Gramopadhye 97] A K Gramopadhye, C G Drury et P V Prabhu. *Training Strategies for Visual Inspection*. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, vol. 7, pages 171–196, 1997.

- [Gramopadhye 12] A K Gramopadhye, C G Drury et J Sharit. *Feedback strategies for visual search in airframe structural inspection*. pages 1–12, 2012.
- [Grandjean 11] J Grandjean, G Le Goïc, H Favrelière, Y Ledoux, S Samper et L Devun. *Analyse multi-échelle des composants articulaires d'une prothèse de hanche par la méthode modale*. 4eme Congres International Conception et Modelisation des Systèmes Mécaniques CM-SM'2011, pages 1–8, 2011.
- [Grubbs 50] F E Grubbs. *Sample criteria for testing outlying observations*. The Annals of Mathematical Statistics, vol. 21, 1950.
- [Grubbs 69] F E Grubbs. *Procedures for detecting outlying observations in samples*. Technometrics, vol. 11, pages 1–21, 1969.
- [Grubbs 72] F E Grubbs et G Beck. *Extension of Sample Sizes and Percentage Points for Significance Tests of Outlying Observations*. American Statistical Association and American Society for Quality, vol. 14, pages 847–854, 1972.
- [Guerra 09] A S Guerra. *Métrologie sensorielle dans le cadre du contrôle qualité visuel*. Thèse de Doctorat, Laboratoire Symme - Université de Savoie, 2009.
- [Horton 06] N Horton et B A Ritter. *System and method for combining parametric texture maps*. no. 7009620, 2006.
- [Hotelling 31] H Hotelling. *The Generalization of Student's Ratio*. The Annals of Mathematical Statistics, vol. 2, pages 360–378, 1931.
- [Iglewicz 93] B Iglewicz et D C Hoaglin. How to detect and handle outliers, volume 16 of (*The ASQC Basic References in Quality Control*). American Society for Quality Control, 1993.
- [ISO-11035 94] ISO-11035. *Sensory analysis – Identification and selection of descriptors for establishing a sensory profile by a multidimensional approach - International Organization for Standardization*, 1994.
- [ISO-12085 96] ISO-12085. *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture : Profile method – Motif parameters - International Organization for Standardization*, 1996.
- [ISO-12781-2 11] ISO-12781-2. *Geometrical product specifications (GPS) – Flatness – Part 2 : Specification operators - International Organization for Standardization*, 2011.
- [ISO-13565 96] ISO-13565. *Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface : Méthode du profil ; surfaces ayant des propriétés fonctionnelles différentes suivant les niveaux - International Organization for Standardization*, 1996.
- [ISO-14405-1 10] ISO-14405-1. *Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional tolerancing – Part 1 : Linear sizes - International Organization for Standardization*, 2010.
- [ISO-14405-2 11] ISO-14405-2. *Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional tolerancing – Part 2 : Dimensions other than linear sizes - International Organization for Standardization*, 2011.

- [ISO-16269-4 10] ISO-16269-4. *Statistical interpretation of data – Part 4 : Detection and treatment of outliers -International Organization for Standardization*, 2010.
- [ISO-25178-3 08] ISO-25178-3. *Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture : Areal – Part 3 : Specification operators - International Organization for Standardization*, 2008.
- [ISO-4287 97] ISO-4287. *Spécification géométrique des produits (GPS) - État de surface : Méthode du profil - Termes, définitions et paramètres d'état de surface - International Organization for Standardization*, 1997.
- [ISO-5459 11] ISO-5459. *Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Datums and datum systems - International Organization for Standardization*, 2011.
- [ISO-8785 98] ISO-8785. *Geometrical Product Specification (GPS) –Surface Imperfections – Terms, definitions and parameters - International Organization for Standardization*, 1998.
- [Jordan 06] S E Jordan et C A Brown. *Comparing texture characterization parameters on their ability to differentiate ground polyethylene ski bases*. *Wear*, vol. 261, pages 398–409, 2006.
- [Kafri 81] O Kafri et A Livnat. *Reflective surface analysis using moiré deflectometry*. *Applied Optics*, vol. 20, pages 1–3, 1981.
- [Koenderink 92] J J Koenderink et A J van Doorn. *Surface shape and curvature scales*. *Image and vision computing*, vol. 10, no. 1, pages 557–564, 1992.
- [Koenderink 96] J J Koenderink, A J van Doorn et M Stavridi. *Bidirectional Reflection Distribution Function expressed in terms of surface scattering modes*. *Computer Vision—ECCV'94*, pages 28–39, 1996.
- [Koenderink 03] J J Koenderink et A J van Doorn. *Local structure of gaussian texture*. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, Special Issue on Multiresolution Analysis*, vol. E86-D, pages 1165–1171, 2003.
- [Kraemer 06] M Kraemer. *Using polynomial texture maps for micro-scale occlusions*. 2006.
- [Lafortune 97] E P F Lafortune, S-C Foo, K E Torrance et D P Greenberg. *Non-Linear Approximation of Reflectance Functions*. *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 117–126, 1997.
- [Lambert 60] J H Lambert. *Photometria sive de mensura de gradibus luminis, colorum umbrae*. Eberhard Klett, 1760.
- [Le Goïc 11] G Le Goïc, H Favrelière, S Samper et F Formosa. *Multi scale modal decomposition of primary form, waviness and roughness of surfaces*. *Scanning*, 2011.
- [Le Port 09] A Le Port, S Thuillier et P-Y Manach. *Occurrence and numerical prediction of surface defects during flanging of metallic sheets*.

- International Journal of Material Forming, vol. 3, no. 3, pages 215–223, 2009.
- [Le Port 10] A Le Port. *Caractérisation et Prédiction des Défauts d'Aspect sur les Ouvrants Automobiles*. Thèse de Doctorat, Université de Bretagne-Sud, 2010.
- [Le Port 11] A Le Port, S Thuillier et P-Y Manach. *Characterization of surface defects after flanging of metallic sheets*. Journal of Materials Processing Tech., vol. 211, no. 12, pages 2062–2071, 2011.
- [Lecompte 10] J Lecompte, O Legoff et J Y Hascoet. *Technological form defects identification using discrete cosine transform method*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 51, no. 9-12, pages 1033–1044, 2010.
- [Lee 98] S H Lee, H Zahouani, R Caterini et T G Mathia. *Morphological characterisation of engineered surfaces by wavelet transform*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 38, no. 5-6, pages 581–589, 1998.
- [Legay 05a] F Legay. *Caractérisation morphologique des défauts d'aspect et détermination d'une méthodologie optique de quantification*. Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comte, 2005.
- [Legay 05b] F Legay, G Monteil, C Roques-Carmes et V Zwilling. *Local Defects Characterization*. Proceedings of the 10th International Conference of Engineering Surfaces, pages 155–164, 2005.
- [Legendre 05] A M Legendre. *Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes*. Firmin Didot, Librairie pour les Mathématique et les Editions stéréotypes, 1805.
- [Leissa 69] A W Leissa. *Vibration of plates*. NASA SP-160, pages 1–316, 1969.
- [Levy 10] P Levy. *Ingénierie Kansei, ou comment lier affectivité et conception*. Techniques de l'Ingénieur, pages 1–13, 2010.
- [Lewis 93] R C Lewis et B H Booms. *The marketing aspects of service quality. Emerging perspectives on Service Marketing*. American Marketing Association, 1993.
- [Linares 05] J M Linares, C Brocot et J M Sprauel. *Impact du filtrage mécanique sur l'association des surfaces en métrologie 3D*. RS-I2M - 5/2005. Métrologie, science transversale, pages 1–18, 2005.
- [Lingadurai 06] K Lingadurai et M S Shunmugam. *Metrological characteristics of wavelet filter used for engineering surfaces*. Measurement, vol. 39, no. 7, pages 575–584, 2006.
- [Mac Leod 09] P Mac Leod, F Sauvageot et E P Köster. *Chapitre 1 - Les caractéristiques d'une réponse sensorielle*. In *Évaluation sensorielle : manuel méthodologique*. Lavoisier, collection Sciences & techniques agroalimentaires, 3<sup>e</sup> Édition, 2009.
- [MacDonald 10] L MacDonald et S Robson. *Polynomial Texture Mapping and 3D representations*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 38, 2010.

- [MacDonald 11] L W MacDonald. *Visualising an Egyptian Artefact in 3D : Comparing RTI with Laser Scanning*. Proceedings of the 2011 international conference on Electronic Visualisation and the Arts EVA'11, pages 155–162, 2011.
- [Mallat 89] S G Mallat. *A theory for multiresolution signal decomposition : the wavelet representation*. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, vol. 11, no. 7, pages 674–693, 1989.
- [Malzbender 00a] T Malzbender, D Gelb, H Wolters et B Zuckerman. *Enhancement of shape perception by surface reflectance transformation*. Rapport technique, 2000.
- [Malzbender 00b] T Malzbender et D G Gelb. *Apparatus for and method of enhancing shape perception with parametric texture maps*. 2000.
- [Malzbender 01a] T Malzbender. *Direction-dependent texture maps in a graphics system*. no. 6297834, 2001.
- [Malzbender 01b] T Malzbender et D Gelb. *Polynomial Texture Map (. ptm) File Format*. Private Communication, 2001.
- [Malzbender 01c] T Malzbender, D Gelb et H Wolters. *Polynomial texture maps*. Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pages 519–528, 2001.
- [Malzbender 06] T Malzbender, B Wilburn et D Gelb. *Surface enhancement using real-time photometric stereo and reflectance transformation*. Eurographics Symposium on Rendering, pages 245–250, 2006.
- [Mazbender 05] T Mazbender et D G Gelb. *Apparatus for and method of rendering 3D objects with parametric texture maps*. no. 6888544, October 2005.
- [Megaw 79] E D Megaw. *Factors affecting visual inspection accuracy*. Applied Ergonomics, vol. 10, no. 1, pages 27–32, 1979.
- [Mehlum 98] E Mehlum et C Tarrou. *Invariant smoothness measures for surfaces*. Advances in Computational Mathematics, vol. 8, no. 1, pages 49–63, 1998.
- [Mudge 08] M Mudge, T Malzbender, A Chalmers et R Scopigno. *Image-based empirical information acquisition, scientific reliability, and long-term digital preservation for the natural sciences and cultural heritage*. homepages.inf.ed.ac.uk, 2008.
- [Murray-Coleman 90] J F Murray-Coleman et A M Smith. *The automated measurement of BRDFs and their application to luminaire modeling*. Journal of the Illuminating Engineering Society, vol. 19, pages 87–99, 1990.
- [Nasri 11] I Nasri, R Boukezzoula et G Habchi. *A propos de la modélisation et le pilotage des systèmes manufacturiers de type HVLV*. 12e Congrès Annuel de la Societe Francaise de Recherche Operationnelle et d'Aide a la Decision (RoadF'2011), Saint-Etienne France, pages 1–2, September 2011.
- [Nayar 90] S K Nayar, K Ikeuchi et T Kanade. *Determining shape and reflectance of hybrid surfaces by photometric sampling*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 6, no. 4, 1990.

- [Nayar 91] S K Nayar, K Ikeuchi et T Kanade. *Surface reflection : physical and geometrical perspectives*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, pages 611–634, 1991.
- [Nelson 69] J B Nelson et J W Barany. *A Dynamic Visual Recognition Test for Paced Inspection Tasks*. AIIE Transactions, vol. 1, no. 4, pages 327–332, 1969.
- [Nickles 03] G M Nickles, B J Melloy et A K Gramopadhye. *A comparison of three levels of training designed to promote systematic search behavior in visual inspection*. International Journal of Industrial Ergonomics, vol. 32, no. 5, pages 331–339, November 2003.
- [Nicodemus 65] F E Nicodemus. *Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface*. Applied Optics, vol. 4, pages 1–8, 1965.
- [Nicodemus 77] F E Nicodemus, J C Richmond, J J Hsia, I W Ginsberg et T Limpeiris. *Geometrical considerations and nomenclature for Reflectance*. Institute for Basic Standards, National Bureau of Standards, Washington, 1977.
- [Oren 94] M Oren et S K Nayar. *Generalization of Lambert's reflectance model*. Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pages 239–246, 1994.
- [Padfield 05] J Padfield, D Saunders et T Malzbender. *Polynomial texture mapping : a new tool for examining the surface of paintings*. Proceedings of the 14th Triennial meeting The Hague, vol. 1, 2005.
- [Palma 10] G Palma, M Corsini et P Cignoni. *Dynamic shading enhancement for reflectance transformation imaging*. Journal on Computing and Cultural Heritage, vol. 3, 2010.
- [Park 07] C D Park, W J Chung et B M Kim. *A numerical and experimental study of surface deflections in automobile exterior panels*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 187-188, pages 99–102, June 2007.
- [Paul 91] S R Paul et K Y Fung. *A Generalized Extreme Studentized Residual Multiple-Outlier-Detection Procedure in Linear-Regression*. Technometrics, vol. 33, no. 3, pages 339–348, 1991.
- [Peirce 52] B Peirce. *Criterion for the rejection of doubtful observations*. the Astronomical Journal, vol. 2, pages 161–163, 1852.
- [Peng 97] Z Peng et T B Kirk. *Two-dimensional fast fourier transform and power spectrum for wear particle analysis*. Tribology International, vol. 30, pages 583–590, 1997.
- [Pentland 90] A P Pentland. *Automatic extraction of deformable part models*. International Journal of Computer Vision, vol. 4, no. 2, pages 107–126, 1990.
- [Perpoli 04] I Perpoli. *Tolérancement des mécanismes flexibles : Application à une aile de carrosserie*. Mémoire CNAM mécanique Annecy, 2004.
- [Puntous 12] T Puntous, D Delafosse, M Jourlin et J Rech. *Perception of scratches on metallic polished*. Proceedings of the International

- Conference On Surface Metrology ICSM'2012, Annecy, France, pages 1–7, 2012.
- [Raja 77] J Raja et V Radhakrishnan. *Analysis and synthesis of surfaces profiles using fourier series*. Int. J. Mach. Tool Des. Res., vol. 17, pages 245–251, 1977.
- [Raja 02] J Raja et B Muralikrishnan. *Recent advances in separation of roughness, waviness and form*. Precision Engineering, 2002.
- [Raphet 06] B Raphet. *États de surface - Mesure*. Techniques de l'Ingénieur, pages 1–17, 2006.
- [Raphet 08] B Raphet. *États de surface - Caractérisation*. Techniques de l'Ingénieur, pages 1–22, 2008.
- [Rebsamen 10] M Rebsamen, J Boucheix et M Fayol. *Quality control in the optical industry : From a work analysis of lens inspection to a training programme, an experimental case study*. Applied Ergonomics, vol. 41, no. 1, pages 150–160, 2010.
- [Ritter 04] B A Ritter. *System and method for synthesis of parametric texture map textures*. 2004.
- [Roberts 01] A Roberts. *Curvature attributes and their application to 3 D interpreted horizons*. First Break, 2001.
- [Rose 09] P Rose, Y Surrel et J M Becker. *Specific design requirements for a reliable slope and curvature measurement standard*. Measurement Science and Technology, vol. 20, no. 9, page 095110, 2009.
- [Rosenboom 11] L Rosenboom, T Kreis et W Jüptner. *Surface description and defect detection by wavelet analysis*. Measurement Science and Technology, 2011.
- [Rosner 83] B Rosner. *Percentage Points for a Generalized Esd Many-Outlier Procedure*. Technometrics, vol. 25, no. 2, pages 165–172, 1983.
- [Ross 03] S M Ross. *Peirce's criterion for the elimination of suspect experimental data*. Journal of Engineering Technology, pages 1–12, 2003.
- [Samper 06] S Samper, H Favrelière, P Vacher et T Coudert. *3D measurement and synthesis of facial expressions*. 3-D Analysis of Human Movement, Technical Group of the International Society of Biomechanics, pages 1–4, 2006.
- [Samper 07a] S Samper. *Tolérancement et analyse des structures au service des systèmes souples et du défaut de forme*. Laboratoire Systèmes et Matériaux pour la Mécatronique, 2007.
- [Samper 07b] S Samper et F Formosa. *Form defects tolerancing by natural modes analysis*. Journal of Computing and Information Science in Engineering, vol. 7, page 44, 2007.
- [Sauvageot 82] F Sauvageot. *L'évaluation sensorielle des denrées alimentaires : aspects méthodologiques*, volume 30. Lavoisier, Collection Actualités scientifiques et techniques en industries agro-alimentaires, 1982.

- [Sauvageot 06] F Sauvageot, I Urdapilleta et D Peyron. *Within and between variations of texts elicited from nine wine experts*. Food Quality and Preference, vol. 17, no. 6, pages 429–444, 2006.
- [Savio 07] E Savio, L De Chiffre et R Schmitt. *Metrology of freeform shaped parts*. Annals of the CIRP, vol. 56, pages 1–26, 2007.
- [Scott 05] R S Scott, P S Ungar, T S Bergstrom, C A Brown, F E Grine, M F Teaford et A Walker. *Dental microwear texture analysis shows within-species diet variability in fossil hominins*. Nature, vol. 436, no. 7051, pages 693–695, 2005.
- [Seulin 00] R Seulin, G Delcroix et F Merienne. *Comparative performance for isolated points detection operators : application on surface defects extraction*. Vision Interface, pages 14–17, 2000.
- [Simonot 02] L Simonot et M Elias. *Color change due to surface state modification*. Color Research & Application, vol. 28, no. 1, pages 45–49, 2002.
- [Stefansky 72] W Stefansky. *Rejecting outliers in factorial designs*. Technometrics, vol. 14, 1972.
- [Student 08] Student. *The probable error of a mean*. Biometrika, vol. 6, pages 1–24, 1908.
- [Sun 06] Z Sun et Y Yang. *A study of surface deflection in pressed automobile panels*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 180, no. 1-3, pages 53–59, 2006.
- [Surrel 04] Y Surrel. *Deflectometry : a simple and efficient noninterferometric method for slope measurement*. Xth SEM international congress on experimental mechanics, 2004.
- [Surrel 05] Y Surrel. *Les techniques optiques de mesure de champ : essai de classification*. Rapport technique, 2005.
- [Surrel 12] Y Surrel. *Mesure de la qualité de surface par déflectométrie*. Présentation du système ONDULO, Société Visuol technologies, pages 1–38, 2012.
- [Tietjen 72] G L Tietjen et R H Moore. *Some Grubbs-Type Statistics for the Detection of Several Outliers*. Technometrics, vol. 14, pages 583–597, 1972.
- [Torrance 67] K E Torrance et E M Sparrow. *Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces*. Journal of the optical society of america, vol. 57, pages 1–10, 1967.
- [Udupa 00a] G Udupa, M Singaperumal, R S Sirohi et M P Kothiyal. *Characterization of surface topography by confocal microscopy : I. Principles and the measurement system*. Measurement Science and Technology, 2000.
- [Udupa 00b] G Udupa, M Singaperumal, R S Sirohi et M P Kothiyal. *Characterization of surface topography by confocal microscopy : II. The micro and macro surface irregularities*. Measurement Science and Technology, 2000.

- [Van Vliet 93] L J Van Vliet. *Curvature and bending energy in digitized 2D and 3D images*. Proceedings of the Scandinavian Conference on Image Analysis, vol. 2, pages 1403–1410, 1993.
- [Varadarajan 12] K M Varadarajan et M L Culpepper. *A dual-purpose positioner- fixture for precision six-axis positioning and precision fixturing Part I. Modeling and design*. Precision Engineering, vol. 31, pages 276–286, 2012.
- [Vessot 12] K Vessot, P Messier et C A Brown. *Correlation between gloss reflectance and surface texture in photographic paper*. Submitted to Scanning, 2012.
- [VISUOL 12] Société VISUOL. *Etude d'une aile automobile en plastique injecté*. pages 1–4, 2012.
- [Wang 97] M J Wang, S C Lin et C G Drury. *Training for strategy in visual search*. International Journal of Industrial Ergonomics, vol. 20, pages 101–108, 1997.
- [Westin 92] S H Westin, J R Arvo et K E Torrance. *Predicting Reflectance Functions from Complex Surfaces*. Thèse de Doctorat, Faculty of the Graduate School of Cornell University, 1992.
- [Wolters 00] H J Wolters. *Apparatus for and method of converting height fields into parametric texture maps*. no. 6583790, 2000.
- [Woodham 80] R J Woodham. *Photometric method for determining surface orientation from multiple images*. Optical engineering, 1980.
- [Wright 84] T W Wright. *A treatise on the adjustment of observations with applications to geodetic work and other measures of precision*. Ithaca, New York : Cornell University Library, 1884.
- [X10-042 06] X10-042. *Caractérisation sensorielle des matériaux - Recommandations pratiques pour l'analyse visuelle de la matière première au produit fini - Association Française de Normalisation (AFNOR)* , 2006.
- [Yashchuk 08] V V Yashchuk, W R McKinney, T Warwick, T Noll, F Siewert, T Zeschke et R D Geckeler. *Proposal for a Universal Test Mirror for Characterization of Slope Measuring Instruments*. Proceedings SPIE, vol. 4809, pages 1–13, 2008.
- [Zamuner 11] G Zamuner. *Application of Artificial Vision to the Quality Inspection of Surfaces in the Case of Luxury Products* . Thèse de Doctorat, 2011.
- [Zhao 10] H B Zhao. *Multisensor integration and discrete geometry processing for coordinate metrology*. Thèse de Doctorat, PhD thesis, ENS Cachan, 2010.
- [Zienkiewicz 02] O C Zienkiewicz, R L Taylor et P Nithiarasu. *The finite element method for solid and structural mechanics*. Elsevier Butterworth Heinemann, 2002.



## Publications associées à ces travaux

### Brevet

- 2011 Serge SAMPER, Hugues FAVRELIÈRE et Gaëtan LE GOÏC. « Procédé et dispositif de caractérisation de surfaces ». Demande de brevet français N°11 011778, déposée le 09 Juin 2011, à l'*Institut National de la Propriété Industrielle (INPI)*, 2011.

### Revue internationale à comité de lecture

- 2012 Gaëtan LE GOÏC, Christopher A. BROWN, Hugues FAVRELIÈRE, Serge SAMPER et Fabien FORMOSA. « Outlier filtering : A new method for improving the quality of surface measurements ». Submitted at *Measurement Science and Technology*, 2012.

Julien GRANDJEAN, Gaëtan LE GOÏC, Hugues FAVRELIÈRE, Yann LEDOUX, Serge SAMPER, Fabien FORMOSA, Laure DEVUN, et Thomas GRADEL. « A multi-scalar analysis of joint components of a hip replacement using the modal method ». Submitted at *Measurement Science and Technology*, 2012.

- 2011 Gaëtan LE GOÏC, Hugues FAVRELIÈRE, Serge SAMPER et Fabien FORMOSA. « Multi scale modal decomposition of primary form, waviness and roughness of surfaces ». *Scanning, the Journal of Scanning Microscopies, Special Issue on Surface Metrology II*, 2011.

### Communications orales et colloques à comité de lecture

- 2012 Hugues FAVRELIÈRE, Gaëtan LE GOÏC et Serge SAMPER. « Preparation and cleaning of surface measurements : New methods - Outlier filtering & Multi-scale characterization ». Tutorial presented at the 3<sup>rd</sup> *International Conference On Surface Metrology ICSM'2012, Annecy, France*, 2012.

Julien GRANDJEAN, Gaëtan LE GOÏC, Hugues FAVRELIÈRE, Yann LEDOUX, Serge SAMPER, Fabien FORMOSA, Laure DEVUN et Thomas GRADEL. « Metrological characterisation of hip implant by using discrete modal decomposition ». *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Surface Metrology ICSM'2012, Annecy, France*, 2012.

- 2011 Julien GRANDJEAN, Gaëtan LE GOÏC, Hugues FAVRELIÈRE, Yann LEDOUX, Serge SAMPER et Laure DEVUN. « Analyse multi-échelle des composants articulaires d'une prothèse de hanche par la méthode modale ». *4<sup>ème</sup> Congrès International de Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques CMSM'11*, Sousse, Tunisie, 2011.
- Hugues FAVRELIÈRE, Gaëtan LE GOÏC, Serge SAMPER et Patrice BELIN. « Flatness calibration of XY translation stages through modal parameterization ». *Proceedings of 15th international congress of metrology, Paris, France, 2011*.
- Gaëtan LE GOÏC, Hugues FAVRELIÈRE, Serge SAMPER et Fabien FORMOSA. « PTMs developments for appearance inspection on high-added value surfaces ». *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Surface Metrology Seminar for the America, Worcester, Massachusetts, Etats-Unis, 2011*.
- Hugues FAVRELIÈRE, Gaëtan LE GOÏC, Serge SAMPER et Fabien FORMOSA. « Multi-scale analysis of surface topographies by modal filtering ». *Proceedings of the 2nd Surface Metrology Seminar for the Americas, Worcester, Massachusetts, Etats-Unis, 2011*.
- 2010 Gaëtan LE GOÏC, Hugues FAVRELIÈRE, Serge SAMPER et Fabien FORMOSA. « Multi scale modal decomposition of form, undulation and roughness of surfaces ». *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference On Surface Metrology ICSM'2010, Worcester, Massachusetts, Etats-Unis, 2010*.



## Résumé

### Qualité géométrique & Aspect des surfaces : approches locales et globales

Parmi tous les leviers à disposition des entreprises, la prise en compte de la perception par les clients est aujourd'hui centrale, dès la conception des produits. En effet, le consommateur est aujourd'hui mieux informé et attentif à ce qu'il perçoit de la qualité d'un produit et cette perception lui permet d'établir une valeur d'estime de la qualité esthétique des produits, mais aussi de ses fonctionnalités techniques. La méthodologie de l'analyse de la qualité d'aspect des surfaces est donc un enjeu essentiel pour l'industrie. Deux approches de la fonctionnalité des surfaces sont proposées afin de formaliser la méthodologie de détection, et d'apporter aux experts des critères objectifs d'évaluation des anomalies.

La première approche proposée est basée sur la métrologie des surfaces. Elle consiste à analyser les topographies mesurées pour lier la fonction aspect aux caractéristiques géométriques extraites. Une approche multi-échelle basée sur la **Décomposition Modale Discrète** est mise en œuvre afin de séparer efficacement les différents ordres de variations géométriques d'une surface, et ainsi d'isoler les anomalies d'aspect. D'autre part, cette méthode permet la mise en œuvre du calcul des courbures sur une surface de façon simplifiée et robuste. On montre que cet attribut géométrique apporte une information supplémentaire et pertinente en lien avec la fonction aspect. Enfin, ces travaux ont mis en évidence l'importance de la qualité des données sources pour analyser l'aspect, et particulièrement deux difficultés d'ordre métrologiques, liées à la présence de points aberrants (hautes fréquences) et de variations géométriques non intrinsèques aux surfaces, générées par le moyen de mesure (basses fréquences). Une méthode innovante d'identification des points aberrants dédiée à la métrologie des surfaces et basée sur une approche statistique multi-échelle est proposée. La problématique des variations géométriques liées aux tables de positionnement du moyen de mesure est traitée au moyen de la Décomposition Modale, et un protocole pour corriger ces variations est présenté.

La seconde approche, plus globale, est basée sur l'interaction entre les surfaces et l'environnement lumineux. L'objet de cette approche de l'analyse de l'aspect est d'apporter une aide aux experts pour mieux détecter les anomalies. Les travaux présentés sont basés sur la technique *Polynomial Texture Mappings* et consistent à modéliser la réflectance en chaque point des surfaces afin de simuler le rendu visuel sous un éclairage quelconque, à la manière de ce que font les opérateurs en analyse sensorielle pour faciliter la détection. Un dispositif d'aide à l'inspection des surfaces basé sur ce principe est présenté.

Enfin, une approche industrielle est proposée afin de montrer comment ces 2 axes de recherche peuvent être complémentaires dans le cadre d'une méthodologie globale, industrielle, de l'analyse de la qualité d'aspect de surfaces.

---

## Mots clés

Métrologie de surface, Qualité d'aspect, Décomposition modale, Polynomial Texture Mappings, Points aberrants

---

## Abstract

### Geometric quality & Appearance of surfaces : Local and global approaches

Accounting for customers' perception of manufactured goods has become a major challenge for the industry. This process is to be established from early design to retail. Customers are nowadays more aware and detail oriented about perceived quality of products. This allows one to set not only an estimated price but also the expected quality of the product. Surface appearance analysis has therefore become a key industrial issue. Two approaches are proposed here to formalize the detection methodology and provide objective criteria for experts to evaluate surface anomalies.

The first proposed approach is based on surface metrology. It consists in analyzing the measured topologies in order to bind aspect to geometric characteristics. A multi-scale procedure based on Discrete Modal Decomposition is implemented and allows an effective separation of geometric variations. Accordingly, appearance anomalies can be isolated from other geometrical features. This method enables the calculation of surface curvatures in a simplified and robust manner. It is shown that such geometric information is relevant and bound to visual aspect. The presented work also emphasizes the influence of raw data in aspect analysis. Two main metrological difficulties are investigated : the presence of outliers (High frequencies) and the presence of non surface-related geometric defects, generated by the measuring device (Low frequencies). An innovative method for identifying outliers in surface metrology is presented. It is based on a multi-scale statistical approach. Finally, the issue of geometrical variation due to positioning tables is also addressed. A calibration protocol based on DMD that intends to correct this phenomenon is proposed.

The second proposed approach, more global, is based on the interaction of a surface with its light environment. It aims at providing experts with assistance, specifically during the anomaly detection phase. The presented work uses *Polynomial Texture Mapping*. This technique consists of calculating the reflectance at each point of the surface and simulating its appearance while the lighting angles vary. A surface Inspection Support Device based on this principle is presented and detailed.

Finally, an industrial study is proposed that shows how these two academic approaches can be combined within a global industrial methodology dedicated to surface appearance quality.

---

## Key words

Surface metrology, Appearance quality, Modal decomposition, Polynomial Texture Mappings, Outliers identification