



**HAL**  
open science

# Numérisation et caractérisation de l'apparence pour l'inspection visuelle des surfaces manufacturées

Marvin Nurit

► **To cite this version:**

Marvin Nurit. Numérisation et caractérisation de l'apparence pour l'inspection visuelle des surfaces manufacturées. Vision par ordinateur et reconnaissance de formes [cs.CV]. Université de Bourgogne, 2022. Français. NNT: . tel-03705736

**HAL Id: tel-03705736**

**<https://theses.hal.science/tel-03705736v1>**

Submitted on 5 Jul 2022

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

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



THESE DE DOCTORAT DE L'ETABLISSEMENT UNIVERSITE BOURGOGNE FRANCHE-COMTE

PREPAREE A L'UNIVERSITE DE BOURGOGNE

Ecole doctorale n° 37

Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques

Doctorat en informatique

Par

Monsieur Marvin Nurit

Numérisation et caractérisation de l'apparence  
des surfaces manufacturées pour l'inspection visuelle

Thèse présentée et soutenue à Dijon, le 24 mars 2022

Composition du Jury :

**Saïda Bouakaz-Brondel**, Professeure des universités, LIRIS, Lyon 1, Présidente

**Maxence Bigerelle**, Professeur des universités, LAMIH, Univ. Polytechnique Hauts de France, Rapporteur

**Sylvie Chambon**, Maîtresse de Conférences, HDR, IRIT, Toulouse INP, Rapporteuse

**Jean-José Orteu**, Professeur de l'IMT, Institut Clément Ader, Ecole des Mines d'Albi, Examineur

**Jean-Luc Maire**, Maître de Conférences, HDR, Laboratoire SYMME, Université Savoie Mont-blanc, Examineur

**Alamin Mansouri**, Professeur des Universités, Laboratoire ImViA, Université de Bourgogne, Directeur de thèse

**Gaëtan Le Goïc**, Maître de Conférences, Laboratoire ImViA, Université de Bourgogne, Co-encadrant

**Hermine Chatoux**, Maîtresse de Conférences, Laboratoire ImViA, Université de Bourgogne, Co-encadrante

**Pierre Jochum**, Expert Industriel, Département technique du Comité Francéclat, Besançon, Invité

**Stéphane Maniglier**, Expert Industriel, CETIM, Cluses, Invité

**Laurent Gwinner**, Expert Industriel, Invité



## Avant-propos

Ces travaux de recherche ont été réalisés au laboratoire ImViA (Imagerie et Vision Artificielle, EA7435) localisé à Dijon, dans le cadre du projet ANR JCJC NAPS sur la période 2018-2022 (Projet ANR-17-CE10-0005).

Le projet NAPS *Numérisation, modélisation et pilotage de l'Apparence des états de Surface manufacturés* est associé à l'axe de recherche *Industrie et usine du futur : Homme, organisation, technologies (CE10)* et au défi DS03 (Stimuler le renouveau industriel) de l'AAP générique 2018 de l'Agence Nationale de la Recherche. Il se situe à la convergence des domaines du Génie industriel (Mécanique, Métrologie, qualité) et du domaine de l'imagerie (acquisition et traitement). La maîtrise de la perception visuelle des surfaces des produits manufacturés est un enjeu central pour l'industrie de demain, et de nombreux défis scientifiques associés sont à relever, dont celui, multifactoriel, de la numérisation de l'apparence des états de surfaces :

1. Comment mesurer les attributs d'apparence des surfaces, et qualifier l'aspect d'un état de surface à partir d'indicateurs objectifs et répétables.
2. Comment modéliser l'information d'apparence des surfaces, et particulièrement passer d'une mesure discrète à une estimation/modélisation continue de l'information.
3. Comment établir la(les) corrélation(s) avec la fonctionnalité, c'est à dire dans ce cas la corrélation entre des indicateurs objectifs d'état de surface géométriques et la qualité d'aspect des surfaces inspectées.

Le projet NAPS est structuré autour de ces trois verrous. Il ambitionne d'apporter des réponses tant sur le plan instrumental, par la poursuite de développements d'un dispositif de mesure d'attributs de l'apparence innovant, que sur le plan méthodologique, par le développement et la mise en œuvre de méthodes permettant une modélisation fidèle et performante de l'information d'apparence des surfaces, et permettant la formalisation du lien fonctionnel entre la micro- géométrie d'une surface et son comportement visuel. Le programme de recherche du projet NAPS s'est échelonné sur 42 mois, et est articulé autour du coordinateur scientifique (Gaëtan Le Goïc, Maître de conférences - porteur du projet), de 6 chercheurs du laboratoire ImViA (1 PR, 4 MCF et 1 IE) et de deux recrutements non permanents (deux doctorants dont moi-même et Mlle Abir Zendagui). Sont également associés à ce projet deux centres techniques : le CEntre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) et le comité Francéclat (Besançon, industries de l'horlogerie et de la joaillerie).

Créé en 2019, le laboratoire Imagerie et Vision Artificielle (ImViA) émane du Laboratoire Electronique, Informatique et Image (Le2i), laboratoire de recherche sous tutelle de l'Université de Bourgogne de 1996 à 2018, des Arts et Métiers ParisTech entre 2014 et 2017 et du CNRS de 2001 à 2017. Il est composé d'environ cinquante enseignants-chercheurs, et a pour thématique la Vision Artificielle. Il est organisé autour de trois équipes : Imagerie Fonctionnelle et moléculaire et Traitement des Images Médicales (IFTIM), Vision pour la roBOTique (VIBOT) et COmputer vision for REal time Systems (CORES), équipe dans laquelle se sont déroulés ces travaux de recherche.

Les recherches menées au sein de cette équipe s'inscrivent dans le champ de la vision artificielle ayant recours à différentes modalités d'imagerie non-conventionnelle pour diverses applications (patrimoine, biomédical, industrie, etc.). Le choix des modalités, leur mise en oeuvre (conception de dispositifs d'acquisition multimodaux innovants) et la gestion des informations générées (méthodes de traitement/analyse) représentent des leviers de recherche importants, avec l'objectif d'extraire des caractéristiques fonctionnelles, c'est à dire au plus proche du comportement physique de la surface/scène analysée ou de ses attributs physiologiques et/ou perceptuels et ce généralement en temps réel ou en respectant des contraintes liées à l'embarquabilité. L'activité de cette équipe s'articule autour de trois thèmes : conception de systèmes d'imagerie et vision temps réel, outils de mesures et de diagnostics basés sur la vision, imagerie multimodale pour la numérisation et la modélisation fonctionnelle de l'apparence des surfaces complexes.



# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
Préambule . . . . .	1
Structure du manuscrit . . . . .	3
<b>1 Mesurer l'apparence des surfaces</b>	<b>5</b>
1 Introduction . . . . .	5
2 Définition de l'apparence . . . . .	6
3 Approche sensorielle . . . . .	8
3.1 Les facteurs de variabilité . . . . .	8
3.2 Répétabilité et Reproductibilité . . . . .	11
3.3 Métrologie sensorielle . . . . .	12
4 Mesure des attributs d'apparence : Approche géométrique . . . . .	14
4.1 Evaluation de la micro-géométrie . . . . .	15
4.2 Mesure mécanique . . . . .	16
4.3 Mesure optique . . . . .	17
4.4 Synthèse des différentes méthodes de mesure de la topographie . . . . .	21
5 Mesure des attributs d'apparence : Approche photométrique . . . . .	23
5.1 La Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) . . . . .	24
5.2 La technique du RTI . . . . .	26
6 Conclusion . . . . .	30
<b>2 Vers une métrologie de l'apparence : proposition d'un système d'imagerie multi-modal</b>	<b>33</b>
1 La technique d'acquisition RTI : Systèmes et approches d'acquisition existants . . . . .	33
1.1 La technique de Reflectance Transformation Imaging . . . . .	33
1.2 Limites des dispositifs d'acquisitions RTI actuels . . . . .	36
2 Proposition de nouvelles modalités d'acquisition RTI . . . . .	41
2.1 Architecture mécanique . . . . .	41
2.2 Architecture logiciel . . . . .	42
3 Développement et intégration de nouvelles modalités d'acquisitions RTI . . . . .	50
4 Conclusion . . . . .	52

<b>3</b>	<b>High Dynamic RTI : Proposition d'une nouvelle modalité d'acquisition de la réflectance angulaire</b>	<b>53</b>
1	Introduction . . . . .	53
2	Principe et état de l'art de la technique d'imagerie HDR . . . . .	58
3	High Dynamic RTI : proposition de méthodologie . . . . .	60
3.1	Estimation de la CRF . . . . .	61
3.2	Nombre de capture et auto-détermination des temps d'exposition associés . . . . .	61
3.3	Reconstruction des données HD-RTI . . . . .	64
4	Évaluation de la méthode proposée & Résultats . . . . .	66
4.1	Évaluation globale . . . . .	67
4.2	Évaluation "pixel-wise" . . . . .	69
4.3	Évaluation de la luminance . . . . .	72
4.4	HD-RTI & Relighting des surfaces . . . . .	73
4.5	HD-RTI & cartographies de saillance . . . . .	75
5	Conclusion . . . . .	76
<b>4</b>	<b>Caractérisation de l'apparence des surfaces et cartographie des caractéristiques locales</b>	<b>79</b>
1	Imagerie RTI : vers une métrologie de l'apparence . . . . .	79
2	Caractérisation locale de l'apparence des surfaces . . . . .	81
2.1	Descripteurs de réflectance locale RTI brutes . . . . .	82
2.2	Descripteurs dérivés des modèles de réflectance . . . . .	87
2.3	Descripteurs géométriques . . . . .	94
3	Exemples d'application . . . . .	102
4	Conclusion . . . . .	105
<b>5</b>	<b>RTI &amp; Saillance visuelle : Approches locale et globale pour l'évaluation de l'apparence des surfaces</b>	<b>107</b>
1	Introduction . . . . .	107
2	Estimation de la saillance visuelle . . . . .	108
2.1	Méthodologie proposée . . . . .	108
2.2	Critère d'optimisation multi-niveau . . . . .	110
2.3	Prise en compte des aspects d'échelle . . . . .	111
2.4	Synthèse d'une saillance multi-niveau & multi-échelle . . . . .	113
3	Segmentation à partir du calcul la saillance . . . . .	114
4	Approche globale : Saillance inter-surfaces à partir de données RTI . . . . .	120
4.1	Distance entre états de surface . . . . .	120
4.2	Distance entre les modèles de reconstruction de l'apparence . . . . .	123
5	Conclusion . . . . .	125
	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>127</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>131</b>
	<b>Publications associées à ces travaux</b>	<b>141</b>







## Table des figures

1	De la perception vers la mesure physique de l'apparence : modèles de perceptions, selon [Obein 18] . . . . .	2
1.1	Schéma du processus de la perception de l'apparence et de l'influence de l'expérience de l'observateur dans la compréhension de la scène . . . . .	7
1.2	Exemples d'attributs d'apparence . . . . .	7
1.3	Schéma des différents facteurs d'influence lors d'une analyse sensorielle, selon [Debrosse 10] . . . . .	8
1.4	Représentation des différents effets lumière recherchés lors de l'inspection visuelle des surfaces. . . . .	9
1.5	Cercles de Titchener - Illusion optique d'Ebbinghaus où le cercle orange de gauche semble plus petit que celui à droite . . . . .	11
1.6	Répétabilité et reproductibilité lors du contrôle visuel . . . . .	11
1.7	Schéma d'un résultat de test R2& E2 . . . . .	12
1.8	Évolution de l'intensité de la sensation en fonction du stimulus [Mac Leod 09] . . . . .	13
1.9	Les étapes du contrôle sensoriel [Baudet 12] . . . . .	15
1.10	Illustration du rugosimètre . . . . .	16
1.11	Illustration du MMT . . . . .	16
1.12	Illustration du AFM . . . . .	17
1.13	Illustration du STM . . . . .	17
1.14	Illustration du MEB . . . . .	18
1.15	Illustration du SNOM . . . . .	18
1.16	Illustration du microscope confocal . . . . .	19
1.17	Illustration du microscope confocal avec codage chromatique . . . . .	19
1.18	Illustration de la triangulation laser . . . . .	20
1.19	Illustration du microscope par interférométrie . . . . .	20
1.20	Illustration du microscope à focalisation étendu . . . . .	21
1.21	Illustration de la déflectométrie . . . . .	21
1.22	Illustration de la photométrie . . . . .	22
1.23	Illustration de la Photogrammétrie . . . . .	22
1.24	Réflexion spéculaire sur une surface . . . . .	23
1.25	Réflexion diffuse sur une surface . . . . .	24
1.26	Types de réflexion sur une surface . . . . .	24

1.27	Lien entre la réflexion et les attributs d'apparence [Pitard 16] . . . . .	25
1.28	Définitions des paramètres $\theta_i, \phi_i, \theta_e$ et $\phi_e$ selon [Durou 07] . . . . .	25
1.29	La taxonomie générale de la réflectance de [Haindl 13] . . . . .	26
1.30	Schema des différents repères sur lesquels agit l'opérateur lors du contrôle visuel	27
1.31	Schema d'une acquisition RTI . . . . .	28
1.32	Exemple de nuages de point RTI de trois différents pixels . . . . .	28
1.33	Exemple de reconstruction de la reflectance angulaire d'un pixel avec les modèles de reconstruction PTM, HSH et DMD . . . . .	29
2.1	Acquisition Underwater RTI (URTI) réalisé sur l'épave romaine du premier siècle av. J.-C. du Cap del Vol, de [Selmo 17] . . . . .	34
2.2	Expérimentation d'un prototype de dôme RTI - ©Frédérique PLAS / MAP / CNRS Photothèque . . . . .	35
2.3	Système RTI du laboratoire NIMBE par Mickaël Bouhier et Jean-Charles Méaudre	35
2.4	Un système RTI se composant d'un bras robotisé qui tient une source d'éclairage, un plateau tournant sur lequel est posée la surface et une caméra multispectrale, de [Kitanovski 21] . . . . .	36
2.5	Acquisition RTI sur la statue commémorative du surfeur à Santa Cruz, en Californie, en pilotant un drone transportant une source d'éclairage, de [Fowler 20] .	36
2.6	Schéma du problème de modélisation de la reflectance angulaire lorsque la variation de reflectance, entre deux positions d'acquisition, est trop grande . . . . .	37
2.7	Schéma d'une acquisition RTI non homogène . . . . .	38
2.8	Acquisition avec un capteur couleur et interpolation des canaux rouge, vert et bleu	39
2.9	Schéma de la différence d'angle de la lumière sur une image lors de l'acquisition RTI d'une surface . . . . .	39
2.10	Schéma de plusieurs acquisitions RTI avec des niveaux de focalisation différents .	40
2.11	Le système RTI développé au laboratoire ImViA pour les besoins de recherche en imagerie de l'apparence. . . . .	41
2.12	Système anti-vibration du système RTI . . . . .	42
2.13	Moteurs des axes $\theta$ et $\phi$ de la source de lumière . . . . .	43
2.14	Moteurs des axes du $Z$ , du focus et du zoom du système optique . . . . .	43
2.15	Décomposition du code en méthodes/fonctions élémentaires . . . . .	44
2.16	Indépendance et communication entre les élément du code . . . . .	45
2.17	Les interfaces des différents module du logiciel . . . . .	48
2.18	Représentation des modalités d'acquisition RTI et de leurs appels successifs lors d'une acquisition. Une nouvelle modalité d'acquisition peut être insérer dans le processus d'acquisition. . . . .	51
3.1	Exemples d'images extraites d'acquisitions RTI pour trois angles d'illumination, sur des échantillons de surfaces manufacturées de papier et de matériau métallique (acier brossé), (Camera monochromatique 12.4 MPix - Temps d'exposition ( $E_t$ ) = 60ms), avec coloration des pixels sous exposés (en bleu) ou saturés (en rouge) . . . . .	54
3.2	Limitation dynamique <i>intra-pixels</i> : représentation du pourcentages de points non mesurés lors d'acquisitions RTI (149 positions angulaires d'aquisition réparties de façon homogène dans l'espace $(\theta, \phi)$ ) . . . . .	55

3.3	RTI - Limitation de la dynamique <i>intra-image</i> : exemples d'images extraites d'une acquisition RTI sur une surface horlogère anisotrope dont l'orientation principale de la texture est variable . . . . .	56
3.4	RTI - Limitation de la dynamique <i>intra-image</i> : Représentation du pourcentage de points non mesurés pour l'ensemble des directions d'illumination de l'acquisition . . . . .	56
3.5	Cartes des pentes en X dérivées à partir d'acquisitions RTI d'un échantillon métallique capturé à différents temps d'exposition ( $E_t$ ). . . . .	57
3.6	Représentation schématique de la différence entre la méthode LDR et HDR lors de la mesure de la dynamique d'une scène . . . . .	58
3.7	Méthode HDR : Représentation schématique des deux principales approches . . . . .	59
3.8	Méthode HD-RTI : Flow-chart général . . . . .	60
3.9	Schéma d'une CRF et d'un histogramme cumulé . . . . .	63
3.10	Fonctions de poids . . . . .	65
3.11	Échantillons <i>Surf-[1-4]</i> - Surfaces d'évaluation . . . . .	66
3.12	Distribution du ratio dynamique au niveau des pixels de <i>Surf-4</i> . . . . .	68
3.13	Comparaison des données LD-RTI brutes et de des données HDR-RTI avec mappage de ton (logarithme de l'intensité) pour la direction de la lumière ( $\theta, \phi$ ), des surfaces <i>Surf-[1-4]</i> . . . . .	70
3.14	Comparaison des valeurs de réflectance angulaire, mesurées pour la direction de la lumière ( $\theta, \phi$ ), à partir des surfaces <i>Surf-[1-4]</i> . . . . .	71
3.15	Ratios de luminance des acquisitions RTI et HD-RTI de surfaces fluoropolymères avec une réflectance de 99% et de 40% . . . . .	72
3.16	Flowchart - reconstruction d'apparence à partir de données HDR . . . . .	73
3.17	Comparaison entre (à gauche) les acquisitions brutes LD-RTI (vérité terrain) et (à droite) les images reconstruites avec la méthode DMD, à partir des acquisitions HD-RTI. . . . .	74
3.18	RTI <i>vs</i> HD-RTI - Cartes de saillance et leurs histogrammes associés . . . . .	76
4.1	Description d'une acquisition RTI et les différents type de descripteurs . . . . .	80
4.2	Représentation du cadran de montre avec des rayures normalisées. Le rectangle rouge représente la zone d'acquisition . . . . .	81
4.3	Caractérisation d'une acquisition RTI en utilisant les descripteurs locaux . . . . .	81
4.4	Cartes des descripteurs de réflectance angulaire locaux dérivés à partir des données brutes d'acquisition RTI(Surface d'application - Cadran de montre avec micro-scratches, ( $E_t = 125ms$ ) . . . . .	84
4.5	Cartes des descripteurs de réflectance angulaire locaux dérivés à partir des données brutes d'une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ ) . . . . .	86
4.6	Cartes des coefficients modaux PTM à partir d'une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ ). . . . .	89
4.7	Cartes des coefficients modaux HSH à partir d'une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ ). . . . .	90
4.8	Cartes des coefficients RBF (Fonction radiale gaussienne) à partir d'une acquisition RTI sur la surface horlogère d'illustration ( $E_t = 125ms$ ). . . . .	92
4.9	Cartes des coefficients issus de la modélisation DMD à partir d'une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ ) . . . . .	94
4.10	Cartes des normales locales (cartésienne) d'une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ ) . . . . .	96

4.11	Cartes des normales locales angulaire d'une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ ) . . . . .	97
4.12	Cartes des pentes locales d'une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ ) . . . . .	98
4.13	Cartes des courbures locales directionnelles d'une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ ) . . . . .	99
4.14	Schéma des formes des courbures directionnelles . . . . .	99
4.15	Cartes des courbures minimales et maximales locales d'une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ ) . . . . .	100
4.16	Classification des formes de courbure selon [Roberts 01] . . . . .	101
4.17	Cartes des courbures locales d'une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ ) . . . . .	101
4.18	Classification des formes de courbures selon $K_S$ et $K_C$ [Aguilar Gutierrez 18] . . . . .	102
4.19	Images des surfaces <i>Surf-[1-2]</i> qui composent la base de donnée . . . . .	103
4.20	Descripteurs locaux estimés à partir des acquisitions RTI sur l'échantillon <i>Surf-1</i>	104
4.21	Descripteurs locaux estimés à partir des acquisitions RTI sur l'échantillon <i>Surf-2</i>	105
5.1	Schéma de la distance de Mahalanobis . . . . .	109
5.2	Cartes de saillance dérivées d'une acquisition RTI ( $E_t = 125ms$ ) sur un cadran horloger poli avec micro-scratches de différentes amplitudes . . . . .	109
5.3	Schéma de la saillance visuelle multi-niveau . . . . .	110
5.4	Carte de saillance multi-niveaux estimé avec $\mu[X]$ calculé à partir d'une acquisition RTI d'un cadran horloger avec micro-scratches . . . . .	111
5.5	Schéma de la saillance visuelle multi-échelle . . . . .	112
5.6	Cartes de saillance multi-échelle estimées avec $\mu[X]$ calculé à partir d'une acquisition RTI du cadran de montre. . . . .	113
5.7	Cartes de saillance multi-niveau et multi-échelle estimé avec $\mu[X]$ calculé à partir d'une acquisition RTI du cadran de montre . . . . .	114
5.8	Schéma des différents types de rupture . . . . .	114
5.9	Acquisitions macro et micro HD-RTI d'une paire de surfaces de rupture d'assemblages collés expérimental . . . . .	116
5.10	Initialisation de la segmentation : Les classes bleues et vertes sont associées à un faciès de rupture adhésive ( $A_1$ est identifié comme substrat métallique et $A_2$ comme matériau adhésif). $C$ correspond à un mode de rupture cohésif . . . . .	117
5.11	Cartes de saillance estimées à partir des descripteurs locaux d'une acquisition HD-RTI sur la surface de rupture d'un assemblage collé . . . . .	117
5.12	Segmentation de la classe $C_1$ sur $S_T$ (Substrat métallique - Fracture adhésive) . . . . .	119
5.13	Segmentation de la classe $C_1$ sur $S_B$ (Substrat métallique - Fracture adhésive) . . . . .	119
5.14	Segmentation, basée sur le RTI, sur <i>Surf-Top</i> et <i>Surf-Bottom</i> ; Les pixels rouges sont associés à la classe $C_1$ (substrat métallique-fracture adhésive), les jaunes à $C_2$ (matériau adhésif-fracture adhésive), violets à $C_4$ (poche d'air/perte de matériau) et les pixels non colorés à $C_3$ (fracture cohésive) . . . . .	120
5.15	Données RTI brutes des états de surface obtenus par un procédé de fraisage en bout provenant d'un ensemble de surface pour le contrôle de la rugosité (Rubert n°130); $\theta = 80^\circ$ ; $\phi = 72^\circ$ . . . . .	121
5.16	Carte de distance de Mahalanobis calculée avec les descripteurs géométriques entre les surfaces provenant de l'ensemble Rubert n°130 . . . . .	122

- 
- 5.17 Cartes de distances estimées avec  $\mu, \sigma, \beta_1, \beta_2$  et  $H$  calculées à partir des reconstructions de reflectance angulaire d'une acquisition RTI (matrice de Macbeth) . 124
- 5.18 Cartes de distances estimées avec  $\mu, \sigma, \beta_1, \beta_2$  et  $H$  calculées à partir des reconstructions de reflectance angulaire d'une acquisition RTI (surface métal brossé) . 124



## Liste des tableaux

1.1	Exemple de grille de décision pour l'inspection visuelle d'un briquet . . . . .	14
3.1	Moyenne ( $\mu$ ) et écart type ( $\sigma$ ) des indicateurs d'acquisitions HD-RTI sur les 20 régions de chaque échantillons de surface <i>Surf-[1-4]</i> . . . . .	67
3.2	Indicateurs de ratio dynamique RTI <i>vs</i> HD-RTI des 20 régions de chaque surfaces <i>Surf [1-4]</i> . . . . .	68
3.3	Erreur absolue moyenne entre les données brutes LDR acquises (vérité terrain) et les images reconstruites à différents $E_t$ des acquisitions HD-RTI (en niveaux de gris)	75
5.1	Les 5 meilleurs valeurs de $K_g$ dans le cas du SFE . . . . .	115
5.2	Les 5 moins bonnes valeurs de $K_g$ dans le cas du SFE . . . . .	115





## Liste des algorithmes

1	HD-RTI Algorithm . . . . .	62
2	Segmentation d'un SFE . . . . .	118



## Notations

- $C_V$  Coefficient de variation. 84, 86, 104
- $K_C$  Curvedness (magnitude de la courbure). xii, 102
- $K_G$  Courbure Gaussienne. 100–102, 115
- $K_{max}$  Courbure maximale. 98, 100, 102, 103, 105, 115
- $\vec{K}_{max}$  Direction de la courbure maximale. 98, 100
- $K_M$  Courbure de Mehlum. 100, 101, 115
- $K_{min}$  Courbure minimale. 98, 100, 102, 115
- $\vec{K}_{min}$  Direction de la courbure minimale. 98, 100
- $K_\mu$  Courbure moyenne. 100–102, 115
- $K_S$  Shape index (Forme de la courbure). xii, 102
- $K_{xx}$  Courbure correspondant à la dérivé de  $D_x$  selon l'axe  $X$ . 97–99
- $K_{xy}$  Courbure correspondant à la dérivé de  $D_x$  selon l'axe  $Y$  ou  $D_y$  selon l'axe  $X$ . 97–99
- $K_{yy}$  Courbure correspondant à la dérivé de  $D_y$  selon l'axe  $Y$ . 97–99
- $C_2$  Coût d'acceptation de pièces défectueuses. 10
- $C_1$  Coût de sur-qualité. 10
- $C_T$  Coût total/heure. 10
- $C_3$  Coût travail/heure. 10
- $K_1$  Critère de discrimination. 115, 118
- $K_g$  Critère de pertinence. xv, 115, 117, 118
- $K_2$  Critère d'homogénéité. 115, 118
- $\sigma$  Ecart-type. 64, 82, 84, 115
- $K_{eig}$  Valeur propre. 99, 100
- $\vec{K}_{eig}$  Vecteur propre. 99, 100
- $H$  Entropie de Shannon. 115
- $P_2$  Probabilité de faux négatif (non détection). 10
- $P_1$  Probabilité de faux positif (fausse alarme). 10

- $w$  Fonction de poids. 61, 65
- $\beta_2$  Kurtosis. 83, 84
- $Mo$  Mode. 85
- $E_c^n$  Moment centré d'ordre  $n$ . 82
- $E_{cr}^n$  Moment centré réduit d'ordre  $n$ . 82
- $E_o^n$  Moment ordinaire d'ordre  $n$ . 82
- $\mu$  Moyenne arithmétique. 64, 82, 84, 105, 115
- $N_P$  Nombre de pièces inspectées/heure. 10
- $\vec{N}$  Normales. 95, 96
- $\hat{N}$  Normales dans l'espace angulaire. 97
- $N_\phi$  Composante  $\phi$  des normales dans l'espace angulaire. 95, 97, 100, 104
- $N_\theta$  Composante  $\theta$  des normales dans l'espace angulaire. 95, 97
- $\vec{N}_x$  Composante  $X$  des normales. 95–97
- $\vec{N}_y$  Composante  $Y$  des normales. 95–97
- $\vec{N}_z$  Composante  $Z$  des normales. 95–97
- $N$  Nombre d'image. 65
- $D$  Intensité de la pente. 96–98
- $D_x$  Pente selon l'axe  $X$ . 95–98
- $D_y$  Pente selon l'axe  $Y$ . 95, 97, 98
- $\phi$  Angle d'élévation. x, xi, 24, 25, 27, 28, 37–39, 42, 43, 46, 49, 55, 62, 64–66, 70, 71, 73, 75, 81, 85, 87, 88, 92, 93, 95, 102
- $P_g$  Probabilité d'avoir des pièces acceptables. 10
- $P_c$  Probabilité cumulée d'un ensemble. 84, 85
- $Q_{(p/q)}$  P-ième quantile. 84
- $Ra$  Moyenne arithmétique de la rugosité. 16, 102
- $D_R$  Ratio dynamique. 85, 86
- $r_S$  Pourcentage de pixels non mesurés. 54
- $Rz$  Rugosité maximale. 16, 102
- $T_{noi}$  Niveau de bruit. 62–64
- $T_{sat}$  Niveau de saturation. 62–64
- $\beta_1$  Skewness. 83, 84
- $E_t$  Temps d'exposition de la caméra. xi, xii, xv, 57, 60–65, 70, 71, 73–75, 84, 86, 89, 90, 92, 94, 96–101
- $E_s$  Temps d'exposition plus court. 63, 64
- $E_l$  Temps d'exposition plus long. 63, 64
- $\theta$  Angle azimuth. x–xii, 24, 25, 27, 28, 34, 37–39, 42, 43, 46, 49, 55, 62, 64–66, 70, 71, 73, 75, 81, 87, 88, 92, 93, 95, 102, 121
- $Z$  Altitude. x, 42, 43, 46, 49–51, 95

## Préambule

La prise en compte de la perception de l'apparence des produits manufacturés est aujourd'hui devenue un levier de valeur ajoutée important pour de nombreuses industries. En effet, les entreprises ont souvent atteint une maturité élevée sur le plan des aspects techniques et technologiques liés aux produits et aux process. La maîtrise du ressenti et de la perception des produits constitue ainsi un facteur de différenciation important. Ceci est d'autant plus important alors que l'on observe que le consommateur est de plus en plus attentif à l'aspect des produits, étant souvent dans l'incapacité d'évaluer les performances intrinsèques fonctionnelles et technologiques de produits de plus en plus complexes. C'est donc souvent à travers la qualité d'aspect que le client évalue les qualités fonctionnelles techniques des produits, à défaut de pouvoir les juger objectivement.

Dans le cadre industriel, plusieurs méthodes ont été mises en œuvre afin de prendre en compte cet enjeu de la maîtrise de l'apparence des surfaces, tout au long du cycle produit, de la conception initiale aux étapes de finition. L'approche la plus fréquente consiste à opérer une ou plusieurs étapes de contrôle de la qualité d'aspect des produits, en mettant en œuvre une analyse sensorielle visuelle, parfois visuo-tactile (on parle dans ce dernier cas de contrôle haptique). Cette approche sensorielle est toujours aujourd'hui la référence, même si elle est couteuse et complexe à mettre en œuvre de façon performante : il est en effet nécessaire d'appréhender les processus complexes de la perception visuelle afin de formaliser et de développer des méthodologies adaptées. Ce processus est complexe car il met en œuvre également des aspects cognitifs qui sont propre à chacun, et ces évaluations sensorielles sont donc intrinsèquement et inévitablement subjectives. Ainsi, pour une surface ou un état de surface, les perceptions peuvent varier de façon significative ce qui complique le pilotage des processus de production.

L'approche instrumentale, qui vise à mettre en œuvre une mesure physique de l'apparence des surfaces, est une autre façon de tenter de répondre à cet enjeu. Cette approche s'inscrit pleinement dans la philosophie de la démarche de *l'Industrie du Futur*, aussi appelée Industrie 4.0, et est en constant développement. En effet, l'idée de mettre en œuvre une numérisation de l'apparence des surfaces permet d'envisager la possibilité de pouvoir quantifier objectivement les attributs d'apparence et *in fine*, permettre le pilotage fonctionnel des processus de fabrication et de finition de surfaces. Les enjeux associés à la numérisation de l'apparence des surfaces sont donc d'une grande importance, mais les défis scientifiques et techniques associés à la mesure physique de l'ap-

parence sont nombreux et conséquents. Les travaux présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans ce contexte et ont été menés avec l'objectif d'apporter des éléments de réponse à ces défis scientifiques, techniques et technologiques. Ils concernent particulièrement une technique d'imagerie de la réflectance appelée *Reflectance Transformation Imaging*, qui après avoir connu un développement important dans le domaine du patrimoine culturel et historique se déploie progressivement dans le domaine industriel. Nous montrons comment il est possible d'apporter des réponses et de proposer des évolutions par rapport aux limites de la technique RTI, afin de permettre une caractérisation fine et robuste de l'apparence des surface et des états de surface.

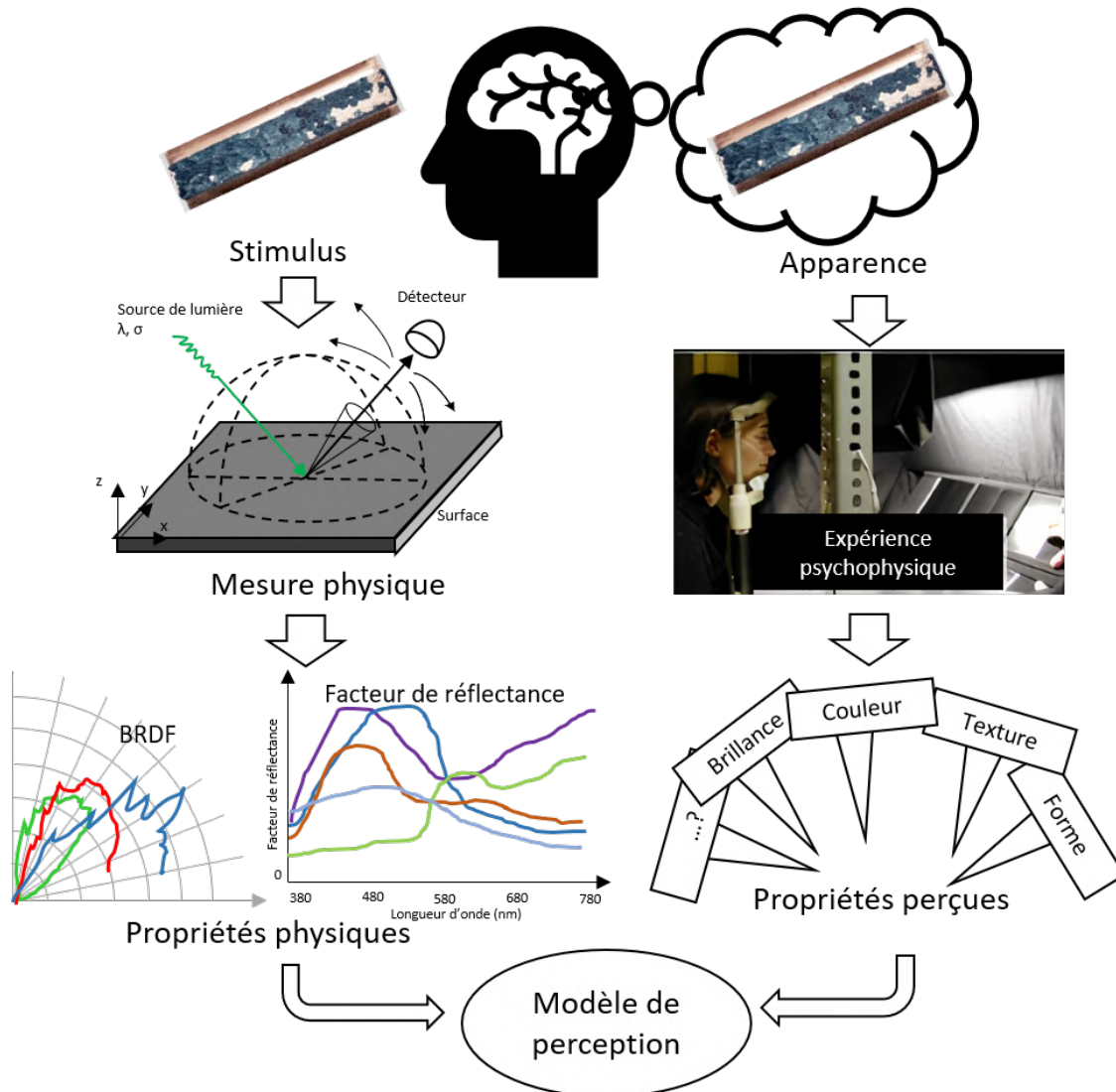


Figure 1 – De la perception vers la mesure physique de l'apparence : modèles de perceptions, selon [Obein 18]

Par ailleurs, un enjeu important est de lier les deux approches évoquées précédemment (sensorielles et instrumentales). Cet enjeu est illustré dans le graphique de la figure 1 extrait de l'Habilitation à Diriger les Recherches de Mr Gaël Obein [Obein 18], enseignant chercheur au CNAM. Bien que les quantités que mesurent les systèmes instrumentaux font intrinsèquement partie, et donc influent sur la perception des surfaces, l'apparence forme un tout, et sa décomposition en quantités physiques mesurables ne permet pas forcément de faire le lien directement avec la perception. La construction de modèles de perception et de métriques psychophysiques est donc une nécessité, ainsi que la prise en compte des aspects multi-échelles (échelles de mesure et échelles de caractérisation), pour faire le lien entre les grandeurs physiques mesurées et les grandeurs perçues évaluées au travers d'expériences psycho-métriques. Cet enjeu particulier fait l'objet d'un autre axe de recherche du projet ANR NAPS (doctorat de Mlle Abir Zendagui).

## Structure du manuscrit

Ce manuscrit est organisé selon la structure suivante. Le chapitre 1 présente un état de l'art des différentes approches existantes associées à la mesure et à l'analyse de l'aspect des surfaces. Dans une première partie, nous décrivons l'approche sensorielle humaine, très répandue dans l'industrie et qui constitue aujourd'hui la référence en terme d'évaluation de la qualité d'aspect. Nous décrivons ensuite différentes approches alternatives à l'approche sensorielle basées sur des mesures instrumentales. Nous séparons les techniques instrumentales en deux catégories méthodologiques. Les *approches géométriques* consistent à mesurer la micro-géométrie des surfaces, afin de permettre de simuler ou estimer l'apparence de la surface inspectée en appliquant des modèles de réflexion. Les approches *photométriques* sont plus directes dans le sens où elles sont basées sur la mesure de la réponse de la surface à un stimulus lumineux : on cherche alors à évaluer directement l'interaction surface/lumière qui détermine l'apparence des surfaces. Un focus particulier est fait sur la technique RTI, autour de laquelle sont basés ces travaux.

Un axe important de ces travaux est lié à l'acquisition des données de *Reflectance Transformation Imaging*. En effet, de nombreux défis et verrous scientifiques sont associés à la mesure de l'apparence des surfaces. Nous montrons dans le chapitre 2 comment nous avons pu apporter des éléments de réponse aux enjeux liés à l'acquisition de données RTI. Nous avons développé un dispositif de numérisation de l'apparence innovant, afin de répondre aux besoins expérimentaux et tester/valider nos approches. Les aspects de développements logiciels associés à ce dispositif sont également présentés. Le système proposé a été conçu autour de 5 axes motorisés associés aux degrés de libertés nécessaires à l'acquisition des données et à leur automatisation, afin de permettre une grande flexibilité dans les paramètres de mesure. Nous montrons également comment les nouvelles modalités d'acquisition RTI que nous proposons ont été implémentées dans le dispositif et mises en œuvre. Concernant l'aspect logiciel, un interface de pilotage des acquisitions et de pré-traitement/visualisation des résultats a été entièrement développé, dans une optique d'efficacité (optimisation du temps de mesure) et d'automatisation afin d'assurer une bonne répétabilité et robustesse des résultats obtenus. Les méthodes associées aux différentes modalités que nous proposons sont détaillées dans les chapitres suivants. Dans le cadre de ces développements, notre démarche a souvent visé à développer des mesures adaptatives : les méthodologies proposés ne concernent ainsi pas uniquement le post-traitement des données mais interviennent dès l'acquisition des données afin d'optimiser la qualité et la quantité des données à acquérir (approche système).

Une des contributions importantes de ces travaux est liée à l'ajout d'une nouvelle modalité d'ac-



quisition RTI appelée HD-RTI. Cette modalité est basée sur la mise en oeuvre d'un couplage entre la technique HDR (High Dynamic Range) et la technique d'imagerie RTI. L'objectif recherché est d'aller vers une meilleure mesure du phénomène physique en permettant d'estimer la dynamique complète de la réponse de réflectance angulaire locale (en chaque point) des surfaces. En effet, nous avons constaté que le choix du réglage du temps d'exposition induisait des fortes variations sur les caractéristiques surfaciques (géométrie) et de réflectance (photométrie) estimées à partir des acquisitions RTI, ce qui altère la qualité métrologique des données estimées, notamment à des fins de caractérisation. De plus, une application importante de cette technique dans le contexte industriel est de permettre l'évaluation des anomalies locales (rayures par exemple). Ces anomalies peuvent souvent générer de fortes intensités, et donc dans le cas d'une acquisition RTI conventionnelle une saturation de l'information qui ne permet plus d'évaluer leur criticité, et donc de les discriminer. La méthode HD-RTI proposée vise aussi à répondre à cet enjeu particulier, en mettant en oeuvre un couplage auto-adaptatif des techniques HDR et RTI. Nous présentons dans ce chapitre (chapitre 3) la méthodologie associée à l'ajout de cette nouvelle modalité d'acquisition RTI, et nous montrons comment cette modalité peut permettre une meilleure caractérisation des surfaces mesurées.

Un autre enjeu est lié à l'usage de la technique RTI pour la caractérisation de l'apparence des surfaces manufacturées. En effet, historiquement, cette approche était uniquement destinée à permettre la reconstruction de l'apparence avec un éclairage virtuel, typiquement de façon dynamique, en faisant varier l'orientation de la source d'éclairage par simulation numérique. Cet usage reste important dans différents domaines d'applications. Dans le domaine industriel il permet par exemple d'apporter aux experts sensoriels une aide à l'inspection des surfaces, en permettant d'automatiser certains paramètres du contrôle d'aspect comme le parcours et la vitesse d'exploration, et ainsi d'augmenter la répétabilité des résultats obtenus. L'enjeu de la caractérisation consiste à aller plus loin que cet usage initial en proposant une méthodologie pour extraire des caractéristiques objectives de la surface (géométrie) et/ou de son comportement photométrique. Nous présentons dans ce chapitre (chapitre 4) comment ces caractéristiques, que nous appelons descripteurs, peuvent être générées et cartographiées à partir d'acquisitions RTI.

Enfin, nous présentons dans le chapitre 5 une dernière contribution, d'ordre méthodologique (post-traitement des données), associée à l'estimation de la saillance visuelle à partir de données d'acquisition RTI. En effet, les cartographies de saillance visent à répondre à un enjeu important pour les industriels, précédemment évoqué, qui est de permettre de mieux détecter, mais aussi d'évaluer la criticité des anomalies d'aspect. Nous montrons comment, à partir d'une analyse multivariée et multi-échelle des descripteurs préalablement extraits des acquisitions RTI (chapitre 4) il est possible de déterminer la saillance locale des points/pixels de la surface inspectée de façon performante. Cette approche est ensuite étendue à l'analyse d'*anomalies globales*, c'est à dire la cartographie de la distance en terme d'apparence entre un (ou plusieurs) états de surface et un état de surface référence. Ces cartographies permettent de quantifier de façon fonctionnelle la distance entre deux surfaces, c'est à dire ici en terme d'apparence globale. Elles répondent ainsi à un enjeu pour le pilotage des processus de fabrication et de finition de surfaces, qui est d'être capable de discriminer et d'évaluer des écarts en terme d'apparence entre surfaces.

## Mesurer l'apparence des surfaces

### *Objectif du chapitre*

*Ce chapitre introduit la notion d'apparence en fournissant une définition et les différentes méthodes de mesure des caractéristiques d'apparence. Un état de l'art des méthodes de mesure sensorielle ou instrumental est proposé afin de comprendre leurs approches et leurs évolutions. Enfin, la méthode de mesure de l'apparence utilisée dans ce document, la Reflectance Transformation Imaging (RTI), est présentée ainsi que les différentes voies d'amélioration de cette technique.*

## 1 Introduction

*Tant que nous n'avons pas les éléments pour juger de ce que les choses sont en soi, nous devons presque nécessairement commencer par de telles comparaisons des sensations et de l'apparence.*

[ PHÉNOMÉNOLOGIE - J.-H. LAMBERT ]

§4

La prise en compte de la perception de l'apparence devient essentielle à l'industrie afin d'ajouter de la valeur aux produits. La maîtrise des aspects techniques et fonctionnels étant assez mature, les entreprises doivent se différencier par leur maîtrise de la perception visuelle de leurs produits. Dans le cadre industriel, la maîtrise de l'aspect des surfaces se trouve dorénavant dans tout le processus de création d'un produit : de la conception à la mise sur le marché en passant par le développement et la fabrication. Cette maîtrise de la fonction aspect se traduit par la mise en œuvre d'approches telle que le design sensoriel lors de la conception. Ces approches ont en commun de vouloir mesurer l'apparence produite par le sensoriel, c'est la métrologie sensorielle [Guerra 08, Guerra 09, Baudet 11, Baudet 12]. Pour un utilisateur final, l'apparence d'une surface

est essentielle. Elle permet à l'observateur de se construire un jugement sur les propriétés de la surface étudiée et influe alors sur l'appréciation et la décision du consommateur. En effet, à défaut de pouvoir juger objectivement la qualité de fabrication ou technologique, l'utilisateur déduit, à partir de la valeur esthétique de la surface, la qualité fonctionnelle du produit. Ainsi l'élaboration des critères de choix est influencée par l'apparence perçue. Or certaines industries sont orientées vers la manufacture de produit à haute valeur ajoutée. La maîtrise de qualité d'aspect des surfaces manufacturées est donc fondamentale pour celles-ci. Ceci est vrai, notamment, dans l'industrie du luxe (horlogerie, joaillerie,...), du cosmétique, de l'emballage, de l'aéronautique ou encore de l'automobile. De plus cette problématique de maîtrise de l'apparence des surfaces concerne aussi des domaines sociaux et sociétaux tels que le domaine de la conservation du patrimoine naturel ou culturel, où les besoins en terme de numérisation de l'apparence sont croissants [Degrigny 16, Christian 17].

Dans ce chapitre nous allons définir la notion d'apparence (section 2). Les sections 3 et 4 décrivent respectivement les approches sensorielles et instrumentales permettant de mesurer des attributs d'apparence. La première approche consiste à contrôler le plus possible de facteurs qui influencent l'analyse sensorielle afin de la rendre la plus robuste possible tout en préservant les avantages du système visuel humain. La seconde approche consiste à reproduire les différentes étapes du processus tels que l'acquisition, le traitement, la reconnaissance ou la discrimination des attributs d'apparence. Enfin l'approche photométrique, et notamment un état de l'art de la méthode d'imagerie RTI (Reflectance Transformation Imaging), est présentée dans la Section 5.

## 2 Définition de l'apparence

La perception est essentiellement une fonction cognitive d'interprétation des informations sensorielles reçues par des stimulus externes. La perception de l'apparence d'une surface est donc le résultat de nombreux processus d'une grande complexité. D'une part, il y a les phénomènes multiphysiques qui concernent l'interaction entre la surface observée et son environnement lumineux. D'autre part, les processus liés au système visuel humain ajoutent un aspect cognitif. En effet, les photons en atteignant les rétines de l'observateur sont traduits en signaux avant d'atteindre le cerveau, où l'information va être traitée et analysée. Plusieurs facteurs peuvent alors modifier l'apparence perçue par l'observateur. D'une part l'environnement lumineux, la micro-géométrie ou encore les matériaux de la surface observée vont influencer la nature des photons. D'autre part la condition physique et psychologique de l'observateur vont modifier son analyse de la surface. Son expérience visuelle et cognitive va participer à l'évaluation finale des nombreux signaux reçus lors de l'observation. Ils vont organiser et transformer l'information en une perception complexe dans laquelle plusieurs propriétés, ou attributs d'apparence, seront reconnues et discriminées [Bagot 99] (voir Figure 1.1).

La Commission International de l'Eclairage (CIE) dans sa définition de l'apparence des objets [Obein 15] définit les attributs d'apparence. Ils correspondent à la couleur, la texture, la brillance ou encore la translucidité d'une surface (Figure 1.2). Ces attributs permettent de décrire une surface et donc de différencier, relativement à ces attributs, des surfaces entre elles. De plus, d'autres attributs d'apparence peuvent être construits à partir des attributs fondamentaux afin d'affiner la description des surfaces. Ces attributs d'apparence peuvent être spécifiques à certaines surfaces ou processus industriels de fabrication et finition : l'impression de netteté, la perception de la densité d'une texture, ou encore la sensation visuelle de piqué ou de vivacité. La perception visuelle de l'apparence des surfaces est un processus subjectif, complexe et inconscient. Ce processus dépend de divers facteurs tels que le passif de l'observateur (ses connaissances antérieures, son expérience),

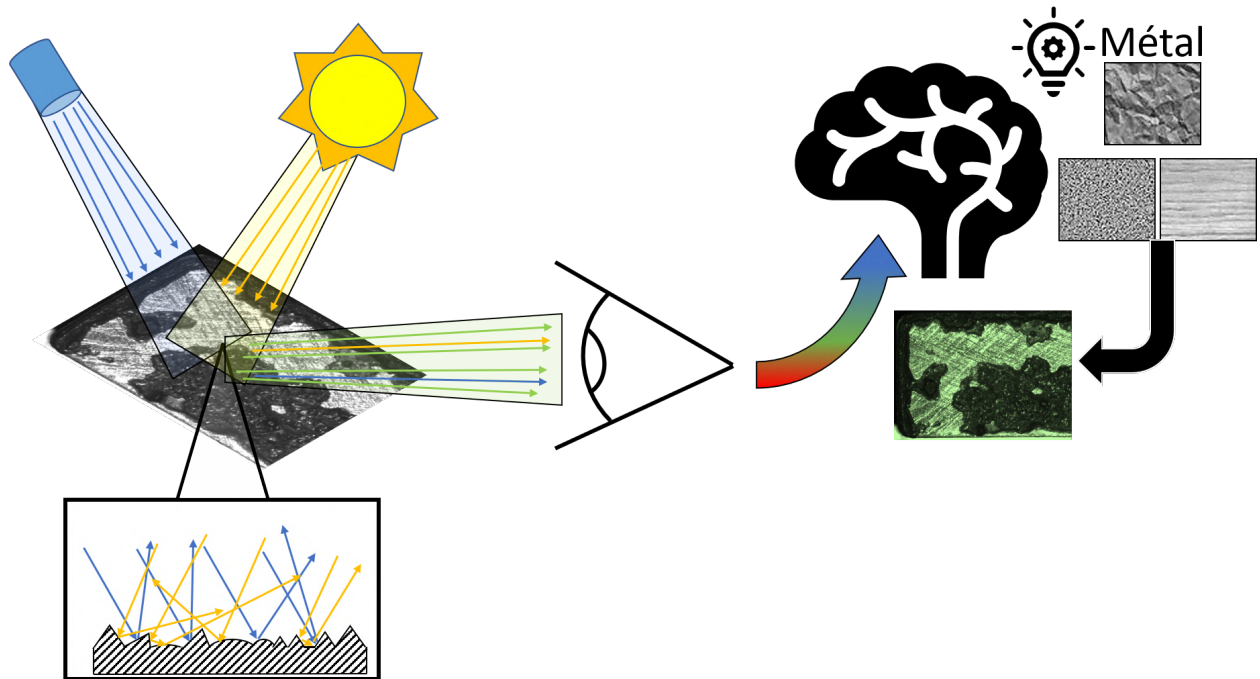


Figure 1.1 – Schéma du processus de la perception de l'apparence et de l'influence de l'expérience de l'observateur dans la compréhension de la scène

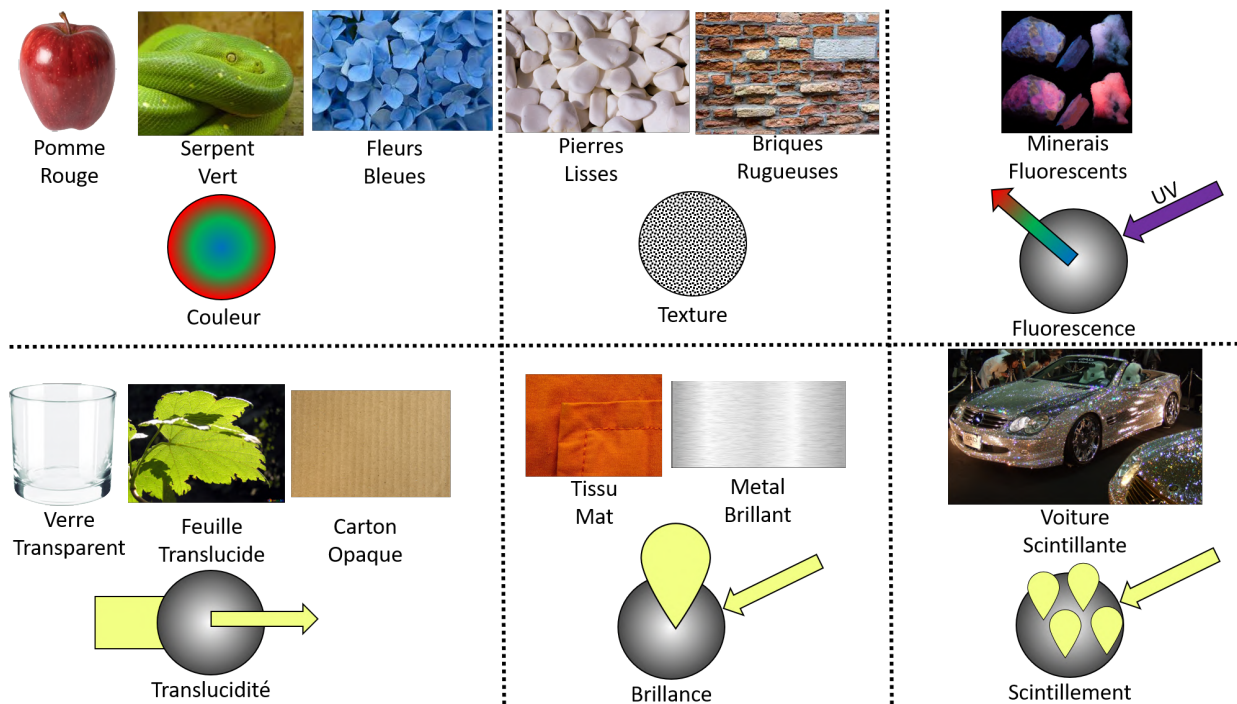


Figure 1.2 – Exemples d'attributs d'apparence

de sa condition physique (fatigue, maladie, acuité visuelle) mais aussi de ses tâches en cours (les objectifs, les attentes et les émotions). Dans le cadre d'un contrôle qualité visuel dans l'industrie (contrôle viso-tactile humain) l'approche sensorielle est l'approche la plus fréquente et est encore aujourd'hui la référence ... d'évaluation de la qualité des surfaces manufacturées. Nous décrivons le concept et principe généraux de cette méthodologie dans la Section 3 de ce chapitre.

### 3 Approche sensorielle

#### 3.1 Les facteurs de variabilité

Le contrôle visuel est important dans les processus de fabrication des surfaces car il permet de garantir la qualité de l'aspect des surfaces produites. Il peut être réalisé à différentes étapes du processus de fabrication. L'opérateur est chargé de vérifier si l'apparence du produit correspond à l'apparence attendue. Ce contrôle visuel est donc un contrôle sensoriel qui met en jeu la vue. La difficulté principale de ce type d'approche est que les résultats obtenus peuvent manquer de robustesse. En effet, la perception humaine évalue la qualité sensorielle des produits avec des grandeurs non "mesurables". Cela introduit de la subjectivité dans le contrôle et les résultats peuvent varier. Ils peuvent aussi varier entre plusieurs opérateurs dont la perception de l'apparence de la surface n'est pas la même, mais aussi pour un même contrôleur, selon son état physique et psychologique, qui peut influencer sur l'étape du traitement de l'information acquise par son système oculaire. Il ne pourra parfois pas reproduire la même évaluation sans variation dans ses résultats.

De nombreux facteurs influent le processus de l'analyse des surfaces, une classification de ces facteurs selon la méthode des 5M est proposée dans la Figure 1.3 [Debrosse 10].

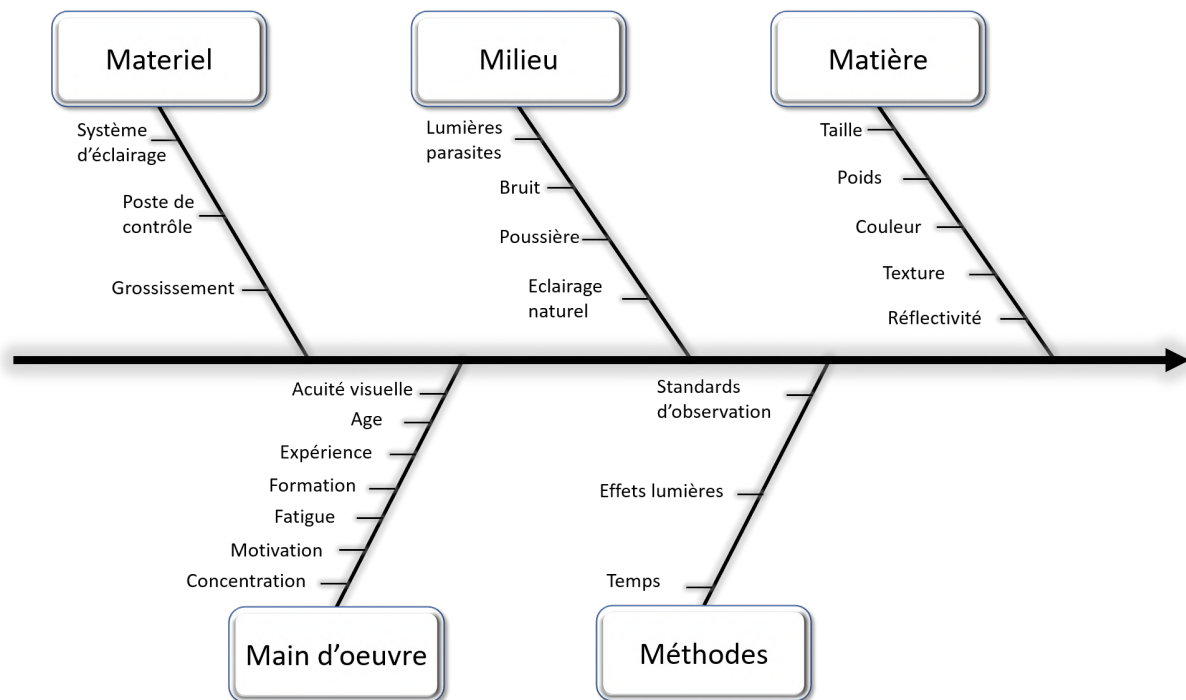


Figure 1.3 – Schéma des différents facteurs d'influence lors d'une analyse sensorielle, selon [Debrosse 10]

Il existe des études [Megaw 79] sur les différents facteurs ainsi que des référentiels de bonnes pratiques [BPX 06] qui fournissent des préconisations pour l'inspection visuelle dans le cadre industriel. Nous détaillons ici certains de ces facteurs :

1. L'acuité visuelle (main d'oeuvre) - L'acuité visuelle d'un contrôleur est bien sûr essentielle au bon déroulé d'une analyse sensorielle visuelle d'une surface. L'opérateur ne doit pas seulement posséder une bonne acuité visuelle statique [Megaw 79, Gallwey 82]. En effet, certains attributs de surface dépendent d'une variation spatiale et/ou angulaire de la luminance de la surface. Cette variation est dynamique, l'opérateur doit alors posséder une bonne acuité visuelle dynamique faisant appel à la vision périphérique du système visuel humain [Nelson 69]. Cette

acuité visuelle peut varier avec le temps, il est donc nécessaire de contrôler les performances de l'opérateur régulièrement.

2. Les conditions d'éclairage (milieu/matériel/méthodes) - Lors d'une analyse sensorielle visuelle l'ergonomie du poste de contrôle de l'opérateur est un facteur important. En effet, c'est dans celui-ci que sont éclairées les différentes surfaces à analyser. Il permet en outre de maîtriser l'environnement notamment l'éclairage général durant l'inspection (technologie, homogénéité, longueur d'onde, positions, etc). Or l'éclairage influe sur deux aspects du contrôle : d'une part, la fatigue de l'opérateur [Ferguson 74], d'autre part, les performances du contrôle visuel. Afin de contrer la fatigue de l'opérateur, un éclairage qui préserve le contrôleur de la lumière directe est recommandé. Concernant les performances du contrôle visuel, plusieurs méthodes peuvent être mises en place. L'une d'elle propose d'utiliser un éclairage puissant afin d'augmenter le contraste de la surface à inspecter [Blackwell 59]. D'autres techniques d'éclairage intéressantes existent [Busin 12, Seulin 00, Aluze 98], notamment l'utilisation de plusieurs modalités d'éclairage et le changement de l'angle d'éclairage et d'observation de la surface [Guerra 08]. Certaines configurations particulières, illustrées dans la Figure 1.4, mettent en évidence certaines anomalies de surfaces qui ne sont visibles que pour un ensemble d'angles limités. La configuration de la "lumière blanche" est, par exemple, particulièrement efficace pour discriminer les irrégularités visuelles des surfaces. De plus, l'opérateur en cherchant à obtenir ces configurations spécifiques, est amené à parcourir un large éventail de scène d'observation, ce qui entraîne une meilleure robustesse de la détection lors du contrôle.

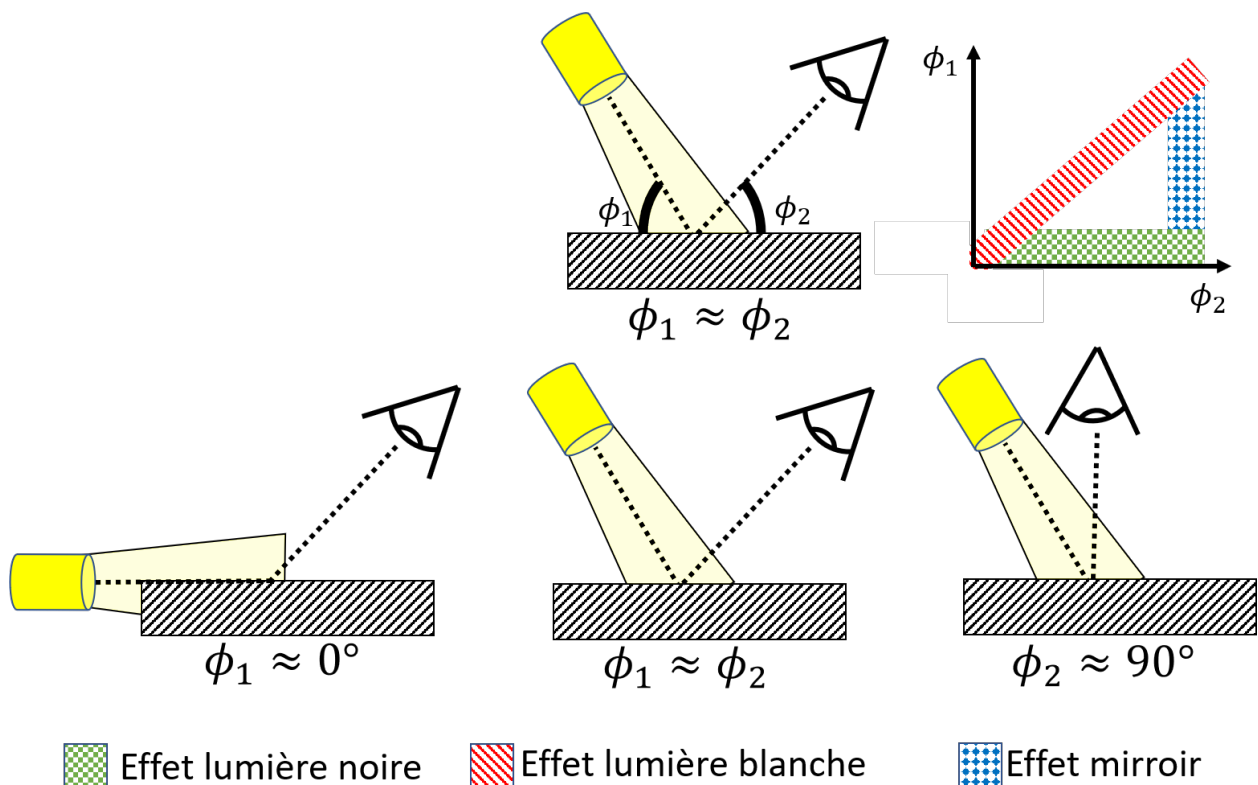


Figure 1.4 – Représentation des différents effets lumière recherchés lors de l'inspection visuelle des surfaces.

3. Le temps d'inspection (méthodes/moyen) - Lors d'un contrôle visuel d'une surface, le temps d'une analyse est un paramètre mais aussi une contrainte importante. Il existe une relation entre le temps du contrôle et la performance de l'analyse sensorielle visuelle de la surface

[Drury 73]. Or ce temps d'inspection peut être optimisé par une approche coût. Dans cette approche, la probabilité de résultats faux-positifs et faux-négatifs, leurs coût respectif, le coût du travail ainsi que la quantité de pièces sont pris en compte. A partir de ces paramètres peut être estimé un coût total afin d'optimiser l'opération de contrôle visuel des surface (Equation 1.1).

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

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

4. L'entraînement et le feed-back (méthodes) - Plus un opérateur est entraîné, plus les résultats de ses contrôles visuels peuvent être reproductibles [Wang 97]. De plus, la définition d'une stratégie d'exploration permet aussi d'améliorer la performance du contrôle visuel [Nickles 03]. En effet, l'opérateur maîtrise mieux le processus d'analyse sensorielle visuelle par l'entraînement, il connaît donc les priorités de détection (selon la topologie des anomalies ou les zones de la surface déterminées comme critiques).

De façon plus globale, l'environnement de contrôle est essentiel, en particulier les conditions d'éclairage qui peuvent faire varier la perception d'une surface. Un contrôleur peut observer une différence (ou en omettre une) à cause de l'éclairage utilisé pendant l'analyse sensorielle visuelle. Sans que la nature intrinsèque de la surface ne change, l'éclairage modifie la perception de l'opérateur. Cependant, l'éclairage n'est pas le seul facteur qui puisse compliquer la tâche du contrôleur. Les propriétés de la surface, telles que sa taille, sa texture ou encore sa réflectivité peuvent induire en erreur le contrôleur. De même les méthodes d'analyse peuvent altérer les résultats. En effet, si le chemin d'exploration est trop restrictif ou aléatoire, l'information pertinente peut ne pas être détectée. Enfin le contrôleur lui-même est un facteur à prendre en compte dans le processus d'analyse. D'une part l'acuité visuelle, comme expliqué précédemment, va influencer la reproductibilité de ses résultats. Si l'acuité visuelle d'un opérateur est trop différente des autres opérateurs alors ses résultats ne pourront être reproduits par ses pairs. D'autre part, la fatigue ou la concentration [Rensink 97] de l'opérateur influencent son jugement et donc sa répétabilité. Ainsi, un même opérateur ne pourra reproduire ses propres résultats si les contrôles d'une même surface sont séparés d'un temps long.

Après l'acquisition vient le traitement de l'information perçue. Cette étape subit aussi de multiples facteurs qui apportent de la variabilité. En effet, l'humain traite de façon subjective l'information acquise par ses sens en utilisant divers processus mentaux. L'expérience passée, les motivations, les besoins ou encore les valeurs de l'individu participent inconsciemment à l'interprétation des données sensorielles [Baudet 11]. D'autant que, la perception de l'apparence des surfaces peut être trompée par l'environnement de l'objet analysé. En effet, sans contraste de lumière, de couleur ou encore de formes, la forme ou encore la profondeur d'une scène ne peuvent être perçues. Ainsi, la perception finale d'un individu dépend aussi de l'organisation de la scène observée. Selon comment

sont disposés les couleurs, les contrastes et les formes, la scène peut être perçue différemment : c'est le cas des illusions optiques où le traitement de l'information visuelle dans son environnement nous induit en erreur (Figure 1.5, exemple des cercles de Titchener).

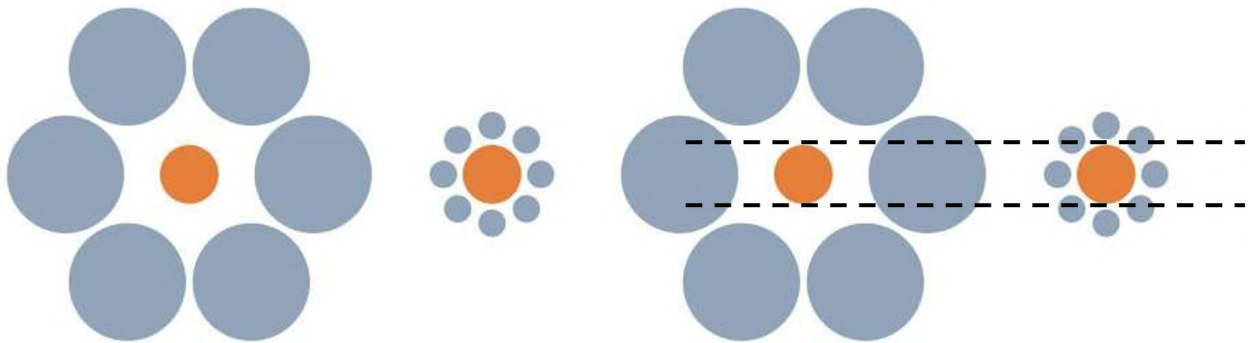


Figure 1.5 – Cercles de Titchener - Illusion optique d'Ebbinghaus où le cercle orange de gauche semble plus petit que celui à droite

### 3.2 Répétabilité et Reproductibilité

Une analyse de la variabilité, tel que le test R&R, peut être effectué afin de quantifier la répétabilité et la reproductibilité des opérateurs (Figure 1.6). Plus particulièrement, le test R2&E2

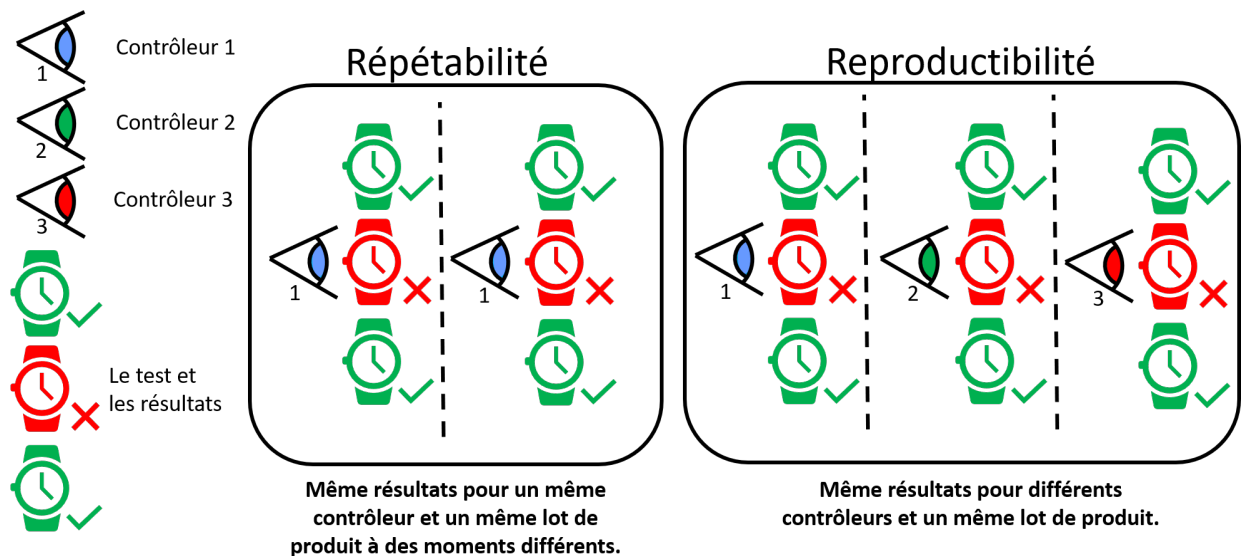


Figure 1.6 – Répétabilité et reproductibilité lors du contrôle visuel

(Reproductibilité et Répétabilité pour l'Exploration et l'Evaluation), est le plus approprié dans le cas du contrôle visuel. En effet, ce test permet de déterminer l'origine des variations dans les résultats en séparant l'exploration et l'évaluation lors du test [Baudet 11]. Six indicateurs sont mesurés lors de ce test.

- Lors de l'exploration (localiser et caractériser une anomalie sur la surface) :
  - La répétabilité du contrôleur évaluant la capacité de l'opérateur à détecter la même anomalie lors des contrôles d'une même surface.
  - La reproductibilité du contrôleur qui évalue la capacité de l'opérateur à détecter la même anomalie que ses pairs sur la même surface (si au préalable la répétabilité est bonne).



- Lors de l'évaluation (attribuer une intensité) :
  - La répétabilité du contrôleur qui évalue sa capacité à juger d'une anomalie de la même façon lors des contrôles d'une même surface.
  - La reproductibilité du contrôleur qui évalue sa capacité à juger d'une anomalie de la même façon que ses pairs sur la même surface (si au préalable la répétabilité est bonne).
- Les scores du contrôleur évaluent si l'opérateur est capable d'être à la fois répétable et reproductible sur l'ensemble des tests.

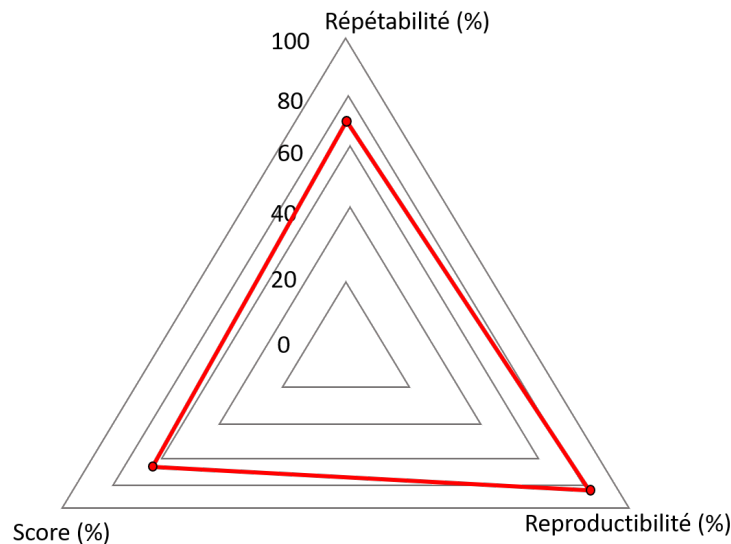


Figure 1.7 – Schéma d'un résultat de test R2& E2

Les systèmes sensoriels les plus utilisés lors de l'analyse des surfaces sont la vue [Corbé, C. 04] et le toucher. Or lors de l'acquisition de l'information par ces systèmes sensoriels, le traitement le plus immédiat effectué est l'identification. L'identification, des objets ou surfaces, consiste à faire une comparaison entre ce qui est perçu et ce qui a été préalablement mémorisé. On ne peut donc pas identifier sans avoir rencontré et décrit une perception semblable au préalable. Or, une norme française (ISO 11035) définit des mots, aussi appelés descripteurs. A partir d'un ensemble de ces mots et de leur pondération, l'opérateur peut alors décrire la surface. Cette méthode est appelée description quantifiée [Mac Leod 09]. L'intensité de la sensation perçue peut être définie en plusieurs domaines corrélés avec la valeur du stimulus [Mac Leod 09] comme illustré dans la Figure 1.8.

La zone infraliminaire correspond à un stimulus très faible. La sensation est donc confuse et noyée dans le bruit. La zone liminaire, correspond au commencement de la perception de la sensation mais elle reste aléatoire. Dans la zone supraliminaire, la sensation perçue est plus nette avec une intensité variable. Enfin la zone de saturation correspond au moment où l'intensité de la sensation est au plus haut et ne peut plus augmenter malgré l'augmentation du stimulus. L'objectif dans le contexte industriel est de diminuer la variabilité de la zone supraliminaire (être reproductible) et d'améliorer l'intensité perçue de la zone liminaire (mieux détecter). Pour accomplir cet objectif des méthodes de formalisation du processus d'analyse sensorielle et des processus d'interprétation des résultats obtenus ont été développées : on parle alors de métrologie sensorielle.

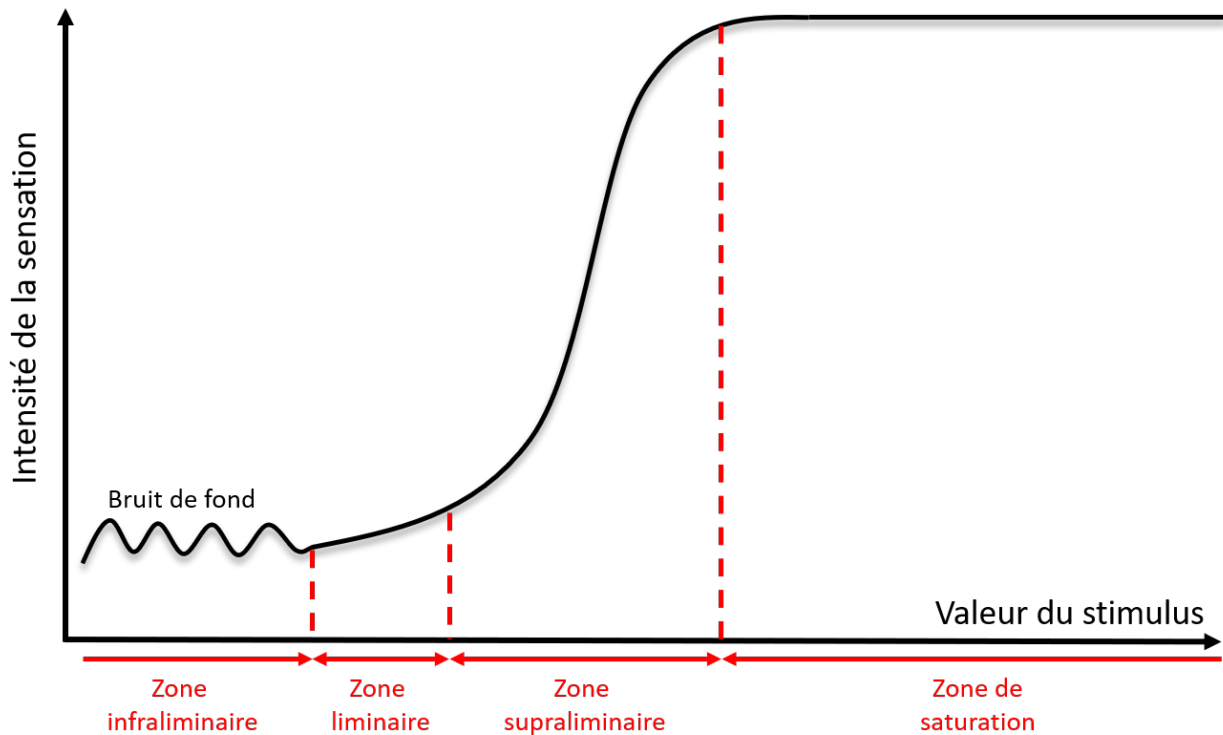


Figure 1.8 – Évolution de l'intensité de la sensation en fonction du stimulus [Mac Leod 09]

### 3.3 Métrologie sensorielle

La métrologie sensorielle vise à améliorer la robustesse de la mesure par l'humain en diminuant la variabilité au cours de l'ensemble du processus d'analyse sensorielle. Dans ce but, il est nécessaire de définir des grandeurs à mesurer, associées à des unités de mesure avec comme référence physique des étalons [Courtier 03]. Cependant, dans le cas de la métrologie de l'apparence, définir des mesurandes est complexe car la perception de l'apparence est liée à des processus cognitifs complexes et subjectifs. L'apparence n'est donc pas directement mesurable [Obein 18]. Le processus d'inspection visuelle est décomposé souvent en trois étapes. Il s'agit de la détection, du jugement et de la décision [Colquhoun 64]. Les deux dernières étapes étant assez proches, d'autres propositions sont apparues utilisant un modèle constitué de seulement deux étapes [Drury 75, Drury 92, Rebsamen 10]. Ce type de modèle est adapté pour les contrôles visuels où les tolérances d'acceptation sont clairement définies [Baudet 11]. Or dans le cas de l'évaluation de la fonction esthétique d'une surface ces tolérances d'acceptation sont difficiles à définir, ce modèle n'est donc pas toujours adapté. D'autres méthodes [Baudet 12] proposent un nouveau découpage en trois étapes du processus de métrologie sensorielle encore utilisé couramment aujourd'hui (Figure 1.9) :

1. L'exploration consiste à localiser et caractériser une anomalie sur la surface. La stratégie pour l'exploration peut être aléatoire ou systématique. Le contrôleur doit alors suivre un protocole de contrôle adapté à la surface inspectée. Ce protocole peut être défini à partir des connaissances des anomalies pouvant être générées lors de la production. Lors de l'inspection, l'opérateur doit constater la présence ou non d'écart entre ce qui est observé et ce qui est attendu du concepteur de la surface ou par rapport à une référence. Cet écart est considéré comme une anomalie acceptable ou non. Si l'anomalie est évolutive (par exemple la corrosion) alors la surface est refusée. Cependant si l'anomalie n'est pas évolutive, il faut déterminer sa topologie (marque, hétérogénéité, pollution ou déformation) [Baudet 11].

2. L'évaluation consiste à attribuer une intensité pour chaque descripteur choisi. L'opérateur doit alors décrire de manière factuelle les anomalies qu'il détecte, en s'appuyant sur le standard défini pour le type de surface qu'il inspecte. Il doit aussi définir l'effort fourni pour détecter l'anomalie. En effet, une anomalie de surface qui nécessite beaucoup de temps d'inspection ou de nombreux outils pour être repérée est moins importante qu'une anomalie qui est détectable immédiatement et sans outil spécifique. De plus, une mise en perspective des attributs de l'anomalie doit être faite. Par exemple, si l'anomalie se situe sur une face visible en utilisation normale, alors sa criticité se renforce. Ou encore, si le contexte local et le contraste augmentent ou non la visibilité de l'anomalie.
3. La décision consiste à accepter ou refuser la surface en se basant sur l'évaluation de la surface. L'opérateur estime une intensité finale de la qualité d'aspect de la surface. Cette intensité peut être calculée de différentes manières telles qu'une somme ou une moyenne des intensités associées à chaque descripteur [Guerra 08] en s'appuyant sur une grille hiérarchique corrigée [Baudet 11] ou une grille de décision. Cette dernière permet de formaliser le calcul de l'intensité totale à attribuer à une anomalie. Le calcul s'effectue à partir des attributs et niveaux définis durant l'étape d'évaluation. Ces paramètres sont pondérés par les conditions d'observation et le contexte de l'anomalie (mise en perspective). Le Tableau 1.1 présente un exemple de grille de décision pour un briquet. Le tableau se lit de gauche à droite et consiste en une initialisation d'un score de départ selon l'effort de détection, puis pour chaque colonne, un bonus, un malus ou rien est attribué. Le score total déterminera alors si la surface est acceptable ou non.

Condition d'observation				Mise en perspective						Décision
				Local			Global			
Effort de détection		Effet lumière		Orientation		Couleur		Position		
Visible en contrôle renforcé (tps inspection ≥ 15 sec)	3	Visible sous 1 seul effet de lumière	=	L'anomalie est dans le sens du décor	-1	L'anomalie est de la même couleur que la pièce	=	Face non visible produit monté	-1	1 2
Visible en contrôle standard (30 cm)	4	Visible sous 2 effets de lumière	=	Décor uni	=			Face arrière et champs latéraux	=	3 4 5
Visible immédiatement	5	Visible sous tous les effets de lumière	+1	L'anomalie n'est pas dans le sens du décor	=	L'anomalie cause un contraste de couleur	+1	Face principale	+1	6 7 8

Tableau 1.1 – Exemple de grille de décision pour l'inspection visuelle d'un briquet

L'approche sensorielle du contrôle de l'aspect des surfaces manufacturées, consiste donc essentiellement à interpréter l'information visuelle perçue par les mécanismes de la vision humaine. Le contrôle sensoriel mis en place dans le cadre de l'industrie, particulièrement dans l'industrie des produits à haute valeur ajoutée, est possible grâce aux facultés exceptionnelles de l'humain à analyser son environnement visuel. Les différentes méthodes et développements, qui constituent la métrologie sensorielle, ont permis d'augmenter la robustesse des contrôles malgré la variabilité inhérente des contrôles fait par l'humain. De plus, l'analyse sensorielle humaine permet une grande flexibilité face à la diversité des surfaces, des paramètres d'analyse et des anomalies recherchées sur les surfaces. Cette approche, répandue dans l'industrie, est l'objet de constantes nouvelles recherches afin de mieux maîtriser la perception humaine. Cependant il existe une alternative au contrôle sensoriel humain : l'approche instrumentale. Dans la section suivante, nous aborderons les différentes méthodes instrumentales qui utilisent des mesures physique pour caractériser l'apparence des surfaces.

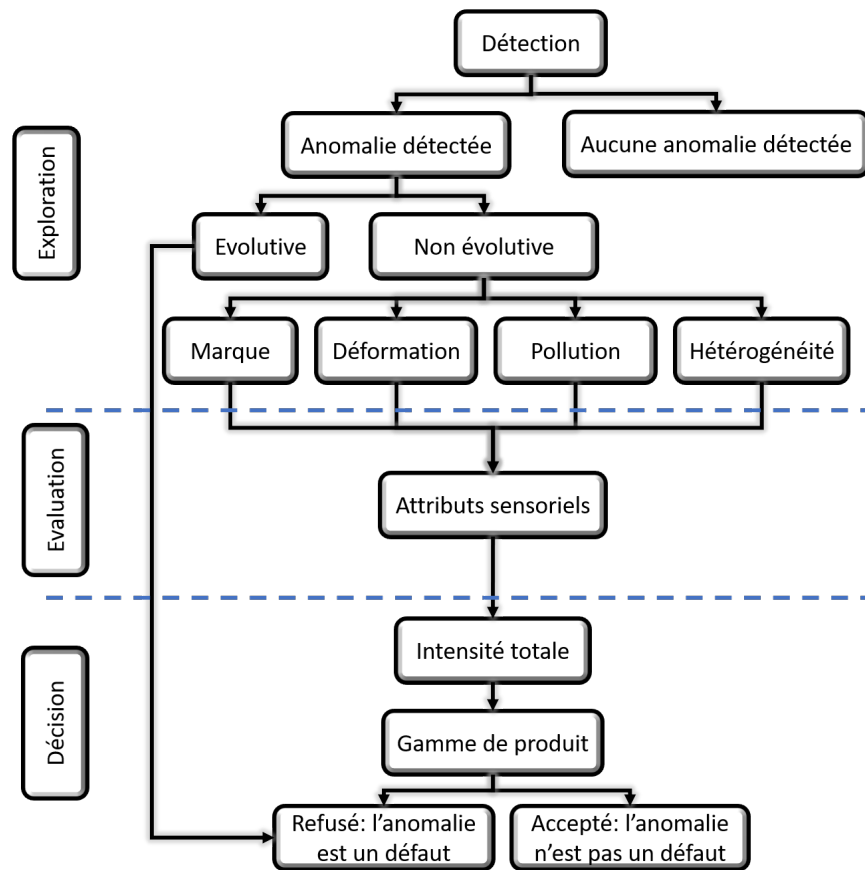


Figure 1.9 – Les étapes du contrôle sensoriel [Baudet 12]

## 4 Mesure des attributs d'apparence : Approche géométrique

L'approche géométrique vise à estimer le comportement, en terme d'apparence, des surfaces à partir de la mesure tridimensionnelle à l'échelle de la micro-géométrie. La mesure est nécessaire pour disposer d'une information quantifiée sur la géométrie d'une surface afin de la caractériser [Raphet 06]. L'information peut être de plusieurs types. On parle de mesure de topographie quand l'information est de type altitude ( $z(x, y)$ ). Elle peut aussi être une forme dérivée de l'information en altitude. Selon l'ordre de la dérivée, il s'agit alors de mesure de pentes (ordre 1) ou de courbures (ordre 2). La mesure ne permet d'obtenir qu'une information discrète, échantillonnée de la surface. Or, pour définir et caractériser de façon complète une surface, il faudrait que cette information soit continue sur 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. La question du choix des échelles est aussi essentielle, tant pour la mesure des attributs géométriques des surfaces que pour le calcul des paramètres d'état de surface ainsi que pour les aspects de modélisation et lier avec la perception visuelle.

### 4.1 Evaluation de la micro-géométrie

L'humain, à travers une analyse sensorielle visuelle et/ou tactile, est le premier à avoir évalué la micro-géométrie des surfaces. Aujourd'hui encore, il reste la référence pour contrôler les états de surface malgré le développement de techniques instrumentales. Cependant, les techniques de mesure de topographie et de traitement des données se sont fortement développées. Cela est dû notamment au développement des technologies de mesures optiques sans contacts. Elles sont capables

de mesurer un grand nombre de points avec une grande résolution latérale et verticale en un temps relativement court. Il est désormais possible de procéder à une mesure 3D intégrale d'une surface à l'échelle micro ou nano (Microscope à Force Atomique - AFM, Microscopie électronique à balayage - MEB, profilomètre optique, ...)

Pour la suite, nous différencierons les méthodes ponctuelles des méthodes à champ étendu. Les méthodes ponctuelles de mesure de surface, utilisent une sonde de mesure pour mesurer point par point un ensemble de profils parallèles afin de reformer une surface. L'inconvénient de cette approche est que ses résultats sont influencés par le choix de la direction de la mesure. Les méthodes à champ étendu, consistent à acquérir l'information à partir de l'ensemble de la région à mesurer. La mesure à champ étendu peut être le résultat d'un assemblage de mesures de plusieurs régions (Stitching). Enfin on peut différencier deux types de moyens de mesure, les méthodes mécaniques et les méthodes optiques. Nous présenterons les différentes méthodes de mesures mécaniques dans la partie 4.2 et les méthodes de mesures optiques dans la partie 4.3 [Le Goïc 12].

## 4.2 Mesure mécanique

L'approche mécanique consiste à mesurer la topographie d'une surface en utilisant d'autres outils que les photons. Ainsi la mesure mécanique peut consister en la palpation de la surface par une sonde ou la mesure des interactions atomiques. Parmi les méthodes de mesure mécanique, beaucoup sont ponctuelles :

- 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 ou sa rugosité (Figure 1.10). La rugosité d'une surface peut être décrite par plusieurs paramètres tels que la rugosité moyenne arithmétique du profil ( $Ra$ ) ou la hauteur maximale du profil ( $Rz$ ). La résolution latérale de cette méthode est élevée et est liée aux dimensions de la pointe en diamant. Cependant le contrôle est long et destructif sur les surfaces fragiles car la pointe en diamant doit rentrer en contact avec la surface, afin de la mesurer, et créer ainsi des sillons.

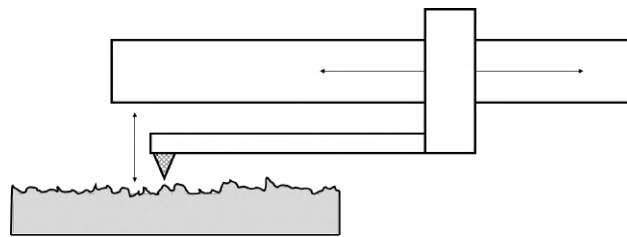


Figure 1.10 – Illustration du rugosimètre

- Machine à Mesurer Tridimensionnelle (MMT) - La tête de mesure se positionne en tout point de l'espace, généralement au moyen de trois liaisons glissières (Figure 1.11). Elle permet d'obtenir les coordonnées des points mesurés (palpés) sur un objet : aussi appelée métrologie par coordonnées. Cette méthode apporte une grande flexibilité par rapport au type de surface à mesurer. Elle est spécialement destinée à calculer rapidement un défaut de tolérance géométrique (forme, localisation, parallélisme, coaxialité, etc).
- Microscope à Force Atomique (AFM) - L'altitude des points de la surface est acquise par mesure des forces d'interactions atomiques (attraction/répulsion) entre une sonde et la surface, proportionnelles à la distance sonde/surface (Figure 1.12). Cette méthode présente une très haute résolution de mesure. Cependant le temps d'acquisition est long. De plus son mou-

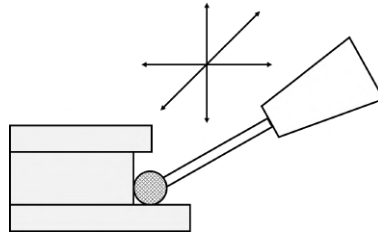


Figure 1.11 – Illustration du MMT

vement vertical est limité car il mesure la flexion d'un micro-levier. La méthode n'est donc adaptée que pour les mesures fines d'état de surface et de petite dimensions.

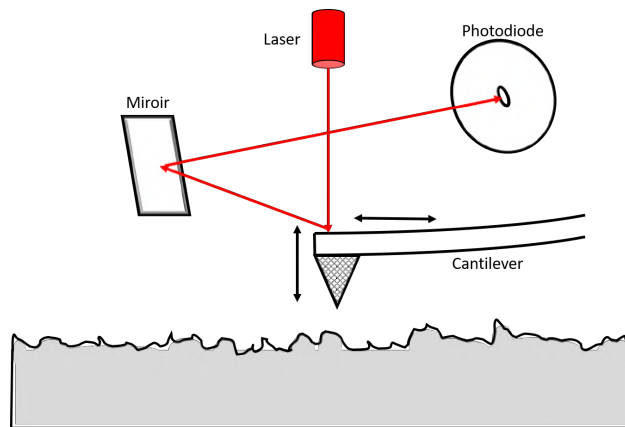


Figure 1.12 – Illustration du AFM

- Microscopie 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. Lors du déplacement de la sonde, le courant est maintenu constant en réglant la hauteur de la sonde qui est ensuite enregistrée (Figure 1.13). La mesure de la topographie se fait à l'échelle atomique. Elle présente en contrepartie les inconvénients d'avoir un temps d'acquisition très long et la surface nécessite d'être conductrice ou semi-conductrice.

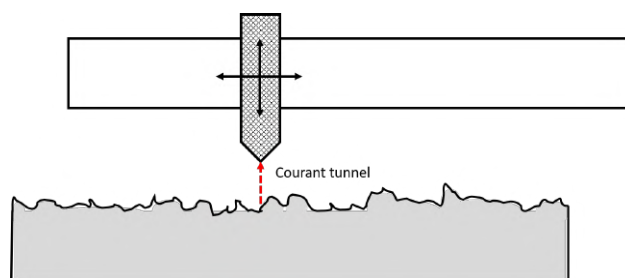


Figure 1.13 – Illustration du STM

Enfin le Microscopie Electronique à Balayage (MEB) est une méthode de mesure à champ étendu. L'acquisition est réalisée par mesure du flux d'électrons secondaires, c'est à dire, des électrons arrachés à la surface au cours d'un processus d'ionisation. Ce flux d'électron secondaire est directement lié à l'angle entre le faisceau incident et la surface (Figure 1.14). Malgré sa haute résolution, la méthode nécessite que le matériau soit conducteur et que la mesure se fasse dans le vide. De plus le champ de mesure du MEB est réduit.

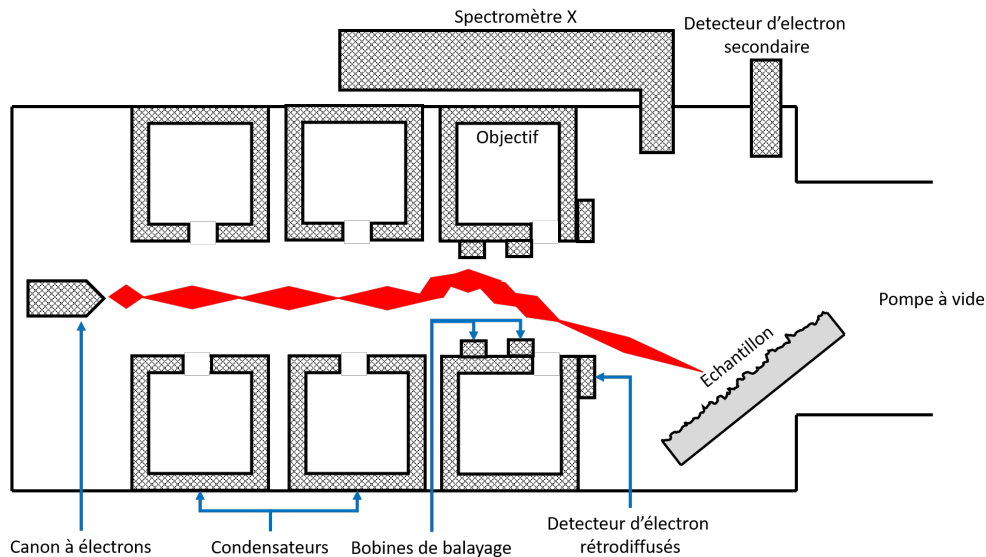


Figure 1.14 – Illustration du MEB

### 4.3 Mesure optique

L'approche optique consiste à utiliser la lumière comme outil de mesure de la topographie des surfaces. Les méthodes de mesure optique ponctuelles sont les suivantes :

- Microscopie Optique en Champs Proche (SNOM) - En plaçant une sonde très proche de la surface, on peut mesurer l'onde évanescente de la lumière (Figure 1.15). La sonde mesure ainsi à un niveau de détail inférieur à la longueur d'onde de la lumière. En effet, si le détail observé est plus petit que la longueur d'onde de la lumière qui l'éclaire, alors la lumière est diffusée sous la forme d'une tache. De plus cette méthode permet d'obtenir des informations physiques et chimiques liées à la nature locale de la surface. Cependant le temps d'acquisition est long, et la résolution n'est pas élevée.

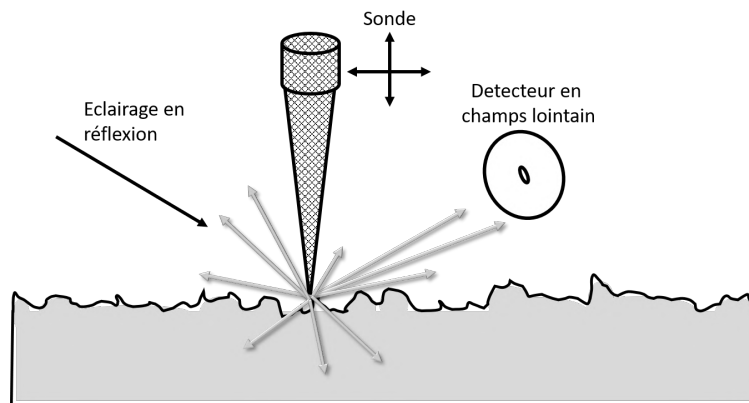


Figure 1.15 – Illustration du SNOM

- Microscopie Confocale - La mesure est réalisée en contrôlant la focalisation d'un faisceau lumineux sur la surface. Afin d'acquérir l'altitude du point éclairé, l'objectif se déplace verticalement afin que le faisceau reste focalisé. La méthode utilise un double filtrage : un premier qui permet d'éclairer un seul point de la surface et un second afin de ne recevoir que la lumière réémise par le point mesuré (Figure 1.16). Cette caractéristique est appelée *sectionnement optique*. Le temps d'acquisition de cette méthode est cependant très long car la mesure se fait

point à point et est limitée dans la mesure des pentes. Mais le sectionnement optique le rend robuste aux différentes interférences et son champ de mesure est large.

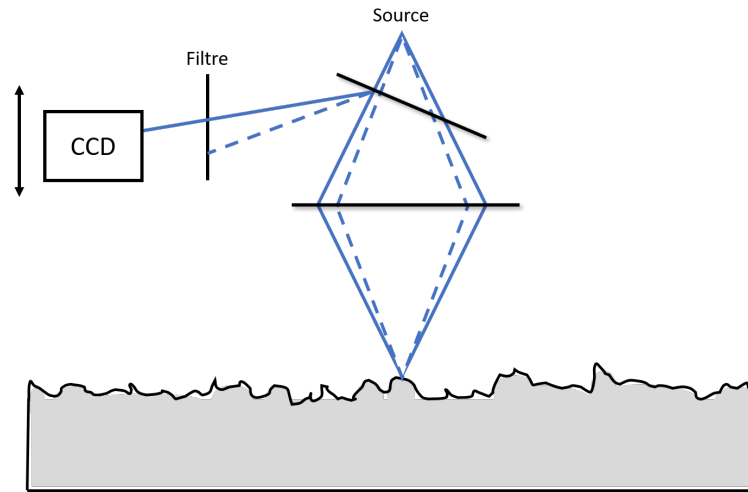


Figure 1.16 – Illustration du microscope confocal

- Microscope Confocal avec codage chromatique - Il s'agit du même principe que la microscopie confocale, à la différence que l'objectif est équipé en plus d'un spectromètre qui permet de décomposer la lumière réfléchie (Figure 1.17). Chaque longueur d'onde correspond alors à une hauteur. Ainsi on peut mesurer les latitudes des points de la surface sans mouvement vertical de la sonde.

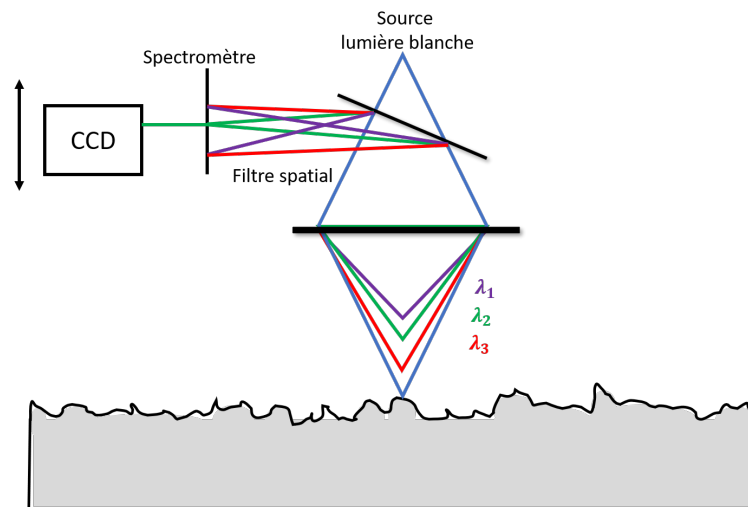


Figure 1.17 – Illustration du microscope confocal avec codage chromatique

- Triangulation Laser - Il existe deux types de capteurs de triangulation laser. Le capteur point permet de calculer l'altitude du point mesuré grâce à l'angle du faisceau de lumière réfléchi (Figure 1.18). Le capteur ligne permet de déterminer la forme de l'objet (profil 2D) en analysant les déformations d'une ligne projetée sur l'objet mesuré. Un profil 3D alors être estimé à partir de l'acquisition de plusieurs profils 2D. La mesure avec cette méthode est très rapide et permet la mesure de surfaces complexes.

Enfin il existe des méthodes de mesure optique de la topographie à champ étendu :

- Microscope par interférométrie - La mesure est réalisée par superposition de deux signaux. Le premier est réfléchi par une surface de référence. Le second est réfléchi par la surface mesurée.



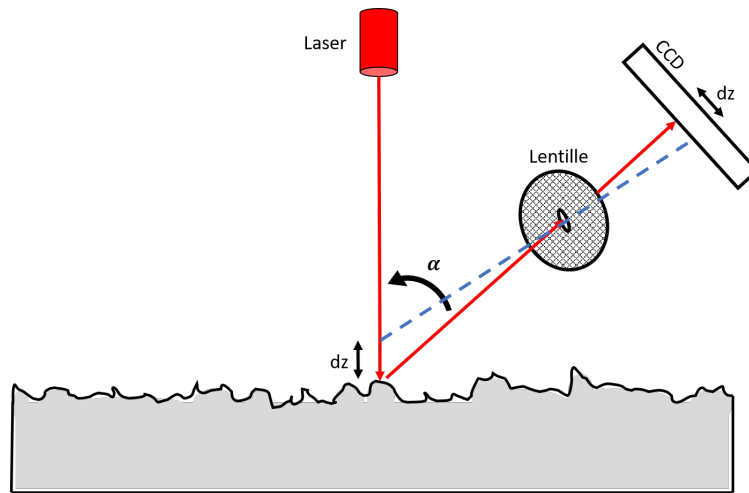


Figure 1.18 – Illustration de la triangulation laser

Les interférences des deux signaux peuvent être analysées afin de détecter les différences de phase et ainsi estimer l'information en  $z$  (Figure 1.19). La mesure est rapide avec une très bonne résolution et est spécialement adaptée pour la mesure de surfaces super-polies. Cependant elle est limitée dans la mesure des pentes.

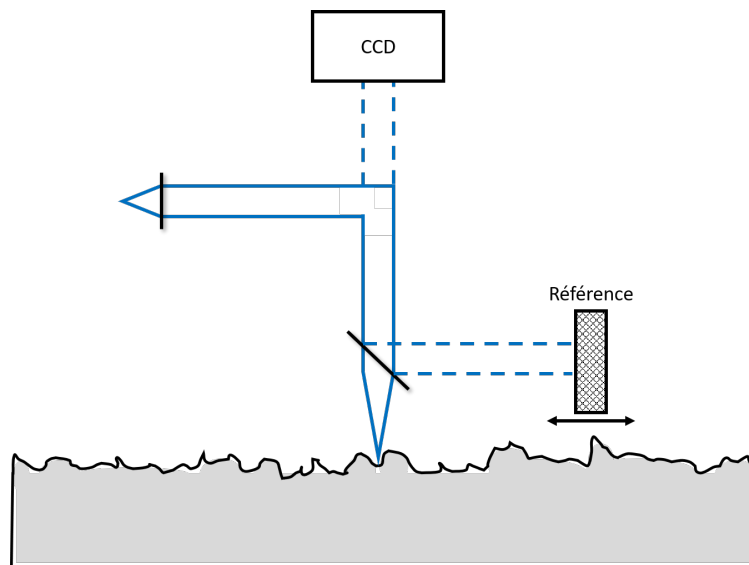


Figure 1.19 – Illustration du microscope par interférométrie

- Microscope à focalisation étendue - La mesure est réalisée à partir d'un balayage de la surface par hauteur. La topographie est reconstruite à partir des points focalisés pour chaque hauteur du capteur (Figure 1.20). La mesure est rapide et permet de mesurer les fortes pentes. De plus cette méthode permet de visualiser la scène en couleurs "vraies". Cependant la résolution verticale n'est pas élevée.
- Déflectométrie (Réflexion de franges) - Une lumière structurée est projetée sur un écran. Sur une surface parfaite l'angle d'incidence et l'angle de réflexion sont égaux. L'analyse de la déformation de la structure permet d'extraire les pentes locales, et par intégration, l'altitude des points de la surface (Figure 1.21). Cette méthode permet la mesure et la détection rapide d'anomalie de surface sur une région étendue. Cependant la surface nécessite d'être réfléchissante pour que la lumière structurée soit réfléchi et mesurée par le capteur.

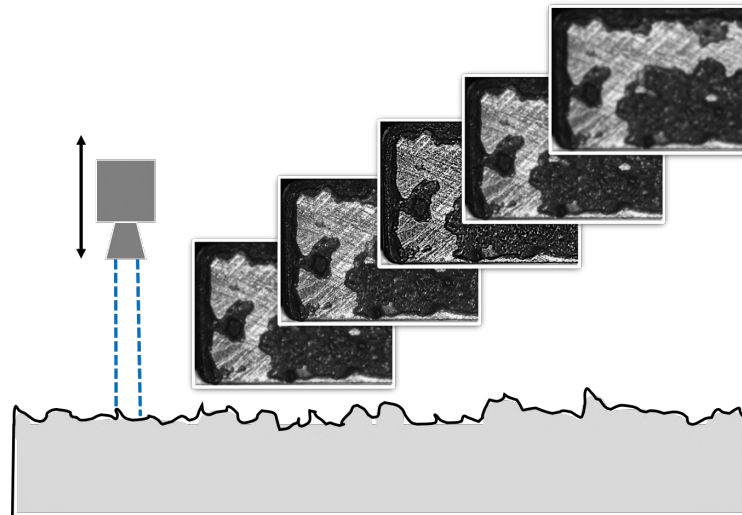


Figure 1.20 – Illustration du microscope à focalisation étendu

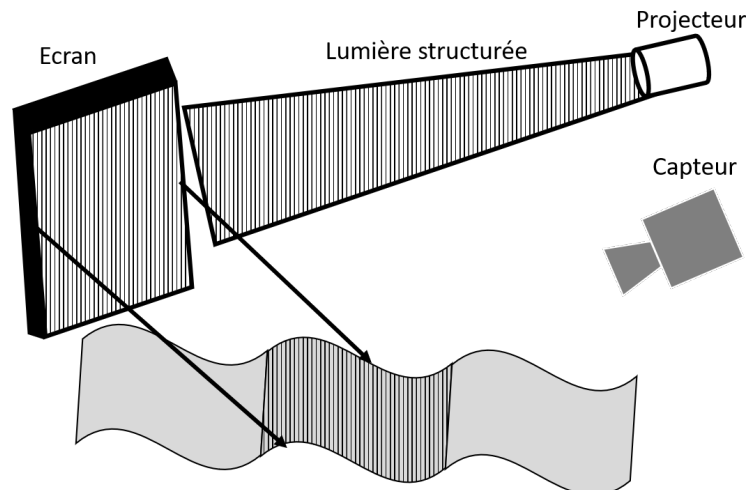


Figure 1.21 – Illustration de la déflectométrie

- Stéréo-Photométrie - La technique consiste à prendre plusieurs images de la surface en faisant varier la position de la source d'éclairage (Figure 1.22). A partir de l'information mesurée, les pentes peuvent être estimées et donc par intégration la topographie. Les mesures sont rapides, étendues et adaptées aux surfaces peu réfléchissantes. La résolution est cependant moyenne.
- Photogrammétrie - Cette méthode est une analogie de la vision stéréoscopique de l'humain. La mesure est effectuée en utilisant le parallaxe obtenu entre plusieurs images capturées avec des points de vue différents. A partir de ces images, par triangulation, la position du capteur dans l'espace est déterminée et ainsi la topographie de la surface peut être estimée (Figure 1.23). L'acquisition est très rapide, facile à mettre en œuvre et permet une mesure dynamique. La région acquise peut être très large et la résolution verticale est moyenne.

#### 4.4 Synthèse des différentes méthodes de mesure de la topographie

Dans le cadre de l'analyse de la qualité géométrique et de la fonction aspect des surfaces, aucune technique ne semble satisfaire pleinement les besoins du contexte industriel. Aucune ne satisfait les besoins des tâches, visant à maîtriser et piloter la qualité d'apparence des surfaces, en terme de temps d'inspection et/ou en terme de flexibilité face à la diversité des produits à inspecter. C'est

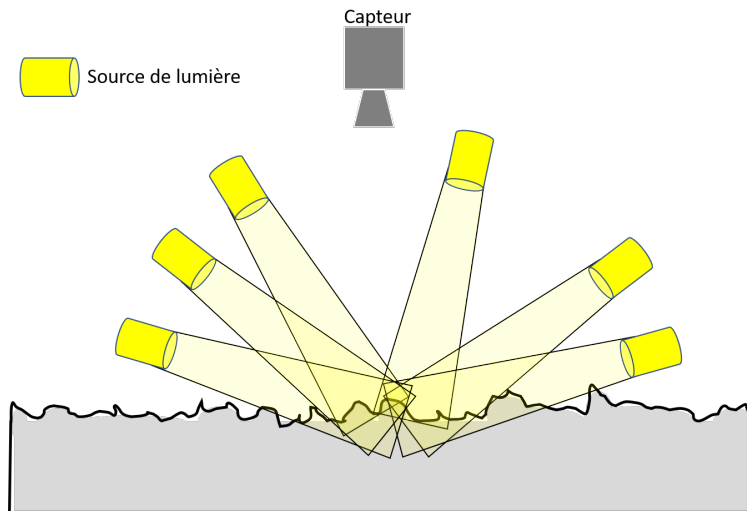


Figure 1.22 – Illustration de la photométrie

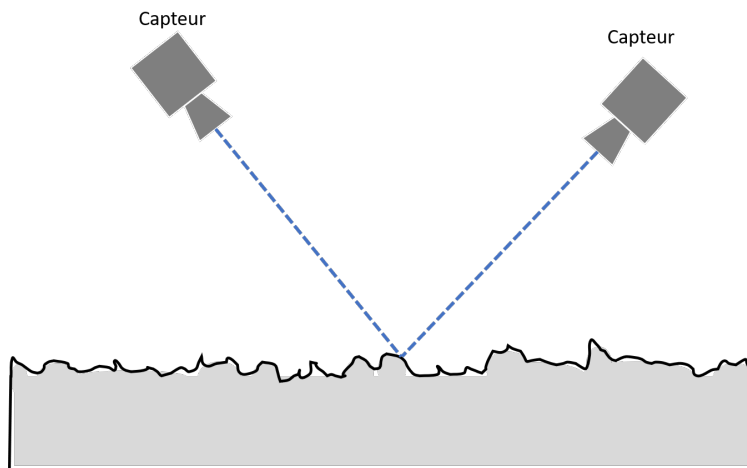


Figure 1.23 – Illustration de la Photogrammétrie

particulièrement vrai dans le domaine des produits à hautes valeurs ajoutées il est souhaitable de réduire la taille des séries de produit et augmenter leur variété (High Variety Low Volume). Cette augmentation de la variété se traduit par une variété au niveau de la géométrie (taille et forme) et du matériau (réflectivité et état de surface). En terme de comparaison des précédentes méthodes on peut déterminer les caractéristiques suivantes :

- Capteurs Ponctuels / Capteurs à champ étendu : La mesure d'une surface, avec un capteur ponctuel, est très fine. Or certaines anomalies d'aspect importantes peuvent être réduites en taille géométriquement. Ainsi le capteur ponctuel permet la mesure de telles anomalies. En contrepartie le temps de mesure avec un tel capteur est généralement important. Pour optimiser le temps de mesure, il faut donc au préalable définir les régions critiques de la surface à mesurer. Il est donc préférable d'utiliser un capteur à champ étendu afin de réaliser la détection d'anomalie de surface tandis qu'un capteur ponctuel sera plus à même de mesurer finement la topographie d'une région segmentée.
- Capteurs sans contact / Capteurs avec contact : Le contrôle qualité d'aspect des surfaces nécessite que celui-ci ne soit pas destructif. Ainsi les capteurs avec contact ne peuvent répondre à la problématique du contrôle de la qualité d'aspect. Cependant, dans certains cas spécifiques, telles que les surfaces poli-miroirs ou des surfaces avec des pentes élevées, la mesure ne peut

pas être réalisée avec un capteur sans contact.

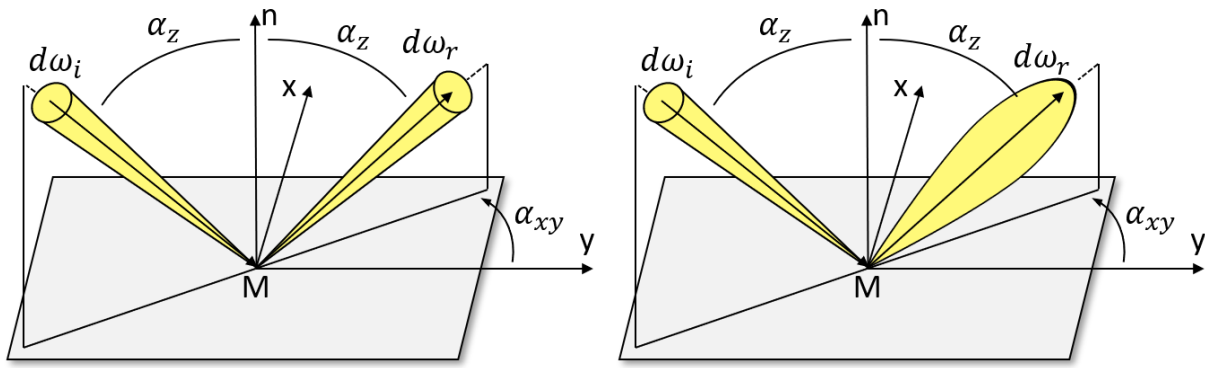
- Mesure des altitudes / Mesures des pentes / Mesure des courbures : La topographie d'une surface peut être soit mesurée, soit estimée à partir d'une opération d'intégration sur l'information des pentes. A l'inverse, la courbure est obtenue par dérivation du champ de normales ou des pentes de la surface. Ces opérations de dérivation et d'intégration induisent des erreurs liées, par exemple, au bruit de mesure (haute fréquence). L'information des pentes ne nécessite qu'une seule dérivé pour estimer la courbure contre deux dans le cas de l'altitude, mais elle nécessite une intégration pour retrouver l'information de l'altitude. Ainsi, le type de données mesurées par le moyen de mesure est un critère de choix essentiel.

## 5 Mesure des attributs d'apparence : Approche photométrique

L'approche géométrique consiste à faire le lien entre certains attributs géométriques d'une surface et son apparence. Une autre approche consiste à lier la fonction aspect des surfaces avec l'interaction des surfaces et leur environnement lumineux : l'approche photométrique. Dans cette partie nous montrerons, par une étude bibliographique, dans quelle mesure cette approche peut aider à analyser la fonction aspect des états de surfaces manufacturées. Nous présenterons le concept et les définitions associées à cette approche. Puis nous présenterons comment par cette approche nous pouvons faire du rendu photo-réaliste ou simuler un éclairage ainsi que son intérêt pour la caractérisation de l'apparence des états de surfaces. L'étude étant restreinte aux surfaces manufacturées, nous n'aborderons que le cas des surfaces réelles et opaques car il constitue une très grande majorité des surfaces manufacturées.

L'interaction entre une surface et la lumière peut être externe (réflexion et diffusion) et interne (réfraction) à la surface. La réfraction, ne concernant pas les surfaces opaques, elle n'est pas présentée dans cette partie. La réflexion et la diffusion décrivent comment un flux incident est renvoyé par une surface.

1. La réflexion, ou réflexion spéculaire, peut être modélisée selon deux approches liées à l'optique :
  - L'optique géométrique qui prend en compte la nature corpusculaire de la lumière en la modélisant par des rayons lumineux. Ce type de modèle suffit à décrire, par exemple, les phénomènes optiques liés au trajet de la lumière (Figure 1.24a). La surface est considérée comme plane et donc l'angle de la réflexion spéculaire est égale à l'angle du rayon de lumière incident. L'angle de la réflexion et du flux de lumière incident sont définis selon la normale locale au phénomène sur la surface.
  - L'optique physique qui considère la lumière comme une onde (Figure 1.24b). La réflexion spéculaire est décrite comme un lobe dont l'intensité maximale correspond à l'angle d'incidence de la lumière selon la normale. Les résultats de ce modèle sont les plus fidèles avec la réalité observée. La forme du lobe dépend de la géométrie de la surface : le lobe sera plus étendu si la surface est rugueuse et inversement.
2. La diffusion, ou réflexion diffuse, correspond à une ré-émission homogène, dans toute les directions, de la lumière, par la surface comme illustré dans la Figure 1.25. On parle de surface lambertienne (nom venant du modèle d'éclairage de Lambert [Lambert 60]) quand la réflexion est uniquement diffusante. A l'inverse une surface spéculaire ne renvoie que de la réflexion spéculaire. Cependant, pour les surfaces réelles, on observe généralement un mélange des deux types de réflexions comme illustré dans la Figure 1.26.



(a) Optique géométrique

(b) Optique physique

Figure 1.24 – Réflexion spéculaire sur une surface

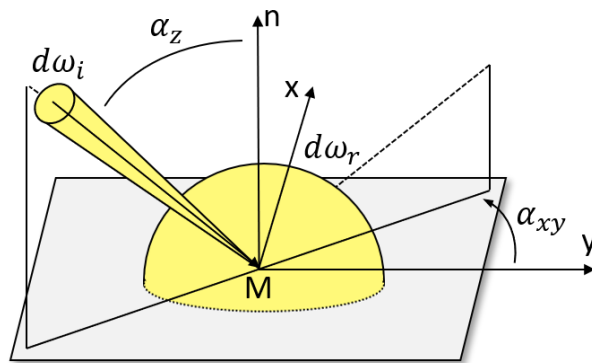
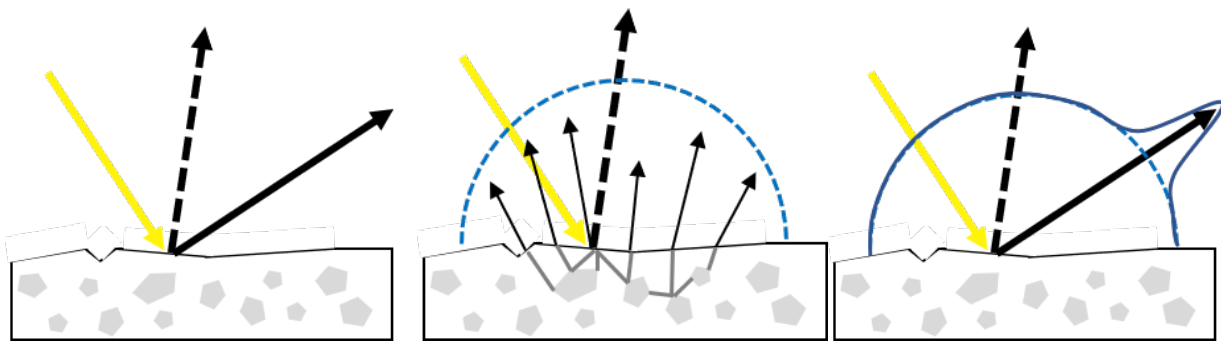


Figure 1.25 – Réflexion diffuse sur une surface



(a) Réflexion spéculaire

(b) Réflexion diffuse

(c) Réflexion mixte

Figure 1.26 – Types de réflexion sur une surface

Le lien entre les composantes de la réflexion lumineuse et les attributs de l'apparence est présenté dans la Figure 1.27 [Obein 18]. Le scintillement, par exemple, caractérise certaines peintures, la couleur perçue est associée à la composante de la diffusion, et le pic spéculaire permet de discriminer les comportements brillants tandis que la forme du lobe dépend de la rugosité de la surface.

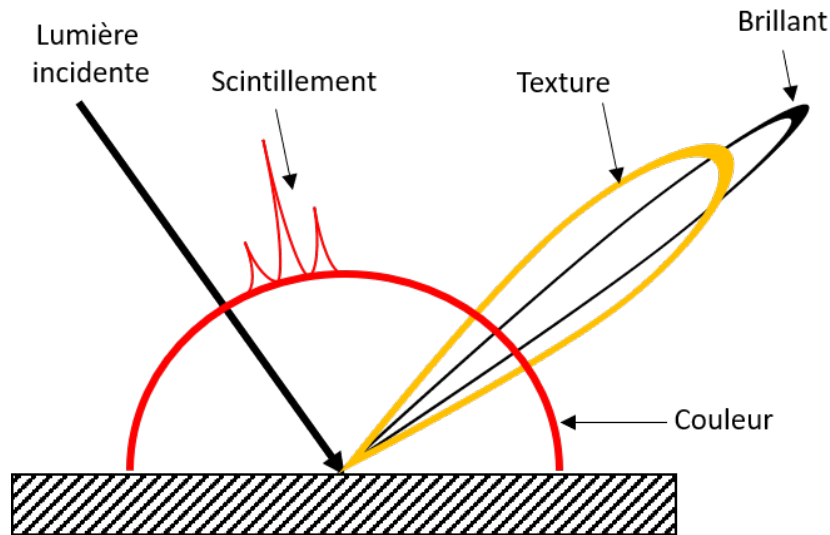
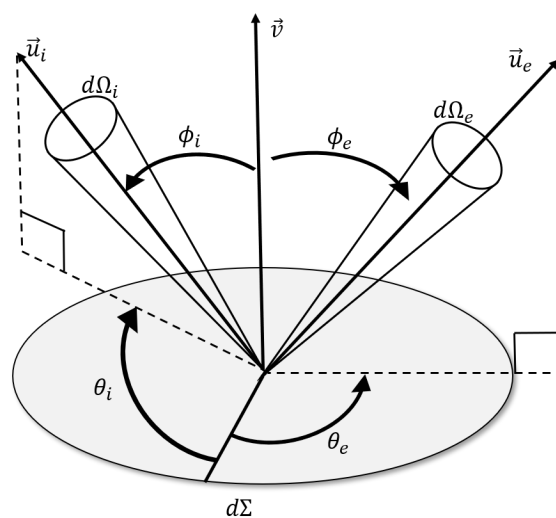


Figure 1.27 – Lien entre la réflexion et les attributs d'apparence [Pitard 16]

### 5.1 La Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)

La mesure la plus complète de l'interaction entre une surface opaque avec son environnement lumineux, est la mesure de la Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) [Durou 07]. La réflectance, ou albédo, est définie comme le rapport entre le flux lumineux incident, dans une direction  $\vec{u}_i$ , et le flux lumineux réémis par la surface dans toute les directions. Ainsi, la BRDF est définie comme étant le rapport entre la luminance réémise  $dL(\vec{u}_e)$  de l'élément de surface  $d\Sigma$ , et l'éclairement reçu  $dE$  (qui dépend de  $\vec{u}_i$ ).  $dL$  et  $dE$  dépendent donc des paramètres  $\theta_i, \phi_i, \theta_e$  et  $\phi_e$  comme décrit dans l'Equation 1.2 [Durou 07] dont les paramètres sont illustrés dans la Figure 1.28.

$$f(\theta_i, \phi_i, \theta_e, \phi_e) = \frac{dL(\vec{u}_e)}{dE} \quad (1.2)$$

Figure 1.28 – Définitions des paramètres  $\theta_i, \phi_i, \theta_e$  et  $\phi_e$  selon [Durou 07]

La luminance est évaluée en lumen par stéradian, ou candela, par mètre carré ( $cd.m^{-2}$ ), l'éclairement est évaluée en lumen par mètre carré, ou lux ( $lx$ ), et l'unité de la BRDF est l'in-

verse du stéradian ( $st^{-1}$ ). Le comportement de la surface peut être évalué selon la longueur d'onde de la source d'éclairage utilisée, on parle alors de BRDF spectrale.

La mesure de la réflectance consiste à mesurer la réflectance sur un échantillon de la surface de l'objet. Le résultat de la mesure est ensuite appliqué à l'ensemble de l'objet afin de simuler son rendu visuel. Cependant cette approche est difficilement utilisable pour détecter et caractériser des anomalies de surface bien qu'elle apporte une réponse pertinente dans le cas d'une caractérisation plus globale des propriétés optiques d'un matériau, comme la texture globale par exemple. La mesure de la BRDF est réalisée avec un instrument de mesure de type *gonio-reflectomètre* [Murray-Coleman 90, Dana 99, Koenderink 96]. Cette approche ne peut généralement pas être appliquée dans l'industrie à cause de son coût en quantité de données à acquérir et à traiter et donc, aussi, en terme de temps. Cela malgré les méthodes de compression développées telles que celles utilisant des harmoniques sphériques [Westin 92] ou des modèles non linéaires [Lafortune 97].

La modélisation de la réflectance permet de réduire l'information mesurée en n'évaluant que les paramètres nécessaires au modèle. A partir du modèle il est possible d'estimer la réflectance pour chaque point de la surface par interpolation ou approximation globale à partir des données mesurées. Le rendu visuel n'est alors pas toujours photo-réaliste (model-based rendering) mais peut être utilisé dans différents cas d'application liés à la réalité virtuelle tels que les films d'animation, les jeux vidéos ou encore la CAO. Les mesures sont dites *goniospectrophotométrique* et correspondent à une estimation de toutes les composantes de la luminance. L'échantillonnage exhaustif des variables angulaires de la BRDF est réalisé avec un appareil appelé goniospectrophotomètre [Murray-Coleman 90, Dana 99].

La mesure de la BRDF n'est pas facile d'accès mais permet la compréhension des relations entre la rugosité et la BRDF et entre la BRDF et l'apparence des surfaces [Fontanot 20, Peterson 12, Wang 83].

## 5.2 La technique du RTI

La BRDF permet d'accéder à une information assez exhaustive du comportement lumineux d'une surface. Cependant, dans un contexte industriel, cette technique est souvent inappropriée car son temps d'acquisition est trop long et le système d'acquisition, le goniospectrophotomètre, a un coût significatif. De plus la BRDF étant une mesure ponctuelle, cette approche n'est pas appropriée pour estimer l'apparence de la texture d'une surface. Plusieurs autres mesures existent comme illustré dans la Figure 1.29, mais chacune présente une complexité de mesure et de modélisation au moins aussi grande que celle de la BRDF et ne sont donc pas adaptées pour une application industrielle.

D'autres approches photométriques ont alors été développées récemment afin de répondre à cette problématique telle que la technique de Reflectance Transformation Imaging (RTI). Le RTI permet de réduire le modèle global de la BRDF à la composante angulaire et spectrale de la réflectance. Ainsi, seuls l'angle d'éclairage et la longueur d'onde de la source d'éclairage varient durant l'acquisition. Cette approche, à la différence de l'approche géométrique ou de la BRDF, est ainsi moins coûteuse et plus rapide. Elle est donc plus facilement compatible avec un contexte industriel d'inspection de la qualité des états de surface manufacturées. Cette technique a été développée et utilisée, à l'origine, dans le domaine du patrimoine pour répondre à des besoins de numérisation et d'analyse de l'apparence des objets culturels et historiques [Earl 12, Duffy 10, Degryny 16, Ciortan 16]. Depuis la technique a aussi été progressivement déployée pour des applications en lien avec l'industrie, notamment pour des applications de contrôle de l'apparence [Zendagui 21, Pitard 17b, Nurit 21, Dulecha 20a], ou des applications en mécanique des matériaux

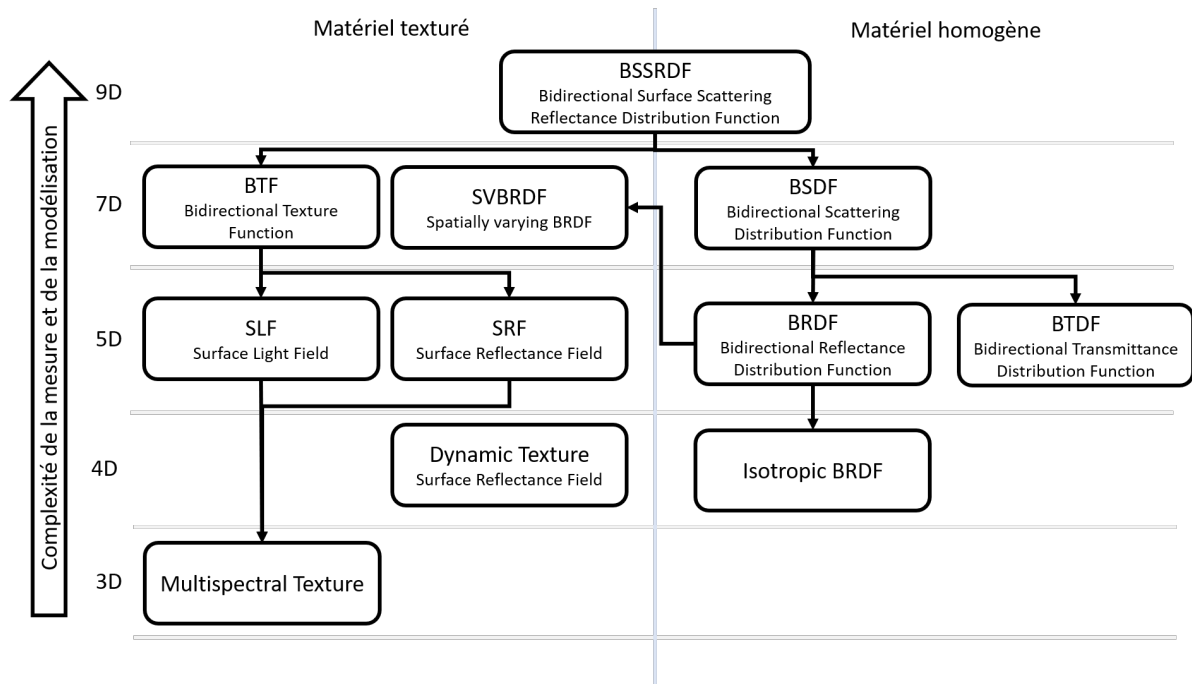


Figure 1.29 – La taxonomie générale de la réflectance de [Haindl 13]

[Lemesle 20] ou encore pour l'analyse des faciès de ruptures [Coules 19].

L'idée à la genèse du RTI vient de l'observation du déroulé de l'inspection visuelle humaine d'une surface. Le constat est le suivant :

1. L'opérateur modifie l'orientation de la pièce. Cette rotation fait varier l'angle d'observation et l'angle d'incidence de la lumière
2. L'opérateur recherche des configurations spéciales d'observations et d'angles d'incidence (les trois effets de lumières 1.4) pour mettre en évidence de potentielles anomalies locales.
3. L'opérateur, lors de la recherche de ces configurations spéciales, s'assure de parcourir une large gamme de configurations possibles. En effet, cela limite le risque de non détection de certaines anomalies de surface.

L'opérateur agit ainsi sur trois repères lors du contrôle visuel des surfaces : le repère de l'observateur, le repère de la surface et le repère de la source de lumière (ou les repères si il y a plusieurs sources de lumières). Il est donc difficile de parcourir l'ensemble des configurations possibles et de maîtriser ce processus d'exploration. D'autant plus que le repère de l'observateur et de la lumière sont dépendants du repère de la pièce. Si l'opérateur modifie l'orientation de la surface, il modifie alors à la fois l'angle d'observation et l'angle d'incidence de la lumière (Figure 1.30).

Le RTI reproduit ainsi certains aspects du contrôle effectué par l'opérateur, en évaluant la réflectance angulaire locale. Lors de la mesure, l'orientation de la source de lumière varie autour de la surface, et parcourt un espace hémisphérique (distance constante). Une caméra fixe positionnée orthogonalement à la surface capture la réponse de la surface (réflectance locale) pour différent angles d'éclairages (angulaire). Seuls les repères de l'observateur et de la surface sont fixes tandis que l'angle de la source de lumière varie de façon analogue à l'étape d'exploration du contrôle sensoriel. A partir de l'acquisition RTI on obtient un lot d'image de type stéréo-photométrique dont chaque pixel correspond à la mesure discrète de la réflectance du point correspondant de la surface (Figure 1.31). Ainsi une acquisition RTI, de  $N$  images de taille  $P_{nb} = n \times m$  pixels, correspond à une fonction  $RTI(i, j, \theta, \phi)$ . Les variables  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, m\}$  sont les coordonnées des pixels, tandis que  $\theta \in \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\}$ ,  $\phi \in \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N\}$  sont les positions angulaires de la



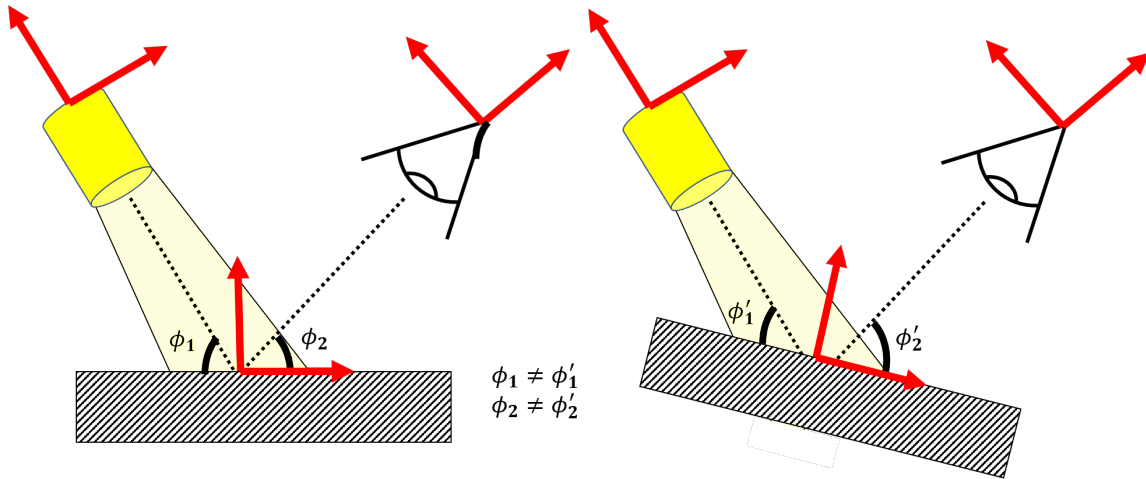


Figure 1.30 – Schema des différents repères sur lesquels agit l'opérateur lors du contrôle visuel

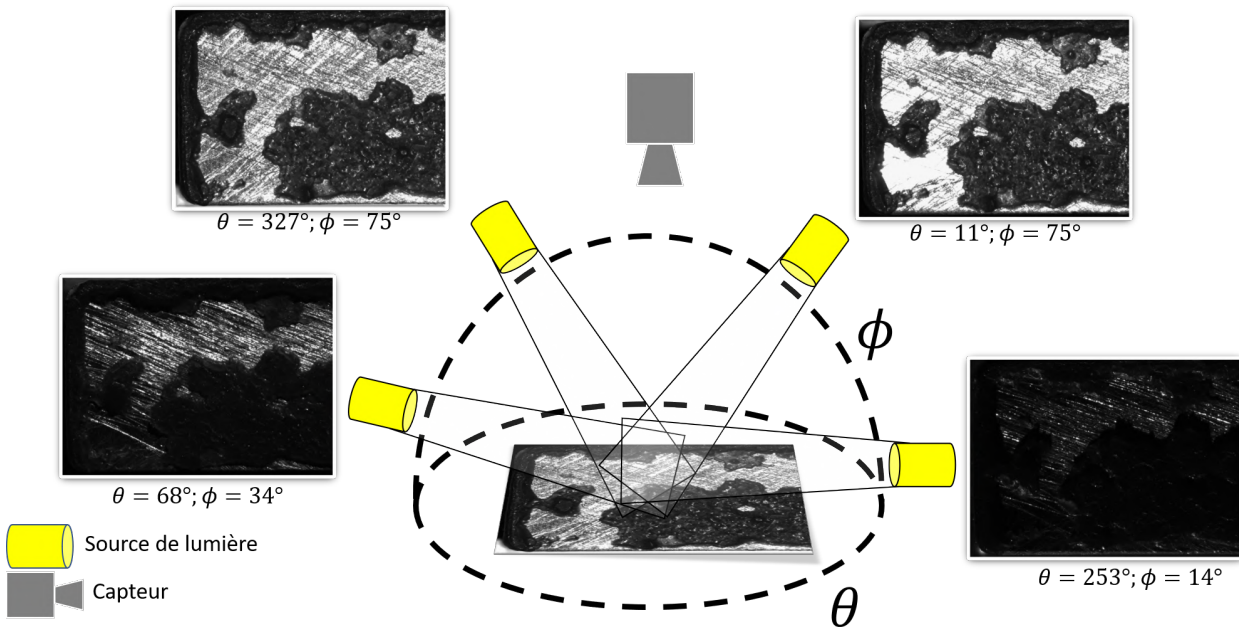


Figure 1.31 – Schema d'une acquisition RTI

source de lumière. On a alors, pour chaque pixel  $P_{(i,j)}$ , un vecteur associé  $X = [X_1, X_2, \dots, X_N]$  correspondant à la réponse angulaire du pixel comme illustré dans la Figure 1.32 où  $lu$  et  $lv$  représentent les composantes associées aux directions d'éclairage projetées dans le plan horizontal.

Il est possible de modéliser la réflectance angulaire locale d'une surface à partir d'une acquisition RTI et d'un modèle d'approximation ou d'interpolation. Une scène virtuelle peut alors être reconstruite, avec une source de lumière virtuelle, configurable dans l'espace continu angulaire  $(\theta, \phi)$ . Il existe différents modèles tels que le Polynomial Texture Mapping (PTM) [Malzbender 00, Malzbender 01, Mudge 05, Kraemer 06], le modèle HSH (Hemispherical Harmonics) [Gautron 04, Ciortan 16, Pitard 15, Pintus 18], la méthode DMD (Discret Modal Decomposition) [Le Goïc 12, Pitard 17a, Pitard 17b, Lemesle 20] ou encore l'approche basée sur les RBF (Radial Basis Function) [Giachetti 17, Ponchio 19]. Le principe de chacun de ces modèles sera détaillé dans le chapitre 4. Nous pouvons observer dans la Figure 1.33, des exemples de reconstruction de la réflectance angulaire avec les modèles PTM, HSH et DMD.

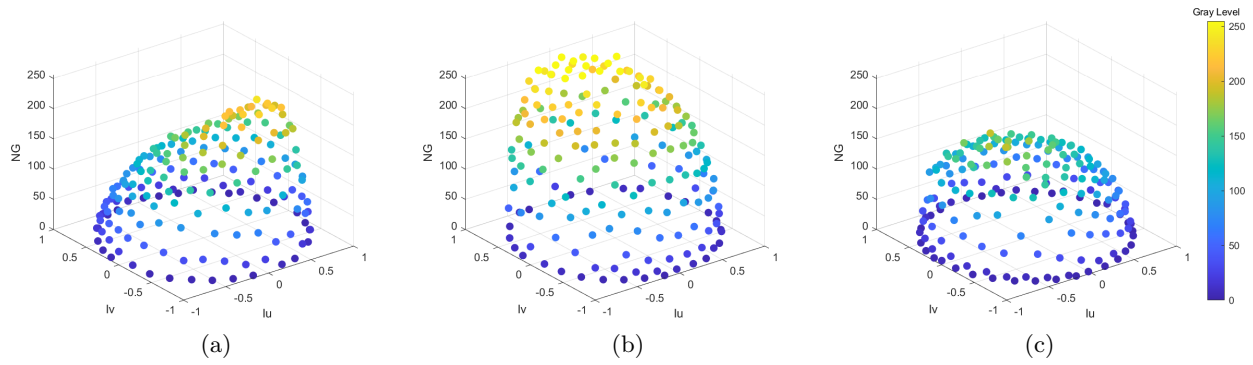


Figure 1.32 – Exemple de nuages de point RTI de trois différents pixels

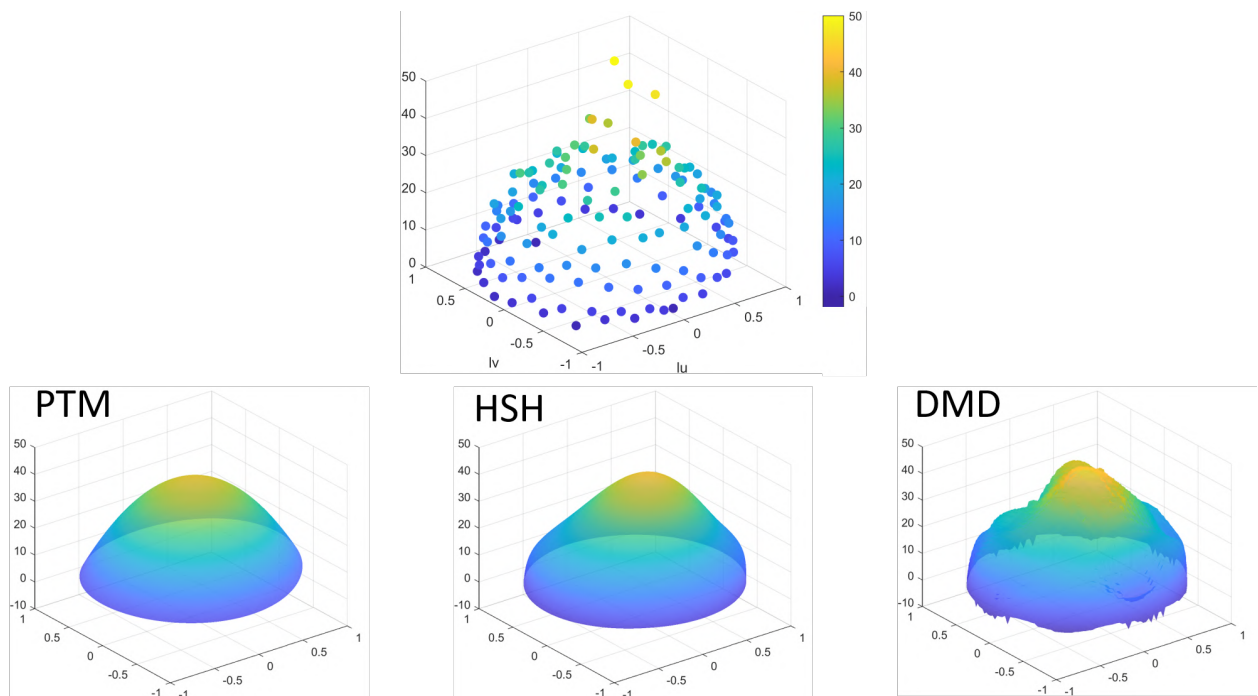


Figure 1.33 – Exemple de reconstruction de la reflectance angulaire d'un pixel avec les modèles de reconstruction PTM, HSH et DMD

La reconstruction de la scène peut servir d'outils d'aide à l'inspection [Zendagui 19, Zendagui 21]. En effet on peut définir des chemins virtuels d'éclairage préalablement définis pour que l'opérateur puisse inspecter l'apparence de la surface reconstruite. Cela évite ainsi la manipulation physique de la surface par les opérateurs et donc leur détérioration éventuelle. De plus le chemin d'inspection sera le même pour chaque opérateur rendant l'inspection plus robuste sur ce chemin. Enfin, à partir des données RTI, la géométrie locale de la surface acquise peut être estimée. Un grand nombre de problématiques liées à l'aspect des surfaces est très fortement impactée par les variations géométriques. Nous montrons dans le chapitre 4 que le RTI permet d'accéder à cette information (normales, pentes, ou encore courbures) de façon rapide et performante.

## 6 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les différentes approches qui concernent l'analyse des états de surface et de l'aspect (apparence visuelle) des objets, notamment en industrie :

1. L'approche humaine est aujourd'hui encore la première approche utilisée lors de l'analyse de l'aspect des états de surface. La capacité de l'humain à analyser son environnement visuel a permis à l'industrie de mettre en œuvre le contrôle d'aspect des surfaces, ou analyse sensorielle. De plus, la métrologie sensorielle, qui consiste à développer et formaliser les méthodologies, a permis de rendre plus répétables et reproductibles les résultats fournis par le contrôle humain. Enfin, malgré les inconvénients de l'approche tels que les coûts dûs aux résultats faux négatifs ou faux positifs, la méthode est appréciée par l'industrie grâce à sa relative simplicité et la flexibilité de l'humain vis à vis de la topologie des surfaces et des anomalies de surfaces à analyser.
2. L'approche géométrique est aujourd'hui encore peu utilisée dans l'industrie, mis à part dans certains domaines d'application spécifiques, malgré les nombreux avantages qu'elle présente. L'évolution des moyens de mesures permet, cependant, à ce type d'approche d'être de plus en plus utilisée lors de l'analyse des états de surface. L'objectif de cette approche est de lier l'impact visuel des anomalies de surface avec des descripteurs géométriques. Ces descripteurs géométriques permettent d'utiliser des mesurandes physique. La caractérisation des anomalies par les descripteurs géométriques fournis des résultats répétables et reproductibles, donc robustes.
3. L'approche photométrique permet la mesure et l'analyse de l'interaction entre une surface et son environnement lumineux. Cette approche aide à l'inspection visuelle et à l'évaluation de la qualité des états de surface. Nous avons présenté la technique de référence, la BRDF, puis nous avons présenté une autre technique, dérivé de la BRDF, appelé Reflectance Transformation Imaging (RTI). Le RTI fait actuellement l'objet de développement important pour des applications industrielles. Cette technique peut, par exemple, aider à la détection d'anomalies de surface. Or l'approche géométrique ne peut le faire dans un temps raisonnable dans le contexte d'une application industrielle des produits à hautes valeurs ajoutées. Le RTI étant une technique encore jeune (2001 [Malzbender 01]), il présente encore des limites au niveau de la mesure, du traitement et de l'analyse des données.

Nous proposerons plusieurs méthodes et outils afin de corriger certaines des limites du RTI. Cependant ces méthodes nécessitent un système de mesure RTI robuste et modulaire. Nous présentons dans le Chapitre 2 un état de l'art de la méthode RTI et des système d'acquisitions existants. Ensuite, nous présentons un appareil de mesure RTI couplé avec un logiciel de pilotage que nous avons développé pour répondre à nos besoins de développement et d'expérimentation. Le système permet la modification et l'ajout de modalité d'acquisition et de méthodes. Les travaux présentés dans ce document ont pu être ainsi développés et implémentés dans ce système afin de répondre aux limites du RTI. L'une de ces limites est lié à un biais de mesure lié à un paramètre d'acquisition RTI : le temps d'exposition. Nous montrons dans le Chapitre 3 que les propriétés d'une même surface, estimé à partir des données RTI, varient selon le choix par l'opérateur du temps d'exposition, sans que les propriétés intrinsèque de la surface n'aient changé. Ce biais rend les résultats d'analyse RTI non répétables ni reproductibles. Ainsi, dans le Chapitre 3 nous proposerons une méthode pour corriger le biais de mesure lié au choix du temps d'exposition. Cette méthode est basée sur le couplage intelligent entre le RTI et le High Dynamic Range (HDR), une technique qui consiste à acquérir la pleine dynamique de la scène. Le High Dynamic Reflectance Transformation

Imaging (HD-RTI) permet donc la mesure sans perte d'information des surfaces brillantes dont la réponse auparavant dépassait la plage de mesure du capteur. Une autre des limites du RTI est la grande quantité de données, complexe à analyser, obtenue avec une acquisition RTI. Or ces données doivent être traitées afin de réduire leurs dimensions et en extraire une ou plusieurs descriptions qui puisse être interprété et donc analyser/comparer. Ainsi, dans le Chapitre 4 nous proposons une méthodologie afin de caractériser l'apparence des surfaces à partir des données RTI. La caractérisation des états de surface est basée sur l'utilisation de descripteurs d'apparence, statistiques et géométriques. La diversité des descripteurs que nous proposons permet une description fine des différentes propriétés des pixels des acquisitions RTI. Enfin, dans le Chapitre 5, nous utiliserons les descripteurs extraits des acquisitions RTI afin d'estimer une distance entre une population et un étalon (une référence). De cette distance est estimée la saillance visuelle en chaque pixel et permet ainsi d'aider à la détection des anomalies de surfaces. Nous proposons une approche multi-échelle et multi-niveau de la saillance afin d'affiner la détection selon la taille et la criticité des anomalies recherchées. La distance est ensuite étendue afin de pouvoir comparer les états de surface entre eux et aider, par exemple, au suivi des états de surface.



## Vers une métrologie de l'apparence : proposition d'un système d'imagerie multi-modal

### *Objectif du chapitre*

*Les systèmes RTI actuels sont limités et ne peuvent répondre à nos besoins en terme d'implémentation et d'expérimentation des modalités et méthodes liées au RTI. Nous avons donc développé un système de mesure RTI couplé à un logiciel de pilotage. Cette ensemble nous fournit une liberté en terme de paramètre d'expérimentation mais aussi permet de valoriser notre travail auprès d'utilisateurs finaux. De plus, l'accès au matériel et au code du logiciel nous permet d'ajouter, de modifier, et de contrôler de manière fine, les différentes modalités d'acquisitions.*

## 1 La technique d'acquisition RTI : Systèmes et approches d'acquisition existants

La technique d'acquisition RTI est une approche instrumentale de la mesure de l'apparence des surfaces qui nécessite un capteur afin de mesurer la réflectance de la surface mais aussi d'éclairer la scène avec différents angles d'éclairage. Le RTI demande alors la mise œuvre de systèmes de mesure afin de répondre à ces spécificités. Il existe aujourd'hui plusieurs approches d'acquisition RTI. Pour la plupart, la différence se situe au niveau du système d'éclairage, et notamment, dans le positionnement de l'éclairage. Dans la section 1.1 nous présentons les différents systèmes de mesure RTI existants. Ensuite dans la section 1.2, nous détaillerons les différentes limites du RTI auxquelles les systèmes de mesure RTI actuels ne peuvent répondre.

### 1.1 La technique de Reflectance Transformation Imaging

Le modèle d'acquisition RTI qui nécessite le moins de matériel consiste en une acquisition à la main (Free-form RTI). C'est à dire que la caméra est fixe et la source d'éclairage est positionné par un opérateur humain autour de la surface. Les avantages de cette méthode est qu'elle est

peu couteuse et s'adapte facilement aux surfaces acquises (taille, complexité, ...) [Ciortan 16] mais aussi au contexte de l'acquisition (espace exigü, acquisition verticale et horizontale,...) [Selmo 17] telle que, par exemple, une acquisition RTI sous l'eau (Figure 2.1). Cependant cette approche, sans calibration, est très peu robuste car l'humain intervient dans le positionnement de la source d'éclairage. La direction de la source de lumière vers le centre de la surface et sa distance constante ne sont pas garanties de même pour l'homogénéité des positions angulaire de la lumière. Cette approche nécessite alors l'utilisation de méthode d'acquisition telle que le H-RTI [Giachetti 18] afin de retrouver, à partir de chaque image, la position de la source d'éclairage. Un étalon peut être utilisé, telle qu'une ficelle, afin de maintenir une distance surface/source d'éclairage constante [Mudge 06].

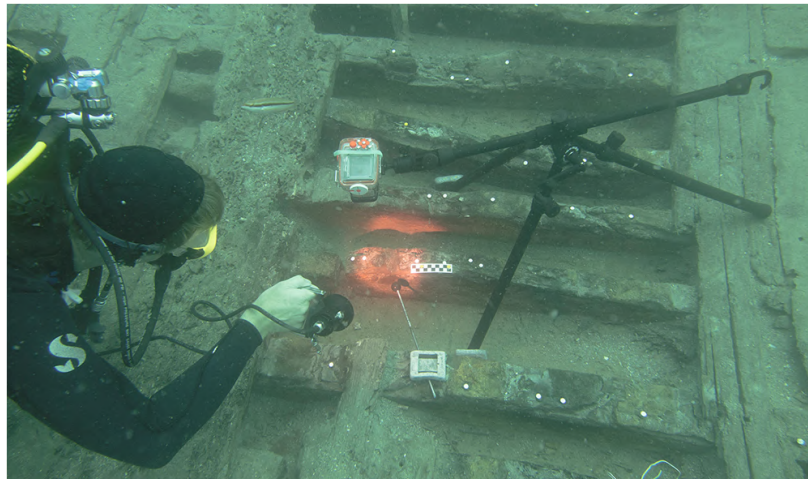


Figure 2.1 – Acquisition Underwater RTI (URTI) réalisé sur l'épave romaine du premier siècle av. J.-C. du Cap del Vol, de [Selmo 17]

Une autre approche consiste à construire un dôme dans lequel sont placées plusieurs LED dirigées vers le centre du dôme [Selmo 17, Mytum 18]. Au sommet du dôme est placé un capteur et le dôme est placé sur la surface à acquérir. Cette approche peut être transportable si les matériaux et la structure du dôme sont légers comme illustré dans la Figure 2.2, voire miniaturisé [Corregidor 20]. De plus l'acquisition est plus robuste car les sources d'éclairage sont fixes et calibrés. Elles sont à distance égale du centre et elle éclairent dans la direction du centre. En contrepartie, généralement, le dôme est adapté pour une taille maximale de surface à inspecter. De plus le positionnement des LED peut ne pas être adapté pour acquérir certaines surfaces complexes. Enfin ce système peut être compliqué au niveau de la maintenance du matériel quand le nombre de LED, et donc de branchement, augmente.

D'autres approches proposent un arceau avec des LED fixées dessus. Cet arceau peut tourner autour de la surface en  $\theta$  à l'aide d'un moteur rotatif comme présenté dans la Figure 2.3. On peut alors obtenir la discrétisation de l'information de réflectance angulaire locale en  $\theta$  souhaitée. La mesure est toujours robuste mais offre plus de liberté dans le choix des angles d'acquisition. Ce type de système est cependant moins portable à cause du poids du système, et notamment du moteur, qui augmente avec la taille des surface que l'on peut acquérir. Une surface de plus grande taille nécessite un arceau plus grand et donc un moteur plus puissant.

Certains systèmes RTI consistent en l'utilisation d'un bras robot (Figure 2.4). Cette méthode, après calibration, peut être transporter et être utiliser afin de mesurer des surfaces. Comme la première approche, le bras robot peut s'adapter au contexte de l'acquisition tel que l'encombrement du lieu de l'acquisition. Cette approche offre donc un bon compromis entre flexibilité et robustesse



Figure 2.2 – Expérimentation d'un prototype de dôme RTI - ©Frédérique PLAS / MAP / CNRS Photothèque



Figure 2.3 – Système RTI du laboratoire NIMBE par Mickaël Bouhier et Jean-Charles Méaudre

de la mesure RTI. Cependant, le bras robot présentant beaucoup de degré de liberté dans son mouvement, il n'est pas simple de le programmer pour une acquisition RTI. De plus un bras robot, comparé aux précédentes approches, est plus coûteux.

Enfin une dernière approche nécessite d'utiliser un drone afin de porter et positionner la source d'éclairage comme illustré dans la Figure 2.5. Le RTI avec drone nécessite peu de calibration [Fowler 20] d'autant que les drones deviennent plus performant en devenant programmable offrant ainsi la possibilité de programmer des déplacements et des positionnements précis [Hepp 17]. Un drone peut aussi transporter le capteur. Le couple de drone (caméra/lumière) peut alors acquérir des surfaces difficiles d'accès [Krátký 20]. Le drone est donc particulièrement utile pour l'acquisition RTI de très grands objets ou de scène inaccessible. Sans cette approche l'acquisition RTI de grands objets doit être alors faite en plusieurs fois en segmentant la surface à acquérir en plusieurs régions





Figure 2.4 – Un système RTI se composant d'un bras robotisé qui tient une source d'éclairage, un plateau tournant sur lequel est posée la surface et une caméra multispectrale, de [Kitanovski 21]



Figure 2.5 – Acquisition RTI sur la statue commémorative du surfeur à Santa Cruz, en Californie, en pilotant un drone transportant une source d'éclairage, de [Fowler 20]

à mesurer [Miles 14], ou certains surfaces ne sont pas acquises faute de moyen d'accès.

## 1.2 Limites des dispositifs d'acquisitions RTI actuels

La technique RTI présente plusieurs limitations. Ces limitations sont liées aux dispositifs d'acquisitions, aux paramètres de l'acquisition RTI, à la mesure et au traitement des données. Quelques exemples de limitations sont décrits ci-dessous.

Avant la mesure des données RTI, plusieurs paramètres sont à configurer. L'un de ces paramètres correspond aux positions angulaires de la source de lumière. Lors de la mesure d'une surface, généralement les positions de la lumière sont positionnées homogènement sur l'espace hémisphérique. En effet, ne connaissant pas en avance les propriétés des surface inspectées, en

moyenne, ce type de répartition permet que l'information pertinente soit mesurée pour tout type de surface. Quand le comportement de la surface est lambertien alors la reconstruction de la réflectance angulaire de la surface ne nécessite pas beaucoup d'information pour être modélisé. Cependant le positionnement homogène des angles d'éclairage, n'est pas optimisé pour les surfaces à géométrie globale complexe et/ou présentant de rapide variation de la réflectance angulaire comme présenté dans la Figure 2.6. Dans le cas de surfaces complexes (anisotropes par exemple), le maillage d'une acquisition RTI ne permet généralement pas de connaître le comportement de la surface lors de la variation de sa réflectance entre plusieurs positions angulaires acquises. Il manque alors de l'information pour reconstruire les positions angulaires intermédiaires.

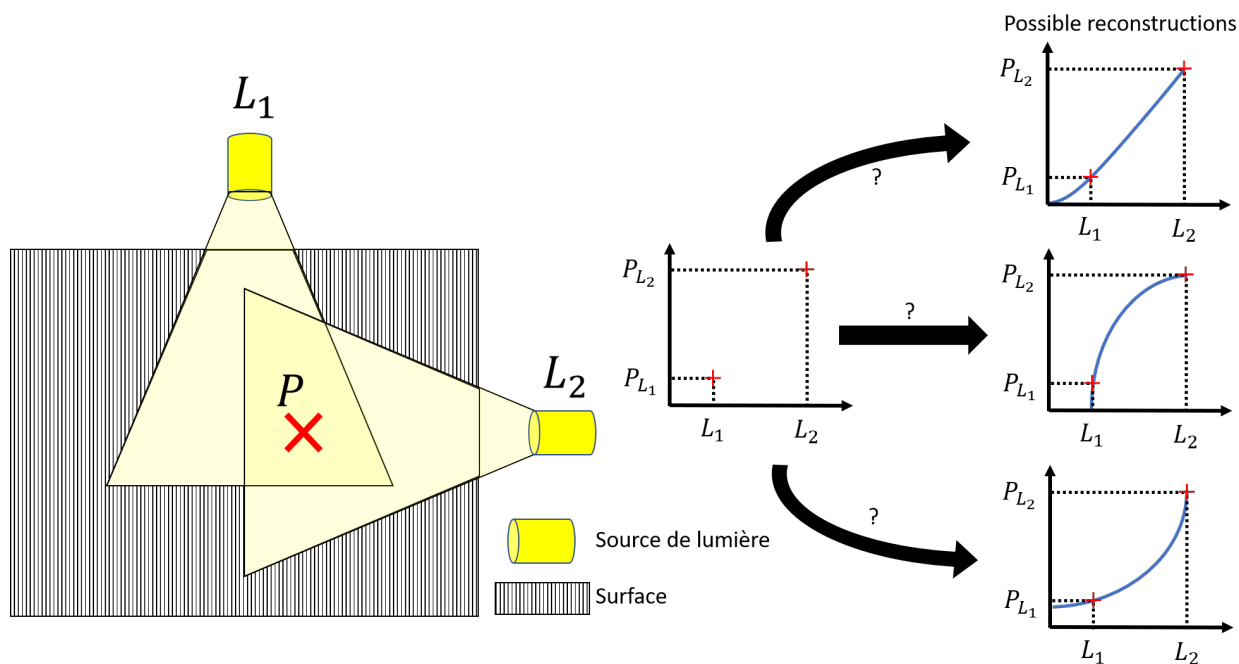


Figure 2.6 – Schéma du problème de modélisation de la réflectance angulaire lorsque la variation de réflectance, entre deux positions d'acquisition, est trop grande

La méthode du Next Best Light Position (NBLP)[Luxman 21] permet de résoudre ce problème lors de la mesure en affinant automatiquement et récursivement le maillage autour des positions angulaires critiques dont la variation des réponses de réflectance entre les positions voisines est trop importante. Cependant, les approches de mesure RTI utilisant des dômes à LED fixes ne peuvent implémenter cette solution car ils ne peuvent modifier les angles d'éclairages pour les adapter à la surface. De plus, cette méthode demande un traitement des données lors de l'acquisition. Or cela n'est pas possible sans couplage entre l'appareil de mesure et un logiciel de traitement en temps réel.

Après l'acquisition des données RTI, la modélisation des données suppose que les positions angulaires d'acquisition soient homogènement réparties sur l'espace  $(\theta, \phi)$  or ce n'est généralement pas le cas (Figure 2.7). Les positions d'acquisitions RTI ne sont pas homogènes pour différentes raisons telles que l'encombrement matériel, acquisition faite manuellement (free-form RTI) ou une modalité d'acquisition spécifique. Pour corriger la non homogénéité des positions angulaires de la source de lumière, une pondération de ces positions peut-être effectuée afin de donner plus de poids aux positions avec peu de voisinage et à l'inverse un poids plus léger aux positions dans un maillage dense [Castro 20, Castro 19a, Castro 19b]. Cependant, beaucoup d'approches d'acquisition RTI considère les positions angulaires de leurs acquisitions homogènes, et applique les modèles de

reconstruction ou les traitement de données sans corriger ce biais.

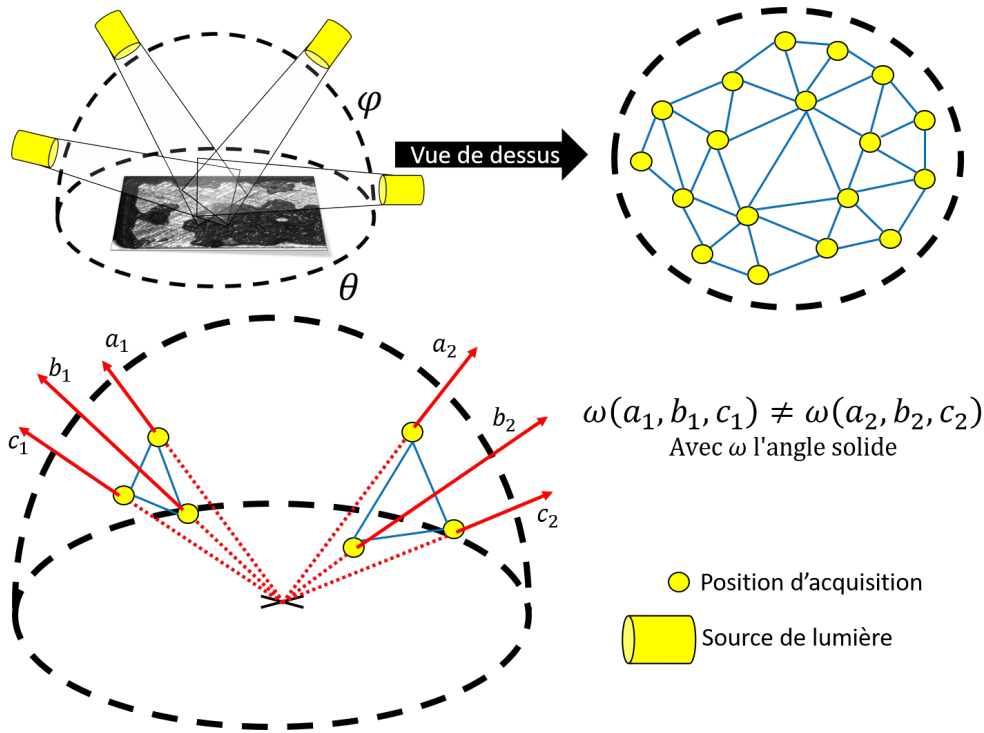


Figure 2.7 – Schéma d'une acquisition RTI non homogène

Une autre limitation vient des paramètres liés à la source d'éclairage, notamment la longueur d'onde. La mesure peut s'avérer inefficace sans l'utilisation de technique multispectrale [Kitanovski 21]. En effet, le couplage de la technique RTI avec le changement de longueur d'onde permet d'acquérir différentes informations sur des surfaces multimatériaux [Giachetti 17] afin d'optimiser la caractérisation de chacun d'eux. Un cas particulier du multispectral est l'utilisation des longueurs d'ondes correspondantes aux couleurs visibles rouge, vert et bleu. Avec une caméra couleur, une matrice de filtres alternant les pixels rouge, vert et bleu permet d'acquérir l'information couleur de la scène. Cependant un algorithme est ensuite utilisé afin d'estimer l'information manquante pour chaque canal, créant ainsi des biais de mesure (Figure 2.8). En utilisant une caméra monochromatique, afin d'acquérir trois photographies de la scène éclairée, avec un éclairage rouge, vert et bleu, l'information couleur de la scène est obtenue sans points non mesurés. L'information couleur est ensuite pondérée par rapport à la réponse de la caméra selon les longueurs d'ondes utilisées et les propriétés de la source de lumière tels que l'angle solide ou encore la distance. Cependant, généralement, les capteurs utilisés dans les approches d'acquisitions RTI sont des capteurs couleurs et le système d'éclairage est constitué d'une source de lumière blanche. Seul quelques approches spécifiques utilisent une longueur d'onde couplée à un capteur spécifique. Aucune approche ne permet la mesure RTI avec plusieurs longueur d'onde à la fois.

Lors de l'acquisition RTI, un biais lié à la source d'éclairage apparaît. Lors de la mesure, l'angle du flux lumineux n'est pas la même sur toute la surface pour une source de lumière non collimatée. Ceci est vérifié par le principe même de la méthode H-RTI. Cette méthode consiste à définir l'angle de la caméra selon la position du point spéculaire sur chacune des sphères brillantes disposées autour de la surface. Or la position du point spéculaire n'est jamais la même sur toutes les sphères. Donc les angles entre chacune des sphère et la source d'éclairage ne sont pas égaux. Pour une position  $\theta$  et  $\phi$  et pour un angle solide de la source de lumière donnés, l'angle relatif aux points de la surface varie selon la distance du centre de la région acquise comme illustré dans la Figure 2.9.

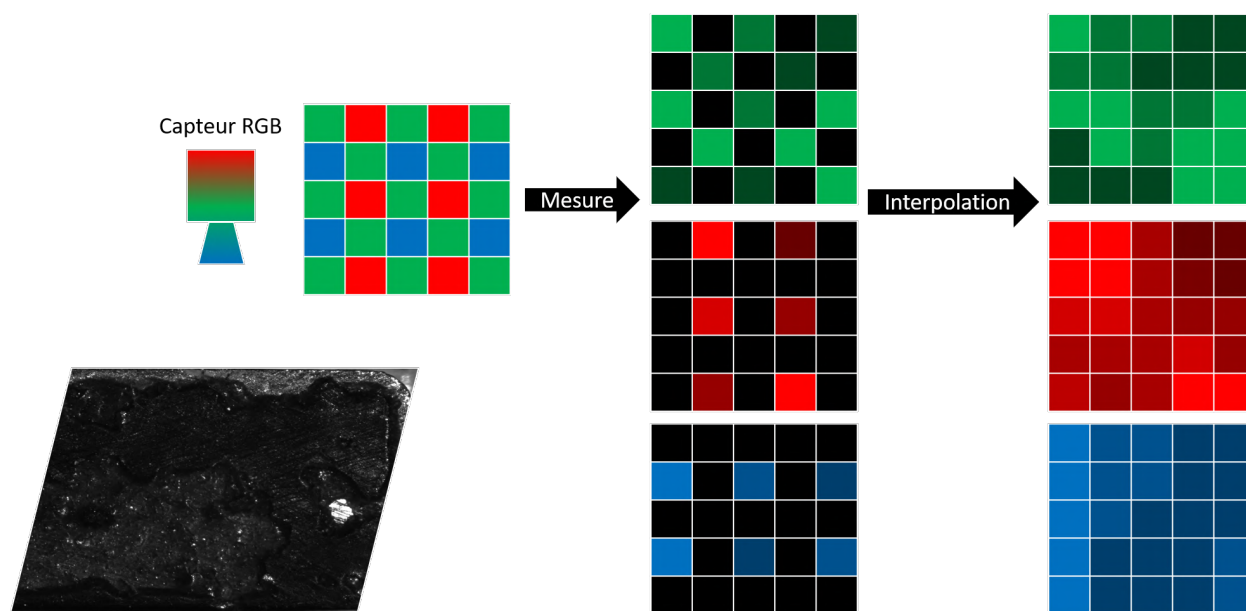


Figure 2.8 – Acquisition avec un capteur couleur et interpolation des canaux rouge, vert et bleu

Cette variation d'angle de la lumière peut altérer la reconstruction de la géométrie de la surface en la déformant aux bords de la zone d'acquisition. Actuellement les approches d'acquisition RTI considèrent l'angle de lumière uniforme sur toute la scène acquise si la source de lumière est à une distance suffisante proportionnelle à la taille de la zone acquise. Cependant dans le cas de grande surface, il n'est pas possible de positionner la source d'éclairage assez loin. Le biais est donc amplifié dans ce cas-ci.

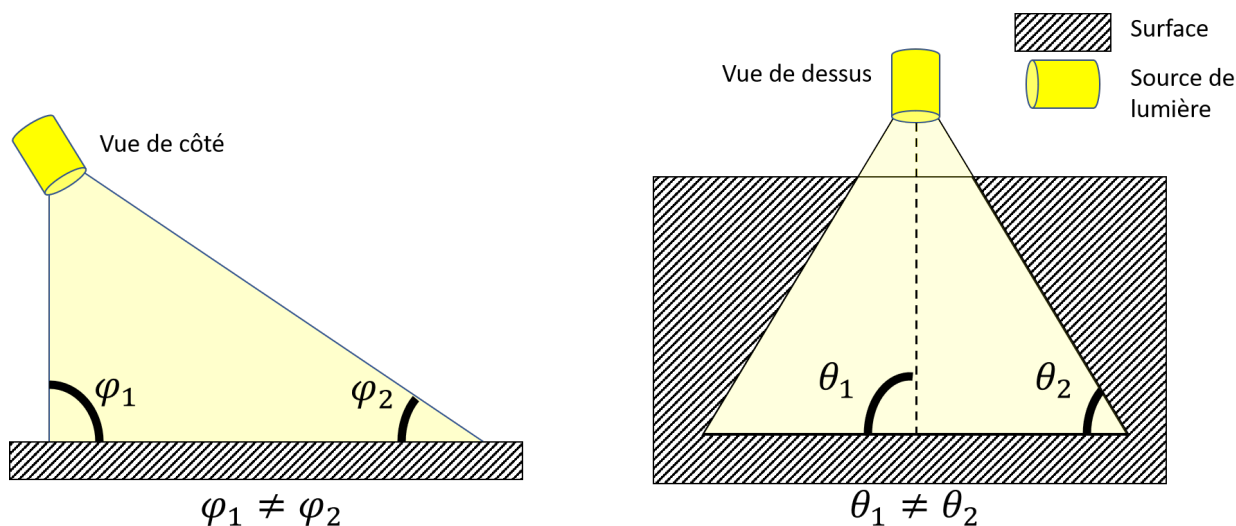


Figure 2.9 – Schéma de la différence d'angle de la lumière sur une image lors de l'acquisition RTI d'une surface

Des méthodes permettent d'estimer automatiquement, pour chaque angle  $\theta$  et  $\phi$  acquis, une correction pour chaque pixel selon différents paramètres tels que la distance surface/lumière, l'angle solide et la position angulaire de la source lumineuse [Huang 15, McGuigan 20]. Si ces paramètres ne sont pas connus alors certains peuvent être estimés à partir d'une acquisition Highlight RTI (H-RTI) [Giachetti 18]. A partir de quelques sphères brillantes disposées autour de la surface acquises, on peut alors, avec le pic spéculaire des sphères, déterminer la position de la source d'éclairage dans l'environnement, mais également la position relative de la source d'éclairage pour chaque pixel par

interpolation du pic spéculaire de chaque sphère.

D'autres biais sont liés au système optique tel que la profondeur de champ du capteur et de la surface inspectée. Certaines surfaces complexes ne sont pas mesurables entièrement par la technique RTI car elles possèdent une profondeur de champs trop importante pour le système optique et ne sont donc pas focalisées en tous points. La non focalisation des points de la surface biaise la reconstruction de la réflectance angulaire. Cela lisse aussi l'analyse des données car la caméra va intégrer l'information de plusieurs points de la surface à la fois en un pixel. Pour être focalisé en tous points de la surface une méthode consiste à coupler la méthode du Focus Variation avec le RTI (FV-RTI)[Lewis 21]. Cependant, les approches actuelles ne proposent pas de méthode pour répondre à ce problème de focalisation car aucun système actuel ne permet de modifier la position de la caméra de façon robuste. La position de la caméra est fixé au départ de l'acquisition et les pixels non focalisés sont traités de la même façon que les pixels focalisés.

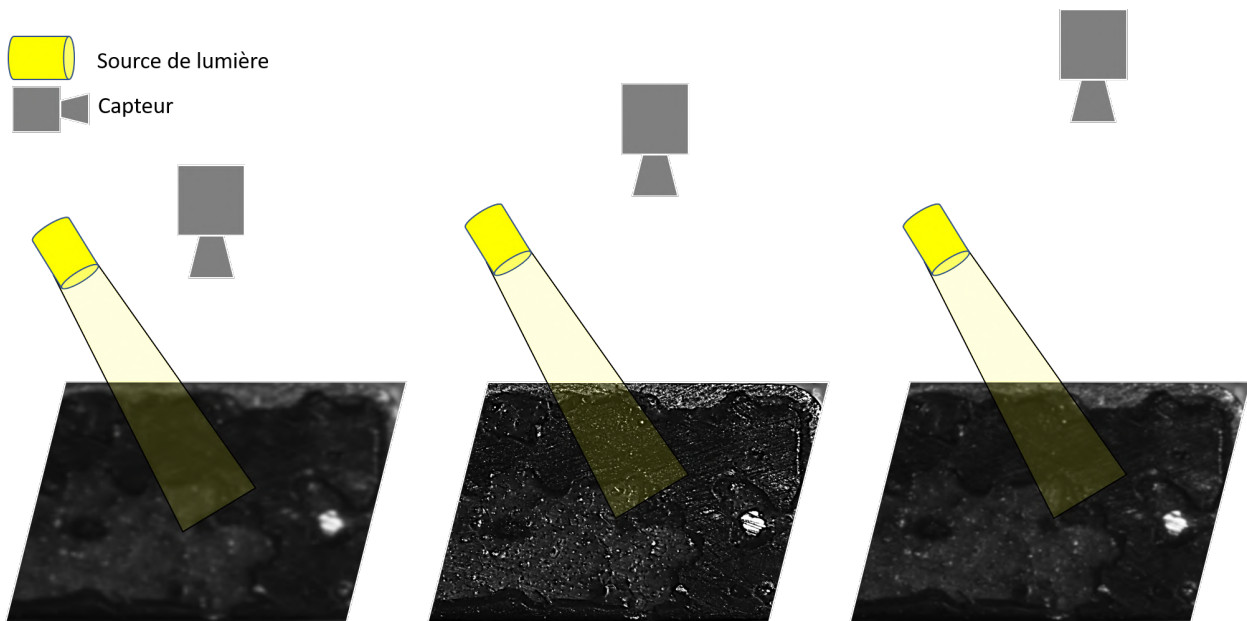


Figure 2.10 – Schéma de plusieurs acquisitions RTI avec des niveaux de focalisation différents

Un second biais lié au capteur empêche la mesure de certains points d'une surface : le temps d'exposition. En effet, le temps d'exposition est le même pour tous les angles d'éclairage d'une acquisition RTI. Or, dans le cas d'une surface dont la dynamique est trop grande pour la caméra, on obtient des données mal mesurées lors d'une acquisition RTI (pixels sous-éclairés ou sur-exposés). Ces points mal mesurés ne peuvent donc pas être bien caractérisés par la suite par manque d'information. De plus le choix, arbitraire, du temps d'exposition par un opérateur humain rend non robuste les acquisitions RTI. Les mesures ne sont alors pas répétables ni reproductibles. De même que pour le problème de focalisation, le temps d'exposition est fixé au départ de l'acquisition RTI est les pixels saturés ou sous-éclairés sont considérés de la même façon que les pixels bien mesurés. L'étude de ce problème est développée dans le Chapitre 3.

Le RTI présente beaucoup de limites auxquelles les systèmes de mesure RTI actuels ne peuvent répondre. Soit ils ne proposent pas le matériel adéquat afin de contrôler les différents paramètres de l'acquisition de façon fine et complète. Soit ils ne proposent pas les outils logiciels nécessaire afin de d'ajouter et de piloter des modalités d'acquisition RTI et de traiter les données acquises. Dans la section suivante nous présentons un système de mesure RTI que nous avons pensé et développé afin de répondre à nos besoin d'expérimentation et d'implémentation des différentes modalités et méthodes RTI mais aussi pour corriger les limites des systèmes d'acquisitions RTI actuels.

## 2 Proposition de nouvelles modalités d'acquisition RTI

Afin de répondre à ce besoin d'expérimentation pour divers modalités d'acquisition, le système nécessite d'être modulaire afin de s'adapter aux besoins matériel des différentes méthodes développées. Le système doit être, aussi, robuste afin de réaliser des expérimentation où la répétabilité est importante afin de pouvoir comparer les données mesurées. Enfin, le système doit être utilisable par le plus grand nombre par le choix d'une interface logiciel ergonomique et complète. Nous présentons dans la partie suivante, l'architecture mécanique du système (le support, les moteurs ou encore le système optique). Puis nous présenterons le logiciel de pilotage couplé au système.

### 2.1 Architecture mécanique

Nous avons développé un système d'acquisition RTI spécifique que l'on peut observer dans la Figure 2.11.

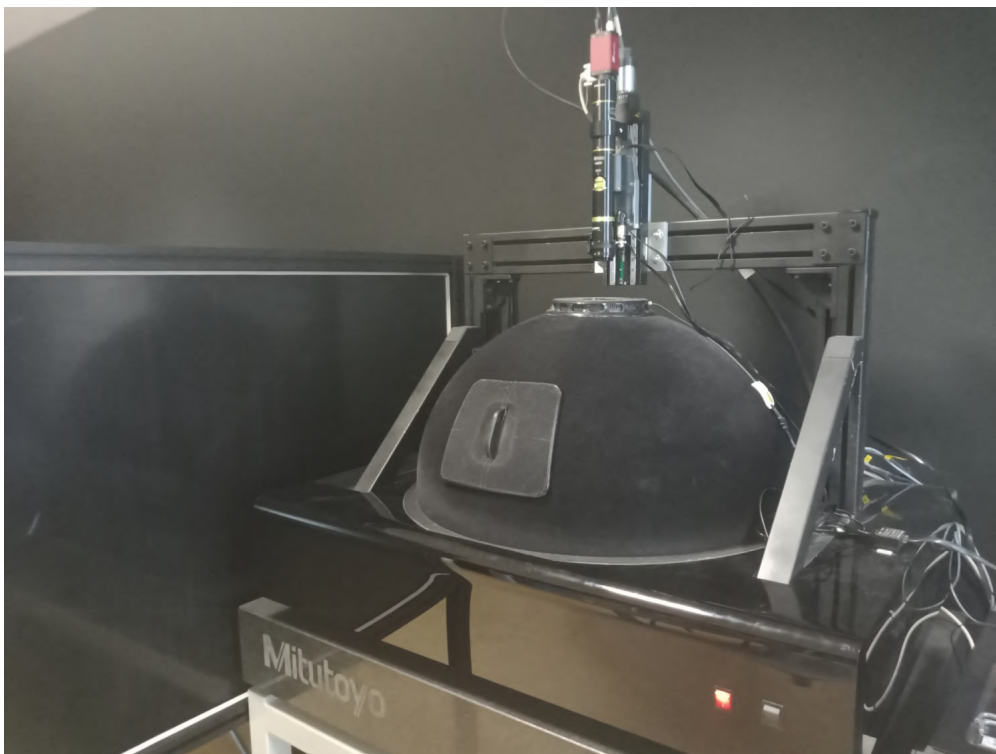
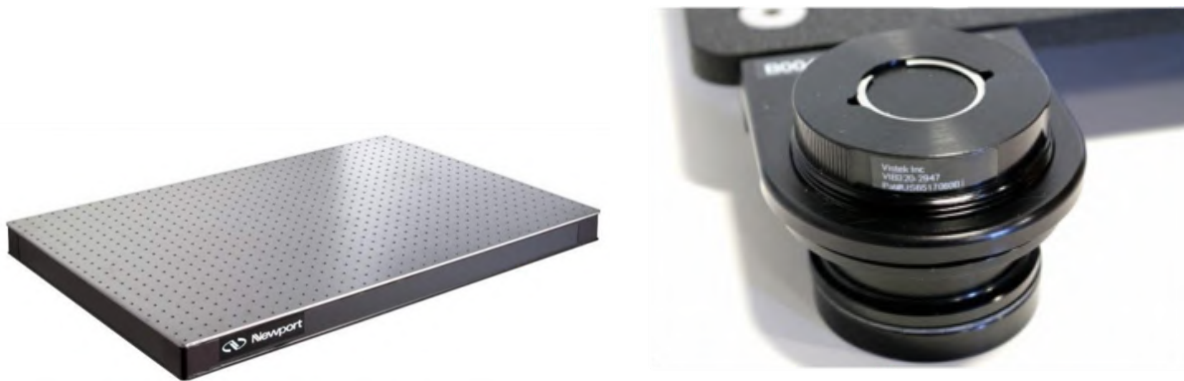


Figure 2.11 – Le système RTI développé au laboratoire ImViA pour les besoins de recherche en imagerie de l'apparence.

La structure porteuse du dispositif est constituée de barres constituant une structure en portique plus deux jambes de force. Horizontalement, deux barres permettent d'assurer une meilleure rigidité de l'ensemble, intégralement assemblé avec des équerres intérieures. Un carter de protection (plastique) est fixé sur le dispositif afin notamment d'isoler la pièce inspectée des possibles multi-réflexions lumineuses, et de protéger les accès électriques vis à vis des utilisateurs. Il est intégralement démontable pour faciliter les accès de maintenance du dispositif. Un dôme de 700 mm de diamètre est placé autour de la surface, permettant d'être le plus indépendant possible vis-à-vis de l'environnement lumineux extérieur. Les sources utilisées étant puissantes, il permet aussi un meilleur confort/ergonomie pour l'utilisateur du dispositif. La surface intérieure du dôme est floquée afin d'obtenir une surface la moins réfléchissante possible et de limiter les effets de multi-réflexions internes (effet satiné/velour noir). Une ouverture dans le dôme permet de positionner

la pièce sans devoir retirer le dôme. Le dôme possède une ouverture à son sommet afin de ne pas limité le déplacement vertical du système optique et ni obstruer son champs de vision.

La structure du système permet d'éviter les vibrations. En effet, le système d'acquisition peut mesurer à des échelles très fines (la taille d'un pixel pouvant aller jusqu'à  $3 \mu\text{m}$ ). Il est alors primordial que la surface et le capteur ne vibrent pas afin que la réflectance angulaire mesuré en un pixel corresponde à la réponse d'un seul point de la surface. Sinon des artefacts apparaîtront lors des analyses et reconstructions semblables à ceux liés aux photographies d'objets en mouvement avec un long temps d'exposition (effet fantôme). Ces artefacts altèrent donc la mesure et l'analyse des données et empêche aussi les acquisitions d'être fiables. Pour empêcher les vibrations, La machine est alors posée sur une table optique avec 4 pieds anti-vibratoire (Figure 2.12) puis l'ensemble repose sur une structure rigide et lourde (un bloc de marbre) afin d'être isolé de toutes vibrations extérieurs.



(a) Table optique 600 × 900 mm (M-IG-23-2 – Newport) (b) Pied anti-vibration (VIB320 2340 – NewPort)

Figure 2.12 – Système anti-vibration du système RTI

Le système RTI est composé de cinq moteurs possédant une origine absolue. La prise d'origine des moteurs permet d'assurer le positionnement des moteurs pour chaque acquisition. Deux moteurs sont associés à la source de lumière. Ils permettent de déplacer la source d'éclairage en tout point  $\theta$  et  $\phi$  (Figure 2.13). Ce système permet d'offrir la liberté de configurer les positions angulaires de l'acquisition RTI afin de les adapter aux besoins de la modalité d'acquisition ou de la surface étudiée. L'axe  $\phi$  est, cependant, limité à un angle maximum de  $75^\circ$  pour ne pas obstruer la vue de la caméra. Le dispositif de rotation est séparé du système de vision et de la pièce inspectée pour éviter les vibrations internes provoquées par les moteurs.

Les trois autres moteurs sont en lien avec le système optique. L'un d'eux permet de déplacer la camera sur l'axe  $Z$  et ainsi varier la distance entre le capteur et la surface. Les moteurs restants servent à modifier le zoom et la focalisation du système optique (Figure 2.14). Le zoom permet de changer l'échelle des acquisitions RTI, cela est utile pour mesurer certaines anomalies de surface qui sont propres à une échelle d'observation plus fine.

## 2.2 Architecture logiciel

L'ensemble du dispositif est piloté par un logiciel développé spécifiquement pour ce système. Le logiciel est codé avec Visual Studio 2019 (v142) avec le langage C++ (norme ISO C++17). Les options de compilation  $Ot$  et  $O2$  ont été activées afin d'optimiser la rapidité du programme au détriment de sa taille. Le programme contient 30795 lignes de code réparti sur 176 fichiers sources (.cpp) et 193 fichier d'en-tête (.h) pour un total de 1693 Ko après compilation.

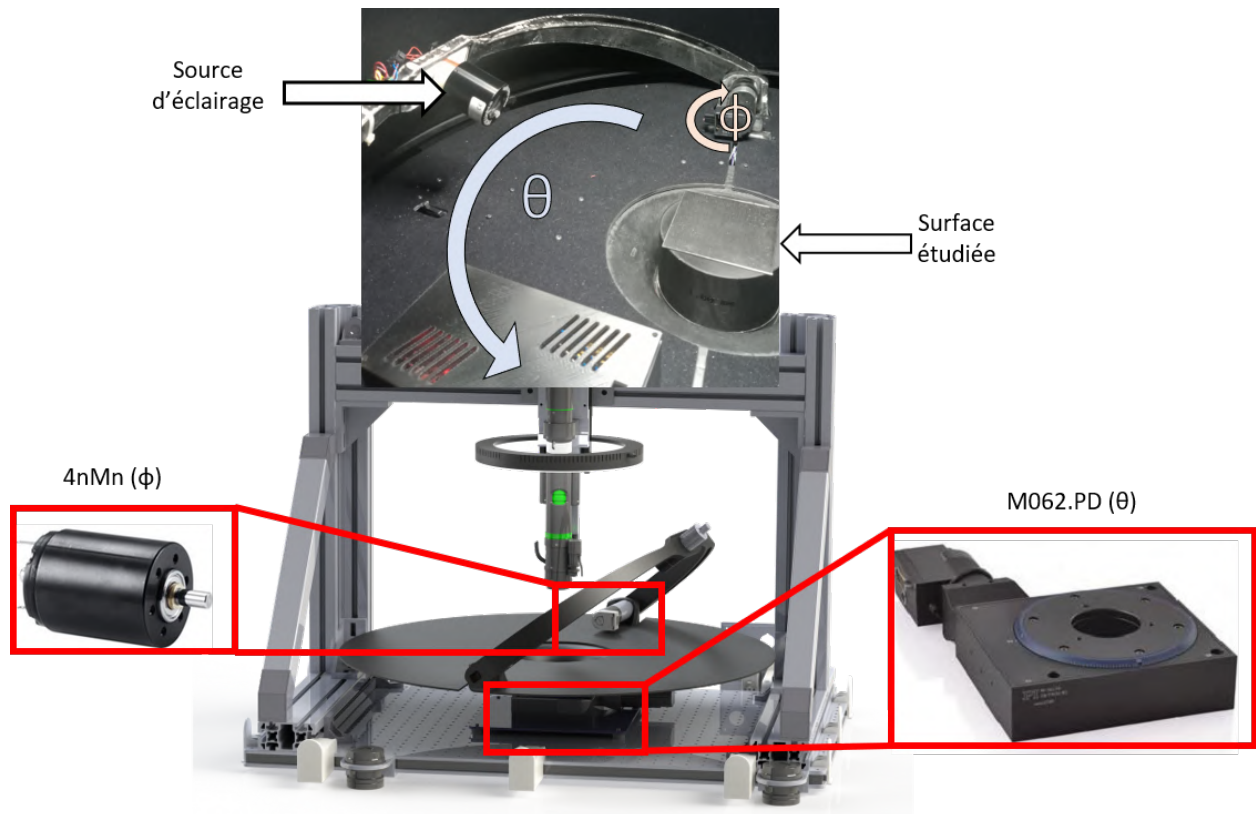
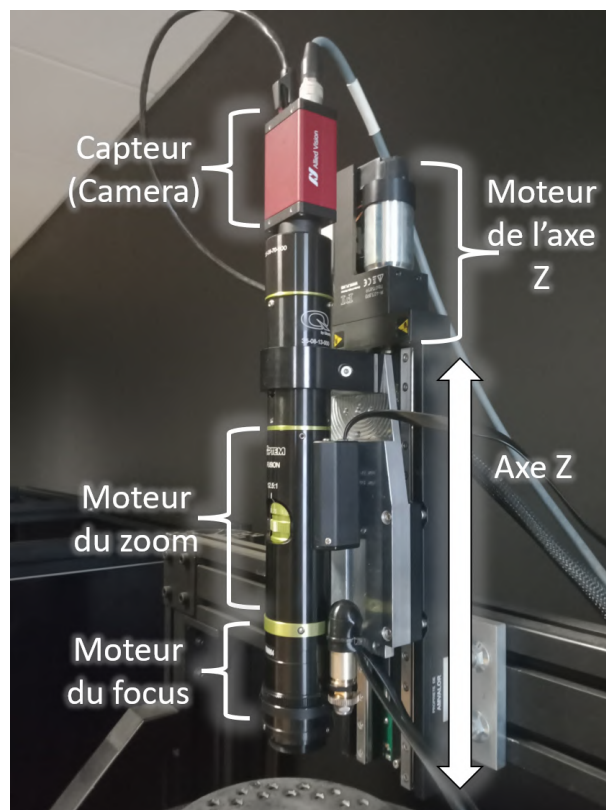
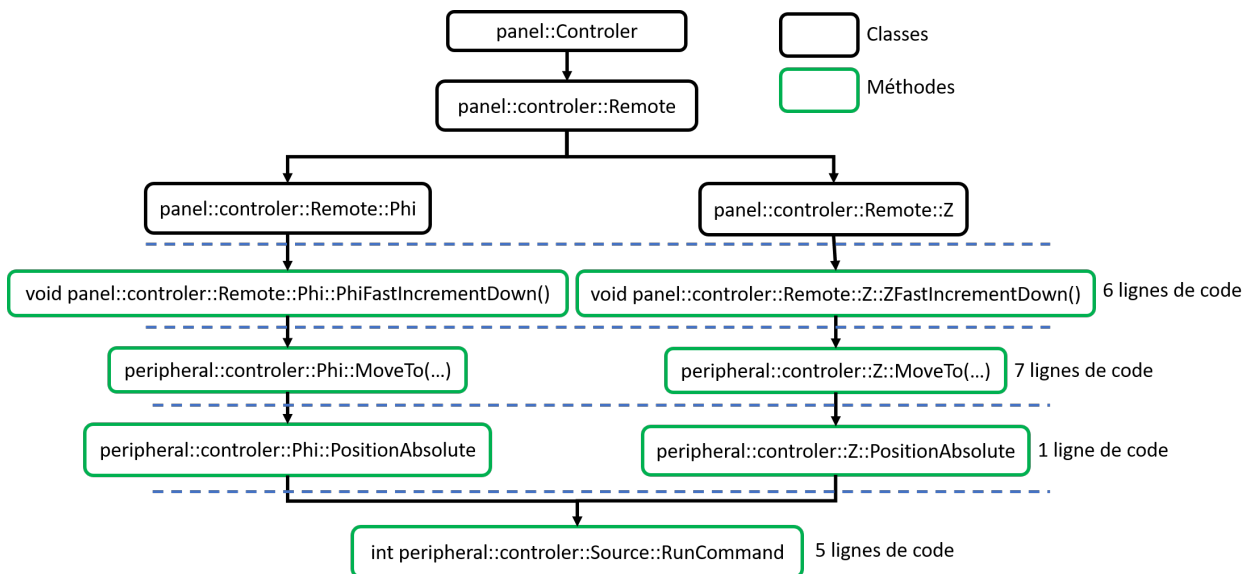
Figure 2.13 – Moteurs des axes  $\theta$  et  $\phi$  de la source de lumière

Figure 2.14 – Moteurs des axes du Z , du focus et du zoom du système optique



Le code doit répondre à plusieurs exigences. En effet, le code est accessible, par un dépôt github, aux différents doctorants travaillant sur les modalités et méthodes en lien avec le RTI, afin qu'ils puissent implémenter et expérimenter leurs travaux avec le système RTI. Le code doit alors fournir des méthodes robustes et simples à réutiliser. De plus, le code des nouvelles modalités/méthodes doit pouvoir être isolé du reste du programme afin de conserver l'intégrité du reste du programme (approche top-down). La structure du code est donc basée sur la décomposition et la décentralisation des méthodes.

La décomposition permet de réduire chaque partie du programme en un niveau élémentaire afin que les méthodes élémentaires puissent être utilisées par plusieurs autres méthodes. Le programme devient ainsi plus robuste et facile à maintenir car les méthodes élémentaires ne seront alors constituées que de très peu de lignes de code. Le code devient aussi très flexible et simple à faire évoluer grâce à la réutilisation des méthodes déjà implémentés (voir Figure 2.15).



Pour faciliter le travail en équipe en gardant un environnement de travail organisé mais aussi rendre plus rapide la validation des fonctionnalités implémentés, une première version du code est contenu dans un seul fichier source. Quand la nouvelle fonctionnalité est validée alors un processus de réusinage (refactoring) et de décomposition du code est réalisé.

La décentralisation du code permet d'assurer l'intégrité du programme principale lors de l'ajout de fonctionnalité et l'autonomie de chaque partie du programme. Lié à la notion de décomposition du code, chaque partie élémentaire du code est le plus indépendante possible du reste du code. Cependant un programme informatique est aussi le résultats d'une communication entre ces différents composants. Ces communication peuvent servir à rendre compte de l'état d'un processus ou d'un matériel. Nous avons alors mis en place un système de communication entre les objets et de surveillance de l'état du système qui rendent indépendant chaque enfant de son parent comme illustré dans la Figure 2.16.

Les Application Programming Interface (API) utilisées dans le code sont les suivantes :

- Qt - L'interface graphique utilisateur (GUI) est construite à partir de l'API Qt (ver 5.15.2). Qt est un projet mature, populaire, documenté, simple à mettre en œuvre et mis à jour régulièrement. Cependant, Qt est plus qu'une API , c'est un framework qui propose des outils, qui aident à construire l'architecture d'un programme, tel que le système des signaux et slots. Ainsi les objets du programme peuvent émettre ou recevoir des signaux. Selon le

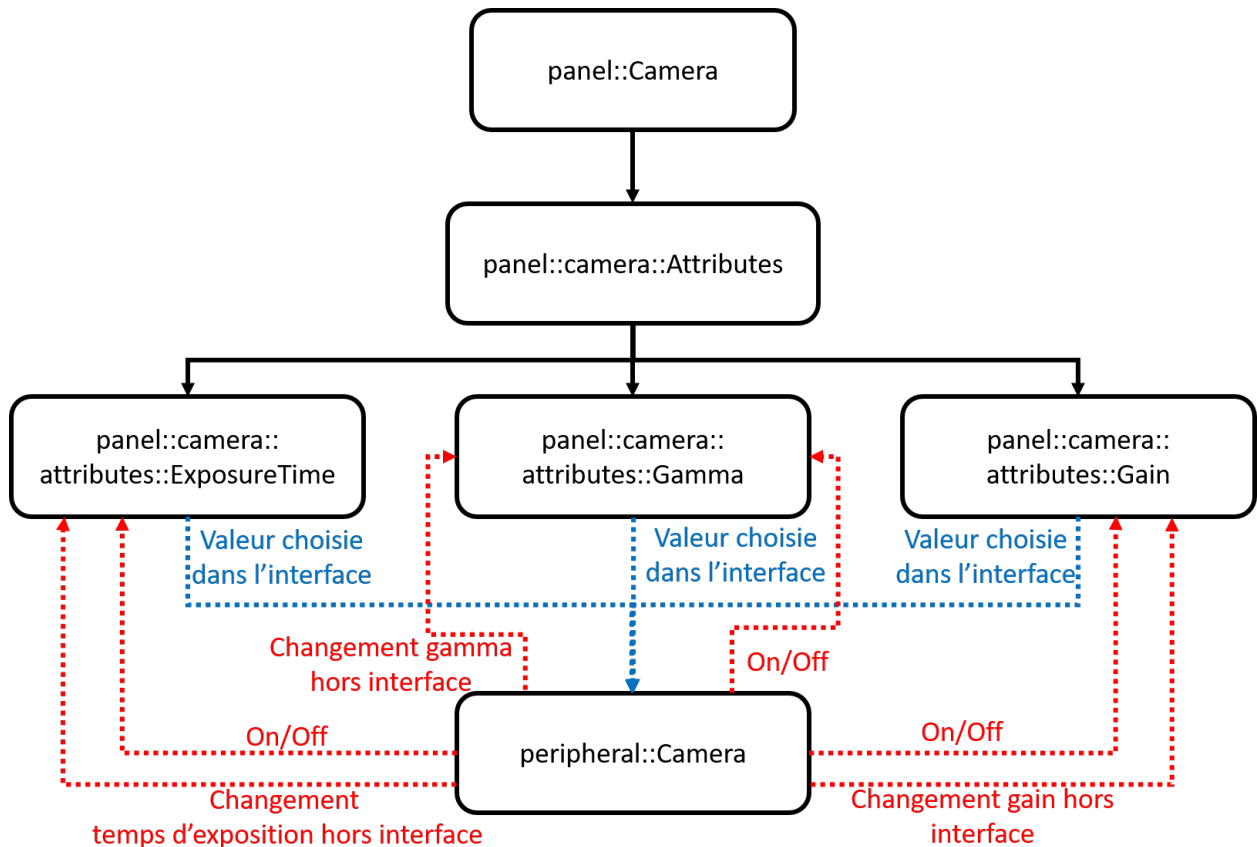


Figure 2.16 – Indépendance et communication entre les éléments du code

signal reçu par un objet, une méthode spécifique différente est appelée. C'est par ce système de signaux et de slots que nous avons pu rendre indépendants les différents objets de leurs parents et aussi rendre réactif le programme à tout changement d'état du matériel (allumage ou arrêt de la caméra, changement de la position de la LED, etc.) ou d'état du programme (lancement d'une acquisition RTI, etc.).

Dans l'interface du logiciel, il est proposé à l'utilisateur de pouvoir configurer le matériel ou les modalités d'acquisition RTI. Or ces différents paramètres possèdent des limites que les valeurs données par l'utilisateur ne doivent pas dépasser afin d'assurer le bon fonctionnement du programme. Par exemple, l'axe phi ne doit pas s'élever au-delà de  $75^\circ$  afin de ne pas obstruer la vue de la caméra, ou encore, le temps d'exposition de la caméra, lié au temps d'allumage de la LED, ne doit pas dépasser le temps d'allumage maximal de cette dernière. Les différents éléments de Qt tels que les `QSlider` (glissière), les `QPushButton` (boutons pour incrémenter ou décrémenter des paramètres) ou encore les `QLineEdit` (champs d'édition), possèdent deux variables qui correspondent à leurs valeurs limites. Quand l'entrée de l'utilisateur dépasse cette limite ou est invalide, alors l'élément ne prend pas en compte l'intention de modification du paramètre et garde la valeur précédente qu'il aura sauvegardé au préalable.

Afin d'aider l'utilisateur à prendre en main le logiciel de pilotage et comprendre les différents paramètres auxquels il a accès, des bulles d'aide sont présentes. Il suffit alors de laisser le curseur sur des endroits réservés de l'interface, associés à un paramètre ou une partie de l'interface, pour faire apparaître la bulle d'aide correspondante.

Enfin, dans le cas où l'utilisateur rencontre une erreur lors de l'utilisation du programme, il peut être difficile pour l'utilisateur d'expliquer le contexte de l'apparition de l'erreur. De plus,

la résolution de l'erreur peut être complexifiée si son apparition n'est pas assez reproductible ou répétable. Afin de simplifier la tâche de maintenance du programme auprès des utilisateurs finaux, et plus généralement afin d'identifier le plus efficacement possible la source d'une erreur dans le code, un fichier de log permet de garder une trace de l'activité de l'opérateur lors de l'utilisation du logiciel de pilotage. Nous pouvons activer et désactiver l'écriture dans les fichiers log pour certaines portions du code. Ainsi, les portions de code qui sont plus sensibles aux erreurs, dues notamment à des développements récents, ou les portions de code identifiées comme source d'une erreur, sont mis sous surveillance en inscrivant dans les log les différentes étapes des méthodes et algorithmes qui se déroulent.

- Vimba - La communication avec la caméra, est réalisé avec l'API Vimba (ver 1.7.0). Elle permet de configurer entièrement les paramètres de la camera et de gérer le flux des images capturés.

L'API fonctionne avec des chaînes de caractères afin d'accéder aux différentes propriétés de la caméra. Cependant, si une erreur est présente dans la chaîne de caractère envoyé, l'erreur ne sera détectée que lors de l'exécution, elle sera donc plus difficilement décelable. Afin d'éviter les erreurs de syntaxe toutes les chaînes de caractères attendus par Vimba ont été associées à une macro. Ainsi, si une erreur est présente lors de l'appel d'une méthode de Vimba, elle sera détectée lors de la compilation et non lors de l'exécution.

Nous avons mis en place des fonctions wrapper ou méthodes de délégation afin d'accéder plus simplement aux paramètres principaux et les plus utilisés dans notre programme. Elles évitent ainsi aux différents contributeurs du code de connaître les macros ou chaînes de caractères correspondant aux propriétés de la caméra et de rendre le code plus cohérent en proposant une syntaxe uniforme des méthodes du programme.

Si une erreur se déclenche, due à un arrêt du matériel ou un problème de communication, l'erreur est capturée et stockée dans une variable de type *VmbErrorType*. Ce type est un entier dont la valeur correspond à une erreur spécifique. Cette valeur est convertie en un message afin d'être utilisé dans l'interface pour prévenir l'utilisateur d'un problème lié à la caméra à l'aide d'une pop-up.

- gclib - Le contrôle des moteurs  $\theta$ ,  $\phi$  et  $Z$  se réalise avec la l'API gclib (ver 128). Elle permet le contrôle des moteurs Galil et ceux respectant la norme PLCS.

L'API permet de communiquer avec la carte de contrôle. La communication est basée sur des commandes appartenant à un langage propre à la carte (langage Galil). Chaque commande envoyé à la carte de contrôle est une chaîne de caractère. De même que pour l'API Vimba, des macros sont utilisées afin normaliser, simplifier et rendre plus robuste l'utilisation de l'API dans le code. En plus des macros, des méthodes de délégation permettent d'envoyer des commandes au contrôleur sans devoir connaître la syntaxe de la commande.

- Eigen - Pour les calculs d'algèbre linéaire et le traitement des données le logiciel utilise l'API Eigen (ver 3.4.0). Cette API propose divers outils de manipulation de matrices et vecteurs ainsi que des solveurs numériques. Elle est donc adapté pour la manipulation et le traitement des données RTI. L'ensemble d'instruction Advanced Vector Extensions 2 (AVX2) est utilisé afin d'augmenter les performance de Eigen.

Eigen ne peut gérer les matrices 3D à part des modules non supportés tels que les tenseurs. Or les données RTI sont comparable à des données 3D et les travaux présentés dans la thèse nécessite l'utilisation d'opérations sur la troisième dimension des données RTI. Pour pallier à ce problème nous avons vectorisé puis empilé les données RTI dans une grande matrice 2D. Chaque ligne de cette matrice correspond à la réponse de la surface mesuré pour une position

angulaire RTI. Or, si chaque donnée RTI est vectorisée de la même façon, alors chaque colonne de la matrice correspond à la réflectance angulaire d'un pixel. Cette structuration des données permet d'utiliser les méthodes *colwise* et *rowwise* de Eigen. Ces deux méthodes permettent d'appliquer une opération ou un méthode de Eigen (moyenne, somme ou encore la recherche du plus grand élément) à chaque colonne ou chaque ligne d'une matrice. Enfin, il suffit de connaître la taille initiale des données pour redonner la forme d'une matrice à chaque vecteur pour enregistrer les données ou pour les opérations nécessitant l'information spatiale des pixels. Nous avons alors développé un objet afin de gérer un ensemble de matrice 2D.

Afin d'optimiser la gestion de la mémoire et éviter les réallocation de la mémoire qui sont coûteuses, l'ajout d'une matrice n'est utilisé que dans certains cas spécifiques. Nous privilégions l'allocation de la mémoire nécessaire au départ d'une acquisition, ou lors du chargement d'une acquisition. Pour cela nous précisons le nombre de matrice nécessaire lors de la construction de l'objet ou lors son initialisation, puis nous écrivons les données RTI en chaque ligne de la matrice.

Eigen permet de manipuler les données matricielles et Qt permet d'afficher des images avec l'objet QImage. Afin de faire le lien entre les deux, des fonctions de conversion ont été développées avec gestion des matrices ou images correspondant à des données couleurs.

- SURF - L'API SURF (ver 1.30) permet l'export des données au format SUR. Ce format de fichier permet d'utiliser les outils de traitement de la topographie fournis par les logiciels d'imagerie et d'analyse des surfaces de l'éditeur *Digital Surf*. Ce format est l'un des nombreux autres formats pris en charge par le programme.

L'interface du programme est ergonomique afin d'être rapide de prise en main, et modulaire pour pouvoir modifier l'agencement de chaque élément de l'interface et ainsi permettre l'ajout d'éléments en lien avec les modalités d'acquisition ou les méthodes implémentées que l'utilisateur pourra utiliser. On peut observer l'interface globale du logiciel dans la Figure 2.17.

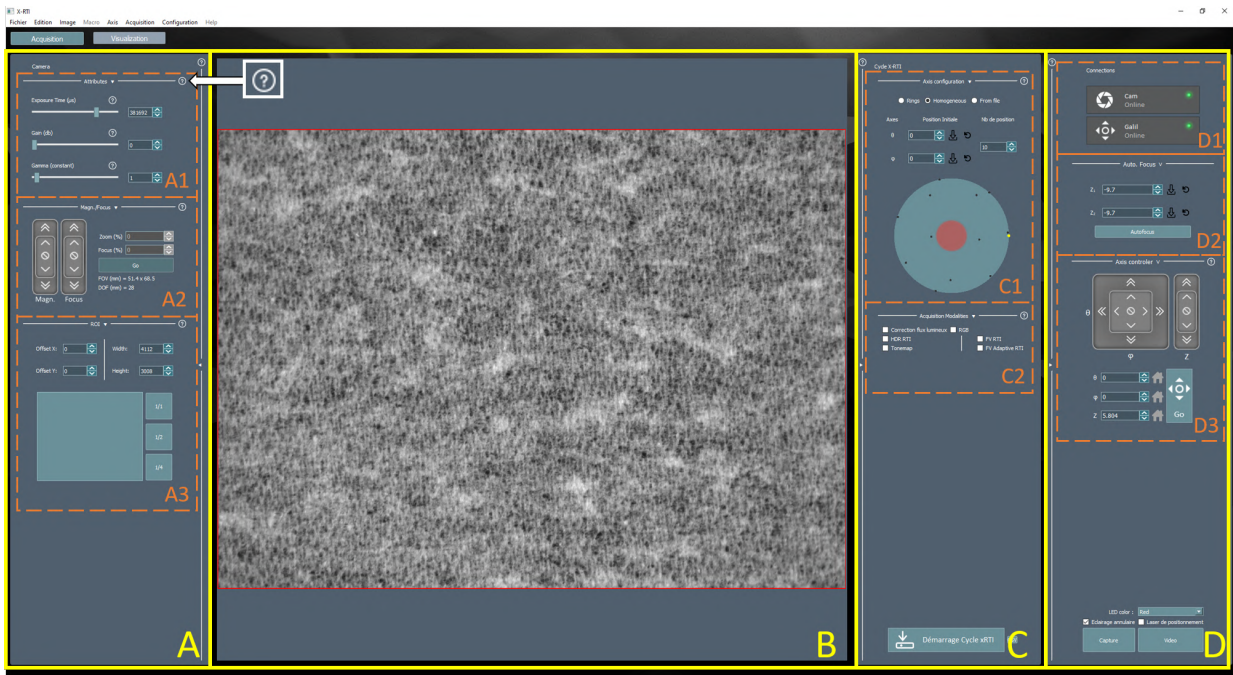
L'interface est décrite ci-dessous :

- A) Les paramètres du système optique peuvent être modifiés ici. D'une part, ceux de la caméra, tels que le temps d'exposition (A1) ou la région que l'on souhaite acquérir (A3). D'autre part, le zoom et le focus de la caméra peuvent être manipuler par deux télécommandes, offrant la possibilité de mesurer à plusieurs échelles (A2).

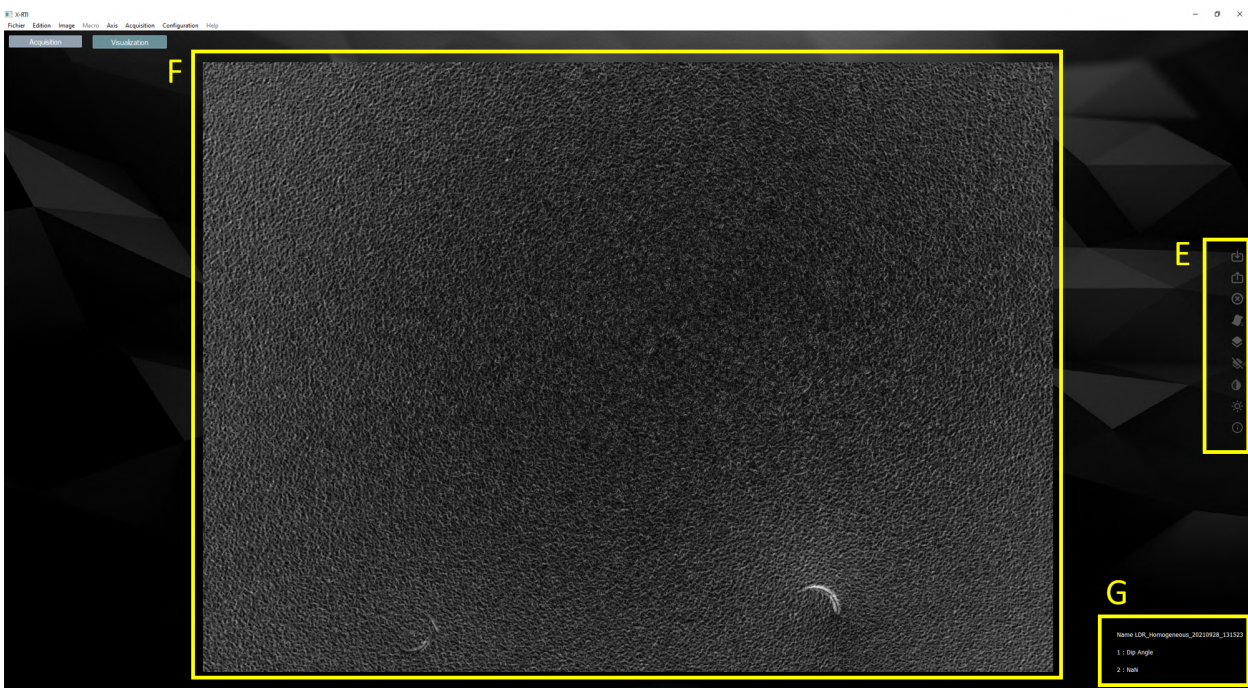
A1 - Les attributs de la caméra sont configurables via des QSlider et une classe composé d'un QLineEdit et de deux QPushButton (widget::LineEditNumber). Le QSlider et le QLineEdit sont liés, si l'on change une valeur avec le QSlider, le QLineEdit sera mis à jour et inversement. Les deux QPushButton permettent d'incrémenter et de décrémenter, avec un pas, le paramètre de la caméra.

A3 - La région d'intérêt (ROI) de la caméra peut être configurée de différentes façon. Pour une configuration plus rapide et intuitive du ROI, nous proposons une interface codé avec OpenGL. Cette interface est une représentation de la vue de la scène où les pixels bleus représente le ROI et les pixels rouges ceux en dehors du ROI. Le rectangle du ROI peut être modifier avec le curseur. Si celui-ci pointe les cotés ou les coins du rectangle, sa taille peut être modifier en maintenant le clic gauche enfoncé et en déplaçant ensuite le curseur. Si le curseur pointe l'intérieur du ROI, alors le clic gauche enfoncé sert à déplacer le ROI.

A2 - Enfin les moteurs de la focalisation et du zoom sont manipulables par des télécommandes. Chaque télécommande possède une vitesse lente et une vitesse rapide afin de permettre une configuration rapide puis fine de chacun des paramètres. La communication avec les moteurs Qioptiq est basé sur un langage propre à la carte de contrôle Qioptiq. De même que pour



(a) Interface pour configurer et réaliser une acquisition RTI



(b) Interface pour visualisation et traiter les données RTI

Figure 2.17 – Les interfaces des différents module du logiciel

les moteurs Galil, des macros sont utilisées afin de rendre simple et robuste l'utilisation des moteurs de zoom et de focalisation.

- B) Le retour en temps réel de la caméra est affiché au centre du l'interface. On peut zoomer et déplacer la vue afin mieux visualiser la surface. De plus, les pixels mal mesurés peuvent être associés à une couleur en appuyant sur la lettre 'c' du clavier : les pixels trop sombres seront rouges, tandis que les pixels trop éclairés seront bleus. Pour cet affichage, nous avons développé plusieurs classes. La première, permet de gérer l'opacité et la région de l'image à

afficher. La deuxième classe, permet de gérer des images tel des calques.

- C) Les modalités de l'acquisition sont configurables dans cette partie de l'interface. On peut modifier le type de positions (homogènes, en anneaux ou charger à partir d'un fichier Light Position au format lp) et le nombre de positions. Les positions de l'acquisition apparaissent sur la représentation du dôme vue du dessus codé avec OpenGL (C1). Ensuite, l'utilisateur peut choisir de réaliser une mesure RTI classique, HD-RTI, FV-RTI, en couleur ou encore avec correction du flux lumineux, puis il peut démarrer l'acquisition et l'annuler à tout instant. (C2)

C1 - L'utilisateur peut choisir le type de répartition des positions angulaires de l'acquisition avec des `QRadioButton`. La première répartition est en anneau. L'opérateur doit alors renseigner le nombre de position en  $\theta$ , qui correspond au nombre de position par anneau, et en  $\phi$ , qui correspond au nombre d'anneau. Cette répartition permet de s'assurer que certaines images soient acquises avec une sources d'éclairage avec le même angle en  $\theta$  ou  $\phi$ . L'opérateur peut ainsi étudier l'influence de ces deux paramètres sur l'apparence d'une surface. Cependant, avec cette répartition dans un espace hémisphérique, le poids des mesures n'est pas uniforme notamment quand on s'approche du sommet du dôme où les angles d'acquisition ont tendance à se rapprocher et inversement pour la base de l'hémisphère. La seconde répartition est homogène c'est à dire que la distance entre chaque position angulaire est homogène. L'utilisateur doit renseigner le nombre de position souhaité pour obtenir un ensemble d'angle d'éclairage répartie de façon homogène sur l'hémisphère. Cette répartition permet de corriger en partie le problème d'uniformité des angles d'éclairage. De plus, l'algorithme qui détermine cette répartition utilise l'aléatoire lors de son initialisation, assurant que deux répartitions homogènes ne peuvent être exactement les mêmes. Pour optimiser la durée de l'acquisition, avec une répartition homogène, une méthode permet d'optimiser le chemin de l'acquisition qui sinon suit l'ordre par défaut des angles générés aléatoirement. Une représentation du dôme vue du dessus, codé avec OpenGL, permet d'observer les positions angulaire de l'acquisition. Dans cette représentation, la région rouge correspond à la région qui ne peut être acquises pour éviter l'obstruction de la vue de la caméra. Les points noirs sont les angles d'éclairage non mesurés et ils sont changer en points blanc après mesure. Le point jaune correspond à la position en temps réel de la source d'éclairage.

C2 - L'opérateur peut choisir les modalités d'acquisition en cochant des `QCheckBox`. Ainsi, il est possible plusieurs modalités d'acquisition à la fois. Ensuite l'utilisateur peut lancer avec un `QPushButton` l'acquisition. L'acquisition RTI peut être annulée à tout moment en appuyant à nouveau sur le même `QPushButton`. Le dossier, dans lequel sont enregistrés les images, contient plusieurs information dans son nom tels que la data et l'heure de l'acquisition et les modalités utilisés. Chaque donnée RTI enregistrée possède aussi dans son nom des informations tels que la position angulaire de l'éclairage utilisé pour la mesure ou encore le temps d'exposition.

- D) L'utilisateur peut se connecter au système optiques et au moteurs avec les boutons de connexion (D1). Ensuite, une interface fournit un outil qui permet l'auto-focalisation de la surface (D2). Les moteurs contrôlant le  $\theta$ , le  $\phi$  et le  $Z$  peuvent être contrôlés par des télécommandes ou par saisie de la valeur de l'angle ou de distance (D3).

D1 - Le premier `QPushButton` permet de se connecter à la caméra et au système `Qioptiq` (zoom et focalisation). Le système `Qioptiq` étant optionnel, la connexion sera considéré comme réussie même si le système n'a pu se connecter au zoom et à la focalisation. Si le système n'arrive pas à se connecter à la caméra, qui est essentiel pour une acquisition RTI, alors la connexion est considérée comme échouée. Le second `QPushButton` concerne la carte de contrôle Galil et

la LED, si celle-ci est en bluetooth, or ces deux matériel sont essentielles donc nécessaire pour considérer la connexion comme réussie. Dans le cas où la connexion échoue pour un quelconque matériel, une pop-up s'affiche avec un message expliquant la source du problème, puis les fonctionnalités en rapport avec le matériel reste désactivées.

D2 - Nous proposons un outil qui permet de réaliser une focalisation automatique en ayant fournit au préalable, deux niveau de  $Z$  au-dessus et en dessous de distance de focalisation. Entre ces deux bornes dix images sont capturés avec différents niveaux de  $Z$ . Par analyse du contraste de l'image [Pertuz 13], une des dix positions  $Z$ , dont l'image associée est la mieux focalisée, est retenue. Deux autres bornes plus proches sont ensuite créées autour de ce  $Z$  afin de réitérer la recherche (recherche dichotomique). La recherche dichotomique est faites sur trois niveaux de récursivité. Le dernier niveau de  $Z$  retenu est alors considéré comme le  $Z$  où la focalisation de la scène est la meilleur.

D3 - Il est possible d'allumer la LED pour capturer une image de la scène ou de démarrer le mode vidéo de la caméra. Si la LED multispectrale est installée, alors on peut choisir quelle couleur ou ensemble de couleur de LED à allumer.

- E) L'utilisateur peut charger une acquisition RTI afin de visualiser ses différents descripteurs. Après visualisation, il peut choisir d'exporter certains descripteurs dans le format PNG ou SUR. Lors de la visualisation, il peut superposer deux descripteurs pour étudier les corrélations/similitudes. Inverser les intensités afin d'augmenter le contraste visuel dans certains cas. Enfin, l'utilisateur peut choisir de reconstruire la réflectance angulaire d'une surface, avec les modèles PTM, HSH ou encore DMD, puis d'activer ou non le déplacement de la source d'éclairage virtuelle.
- F) Les descripteurs de l'acquisition chargée peuvent être visualisés. Un calque transparent permet de superposer deux descripteurs afin de visualiser l'un sur l'autre avec un coefficient de transparence que l'utilisateur peut faire varier. Enfin, lors de la reconstruction de l'apparence, l'utilisateur peut laisser le clic gauche appuyer sur le centre de la visualisation et déplacer le curseur afin de déplacer la source de lumière virtuelle avec.
- G) L'utilisateur peut y observer le nom de l'acquisition charger ainsi que les descripteurs qu'il visualise actuellement.

Ce système RTI a permis la mise en œuvre de certaines méthodes pour corriger les limites de la technique du RTI comme ceux présentés dans la section 1.2. Le développement et les intégrations des modalités d'acquisition et des méthodes sont présenté dans la section 3.

### 3 Développement et intégration de nouvelles modalités d'acquisitions RTI

Lors d'une acquisition RTI des modalités peuvent être mise en œuvre afin d'améliorer la mesure en la rendant plus robuste et/ou complète les données. Dans une perspective de couplage des différentes modalités d'acquisition RTI la structure du code du processus d'acquisitions a été adapté. Ainsi les modalités d'acquisition peuvent faire appel à d'autres modalités comme illustré dans la Figure 2.18.

Par exemple, si on réalise une acquisition RGB-RTI, alors une classe acquisitions::RBG fera appel trois fois à la méthode de capture de la classe acquisitions::LDR (un appel par canal). La classe acquisitions::LDR correspond à la capture par défaut, sans méthodologie de capture particulière. Ainsi il est possible d'ajouter des modalités d'acquisition avec ou sans lien avec les autres modalités

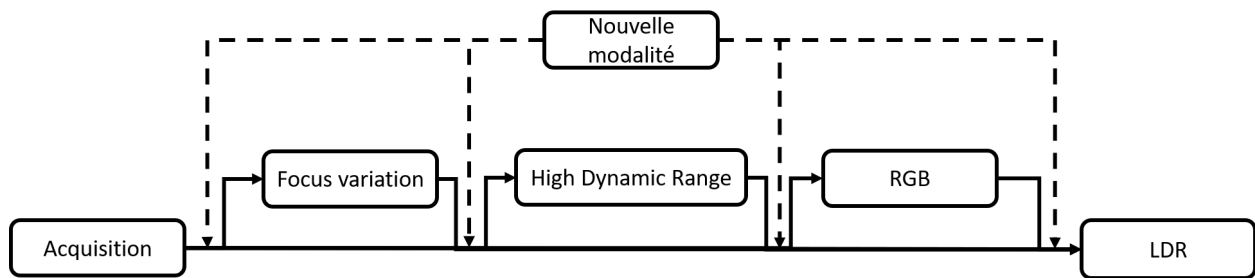


Figure 2.18 – Représentation des modalités d'acquisition RTI et de leurs appels successifs lors d'une acquisition. Une nouvelle modalité d'acquisition peut être insérer dans le processus d'acquisition.

en créant une classe associé à la modalité. La classe de la modalité sera instancié lors de l'acquisition ou à l'intérieur d'une autre modalité d'acquisition lors du couplage.

Afin de corriger le problème angle de lumière intra-image, une méthode est a été implémentée dans le logiciel de pilotage. Lors de la capture acquisitions::LDR, si l'utilisateur à choisit de corriger le flux lumineux, alors un méthode est appelée afin de déterminer une carte de correction selon la position angulaire de la source d'éclairage. Cette méthode à été l'objet de travaux de calibration afin que la carte soit calculé selon notre système actuel (distance entre la source de lumière et le centre du dispositif ou encore angle solide de la LED). Du fait que acquisitions::LDR soit à la base de toute les modalités d'acquisition, la correction du flux lumineux est donc appliqué sur les images utilisées par les autres modalités d'acquisition et permet leur amélioration sans avoir à se préoccuper du code de leurs méthodologies respectives.

Parmi les modalités intégré dans le logiciel de pilotage il y a le FV-RTI (Focus Variation RTI)[Lewis 21]. Cette modalité permet de réaliser une mesure focalisée en tout les point d'une surface avec une forte topologie. Elle est basée sur le même principe que le microscope à focalisation étendu. L'acquisition FV-RTI consiste, en chaque angle d'éclairage, à déplacer la caméra sur l'axe  $Z$  en plusieurs positions et à chacune de ces positions la caméra capture la scène. Alors les pixels seront focalisés sur différentes images correspondant chacune à un niveau de  $Z$  différent. On peut alors extraire pour chacun des pixels, la réponse pour laquelle il était le mieux focalisé. Le niveau de focalisation de chaque pixel est déterminé par l'opérateur laplacien modifié [Pertuz 13]. De plus, en connaissant le  $Z$  associé à la réponse du pixel focalisé, on peut estimer la hauteur relative du pixel.

Le HD-RTI (High Dynamic RTI)[Nurit 21], présenté dans le Chapitre 3, est basé sur un principe sensiblement similaire au FV-RTI.

Concernant le RGB-RTI, comme expliqué précédemment, il s'agit de trois images capturées avec pour chacune une LED de couleur différente (Rouge, Vert et Bleu). Les trois images peuvent alors être empilé pour obtenir une image couleur brute. Cependant cette image couleur ne prend pas en compte la sensibilité spectrale de la caméra car les poids des canaux sont égaux, alors la couleur de l'image n'est pas fidèle avec la réalité. Après calibration du système, un poids pour chaque canal est déterminé qui sont alors appliqué à la fin d'une acquisition RGB-RTI pour obtenir une image couleur proche de la réalité. La méthode du RGB-RTI peut être étendu au multispectral en utilisant différentes longueurs d'onde.

La modalité du NBLP[Luxman 21] est plus complexe à implémenter car elle ne concerne pas le capteur mais les angles d'éclairage. Nous avons alors restructuré le code de la classe acquisition pour permettre au NBLP d'ajouter des angles d'éclairage lors de l'acquisition. La méthode du NBLP est appelée à la fin de l'acquisition pour estimer si l'on doit ou non ajouter des angles d'éclairage afin de combler le manque d'information entre plusieurs angles d'éclairage. Lorsque les nouveaux



angles d'éclairages ont été estimés et ajoutés, alors l'acquisition RTI continue avec ces nouvelles positions angulaires. Le cycle d'acquisition NBLP-RTI s'arrête quand l'information acquise satisfait les conditions de la méthode NBLP.

## 4 Conclusion

Le système RTI développé, couplé avec le logiciel de pilotage, offre un ensemble d'outils pour maîtriser l'apparence des surfaces. Le système RTI est modulaire, en terme de matériel mais aussi au niveau du logiciel. Les nombreux paramètres d'acquisition, liés aux axes motorisés ou aux systèmes d'éclairage développés, ouvrent la voie vers de nouvelles modalités d'acquisition. Cette modularité permet d'ajouter et de modifier des modalités d'acquisition. De plus, La robustesse du système aide à reproduire à l'identique les acquisitions RTI. Le code du logiciel est pensé pour un travail en équipe afin que les différents contributeurs puissent implémenter leurs modalités et méthodes. Les nouvelles méthodes implémentées peuvent être éprouvées en comparant les données avec moins de biais de mesure lié au système d'éclairage ou du système optique. L'interface logiciel permet une prise en main rapide et intuitive du système et permet d'utiliser la technique du RTI de l'acquisition à l'analyse en passant par le traitement.

### Résumé

- ☞ Système RTI multimodal complet (hardware et software)
- ☞ Système donnant accès au paramétrage fin des acquisitions par une interface ergonomique et complète.
- ☞ Système fournissant une interface pour visualiser et traiter les données.
- ☞ Système modulaire et extensible permettant le développement et l'expérimentation de modalités d'acquisition et de méthodes.

## High Dynamic RTI : Proposition d'une nouvelle modalité d'acquisition de la réflectance angulaire

### *Objectif du chapitre*

*Dans le chapitre précédent nous avons présenté les développements que nous avons apportés concernant le dispositif d'acquisition de données RTI. Comme indiqué, un des développement a consisté à implémenter une nouvelle modalité d'acquisition, appelée HD-RTI, qui permet de mesurer la pleine dynamique de la réponse en luminance des surfaces inspectées. Nous présentons dans ce chapitre les aspects méthodologiques liés à cette nouvelle modalité, afin notamment de permettre une acquisition auto-adaptative de l'information.*

## 1 Introduction

La caméra, dans un système RTI, est utilisée comme un capteur photo, mesurant et échantillonnant la luminance en chaque point de la scène. Une caractéristique importante d'une caméra est sa plage dynamique, à laquelle on fait généralement référence de façon simplifiée par la *Dynamique*. Cette grandeur est caractérisée par le rapport entre la plus grande et la plus petite des valeurs du signal mesurable, pour une acquisition/surface donnée. A titre de repère, la plage dynamique d'un capteur d'imagerie conventionnel est d'environ  $1/10^5$  (environ 60 dB), des développements matériels récents permettront très probablement d'augmenter significativement ce ratio à l'avenir (approches *Single Exposure*, [Darson 17]). En comparaison, la dynamique de la vision humaine est d'environ  $1/10^9$  (90 dB). Dans le cas d'une acquisition RTI classique, et dans le contexte de l'inspection de la qualité d'apparence des surfaces manufacturées, cette limitation de la dynamique est souvent préjudiciable. En effet, la quantité de lumière réfléchiée par une surface varie fortement pour ce type d'acquisition, la dynamique est à la fois *intra-surface* (variations de texture/géométrie et/ou de matériaux) mais aussi *intra-pixels* du fait de la variation de l'angle d'illumination des surfaces. A titre d'illustration, des images extraites d'acquisitions RTI sont présentées dans la figure 3.1, pour des échantillons de surfaces industrielles de papier et d'un matériau métallique (acier brossé).

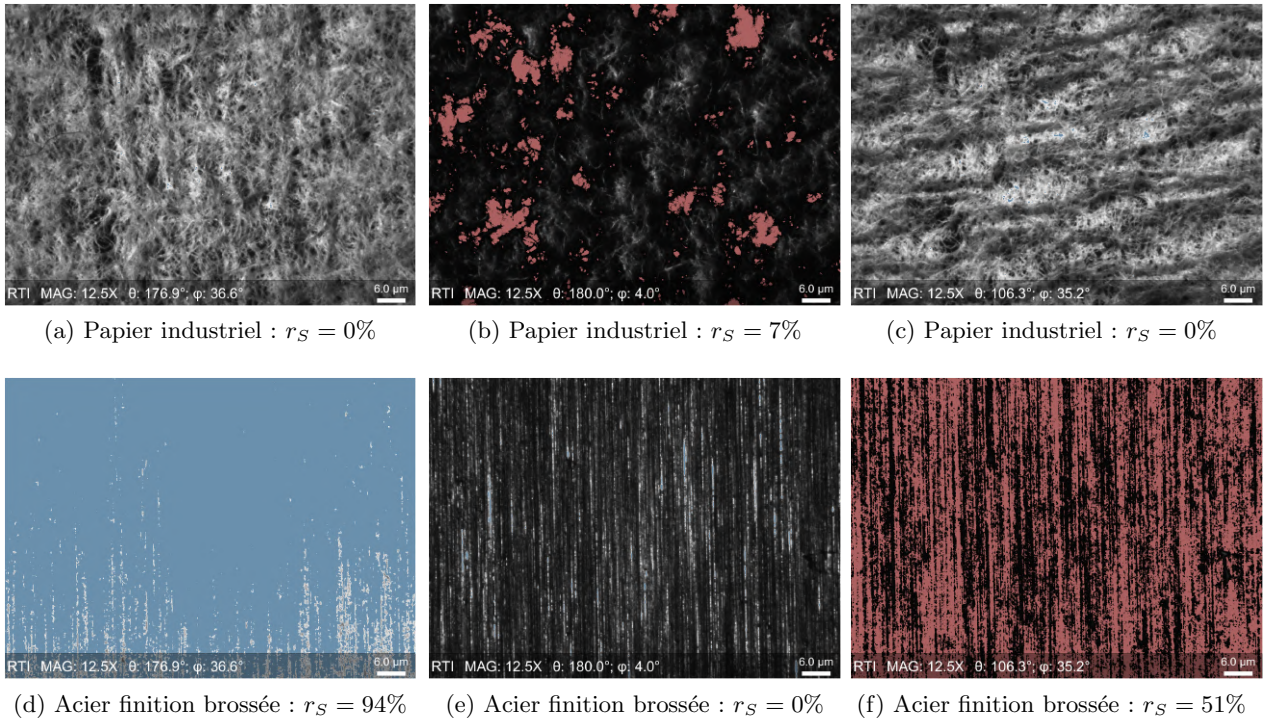


Figure 3.1 – Exemples d’images extraites d’acquisitions RTI pour trois angles d’illumination, sur des échantillons de surfaces manufacturées de papier et de matériau métallique (acier brossé), (Camera monochromatique 12.4 MPix - Temps d’exposition ( $E_t$ ) = 60ms), avec coloration des pixels sous exposés (en bleu) ou saturés (en rouge)

Dans cette figure, le ratio  $r_S$  correspond au pourcentage de pixels non mesurés, c’est à dire quand la valeur associée à ce point est égale à la valeur minimale ou maximale de la plage dynamique du capteur. En terme de représentation, ces points non mesurés sont colorisés en rouge (pixels sous-exposés, valeurs égales à 0) tandis que les pixels colorisés en bleu correspondent aux points surexposés (valeurs égales à 255). On observe que pour l’échantillon de papier, le ratio  $r_S$  est proche de 0 ; ce qui est cohérent car ce matériau produit une réflexion diffuse, on parle pour ce type de comportement de surface *lambertienne*. La dynamique d’une surface lambertienne est donc assez faible pour être mesurée correctement par le capteur, avec relativement peu de valeurs non mesurées à part pour certaines configurations d’acquisition (éclairage très rasant par exemple). Au contraire, les acquisitions correspondantes à l’échantillon de surface en acier brossé présentent des ratios de points non mesurés élevés, ce qui altère fortement la qualité et la pertinence des informations mesurées (ce qui est d’autant plus critique du fait que les surfaces métalliques représentent une part très importantes des surfaces manufacturées). De plus, on observe dans de nombreux cas d’applications que les anomalies d’aspect locales sont très souvent associées à de fortes variations locales de luminance, ce qui génère de grandes valeurs  $r_S$ , et une qualité des données très réduites en ces points. Ce problème de limite dynamique est donc fortement critique car il impacte fortement les matériaux métalliques (les plus fréquents), et les points d’intérêts, ne permettant pas d’évaluer la criticité des anomalies locales en termes de perception et donc de les discriminer de manière robuste dans le processus de décision d’acceptabilité.

La plage dynamique limitée des capteurs d’imagerie conventionnellement mis en oeuvre pour les acquisitions RTI entraîne deux conséquences. La première est spécifique à l’imagerie RTI et concerne la dynamique *intra-pixel*. En effet, la variation des directions d’éclairage lors de l’acquisition RTI

entraîne pour chaque pixel des variations d’amplitude rapides et importantes. Les angles avec une faible élévation générant potentiellement des valeurs de luminance extrêmement faibles, tandis que les directions d’éclairage associées au lobe spéculaire peuvent générer des valeurs de luminance élevées, avec de façon générale un ordre de grandeur très éloigné entre les réflexions diffuses et les phénomènes de brillance spéculaire locale. Cette dynamique *intra-pixel* est illustrée dans les exemples de la figure 3.2, où chaque point représente le pourcentage d’angles d’acquisition RTI (c’est à dire de positions d’acquisitions) pour lesquels la luminance n’a pas pu être estimée (sous-exposition et saturation).

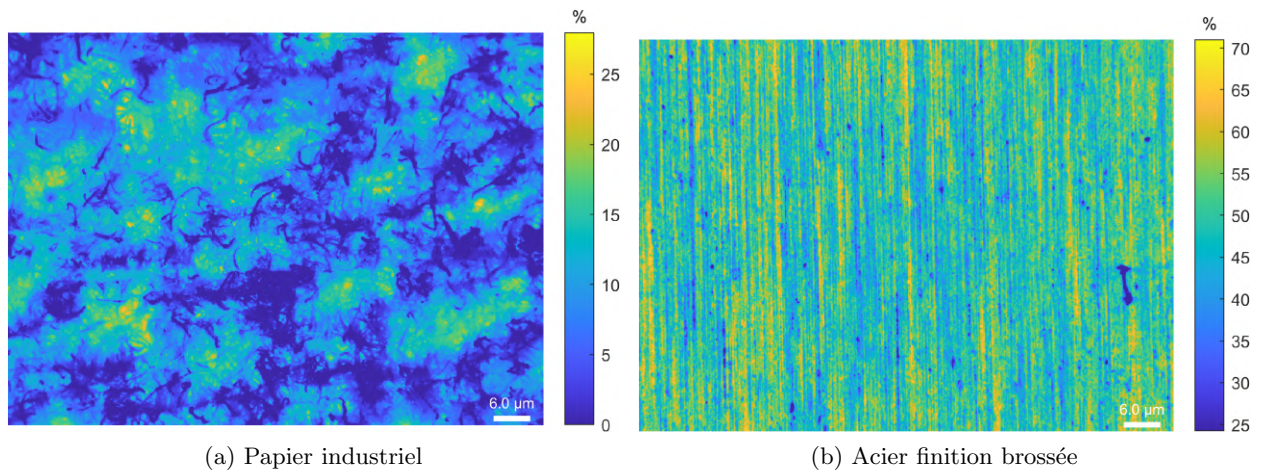


Figure 3.2 – Limitation dynamique *intra-pixels* : représentation du pourcentages de points non mesurés lors d’acquisitions RTI (149 positions angulaires d’aquisition réparties de façon homogène dans l’espace  $(\theta, \phi)$ )

On observe sur ces représentations que même si le matériau est lambertien, on peut obtenir localement des ratios significatifs de valeurs non-mesurées, dans ce cas d’application jusqu’à 30% des positions d’acquisition RTI (voir figure 3.2a). Ceci est dû ici à la topographie de la surface et à la morphologie du matériau qui est très hétérogène. Pour l’échantillon métallique broyé (Figure 3.2b), on observe ici jusqu’à 70% de positions d’acquisition RTI qui produisent des valeurs non mesurées. Ces résultats sont représentatifs de ce qui est obtenu généralement pour les matériaux métalliques notamment, avec un ratio qui augmente progressivement en fonction du degré de polissage de la surface, et/ou de son caractère anisotrope. En effet, dans le cas des surfaces anisotropes, la quantité de lumière réfléchi va être fortement liée à l’angle relatif entre la texture et l’éclairage, les configurations où l’illumination est orthogonale à la texture de surface induisant des réflexions maximales, et inversement.

Le deuxième aspect concerne la dynamique *intra-image* et correspond au cas classique d’application de la méthode HDR : au sein d’une même image d’une acquisition RTI, la différence de réponse entre deux pixels peut être très importante. Celle-ci peut en effet varier en fonction de la texture de surface (micro-géométrie) et/ou localement en fonction du matériau. Ainsi, dans le cas de surfaces anisotropes, où l’orientation de la texture locale n’est pas constante sur la surface inspectée (exemple illustré dans la figure 3.3), ou dans le cas de surfaces composites (multi-matériaux), l’amplitude de la réponse peut largement dépasser la plage dynamique du capteur, ce qui conduit à une perte d’information importante (points non mesurés) et donc à une altération de la qualité des données obtenues.

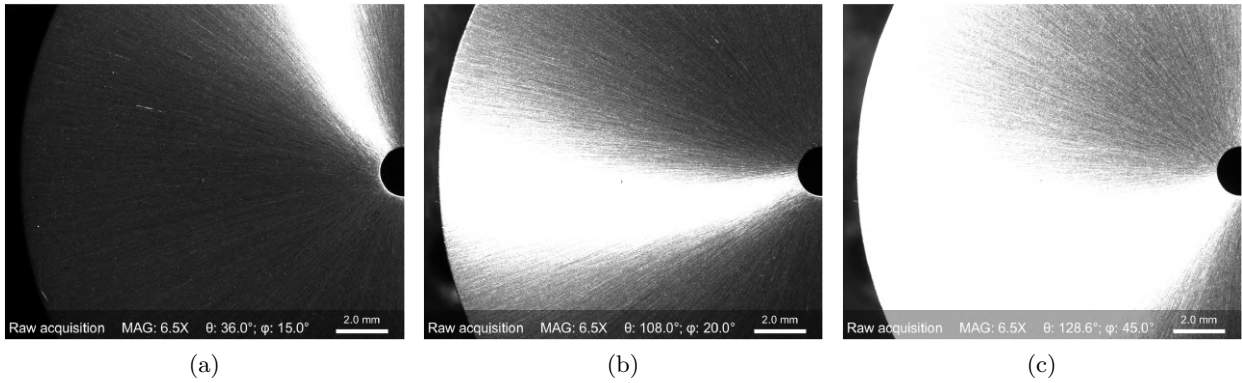


Figure 3.3 – RTI - Limitation de la dynamique *intra-image* : exemples d'images extraites d'une acquisition RTI sur une surface horlogère anisotrope dont l'orientation principale de la texture est variable

La figure 3.4 représente pour chaque angle d'acquisition RTI le pourcentage de points non mesurés dans l'image de réflectance angulaire obtenue sur les échantillons d'application de ce chapitre. Nous observons que un réglage unique de temps d'exposition (effectué manuellement et arbitrairement par l'opérateur pour une acquisition RTI conventionnelle) ne permet pas de capturer des images correctement exposées pour l'ensemble des directions d'acquisitions, même pour le cas d'application le plus favorable (échantillon de surface de papier, comportement diffusant).

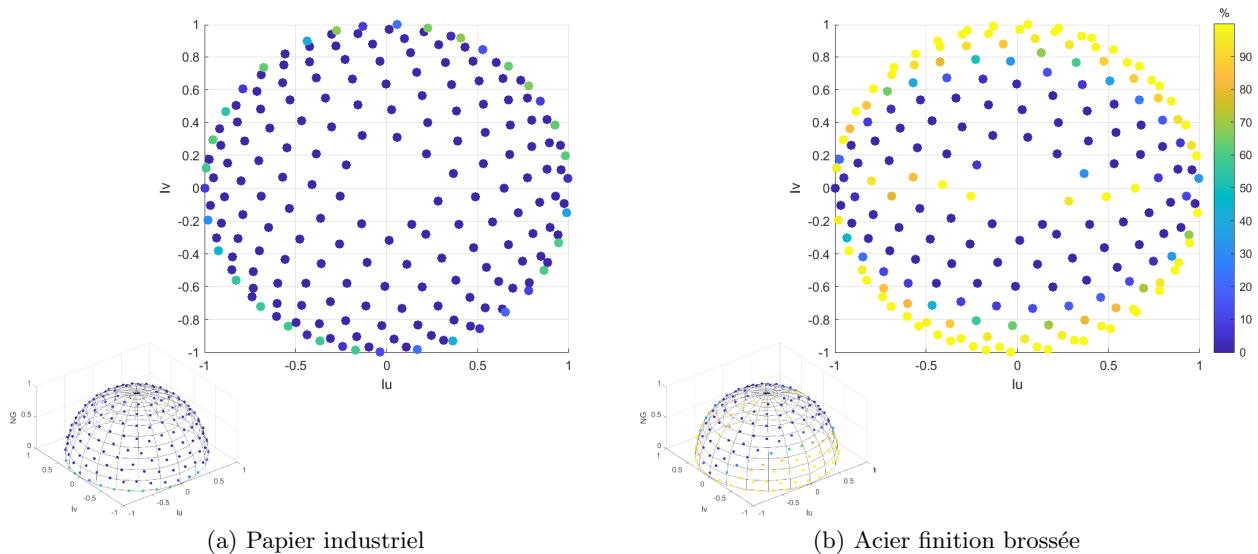


Figure 3.4 – RTI - Limitation de la dynamique *intra-image* : Représentation du pourcentage de points non mesurés pour l'ensemble des directions d'illumination de l'acquisition

Les limitations associées à la dynamique *intra-pixel* et à la dynamique *intra-image* de la technique d'acquisition RTI sont donc des enjeux importants, d'autant plus si l'objectif n'est pas, comme dans l'usage historique de la technique, uniquement de permettre une reconstruction du rendu visuel des surfaces mais de mettre en œuvre cette technique de façon métrologique pour la caractérisation des surfaces et de leur apparence (cf. méthodologie présentée dans le chapitre 4.1). Les caractéristiques surfaciques estimées à partir des acquisitions RTI peuvent ainsi avoir une qualité significativement altérée par les limitations de dynamique de l'approche d'acquisition RTI conventionnelle. Le choix du temps d'exposition influe fortement sur le nombre de points mesurés

selon les directions d'illumination, et l'opérateur est confronté à un choix arbitraire qui n'a pas d'optimal. En effet, de façon générale, même lorsque l'on choisit un temps d'exposition qui permet d'avoir un compromis entre sous-exposition et saturation pour l'ensemble des directions d'acquisition, les variations de luminance associées à ce type d'acquisitions produisent un nombre important de valeurs non mesurées. A titre d'exemple, deux cartes de pentes locales estimées à partir d'acquisitions RTI sur un échantillon de surface métallique (méthode stéréo-photométrique, [Woodham 94]) à différents temps d'exposition sont présentées sur la figure 3.5. On observe que le réglage du temps d'exposition  $E_t$  a une influence significative sur l'estimation du champ de normales, et donc sur les caractéristiques de pentes locales cartographiées ici.

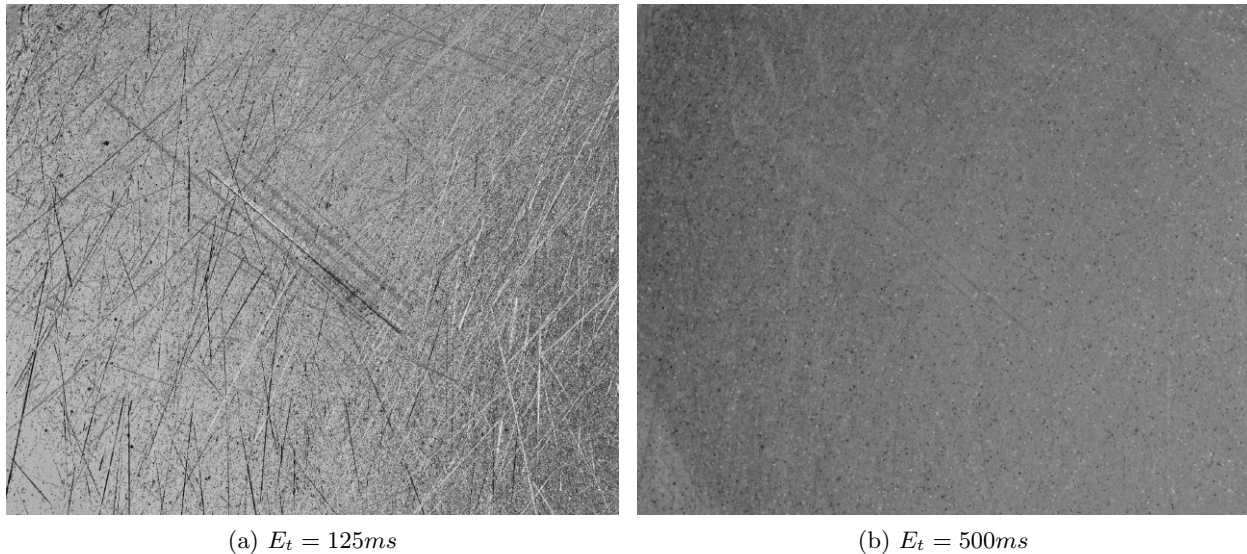


Figure 3.5 – Cartes des pentes en X dérivées à partir d'acquisitions RTI d'un échantillon métallique capturé à différents temps d'exposition ( $E_t$ ).

Les travaux présentés dans ce chapitre visent à répondre à cette problématique en proposant une nouvelle modalité d'acquisition des données RTI, basée sur la mise en œuvre d'un couplage des techniques d'imagerie HDR et RTI. Cette contribution présentée dans [Nurit 21] consiste à acquérir de façon auto-adaptative la pleine dynamique de l'information de réflectance angulaire à partir de plusieurs prises de vues en chaque direction d'illumination de la surface inspectée, en faisant varier les temps d'exposition de façon automatique. Ainsi la méthode permet de supprimer le réglage arbitraire du temps d'exposition et supprime donc le biais associé à ce paramètre de mesure. Nous détaillons dans la suite de ce chapitre cette méthodologie (section 3), puis nous présentons des exemples de cas d'application (section 4). Un court état de l'art sur la technique d'imagerie HDR (High Dynamic Range) est présenté en préambule dans la section suivante.

## 2 Principe et état de l'art de la technique d'imagerie HDR

L'œil humain, grâce notamment à une réponse non linéaire et à l'adaptation dynamique de l'iris s'ajuste constamment à une large gamme de luminances présente dans l'environnement. Le cerveau interprète en permanence ces informations afin que l'observateur puisse voir et reconstruire l'information visuelle dans un large éventail de conditions d'éclairage. La plupart des appareils photographiques ne peuvent pas fournir cette plage dynamique avec un seul temps d'exposition, en raison de leur faible plage dynamique. L'imagerie à plage dynamique élevée ou High Dynamic Range (HDR) est une technique qui permet de mesurer une plage dynamique plus large que les techniques d'imagerie traditionnelles, comme illustré dans la représentation schématique de la figure 3.6.

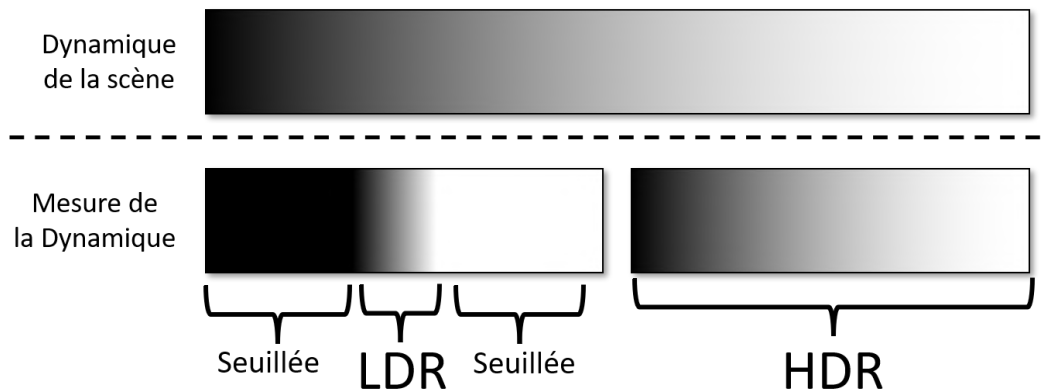
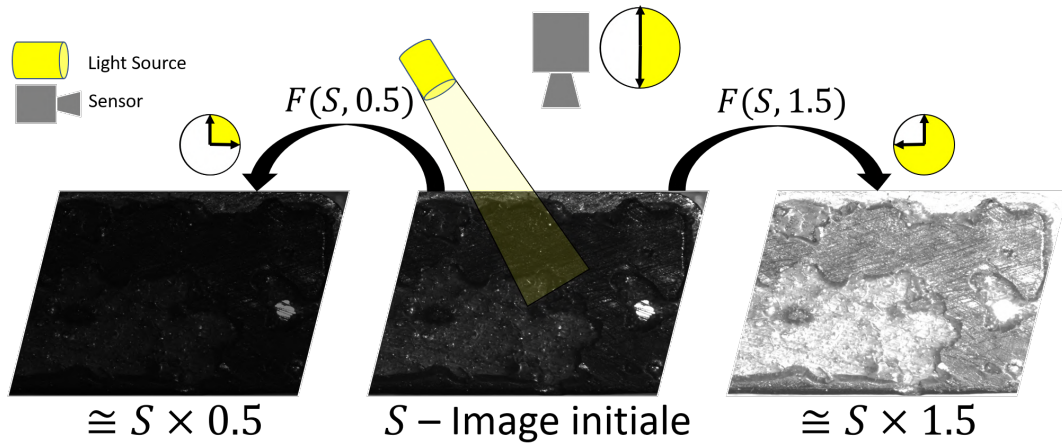
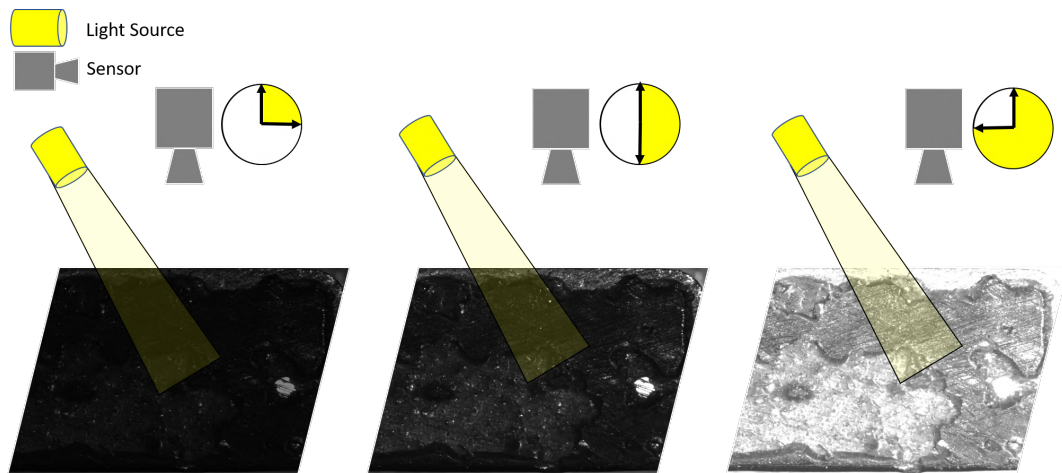


Figure 3.6 – Représentation schématique de la différence entre la méthode LDR et HDR lors de la mesure de la dynamique d'une scène

Un objectif central de la technique d'imagerie HDR est de permettre l'acquisition sur une gamme de luminance similaire à celle ressentie à travers le système visuel humain. Cette technique vise ainsi à permettre la mesure sur un large éventail de niveaux d'intensité d'une scène, du lumineux au plus sombre. Grâce à l'imagerie HDR, la mesure de la luminance d'une surface peut être utilisée dans diverses applications sans la linéarisation du signal ou la gestion des valeurs seuillées (les points de la surface sous-exposés ou sur-exposés) [Banterle 17]. L'imagerie HDR conventionnelle utilise principalement des caméras HDR spéciales pour capturer des images HDR [Tiwari 15, Tursun 15]. Cependant, ces caméras ont généralement un coût élevé, et des spécifications et compatibilités matérielles parfois restreintes. Une alternative consiste à créer du contenu HDR à partir d'environnements virtuels à l'aide d'outils de rendu [Banterle 17, Tiwari 15, Wang 19]. Cette approche ne permet pas de mesurer fidèlement la pleine dynamique de la scène mais seulement de la simuler. Une autre méthode courante consiste à reconstruire de l'information HDR à partir du contenu visuel capturé par des caméras à faible plage dynamique (LDR) à l'aide d'algorithmes spécialement conçus. Parmi ces algorithmes, deux méthodes sont couramment mises en œuvres. La première consiste à générer du contenu HDR à partir d'une image LDR avec un seul temps d'exposition unique [Eilertsen 17, Lee 18, Ning 18, Khan 19, Liu 20]. A partir de cette unique image sont déduites d'autres images avec des temps d'expositions différents. Cette approche est rapide, demande moins de mémoire et permet la capture d'objet en mouvement sans l'apparition d'artefact visuel. Cependant elle ne mesure pas la pleine Dynamique de la scène mais ne fait que la déduire.



(a) Mesure HDR avec un seul temps d'exposition



(b) Mesure HDR avec plusieurs temps d'exposition

Figure 3.7 – Méthode HDR : Représentation schématique des deux principales approches

La deuxième approche consiste à générer du contenu HDR en fusionnant plusieurs mesures LDR de la même scène à différents temps d'exposition [Debevec 97, Robertson 00b, Nayar 00, Banterle 17]. Cette méthode a l'avantage de fournir une solution simple et robuste pour générer des données HDR qui correspondent à la mesure réelle de la réflectance de la surface. Les deux méthodes sont illustrées dans la Figure 3.7. Nous avons choisi dans le cadre de ces travaux de nous baser sur les méthodes de reconstruction du HDR avec plusieurs images LDR. En effet, notre système est adapté à ce type d'approches car il permet l'acquisition des surfaces sans mouvement, et l'objectif étant de procéder à une mesure de la réponse des surfaces au plus proche des phénomènes physiques, les approches basées sur des modèles d'extrapolation à partir d'une image unique ne sont pas dans ce cas adaptées.



### 3 High Dynamic RTI : proposition de méthodologie

La méthode proposée vise à répondre aux deux limitations de la dynamique *intra-image* et *intra-pixel* décrites précédemment. L'implémentation du couplage entre les techniques HDR et RTI que nous proposons est entièrement automatique et adaptative : le nombre de prises de vue requises pour chaque direction d'éclairage ainsi que leurs temps d'exposition correspondants sont automatiquement réglés en fonction de la réponse de la surface observée. Ce caractère adaptatif est important dans notre approche car cette nouvelle modalité est basée sur plusieurs prises de vues, elle accroît donc le temps d'acquisition et *in fine* le volume de données acquises. Ne mesurer que l'information utile permet donc d'optimiser les aspects liés au temps d'acquisition et au temps de traitement des données, ce qui est essentiel dans le cadre applicatif industriel de ces travaux. L'organigramme général de la méthode proposée est présenté à la figure 3.8. La méthode implémentée ainsi que son algorithme sont détaillés ci-dessous.

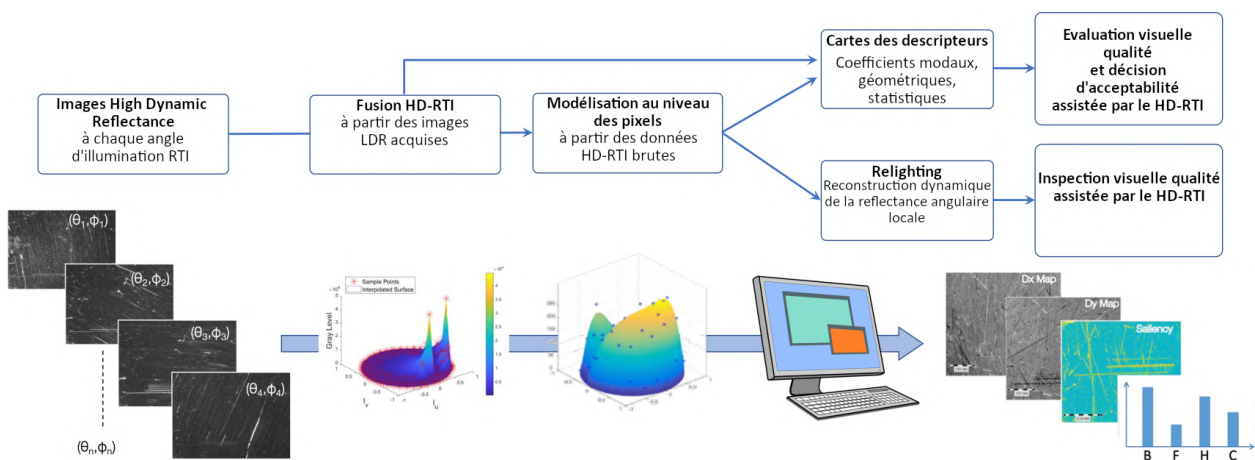


Figure 3.8 – Méthode HD-RTI : Flow-chart général

Notre approche a été construite à partir de l'approche de Martínez & al. [Martínez 15], que nous avons adapté aux spécificités des acquisitions RTI, et dont nous avons automatisé le réglage des paramètres. Le principe est d'ajuster automatiquement le nombre de prises de vue à chaque direction d'éclairage, ainsi que les valeurs de temps d'exposition,  $E_t$ , en fonction de la réponse de surface à chaque angle d'acquisition. Une opération de normalisation est ensuite effectuée afin d'obtenir des informations dans le même référentiel pour l'ensemble des directions d'illumination de l'acquisition, ce qui est essentiel pour le processus d'analyse et de modélisation RTI. Les principales étapes de la méthode proposée sont l'estimation de la *Camera Response Function* (CRF), la capture de la scène avec des valeurs  $E_t$  estimées automatiquement et la reconstruction de l'image. Ces étapes de l'algorithme 1 sont détaillées dans la suite de ce chapitre.

### 3.1 Estimation de la CRF

L'image, d'une scène acquise avec une caméra est constituée de valeurs d'intensité mesurées correspondant à l'application d'une fonction sur la réponse réelle des points de la surface. Cette fonction est appelée la *fonction de réponse de la caméra* (CRF). De multiples méthodes existent pour estimer la CRF [Mann 95, Mitsunaga 99, Grossberg 04, Nayar 00, Liu 20]. Nous avons dans le cadre de ces travaux choisi d'implémenter la méthode proposée par Debevec et Malik [Debevec 97], qui nous a semblé simple, générale et robuste. Il est à noter que l'estimation de la CRF n'a pas à être renouvelée à chaque acquisition HD-RTI, il est en effet possible de réutiliser une CRF connue à condition d'utiliser la même caméra. Un recalibrage régulier pourra également être réalisé. Une façon de déterminer la fonction consiste à établir une cartographie des valeurs d'intensité entre des images prises avec différentes expositions. Pour initialiser le calcul, nous choisissons un nombre de pixels de référence, généralement de 100 à 5000 répartis de manière homogène sur l'image. Ce choix est en pratique un compromis entre le temps de calcul et le niveau de bruit de la CRF estimé qui augmente lorsque le nombre de pixels de référence est trop faible. Plusieurs images sont alors acquises avec des  $E_t$  différents pour accéder à l'ensemble de la réponse lumineuse de la surface pour chacun des pixels de références. L'utilisation de l'ensemble de la réponse lumineuse permet d'obtenir la CRF à partir de tout type de surface avec un comportement lambertien. La CRF est approximée par la minimisation de la fonction objective  $\mathcal{O}$  exprimée dans l'équation 3.1 [Debevec 97]. Enfin, il est nécessaire de calculer l'inverse de la fonction CRF ( $CRF^{-1}$ ) pour les étapes suivantes de la méthode HD-RTI. Une représentation normalisée de l'inverse de la CRF obtenue avec notre système d'acquisition RTI est présentée dans la figure 3.9a. La fonction de poids utilisée est *Deb97* [Debevec 97], présentée plus loin dans le document.

$$\mathcal{O} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P \{X_{(i,j)}[CRF(X_{(i,j)}) - \ln(I_i) - \ln(E_t^j)]\}^2 + \lambda \sum_{x=X_{min}+1}^{X_{max}-1} [w(x)CRF''(x)]^2 \quad (3.1)$$

$$\text{Où } \left\{ \begin{array}{l} X_{(i,j)} \text{ est la valeur du pixel } i \text{ avec un temps d'exposition } j \\ I_i \text{ est l'irradiance du pixel } i \\ E_t^j \text{ est le temps d'exposition } j \\ w \text{ est une fonction de poids} \end{array} \right.$$

### 3.2 Nombre de capture et auto-détermination des temps d'exposition associés

Un cycle d'acquisition RTI consiste à prendre plusieurs photographies d'une scène en faisant varier la position angulaire de la source d'éclairage. Dans le cas de la technique d'imagerie HDR, on photographie la scène à plusieurs reprises, en faisant varier le temps d'exposition pour les différentes prises de vues. Le couplage de ces deux techniques peut donc entraîner la multiplication des prises de vues nécessaires à l'acquisition de l'information, et donc entraîner des temps d'acquisition significatifs (plusieurs dizaines de minutes), contraignants dans le contexte d'application industriel de ces travaux. De plus, nous avons vu précédemment que la dynamique de l'information varie très fortement en fonction de la direction d'éclairage. La méthode proposée vise donc à mettre en place une optimisation du couplage entre les modalités d'acquisition HDR et RTI, de façon à faire en sorte de ne mesurer que l'information utile aux données. Nous proposons ainsi une méthode *auto-adaptative*, *i.e.* qui adapte automatiquement pour chaque direction d'éclairage du cycle d'acquisition RTI le nombre de prises de vues, ainsi que leurs valeurs de temps d'exposition  $E_t$  associées, en fonction de la dynamique observée de la réponse.

**Algorithme 1** HD-RTI Algorithm**Variables d'entrées:** Variables d'entrées $(\theta, \phi) \in \mathbb{R}^n$  : positions angulaires de la source de lumière $CRF \in \mathbb{R}^{255}$  : fonction de réponse de la caméra précédemment estimée $(T_{noi}, T_{sat}) \in ]0; 255]$  : seuil défini par l'utilisateur ;  $T_{noi} < T_{sat}$  $E_{init} \in \mathbb{N}$  : Premier  $E_t$  pour chaque position angulaire (défini par l'utilisateur) $E_{ref} \in \mathbb{N}$  :  $E_t$  de référence (défini par l'utilisateur)**for**  $i = 1$  **to**  $n$  **do**Déplacement de la source de lumière en  $(\theta(i), \phi(i))$  $E_{vec} \leftarrow$  Vecteur vide ;  $P_{vec} \leftarrow$  Vecteur vide %Initialisation des variables $P_{init} \leftarrow$  Prendre une photo avec  $E_t = E_{init}$  $P_{init}/255$  empilé dans  $P_{vec}$  %Normalisation $E_{init}/E_{ref}$  empilé dans  $E_{vec}$ 

%Traitement des pixels sur-exposés

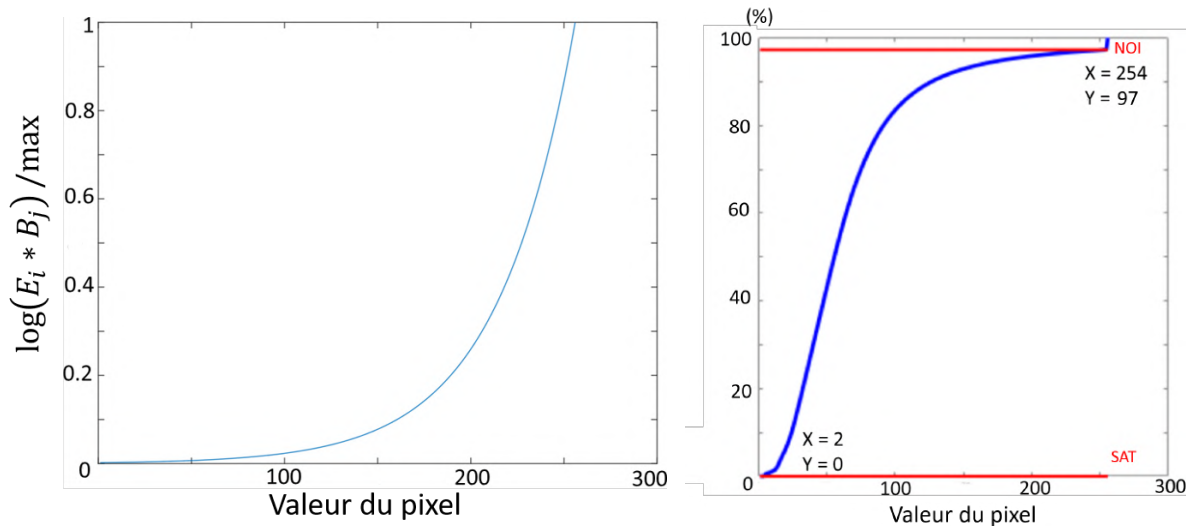
 $P_{shorter} \leftarrow P_{init}$  ;  $E_{shorter} \leftarrow E_{init}$ **while**  $P_{shorter}$  a des pixels  $> SAT$  **do** $E_{shorter} \leftarrow \frac{CRF^{-1}(T_{noi})}{CRF^{-1}(T_{sat})} * E_{shorter}$  %Calcul du  $E_t$  plus court $P_{shorter} \leftarrow$  Prendre une photo avec  $E_t = E_{shorter}$  $P_{shorter}/255$  empilé dans  $P_{vec}$  %Normalisation $E_{shorter}/E_{ref}$  empilé dans  $E_{vec}$ **end while**

%Traitement des pixels sous-exposés

 $P_{longer} \leftarrow P_{init}$  ;  $E_{longer} \leftarrow E_{init}$ **while**  $P_{longer}$  a des pixels  $< T_{noi}$  **or**  $E_{longer} = E_{min}$  **do** $E_{longer} \leftarrow \frac{CRF^{-1}(T_{sat})}{CRF^{-1}(T_{noi})} * E_{longer}$  %Calcul du  $E_t$  plus long $P_{longer} \leftarrow$  Prendre une photo avec  $E_t = E_{longer}$  $P_{longer}/255$  empiler dans  $P_{vec}$  %Normalisation $E_{longer}/E_{ref}$  empiler dans  $E_{vec}$ **end while** $L_{vec} \leftarrow CRF^{-1}(P_{vec})$  %Linearisation $W_{vec} \leftarrow \frac{(\exp^{-16*(P_{vec}-0.5)^2} - \exp^{-4})}{1 - \exp^{-4}}$  %Calcul du poids des pixels (Robertson[Banterle 17]) $HDR \leftarrow \text{sum}(1/E_{ref} * (L_{vec} * W_{vec}))/\text{sum}(W_{vec})$  %Fusion

%Traitement des pixels toujours sous-exposés/sur-exposés

**if** Poids de quelques pixels  $\simeq 0$  **then** $HDR(Pixels)$  où  $P_{vec}(Pixels) > 0.5$  et  $\text{sum}(W_{vec}(Pixels)) = 0 \leftarrow L_{vec}(Pixels)(Min)/\min(E_{vec}(Min))$  $HDR(Pixels)$  où  $P_{vec}(Pixels) < 0.5$  et  $\text{sum}(W_{vec}(Pixels)) = 0 \leftarrow L_{vec}(Pixels)(Max)/\min(E_{vec}(Max))$ **end if****return**  $HDR$ **end for**



(a) Estimation de la Fonction de Réponse de la Camera (CRF), (b) Histogramme cumulé d'une image RTI capteur AVT MANTA G 507B monochromatique brute

Figure 3.9 – Schéma d'une CRF et d'un histogramme cumulé

Concernant l'estimation automatique des temps d'exposition nécessaires à la mesure HDR, il existe plusieurs méthodes. Les contributions méthodologiques dans ce domaine visent souvent à optimiser la qualité des données à se travers l'optimisation du rapport Signal/bruit (SNR) des données HDR résultantes, et il existe assez peu d'approches visant à minimiser le temps d'acquisition (*i.e.* minimiser le nombre de prises de vues avec différents temps d'exposition). Les informations sur le contenu de la scène sont généralement considérées comme connues avant de commencer le processus de mesure. Le capteur d'imagerie est souvent associé à une fonction de réponse linéaire ([Granados 10, Hirakawa 10, Gallo 12]) donc la sélection d'ensembles de temps d'exposition est basée sur l'augmentation ou la diminution d'un temps d'exposition intermédiaire avec un nombre fixe de pas ([Stumpf 04, Bilcu 08]). D'autres auteurs capturent un grand nombre de temps d'expositions, et ensuite sélectionnent ceux pertinents à utiliser pour reconstruire une donnée HDR avec un SNR optimal ([Hasinoff 10, Gallo 12]). Une méthode [Barakat 08] permet de trouver des ensembles de temps d'exposition minimum pour une caméra donnée. Cette approche consiste à étudier la Dynamique couverte par le capteur en utilisant chaque réglage de temps d'exposition disponible. Ensuite, sont sélectionnés uniquement les temps d'exposition qui couvraient toute la plage dynamique de la caméra avec un certain chevauchement, éliminant les prises de vue redondantes qui n'ajoutent aucune nouvelle information à l'image HDR finale. Pour rendre cette méthode adaptative au contenu de la scène, elle inclut une condition d'arrêt si la méthode ne trouve aucun pixel sous-exposé ou saturé dans la mesure. De cette façon, elle limite sa mesure à quelques temps d'exposition, sans contrôler le SNR des données HDR obtenues.

La méthode que nous proposons est basée sur l'estimation adaptative de l'exposition (AEE) [Martínez 15] adaptée au cas des acquisitions RTI, et peut donc être considérée comme une extension de la méthode de Barakat [Barakat 08]. Trois paramètres prédéfinis sont utilisés : le bruit ( $T_{noi}$ ), le niveau de saturation ( $T_{sat}$ ) et un seuil ( $S_p$ ) qui correspond au pourcentage de pixels non-mesurés considérés comme acceptables. A chaque direction d'éclairage, une première image est acquise avec un  $E_t$  arbitraire (choix de l'utilisateur). Puis récursivement, d'autres images sont acquises avec un  $E_t$  plus long et/ou plus court, respectivement  $E_s$  et  $E_l$ , déterminés automatiquement à l'aide de

l'équation 3.2. A chaque itération  $E_t$  et remplacé par le  $E_s$  ou le  $E_l$  précédemment estimé selon si l'on souhaite estimé, respectivement, un nouveau  $E_s$  ou  $E_l$ . Enfin, l'histogramme cumulé de l'image (Figure 3.9b) permet de déterminer si la scène présente trop de pixels non-mesurés (sous-exposés ou surexposés) et si il est donc nécessaire d'acquérir la scène avec d'autre temps d'exposition.

$$\begin{cases} E_s = E_t * \frac{CRF^{-1}(T_{noi})}{CRF^{-1}(T_{sat})} \\ E_l = E_t * \frac{CRF^{-1}(T_{sat})}{CRF^{-1}(T_{noi})} \end{cases} \quad (3.2)$$

L'algorithme s'arrête lorsque le ratio de pixels correctement mesurés dans l'histogramme cumulé de l'image est satisfaisant. Il est également possible de définir (réglage utilisateur) un nombre maximum ou minimum d'images à acquérir si nécessaire sinon l'algorithme s'arrête quand plus aucun temps d'exposition (plus court ou plus long) ne sont disponibles. Les paramètres  $T_{noi}$  et  $T_{sat}$  influencent le SNR (Signal-to-Noise Ratio). Il est estimé au niveau des pixels (équation 3.3) : plus les valeurs de  $T_{noi}$  et de  $T_{sat}$  sont proches, plus le SNR moyen des données HDR résultantes est élevé. Cependant, le temps d'acquisition augmente avec le nombre d'images.

$$SNR[X] \equiv 20 \times \log_{10} \left( \frac{\mu[X]}{\sigma[X]} \right) \quad (3.3)$$

### 3.3 Reconstruction des données HD-RTI

Cette étape consiste à fusionner les images acquises pour générer des données stéréoscopiques HDR pour chaque direction d'acquisition. Il est alors également possible d'extraire (pour chaque pixel) l'ensemble des valeurs de luminance (acquises en pleine dynamique) et de post-traiter ces données pour répondre aux besoins du contrôle visuel automatisé (modélisation, relighting, description des propriétés visuelles locales). La reconstruction pour chaque direction d'acquisition des informations de réflectance HDR nécessite trois étapes principales  $S_{i=1...3}$ , qui sont la linéarisation, la pondération et la fusion des données acquises [Banterle 17].

**$S_1$  - Linéarisation** Cette opération consiste à corriger la non-linéarité de la caméra. La caméra n'a généralement une réponse linéaire qu'au milieu de sa  $CRF$  (voir figure 3.9) alors qu'à ses frontières elle présente un comportement logarithmique/exponentiel. La linéarisation est effectuée à partir de l'inverse de la  $CRF$ , comme décrit dans l'équation 3.4.

$$Lin(X, \theta, \phi) = CRF^{-1}(X_{(\theta, \phi)}) \quad (3.4)$$

Où  $X_{(\theta, \phi)}$  correspond à la réflectance du pixel à la position angulaire  $(\theta, \phi)$

**$S_2$  - Pondération** Dans cette étape, une fonction permet de pondérer les pixels d'une image en fonction de la distance entre leurs intensités mesurées et les seuils fixés du bruit ( $T_{noi}$ ) et de la saturation ( $T_{sat}$ ). Les pixels trop sombres ou trop éclairés sont donc associés à un poids faible et les pixels les mieux mesurés participent ainsi plus à la reconstruction du HDR. Cette pondération a pour but d'atténuer les artefacts potentiels pouvant provoquer un éblouissement ou du bruit sur la donnée HDR reconstruite. Les fonctions de poids les plus utilisées sont *Box*, *Robertson*, *Hat* ou *Deb97* (Debevec 1997) [Debevec 97, Robertson 00a] parmi d'autres fonctions existantes [Mitsunaga 99, Akyüz 07]. Les fonctions de poids sont illustrées dans la figure 3.10.

**$S_3$  - Fusion** Cette opération est réalisée indépendamment pour chaque direction d'éclairage. Elle consiste à fusionner (dans l'espace linéaire, logarithmique ou carré) les images acquises avec

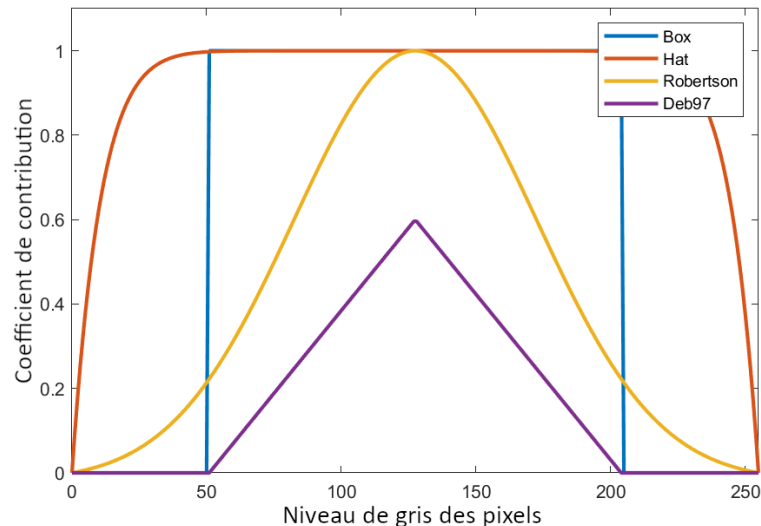


Figure 3.10 – Fonctions de poids

différents  $E_t$ , en tenant compte des  $T_{noi}$  et  $T_{sat}$  fixés par l'utilisateur, de la fonction de poids sélectionnée et de la CRF. Pour chaque pixel, la valeur de luminance HDR peut être obtenue par une moyenne pondérée dans l'espace linéaire (Equation 3.5). Cependant à cause de la précision numérique, du bruit peut apparaître sur les données. Afin de réduire le bruit concernant les pixels brillants la moyenne pondérée peut être calculée dans l'espace logarithmique (Equation 3.6) [Debevec 97]. Tandis que pour le bruit apparaissant avec les pixels sombre le calcul s'effectue dans l'espace carré 3.7 [Robertson 00b]. D'autres méthodes se basent notamment sur la maximisation du SNR en fusionnant des sous-échantillons des images LDR [Hasinoff 10].

$$E(X, \theta, \phi) \equiv \frac{\sum_{i=1}^{N_t} w(X_{(\theta, \phi)}^i) \frac{Lin(X^i, \theta, \phi)}{E_t^i}}{\sum_{i=1}^{N_t} w(X_{(\theta, \phi)}^i)} \quad (3.5)$$

Où  $\begin{cases} X^i \text{ est la valeur du pixel pris avec le temps d'exposition } i \\ E_t^i \text{ est le temps d'exposition } i \\ N_t \text{ est le nombre de d'image avec un temps d'exposition differents} \\ w \text{ correspond à la fonction de poids} \end{cases}$

$$E(X, \theta, \phi) \equiv \exp \left( \frac{\sum_{i=1}^{N_t} w(X_{(\theta, \phi)}^i) (\log(Lin(X^i, \theta, \phi)) - \log(E_t^i))}{\sum_{i=1}^{N_t} w(X_{(\theta, \phi)}^i)} \right) \quad (3.6)$$

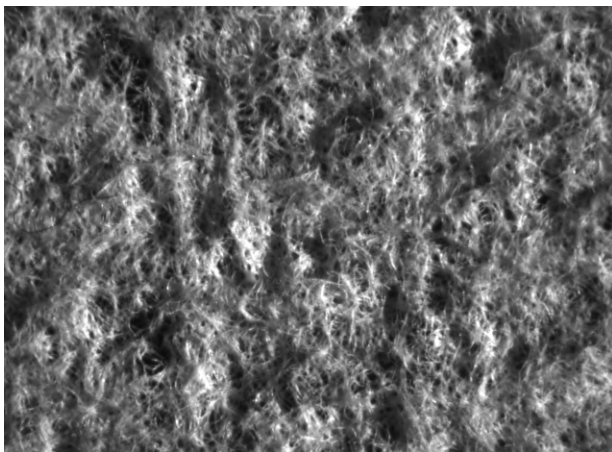
$$E(X, \theta, \phi) \equiv \frac{\sum_{i=1}^{N_t} w(X_{(\theta, \phi)}^i) Lin(X^i, \theta, \phi) E_t^i}{\sum_{i=1}^{N_t} w(X_{(\theta, \phi)}^i) (E_t^i)^2} \quad (3.7)$$

Les valeurs de luminance Haute Dynamique (HD) obtenues à chaque pixel à partir des directions d'acquisition RTI doivent être cohérentes entre elles, et non associées à une valeur de réflectance relative *intra-image* comme pour l'imagerie HDR classique. Pour répondre à cette problématique, un temps d'exposition de référence  $E_t^{ref}$  est choisi empiriquement permettant ensuite de calculer toute la luminance HDR relative à cette référence, en calculant pour chaque image d'acquisition  $i$  le rapport entre son temps d'exposition ( $E_t^i$ ) et le temps d'exposition de référence  $R_E = E_t^i / E_t^{ref}$ . La seule condition à respecter pour comparer les données HDR entre elles est d'utiliser le même  $E_t^{ref}$  lors de leurs reconstructions. En effet,

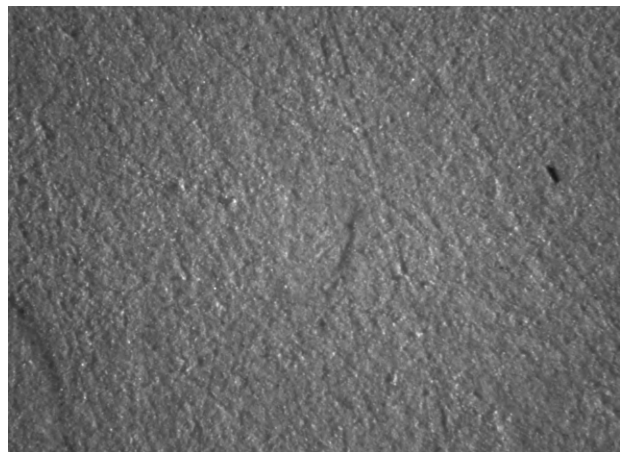
les données HDR correspondront alors à la scène capturée avec un temps d'exposition  $E_t^{ref}$  sans la limitation du capteur.

## 4 Évaluation de la méthode proposée & Résultats

La méthode est appliquée sur 4 échantillons aux propriétés distinctes en termes d'isotropie et de réflectance (Figure 3.11). L'échantillon *Surf-1* est un échantillon de papier mat industriel avec une rugosité isotrope. *Surf-2* est une surface en fluoropolymère gris avec une réflectance diffuse qui réfléchit 40% de la lumière. Il présente un comportement lambertien et peut être utilisé pour l'étalonnage de la lumière en photographie (étalon de réflectance). *Surf-3* est un échantillon de surface en acier obtenu par laminage à chaud avec une finition de surface par brossage. *Surf-4* est un échantillon de surface en argent avec une finition par micro-billage. Les acquisitions sur ces quatre échantillons ont été réalisées dans les mêmes conditions expérimentales, avec un champ de vision de  $6,89 \times 5,11$  mm soit une taille de pixel d'environ  $1,7 \mu m^2$ . 192 angles d'éclairage répartis de manière homogène dans l'espace angulaire  $(\phi, \theta)$  ont été acquises dans le cycle d'acquisition RTI (voir figure 3.4), sur 20 régions différentes de surface pour chacune d'entre elles.



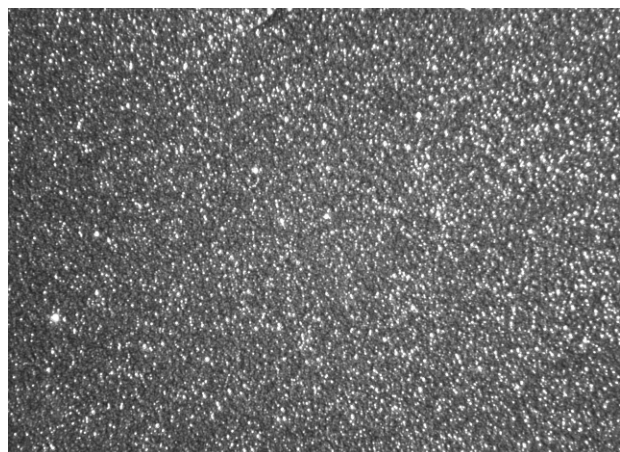
(a) *Surf-1* - Papier mat industriel



(b) *Surf-2* - Patch d'étalonnage en fluoropolymère



(c) *Surf-3* - Acier brossé



(d) *Surf-4* - Argent microbillé

Figure 3.11 – Échantillons *Surf-[1-4]* - Surfaces d'évaluation

## 4.1 Évaluation globale

La première évaluation de la méthode consiste à comparer les données obtenues par RTI (notées LD-RTI brute) et HD-RTI sur les échantillons de surface d'évaluation *Surf-[1-4]*. Dans le tableau 3.1 nous comparons le nombre d'image acquises durant les acquisitions HD-RTI de ces différentes surfaces, sur l'ensemble de l'acquisition et par positions d'acquisition. On observe comme attendu que plus une surface a une amplitude de réponse élevée (exemple de *Surf-4*), plus le nombre d'images nécessaires par direction d'éclairage est important. A contrario *Surf-1* ne nécessite moins de prises de vue, 2 images en moyenne par direction d'acquisitions. Nous observons également que l'écart-type des surfaces dont le comportement est lambertien est plus faible, respectivement 0 pour *Surf-1* et 0.5 pour *Surf-4* pour chaque direction d'éclairage. Ces données montrent que la méthode permet des acquisitions auto-adaptatives, à la fois selon le type de surface observées et de l'amplitude des réponses aux différents angles d'acquisition.

	<i>Surf-1</i>	<i>Surf-2</i>	<i>Surf-3</i>	<i>Surf-4</i>
Nombre total de direction d'éclairage	192	192	192	192
Nombre de d'image total (LDR) $\mu$ ( $\sigma$ )	386 (0)	347.2 (26.6)	397.8 (3.6)	486 (6.3)
Nombre maximum d'image par direction $\mu$ ( $\sigma$ )	2 (0)	2.2 (0.4)	3 (0)	3 (0)
Nombre minimum d'image par direction $\mu$ ( $\sigma$ )	2 (0)	1.2 (0.4)	2 (0)	2 (0)
Nombre d'image par direction $\mu$ ( $\sigma$ )	2 (0)	1.8 (0.4)	2.1 (0.2)	2.5 (0.5)

Tableau 3.1 – Moyenne ( $\mu$ ) et écart type ( $\sigma$ ) des indicateurs d'acquisitions HD-RTI sur les 20 régions de chaque échantillons de surface *Surf-[1-4]*.

Le tableau 3.2 synthétise les résultats en terme de ratio dynamique (pour rappel le rapport dynamique représente le rapport entre la valeur minimum et maximum des données acquises). Le ratio dynamique est calculé au niveau des images et au niveau des pixels pour les acquisitions LD-RTI et HD-RTI des quatre échantillons. L'analyse comparative des ratios dynamiques montre des valeurs plus élevées pour le HD-RTI. Nous observons également que les moyennes des ratios dynamiques au niveau des images et des pixels augmentent significativement dans le cas des acquisitions HD-RTI. Par exemple, le ratio moyen dynamique au niveau des images de l'acquisition HD-RTI de *Surf-1* et de *Surf-4* sont respectivement de 55 et de 395. Il traduit un comportement de réflectance attendu des surfaces étudiées, alors que cette évolution n'est pas présente dans les données LDR brute. Les valeurs élevées du ratio max au niveau des pixels de *Surf-3*, soit 255 pour les données LDR brute et 23823 pour les données HD-RTI, confirment également la nécessité et la pertinence de l'approche proposée pour mesurer la pleine dynamique de l'information de réflectance angulaire. Ces différences confirment que l'information n'a été que partiellement mesurée avec la méthode RTI classique. Ces résultats sont corroborés par la distribution des ratios dynamiques au niveau des images et au niveau des pixels. Les distributions obtenues pour *Surf-4* sont présentées sur la Figure 3.12, des résultats analogues sont obtenus pour les trois autres échantillons.



Moyenne $\mu$ ( $\sigma$ )	Surf-1		Surf-2		Surf-3		Surf-4	
	LDR brute	HD-RTI	LDR brute	HD-RTI	LDR brute	HD-RTI	LDR brute	HD-RTI
Ratio de la Dynamique au niveau de pixels	102 (39)	58 (15)	113 (38)	61 (8)	255 (6)	1336 (456)	109 (33)	454 (184)
Ratio de la Dynamique au niveau des images	115 (27)	55 (10)	125 (24)	57 (4)	255 (0)	1130 (216)	99 (27)	395 (127)

Min $\mu$ ( $\sigma$ )	Surf-1		Surf-2		Surf-3		Surf-4	
	LDR brute	HD-RTI	LDR brute	HD-RTI	LDR brute	HD-RTI	LDR brute	HD-RTI
Ratio de la Dynamique au niveau de pixels	6 (2)	6 (2)	8 (2)	9 (2)	12 (6)	142 (80)	7 (2)	28 (14)
Ratio de la Dynamique au niveau des images	67 (39)	32 (11)	76 (24)	49 (8)	255 (0)	744 (183)	45 (12)	199 (66)

Max $\mu$ ( $\sigma$ )	Surf-1		Surf-2		Surf-3		Surf-4	
	LDR brute	HD-RTI	LDR brute	HD-RTI	LDR brute	HD-RTI	LDR brute	HD-RTI
Ratio de la Dynamique au niveau de pixels	255 (0)	301 (81)	255 (0)	740 (869)	255 (0)	23823 (7682)	255 (0)	5018 (1165)
Ratio de la Dynamique au niveau des images	156 (74)	78 (14)	199 (65)	69 (11)	255 (0)	1705 (438)	167 (63)	844 (313)

Tableau 3.2 – Indicateurs de ratio dynamique RTI *vs* HD-RTI des 20 régions de chaque surfaces *Surf* [1-4].

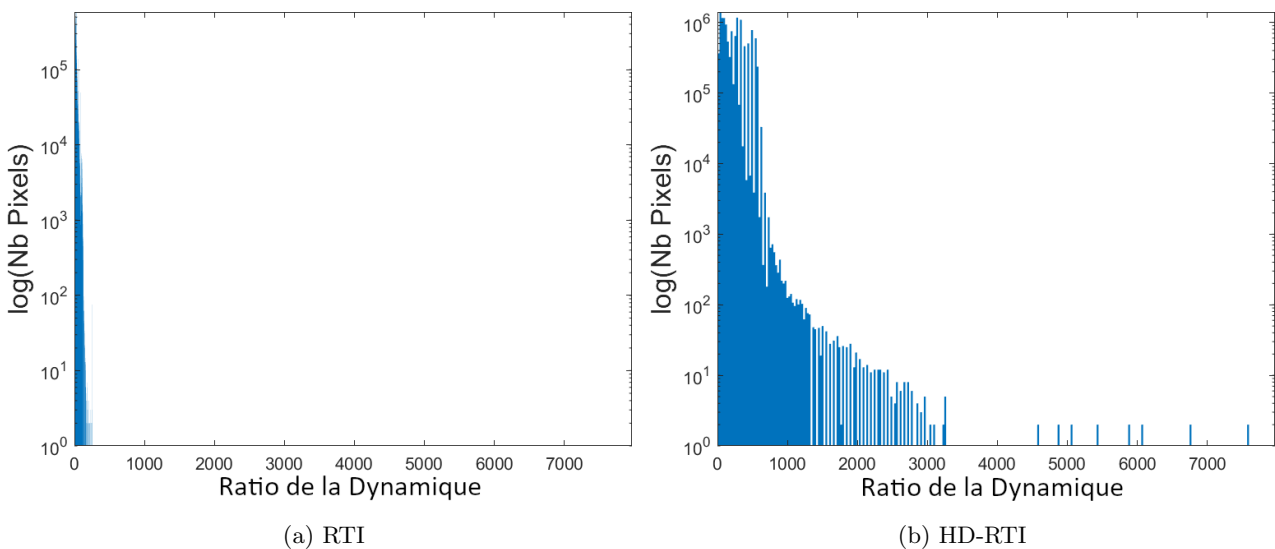


Figure 3.12 – Distribution du ratio dynamique au niveau des pixels de *Surf-4*.

## 4.2 Evaluation “pixel-wise”

L'évaluation globale des indicateurs associés aux données HD-RTI montre que les données mesurées sont significativement différentes des données RTI conventionnelles. L'évaluation au niveau des pixels vise à mettre en évidence en quoi ces changements peuvent altérer la caractérisation des informations de réflectance, la perception de la texture des surfaces et plus généralement l'ensemble des analyses RTI réalisées en post-traitement de ce type d'acquisitions. Il est important de noter ici que la dynamique des données HD-RTI obtenues étant souvent plus importante que dans le cas des données conventionnelles, une opération de mappage de ton (tone mapping) est nécessaire pour permettre la visualisation. La non-linéarité induite par le processus de mappage de ton peut générer des biais d'analyse, cependant, ce traitement n'est pas nécessaire pour les autres type d'analyses (cf chapitre 4).

Un exemple comparatif d'images RTI (méthode conventionnelle) et d'images HD-RTI (avec tone mapping) est présenté en figure 3.13 pour les 4 surfaces d'évaluation de la méthode retenues dans ce chapitre. La comparaison avec les données LD-RTI montre que la technique HD-RTI permet de mesurer l'information de réflectance angulaire quelle que soit son amplitude, ce qui conduit à une évaluation plus fine et plus robuste de cette grandeur physique. Les résultats obtenus sur *Surf-3* et *Surf-4* montrent que la méthode est particulièrement pertinentes pour les surfaces brillantes. En effet, ces surfaces ne permettent souvent pas de définir un temps d'exposition approprié pour tous les angles d'une acquisition RTI, et conduisent inévitablement à un grand nombre de points non mesurés. Ces résultats sont confirmés par la comparaison des cartes de réflectance 3D présentées sur la figure 3.14 où les valeurs du LD-RTI sont limités à 255 tandis que pour le HD-RTI les valeurs atteignent environ 600.

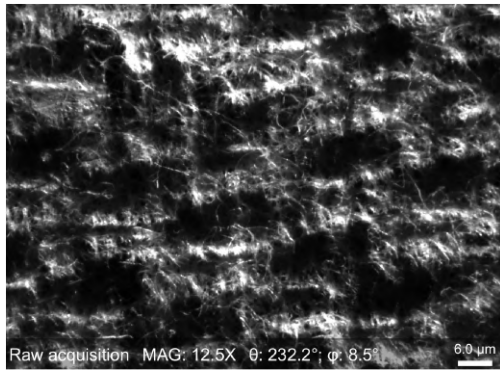
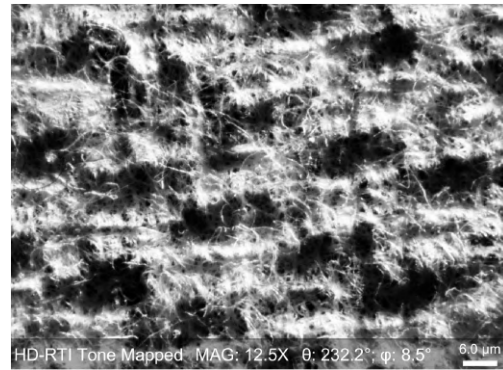
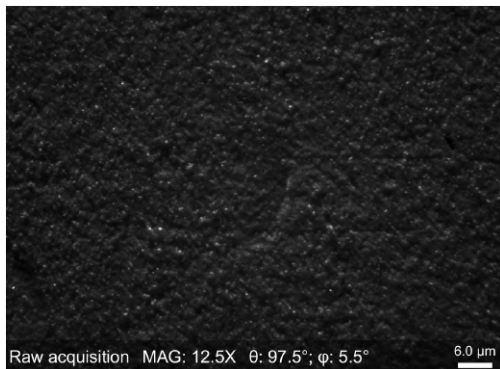
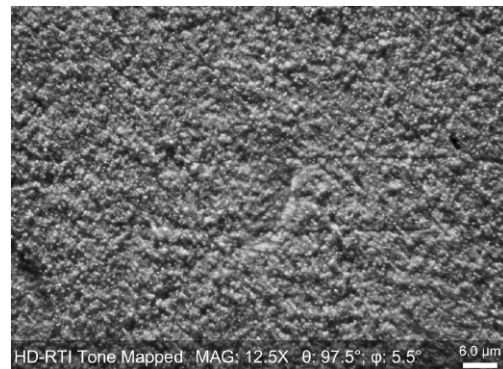
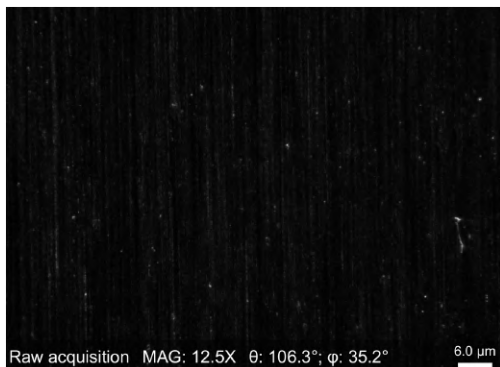
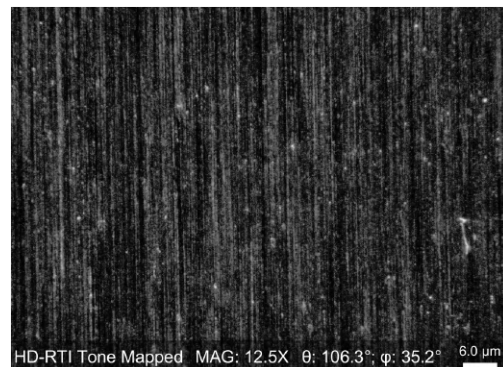
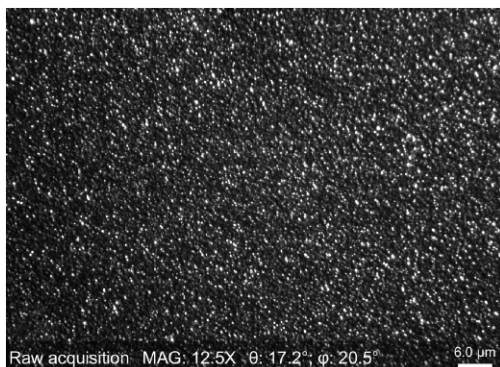
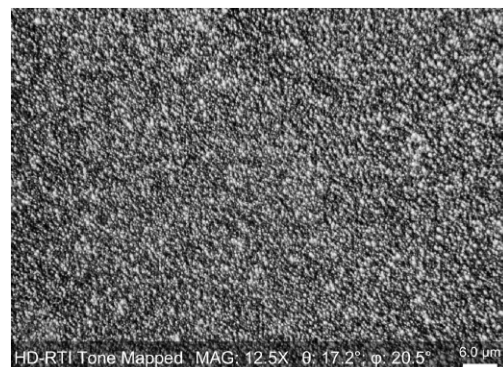
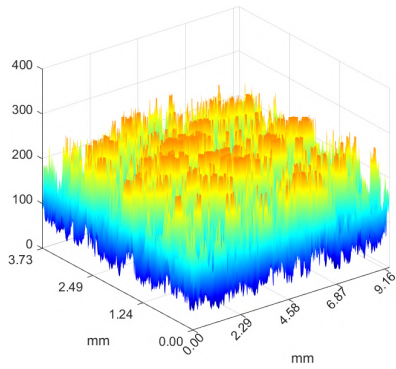
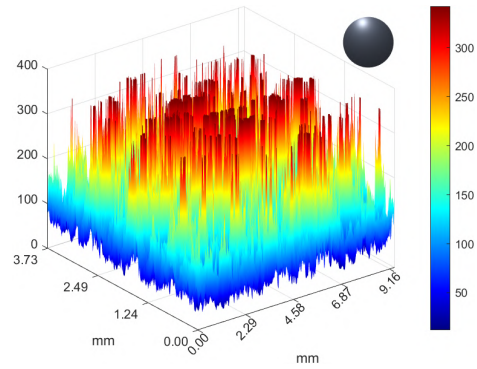
(a) *Surf-1* - LD-RTI brute; ( $E_t = 125\text{ ms}$ )(b) *Surf-1* - HD-RTI avec mappage de ton;(c) *Surf-2* - LD-RTI brute; ( $E_t = 125\text{ ms}$ )(d) *Surf-2* - HD-RTI avec mappage de ton;(e) *Surf-3* - LD-RTI brute; ( $E_t = 125\text{ ms}$ )(f) *Surf-3* - HD-RTI avec mappage de ton;(g) *Surf-4* - LD-RTI brute; ( $E_t = 125\text{ ms}$ )(h) *Surf-4* - HD-RTI avec mappage de ton;

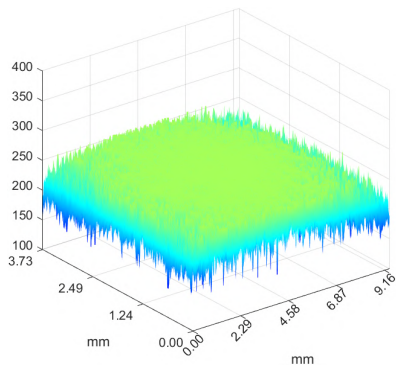
Figure 3.13 – Comparaison des données LD-RTI brutes et de des données HDR-RTI avec mappage de ton (logarithme de l'intensité) pour la direction de la lumière ( $\theta, \phi$ ), des surfaces *Surf-[1-4]*



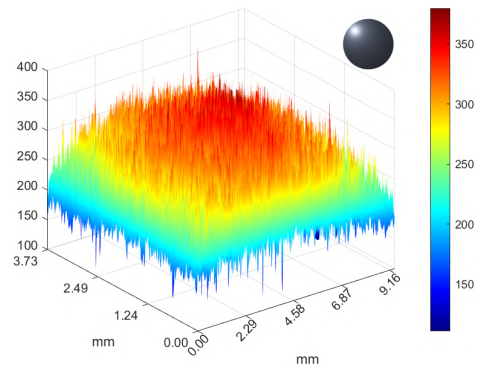
(a) *Surf-1* - Surface de réflectance LD-RTI brutes ( $\theta = 106^\circ, \phi = 35^\circ, E_t = 125 \text{ ms}$ )



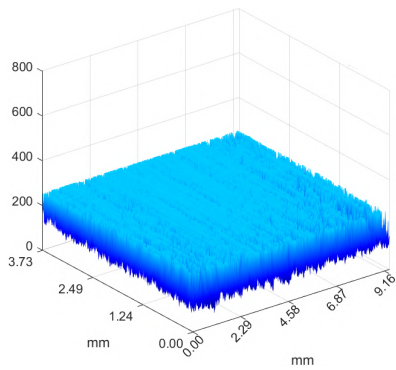
(b) *Surf-1* - Surface de réflectance HD-RTI ( $\theta = 106^\circ, \phi = 35^\circ$ )



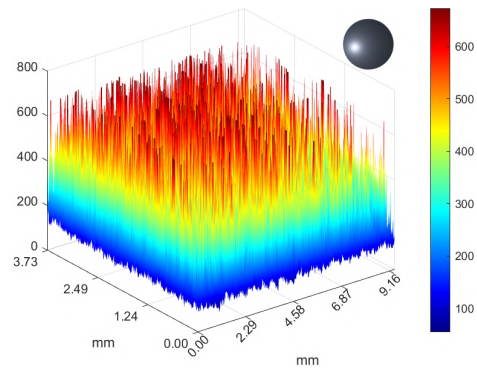
(c) *Surf-2* - Surface de réflectance LD-RTI brutes ( $\theta = 134^\circ, \phi = 41^\circ, E_t = 125 \text{ ms}$ )



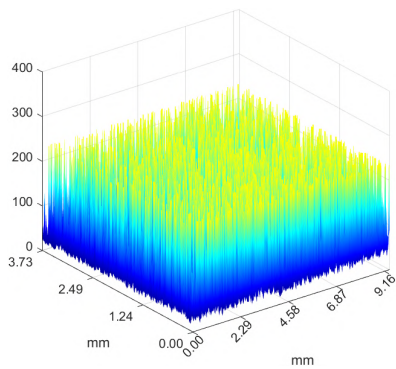
(d) *Surf-2* - Surface de réflectance HD-RTI ( $\theta = 134^\circ, \phi = 41^\circ$ )



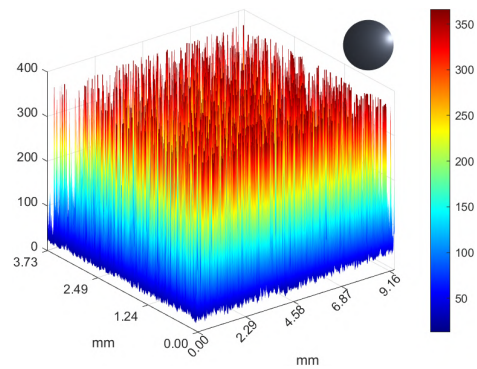
(e) *Surf-3* - Surface de réflectance LD-RTI brutes ( $\theta = 192^\circ, \phi = 56^\circ, E_t = 125 \text{ ms}$ )



(f) *Surf-3* - Surface de réflectance HD-RTI ( $\theta = 192^\circ, \phi = 56^\circ$ )



(g) *Surf-4* - Surface de réflectance LD-RTI brutes ( $\theta = 17^\circ, \phi = 20^\circ, E_t = 125 \text{ ms}$ )



(h) *Surf-4* - Surface de réflectance HD-RTI ( $\theta = 17^\circ, \phi = 20^\circ$ )

Figure 3.14 – Comparaison des valeurs de réflectance angulaire, mesurées pour la direction de la lumière  $(\theta, \phi)$ , à partir des surfaces *Surf-[1-4]*

### 4.3 Évaluation de la luminance

La cohérence et l'homogénéité des valeurs de luminance acquises est importante dans le cas d'une évaluation visuelle ou analytique de la qualité de surface. Pour pouvoir comparer les surfaces entre elles, il faut que le rapport entre la luminance des surfaces soit respecté. Pour évaluer si les acquisitions HD-RTI permettent d'acquérir des valeurs de luminance cohérentes, deux surfaces de polymère fluoré avec une réflectivité de 40% et de 99% ont été acquises. Les acquisitions sont réalisées avec la méthode RTI conventionnelle à un temps d'exposition de 11ms, respectivement RTI<sub>40%</sub> et RTI<sub>99%</sub>, et avec la méthode HD-RTI, respectivement HD-RTI<sub>40%</sub> et HD-RTI<sub>99%</sub>, aux mêmes positions angulaires (193 angles d'éclairages). Ensuite, nous comparons le ratio de RTI<sub>99%</sub>/RTI<sub>40%</sub> et HD-RTI<sub>99%</sub>/HD-RTI<sub>40%</sub>. Le coefficient entre les deux surfaces devrait être en moyenne égal à  $99/40 = 2,475$ . Les résultats sont présentés dans la figure 3.15. Sur la première ligne nous pouvons observer le résultat de l'estimation du rapport de luminance entre les acquisitions des surfaces avec une réflectivité à 99% et 40% et sur la seconde ligne le même rapport mais centré sur la valeur théorique (99/40).

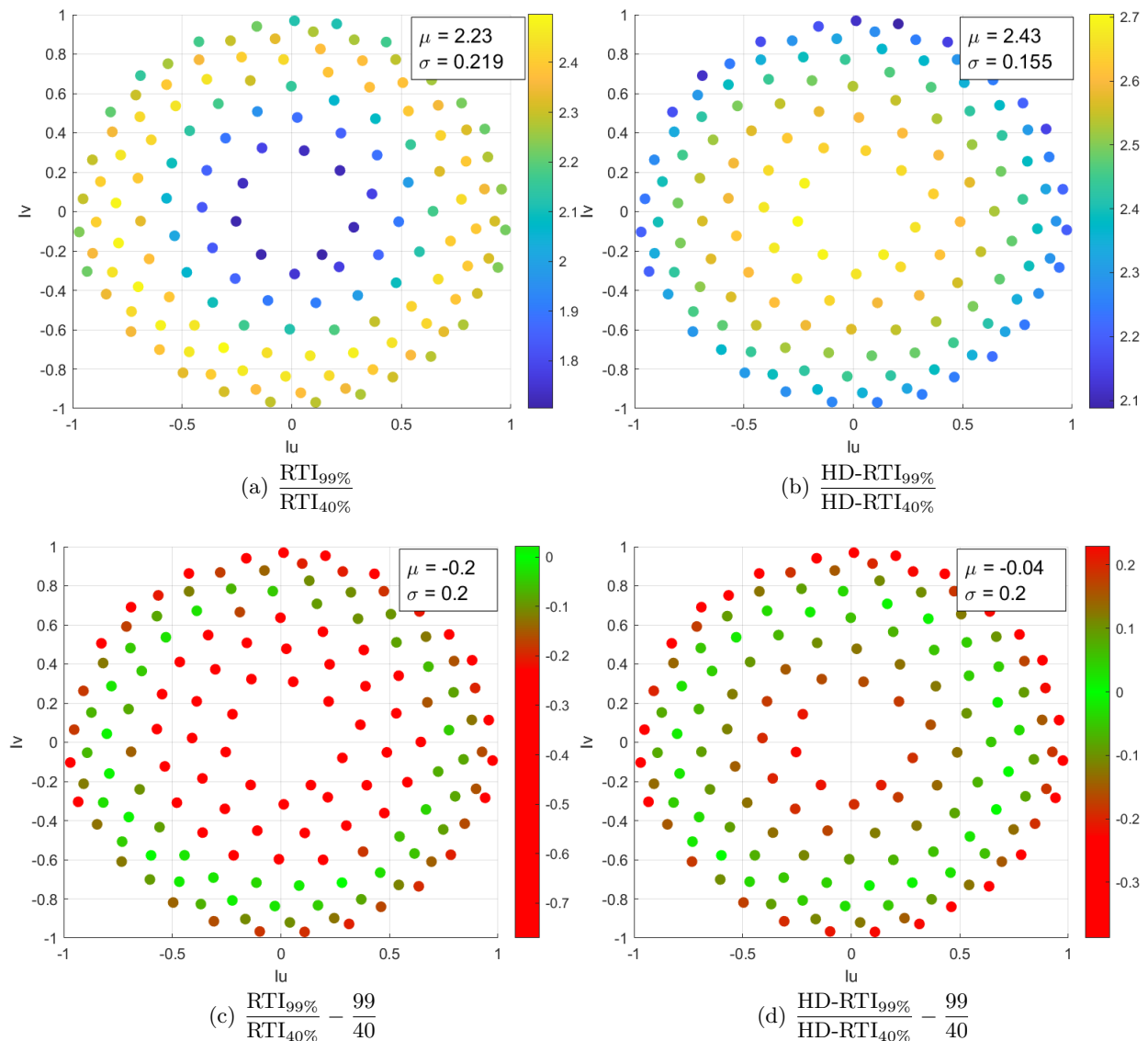


Figure 3.15 – Ratios de luminance des acquisitions RTI et HD-RTI de surfaces fluoropolymères avec une réflectance de 99% et de 40%

En raison de la saturation du  $RTI_{99}$  lorsque le  $RTI_{40}$  ne sature pas, les coefficients diminuent, tandis que le  $HD-RTI_{99\%}$  ne saturent pas donc le coefficient de luminance ne diminue pas avec une élévation élevée. La moyenne des coefficients de luminance des acquisitions HD-RTI est plus proche de la valeur théorique (2,475) que celle des acquisitions RTI. De plus, la différence de coefficient entre les acquisitions HD-RTI et la valeur théorique peut s'expliquer par les valeurs manquantes pour une élévation supérieure à  $75^\circ$  en raison de la limitation de l'installation (obstruction de la vue de la camera). Ces résultats montrent que la méthode HD-RTI permet l'acquisition de la réponse physique des surfaces en terme de reflectance angulaire, ce qui n'est pas le cas avec des acquisitions RTI acquises conventionnellement. Cet approche constitue donc un gain significatif en terme métrologique de la technique RTI. De plus, comme évoqué précédemment, ce gain dans la qualité de l'information mesurée ouvre des perspectives importantes de cette approche en tant que technique de caractérisation, comme développé dans le chapitre suivant.

#### 4.4 HD-RTI & Relighting des surfaces

Les données HD-RTI peuvent être utilisées pour reconstruire le rendu visuel des surfaces avec un éclairage virtuel, le terme usuellement employé pour cette opération dans le cadre de l'approche RTI étant *Relighting*. En plus des degrés de libertés associés à l'espace angulaire de la source d'éclairage  $(\theta, \phi)$ , la technique HD-RTI permet également de faire varier virtuellement la quantité de lumière, en simulant différents temps d'exposition  $(E_t)$ . Ce degré de liberté supplémentaire pour la reconstruction permet d'adapter parfaitement la configuration d'éclairage à la zone que l'on souhaite inspecter ou analyser. Cela est particulièrement utile pour les surfaces hétérogènes en couleur et/ou en texture, ainsi que pour les surfaces composites (multi-matériaux). Pour réaliser ce *relighting* dynamique, il est d'abord nécessaire de construire un modèle expérimental à partir des données HDR discrètes acquises à chaque angle d'acquisition. Ce modèle permet ensuite de reconstruire de façon continue l'image HDR de la surface en fonction de l'angle d'éclairage  $(\phi, \theta)$ . La deuxième étape consiste ensuite à convertir l'image HDR reconstruite en une image LDR associée au temps de reconstruction choisi  $(E_t)$ . Cette opération de conversion est décrite dans l'équation 3.8. Le flowchart de la méthode proposée et implémentée pour le *relighting* des données HD-RTI est présenté ci-dessous dans la figure 3.16.

$$LDR(\theta, \phi, E_t) = \begin{cases} \text{if } \lfloor HDR(\theta, \phi) \times \frac{E_t}{E_t^{ref}} \rfloor > 255 \text{ then} & 255 \\ \text{else} & \lfloor HDR(\theta, \phi) \times \frac{E_t}{E_t^{ref}} \rfloor \end{cases} \quad (3.8)$$

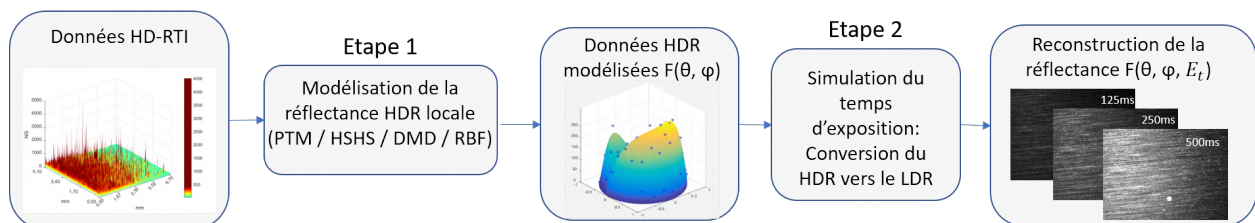


Figure 3.16 – Flowchart - reconstruction d'apparence à partir de données HDR

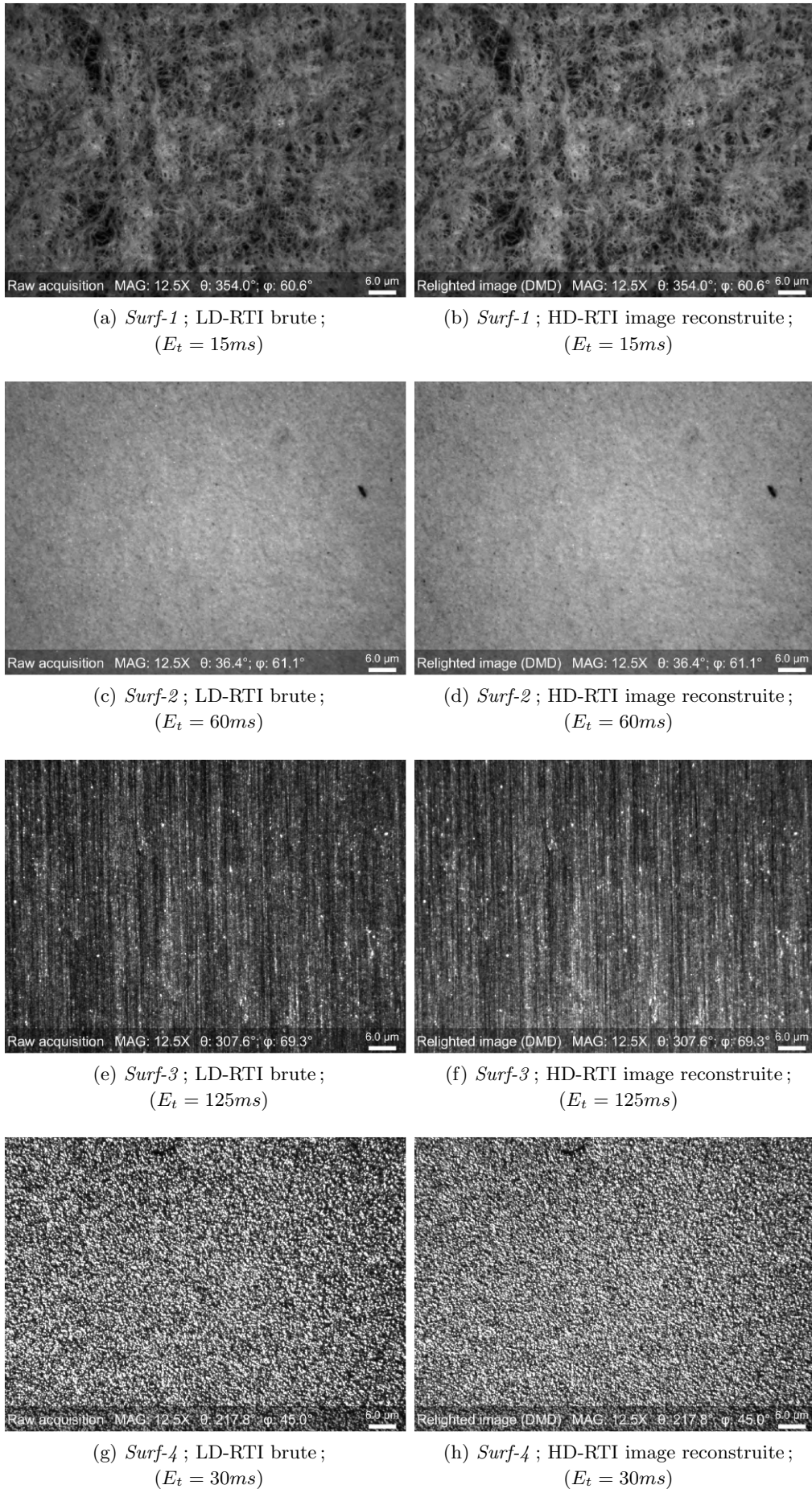


Figure 3.17 – Comparaison entre (à gauche) les acquisitions brutes LD-RTI (vérité terrain) et (à droite) les images reconstruites avec la méthode DMD, à partir des acquisitions HD-RTI.

Les résultats de la reconstruction  $f_R(\theta, \phi, E_t)$  sont présentés dans la figure 3.17 et dans le tableau 3.3 ci-dessous. Nous observons que la méthode proposée conduit à des reconstructions très fines de l'apparence en référence aux données acquises, notamment pour les zones ombrées ou saturées. La variable  $E_t$  permet, en plus du *relighting* RTI classique, d'adapter dynamiquement l'exposition lumineuse en fonction de l'amplitude de la réponse dans la zone d'intérêt.

		Surf-1		Surf-2		Surf-3		Surf-4	
		$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
$E_t$ (ms)	15	0,8	(0,3)	0,5	(0,3)	3,1	(7,5)	3,7	(3,6)
	30	1,4	(0,6)	1	(0,6)	4,4	(8,8)	5,6	(4,3)
	60	3	(1,1)	2	(1,4)	6,5	(11,4)	6,4	(4,6)
	125	4,9	(3,8)	3,3	(5,4)	9,5	(12,5)	7,7	(6,1)

Tableau 3.3 – Erreur absolue moyenne entre les données brutes LDR acquises (vérité terrain) et les images reconstruites à différents  $E_t$  des acquisitions HD-RTI (en niveaux de gris)

#### 4.5 HD-RTI & cartographies de saillance

Comme indiqué précédemment, la mise en œuvre de la méthode HD-RTI conduit à une structure et à une dynamique de données différentes, ce qui améliore la qualité des données et le *relighting*, mais à également un impact sur le calcul des cartes de caractéristiques dérivées du RTI. Une des contributions de nos travaux est axée sur l'estimation de cartographies de saillance visuelle à partir des acquisitions RTI. La méthodologie de post-traitement des données RTI proposée en ce sens est détaillée dans le chapitre 5 de ce manuscrit. Nous détaillons dans cette section l'impact de la modalité d'acquisition HD-RTI sur les analyses en terme de saillance visuelle. En effet, une des applications industrielles importantes de cette approche est la détection et l'évaluation d'anomalies d'aspect locales (coups, rayures, ou encore pollutions locales), et il apparait souvent que l'information mesurée est saturée à l'endroit de ces anomalies (fortes réflectivités) ce qui nuit voire rend impossible l'évaluation de la criticité des anomalies et leur discrimination. A titre d'illustration, nous présentons donc ici, sans rentrer dans les détails méthodologiques de calcul présentés dans le chapitre 5, les résultats comparatifs obtenus à partir d'acquisitions RTI et HD-RTI. Le cas d'application que nous présentons ici est une surface horlogère (cadran de montre poli-miroir) sur lequel ont été réalisés des micro-scratches (rayures linéaires) de différentes profondeurs avec une machine d'indentation. La résolution spatiale d'acquisition est identique aux acquisitions réalisées sur les surfaces d'évaluation présentées dans ce chapitre ( $Surf[1-4]$ ), et 149 orientations d'éclairage ont été mises en œuvre dans le cycle d'acquisition. La saillance est dans ce cas d'application estimée à partir d'une analyse multi-variée de descripteurs extraits des données d'acquisition (cf. chapitre 5), associé à la distribution statistique de la luminance en chaque pixel (coefficient de variation, kurtosis, skewness, entropie et énergie).



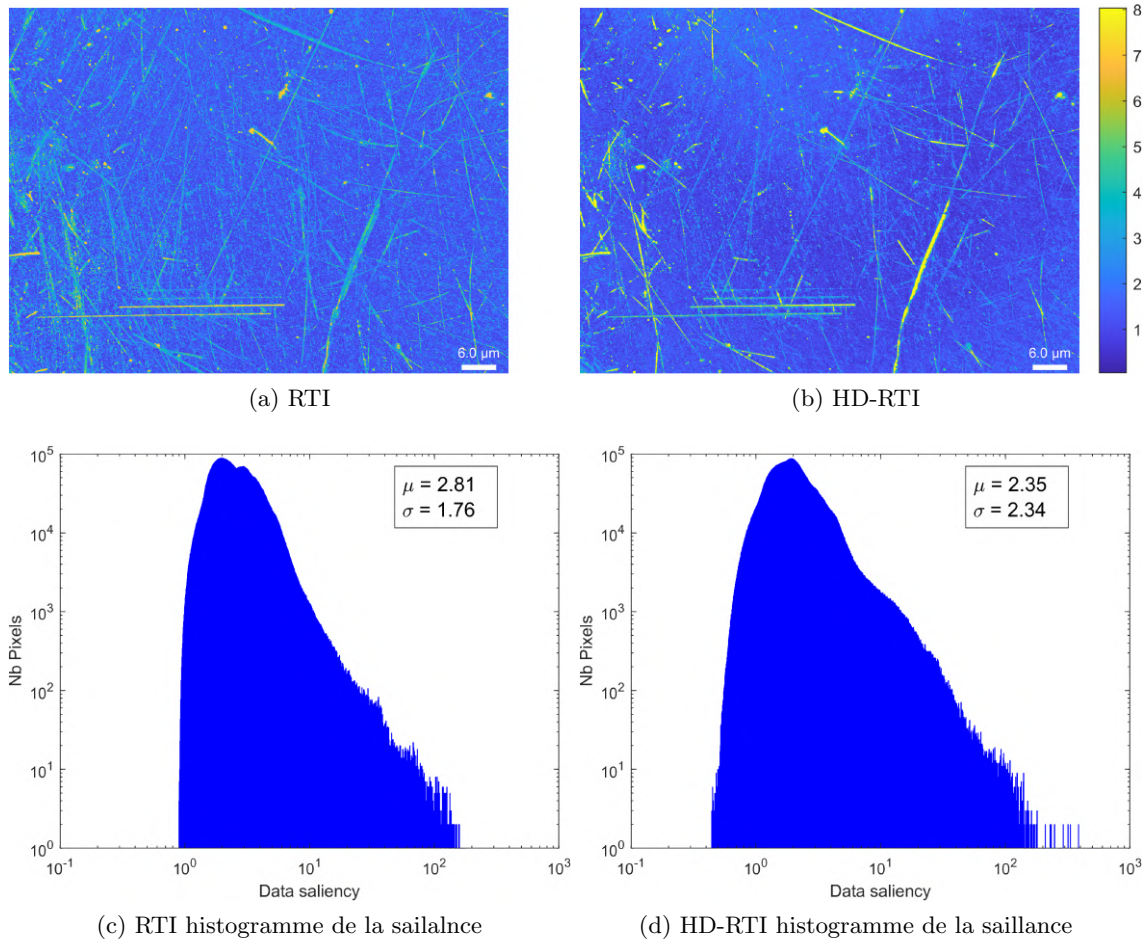


Figure 3.18 – RTI *vs* HD-RTI - Cartes de saillance et leurs histogrammes associés

Les cartes obtenues sont présentées dans la figure 3.18. On observe que les cartographies de saillance obtenues sont significativement différentes. Un critère de qualité pour une carte de saillance est la différenciation entre le fond et les éléments saillants. Dans ce cas, le fond de la carte de saillance HD-RTI est plus faible et l'amplitude de saillance des anomalies (rayures et autres anomalies de surface) est plus élevée. Cela signifie que l'évaluation de la saillance à partir d'une acquisition HD-RTI est plus robuste et discriminante. Ceci est confirmé dans les histogrammes associés. Ces derniers montrent que la moyenne est plus faible, dans le cas du HD-RTI, donc que la plupart des pixels, ont leurs niveaux de saillance baissés. Cependant, l'écart type est plus élevé donc la différence de saillance entre les pixels saillants et peu saillants est augmentée. Ce cas d'application mettent en évidence le gain potentiel en terme de qualité et de robustesse des analyses réalisées à partir de cette nouvelle modalité d'acquisition relativement à la méthode d'imagerie RTI conventionnelle.

## 5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une méthodologie pour la mise en œuvre de la technique High Dynamic Range pour des acquisitions RTI. La méthode proposée est auto-adaptative à la fois en fonction du type de surface observée et de l'amplitude de sa réponse aux différents angles d'acquisition. Les expériences ont été réalisées sur des échantillons de surface distincts en termes de rugosité et de réflectance permettant une comparaison non orientée des résultats avec le RTI. Les résultats ont montré que la méthode est particulièrement appropriée pour les surfaces hétérogènes

et brillantes. En effet, ces surfaces ne permettent souvent pas de définir un temps d'acquisition approprié pour tous les angles d'acquisition RTI, ce qui induit inévitablement des points non mesurés. En termes de simulation de la scène, la méthode proposée conduit à des reconstructions plus précises notamment pour les zones sombres ou brillantes. En plus de la modélisation RTI classique, le HD-RTI permet d'adapter dynamiquement l'exposition lumineuse en fonction de l'amplitude de la réponse dans la zone d'intérêt. Cependant l'ajout de modalités d'acquisition augmente la complexité du traitement et de la compréhension des données RTI. Dans le chapitre suivant nous proposons une méthodologie pour caractériser les données RTI (ou HD-RTI) en utilisant des descripteurs locaux associés à la réflectance angulaire locale et à la géométrie des surfaces. Enfin, cette étude a prouvé que l'évaluation de la saillance basée sur le HD-RTI est plus robuste et discriminante, ce qui la rend plus fiable pour les applications industrielles liées à l'inspection de la qualité.

### Résumé

- ☞ La technique High Dynamic Range (HDR) est adaptée et mise en œuvre automatiquement pour la Reflectance Transformation Imaging (RTI), appelée HD-RTI.
- ☞ La Reflectance Transformation Imaging augmentée de la technique de High Dynamic Range (HD-RTI) permet une meilleure capture et une meilleure modélisation des surfaces spéculaires.
- ☞ Le RTI couplé à la technique High Dynamic Range (HD-RTI) s'adapte aux surfaces observées.
- ☞ Le HD-RTI permet un calcul efficace des cartes de saillance
- ☞ Le HD-RTI sert de moyen d'évaluation visuelle de la qualité et d'inspection des surfaces fabriquées.

Les contributions présentées dans ce chapitre ont été valorisés dans les publications suivantes :

- Marvin NURIT, Gaëtan LE GOÏC, David LEWIS, Yuly CASTRO, Abir ZENDAGUI, Hermine CHATOUX, Hugues FAVRELIÈRE, Stéphane MANIGLIER, Pierre JOCHUM, et Alamin MANSOURI. « HD-RTI : An adaptive multi-light imaging approach for the quality assessment of manufactured surfaces ». *Computers in Industry*, 2021.
- Marvin NURIT, Gaëtan LE GOÏC, Stéphane MANIGLIER, Pierre JOCHUM, Hermine CHATOUX et Alamin MANSOURI. « Improved visual saliency estimation on manufactured surfaces using high-dynamic reflectance transformation imaging ». *Proceedings Volume 11794, 15th International Conference On Quality Control By Artificial Vision QCAV 2021, Tokushima, Japon, 2021*.
- Marvin NURIT, Yuly CASTRO, Abir ZENDAGUI, Gaëtan LE GOÏC, Hugues FAVRELIÈRE et Alamin MANSOURI. « High Dynamic Range Reflectance Transformation Imaging : an adaptive multi-light approach for visual surface quality assessment ». *Proceedings Volume 11172, 14th International Conference On Quality Control By Artificial Vision QCAV 2019, Mulhouse, France, 2019*.



## Caractérisation de l'apparence des surfaces et cartographie des caractéristiques locales

### *Objectif du chapitre*

*Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une méthodologie permettant la mesure de la pleine Dynamique de luminance des surfaces. Ce chapitre se focalise sur l'exploitation des données acquises et propose une méthodologie de caractérisation des surfaces basée sur l'extraction de descripteurs à partir d'acquisitions de type RTI. Trois catégories de descripteurs sont proposées. La première catégorie concerne des descripteurs statistiques locaux (calculés en chaque pixel) à partir des données brutes d'acquisition. Les deux autres catégories sont des descripteurs locaux issus de modèles de réflectance et topographiques construits à partir des données acquises.*

### 1 Imagerie RTI : vers une métrologie de l'apparence

La technique de *réflectance Transformation Imaging* est une technique qui a été initialement développée pour permettre de simuler le rendu visuel d'une surface selon la direction d'éclairage choisi, et éventuellement en faisant également varier les paramètres des modèles de reconstruction. La variation de la direction d'éclairage, l'amplification, ou la séparation d'une composante des modèles de réflexion permettent de mettre en évidence des informations surfaciques concernant la micro-géométrie et/ou la réflectance angulaire locale.

Si cette approche présente de nombreux intérêts dans un cadre d'application industriel pour l'aide à l'inspection lors du contrôle qualité de l'apparence des surfaces par exemple, la démarche que nous présentons ici vise à mettre en œuvre la technique RTI, et les analyses subséquents, pour permettre la caractérisation de l'apparence des surfaces. L'objectif est particulièrement de

répondre à deux besoins importants associés à la caractérisation des variations d'apparence intra-surface (défauts d'aspects locaux) et inter surface. Ces défauts, ou anomalies globales, peuvent par exemple être générés par la dérive de processus de fabrication et de finition des surfaces. Un autre cas fréquent d'application est le monitoring temporel de l'apparence (analyse du vieillissement par exemple).

La méthode que nous proposons est basée sur le calcul de descripteurs surfaciques à partir des données d'acquisition RTI. Un descripteur est une valeur estimée à partir d'une fonction qui prend en paramètre un ensemble de mesure ( $F(X_1, \dots, X_n) \equiv F[X]$ ). Dans notre cas, les mesures sont des valeurs de réflectance angulaire locales (en chaque pixel) discrètes (positions d'acquisition RTI). Ce calcul de descripteur correspond à une réduction de la complexité des données, ou compaction, qui permet d'extraire des valeurs caractéristiques de l'ensemble de données d'acquisition. Ces valeurs caractéristiques peuvent aussi être dépendantes de l'échelle d'observation, on parlera alors de descripteur multi-échelle. Deux types de descripteurs peuvent être calculés :

**Les descripteurs locaux :** Ces valeurs caractéristiques décrivent les données de réflectance angulaire localement, c'est à dire en chaque point/pixel de la surface.

**Les descripteurs globaux :** Ces descripteurs décrivent à travers un scalaire unique les caractéristiques de l'ensemble de la surface considérée. Ils peuvent potentiellement être des valeurs statistiques dérivées des valeurs des descripteurs locaux (par exemple, moyenne sur l'ensemble de la surface d'un descripteur local).

L'approche que nous développons ici est basée sur l'extraction de descripteurs locaux pour la caractérisation des surfaces. Ces descripteurs peuvent être classés en deux groupes principaux : les descripteurs de réflectance (interaction lumière surface) et les descripteurs qui caractérisent la micro-géométrie locale de la surface inspectée (descripteurs *géométriques*). Le flow-chart général de cette méthodologie est présenté ci-dessous (figure 4.1).

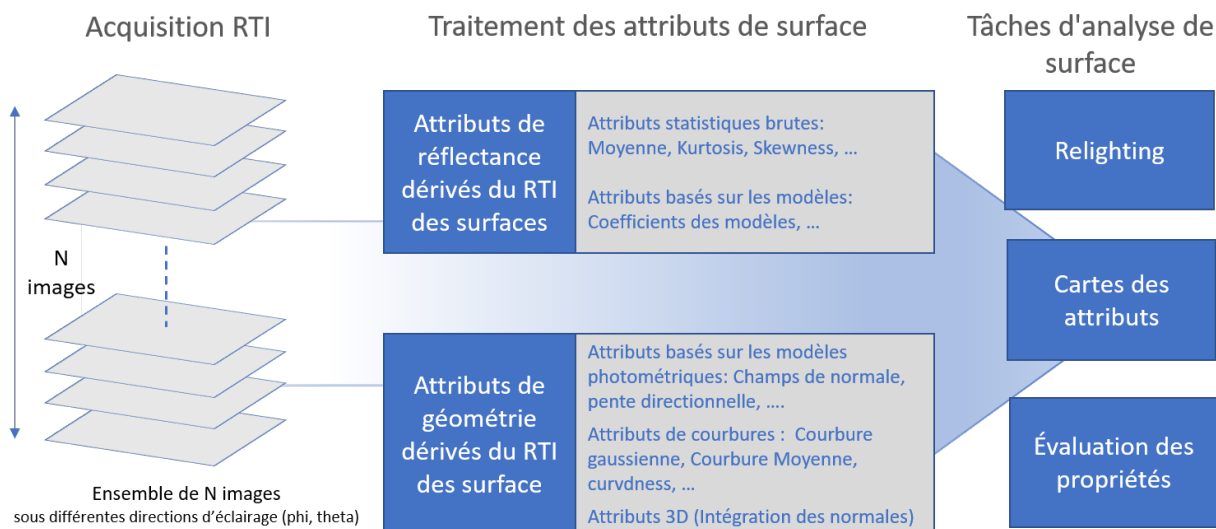


Figure 4.1 – Description d'une acquisition RTI et les différents type de descripteurs

Les descripteurs de *réflectance* sont présentés dans les sections 2.1 et 2.2. Il s'agit d'indicateurs statistiques estimés à partir des données brutes d'acquisition, et/ou de descripteurs dérivés de modèles d'apparence mise en oeuvre dans l'approche RTI pour la reconstruction du rendu visuel

des surfaces. Les descripteurs *géométriques* correspondent à des caractéristiques estimées à partir d'un modèle Stéreo-photométrique (PS), c'est à dire un modèle qui vise à partir de ce type de données à reconstruire la topographie de la surface imagée. Cette catégorie de descripteur est décrite dans la section 2.3.

Afin d'illustrer la méthodologie proposée, nous l'appliquons sur une surface d'application associée à l'industrie horlogère. Il s'agit d'un cadran de montre avec dépôt de matière précieuse et une finition polie. Des micro-rayures fabriquées, dont on connaît la localisation, de différentes caractéristiques géométriques, ont été réalisées sur la surface avec une machine de scratch test (Anton Paar *MCT*<sup>3</sup>). Les caractéristiques de cet échantillon sont représentées dans la figure 4.2. En termes de modalités d'acquisition RTI, 149 positions angulaires réparties de façon homogène dans l'espace angulaire  $(\theta, \phi)$  (temps d'exposition de 125ms) ont été acquises, en lumière blanche.

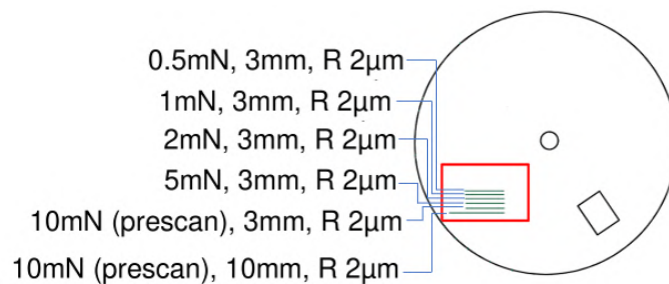


Figure 4.2 – Représentation du cadran de montre avec des rayures normalisées. Le rectangle rouge représente la zone d'acquisition

## 2 Caractérisation locale de l'apparence des surfaces

Les descripteurs estimés à partir de la réflectance angulaire locale des surfaces permettent de décrire le comportement des points de la surface en réduisant la dimension de la fonction  $RTI(i, j, \theta, \phi)$  aux dimensions  $i$  et  $j$  (voir Figure 4.3).

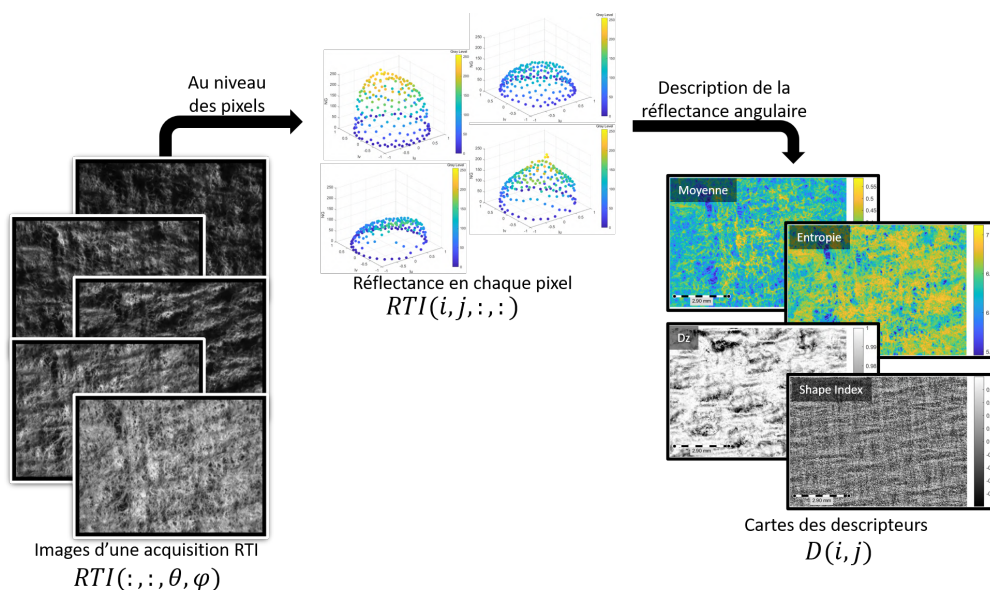


Figure 4.3 – Caractérisation d'une acquisition RTI en utilisant les descripteurs locaux

Comme indiquée précédemment, une grande variété de caractéristiques surfaciques peut être

extraite des données d'acquisition RTI. En effet, des descripteurs peuvent être calculés directement à partir des valeurs discrètes de réflectance angulaire locale associées aux acquisitions RTI (données brutes), ces descripteurs statistiques de réflectance sont détaillés dans la section 2.1. Ils peuvent aussi être obtenus à partir des modèles de reconstruction du rendu visuel des surfaces. La méthode pour l'estimation de ce type de descripteur, basés sur les modèles de réflectance, est détaillée dans la section 2.2. Enfin les descripteurs peuvent être estimés à partir de la mise en oeuvre de modèles de stéréophotométrie (modèles géométriques), ces descripteurs sont présentés dans la section 2.3.

## 2.1 Descripteurs de réflectance locale RTI brutes

Les principaux types de descripteur, estimés à partir de la réflectance angulaire locale brute, sont des indicateurs de position, d'échelle et de forme. Les premiers indicateurs sont de la famille des moments statistiques. Le moment fournit une information sur un aspect d'une distribution statistique des mesures tel que l'aplatissement ou l'asymétrie. Il existe plusieurs types de moment d'ordre  $n \in \{1, \dots, +\infty\}$  : ordinaire, centré et centré réduit, respectivement décrit dans les équations 4.1, 4.2 et 4.3.

$$E_o^n[X] \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N X^n \quad (4.1)$$

$$E_c^n[X] \equiv E_o^n[(X - E_o[X])^n] \quad (4.2)$$

$$E_{cr}^n[X] \equiv \frac{E_c^n[X]}{\sqrt{E_c^2[X]}^n} \quad (4.3)$$

Où  $\left\{ \begin{array}{l} X \text{ correspond à la réflectance angulaire locale.} \\ N \text{ est le nombre de positions angulaires de l'acquisition RTI.} \end{array} \right.$

Certains cas particuliers de moments sont caractéristiques et correspondent donc directement à des descripteurs, tel que détaillé ci-dessous :

- Le premier cas particulier de moment est la moyenne, elle correspond à la somme des mesures divisée par le nombre de mesure (Equation 4.4).

$$\mu[X] \equiv E_o^1[X] \quad (4.4)$$

Ce descripteur est linéaire, c'est à dire qu'un ajout ou une multiplication de toute les mesures par une même constante, alors la moyenne subit la même opération. Dans le cas d'une acquisition RTI, avec une caméra strictement linéaire, changer le temps d'exposition par un coefficient revient à modifier la moyenne par le même coefficient si on ne considère pas les points non mesuré (sous-exposés ou sur-exposés). La moyenne permet de discriminer les points de la surface dont l'intensité de la réflectance angulaire est en moyenne différente du reste des points. Ce descripteur est illustré dans la figure 4.4a.

- L'écart-type est le deuxième cas particulier du moment. Il correspond à la racine carré du moment centré d'ordre 2 (Equation 4.5).

$$\sigma[X] \equiv \sqrt{E_c^2[X]} \quad (4.5)$$

L'écart-type décrit la dispersion des données. Plus l'écart-type est bas, plus les données sont proche de la moyenne et inversement. Dans le cas du RTI, cette valeur caractéristique peut permettre d'indiquer la variation dynamique des points de la surface. En effet, un grand écart-type pour un point de la surface, indique que ce point a une réflectance angulaire dont les

valeurs de l'intensité varient de façon importante, tandis qu'un faible écart-type indique que le point a une intensité de réflectance angulaire qui varie peu. Cet indicateur peut renseigner sur le caractère anisotrope des surfaces : dans le cas d'une géométrie de surface anisotrope (brossage par exemple), l'écart-type sera plus grand que pour une surface isotrope. En effet, la réponse d'une géométrie anisotrope variera fortement en fonction de l'angle entre l'éclairage et la direction de texture. Ainsi, les rayures des surfaces d'applications présentent des valeurs de descripteur d'écart-type de réflectance plus importantes que les points de leur voisinage (voir figure 4.4b).

- Le skewness (ou moment normalisé d'ordre 3) est un indicateur de l'asymétrie d'une distribution estimé avec l'équation 4.6.

$$\beta_1[X] \equiv E_{cr}^3[X] \quad (4.6)$$

Dans le cas de la réflectance angulaire locale, le descripteur de skewness permet d'estimer si la distribution d'un pixel est normale (valeur de skewness nulle) ou si au contraire la distribution s'éloigne d'une loi normale. Ainsi, un skewness négatif indique que la distribution du pixel est concentrée vers la droite de la moyenne, tandis qu'un coefficient positif correspond à une distribution décentrée vers la gauche de la moyenne. Selon le coefficient du skewness nous pouvons alors déduire si le pixel associé a tendance à être sombre ou clair (Figure 4.4c). Cependant le skewness à lui seul ne permet pas de déduire si une distribution possède beaucoup ou peu de valeurs aberrantes. En effet, la forme des deux queues d'une distribution peuvent être différentes pour une même valeur de skewness. Pour estimer la présence ou non de valeurs aberrantes il est alors nécessaire d'analyser à la fois les descripteurs de skewness et de kurtosis.

- Le kurtosis permet de décrire les queues d'une distribution et donc d'évaluer la présence de valeurs très éloignées de la moyenne (voire aberrantes). Le kurtosis (ou moment normalisé d'ordre 4) est donné dans l'équation 4.7).

$$\beta_2[X] \equiv E_{cr}^4[X] \quad (4.7)$$

Donc seules les valeurs normalisées supérieures à 1 contribuent au kurtosis tandis que la contribution des valeurs de faible amplitude resteront proches de zéro (car élevées à la puissance quatre). Les valeurs normalisées supérieures à 1 correspondent aux valeurs au delà d'un écart-type à partir de la moyenne soit les 31,8% valeurs éloignées de la moyenne. De plus, plus la valeur est éloignée de la moyenne plus elle contribue au kurtosis, donc une valeur élevée de kurtosis évalue la présence de valeurs éloignées de la moyenne de la distribution. Dans le cas d'un pixel, l'analyse est semblable à l'écart type : tandis que l'écart-type permet de décrire la dynamique autour de la moyenne, soit les 68,2% des valeurs de la distribution, le kurtosis permet de décrire les 31,8% restant. Nous observons dans les Figures 4.4b et 4.4d que les rayures normalisées ont un fort écart-type et un faibles kurtosis. Ceci signifie que ces pixels ont une forte Dynamique à cause du caractère anisotrope des rayures mais que sa réponse est à chaque fois proche de la moyenne donc non aberrant.

L'un des désavantages des descripteurs correspondant aux moments, est leur faible robustesse en présence de valeurs aberrantes. En effet, s'il existe des valeurs extrêmes dans les données alors le moment calculé peut être biaisé par ces valeurs. De plus, le moment seul ne permet pas de décrire entièrement les données RTI. Il existe ainsi d'autres descripteurs dérivés de la réflectance angulaire locale plus robustes et/ou pouvant combler l'information manquante sur les données :



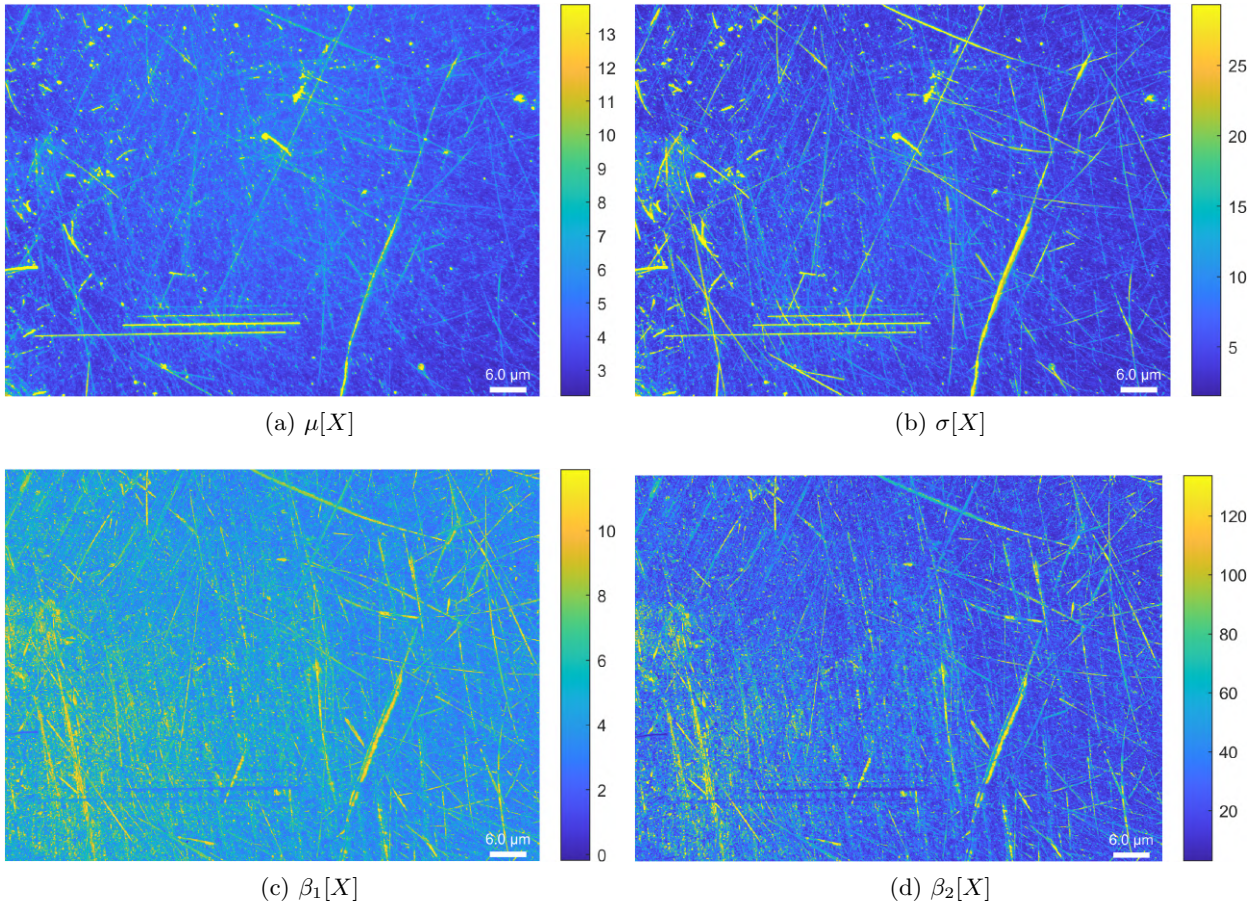


Figure 4.4 – Cartes des descripteurs de réflectance angulaire locaux dérivés à partir des données brutes d'acquisition RTI (Surface d'application - Cadran de montre avec micro-scratches, ( $E_t = 125ms$ ))

- Le coefficient de variation est défini par le ratio entre l'écart-type et la moyenne comme décrit dans l'équation 4.8.

$$C_V[X] \equiv \frac{\sigma[X]}{\mu[X]} \quad (4.8)$$

Ce coefficient décrit la dispersion relative d'une distribution. En effet, l'écart-type seul ne permet pas de juger de la dispersion d'une distribution car l'importance de la dispersion, estimé avec l'écart-type, ne peut être estimé sans comparer son échelle à celle de la moyenne. Une distribution dont l'écart-type est plus petit ne signifie pas nécessairement que sa dispersion est moindre, il faut prendre en compte l'échelle entre la moyenne et l'écart-type. Par exemple, en observant les rayures normalisées dans la Figure 4.5a nous constatons des coefficients de variation bas, ce qui s'explique par une moyenne haute (Figure 4.4a) comparée à l'écart-type (Figure 4.4b).

- Les  $q$ -quantiles décrivent une distribution en définissant la valeur de la distribution qui la divise en  $q$  intervalles contenant le même nombre de données (Equation 4.9).

$$Q_{(p/q)}[X] \equiv X(P_c(X) = \frac{p}{q}) \quad (4.9)$$

$$\text{Où } \begin{cases} P_c(X) \text{ est la probabilité cumulée de } X \\ X(\text{condition}) \text{ correspond à la valeur de } X \text{ qui remplit la condition} \\ q \text{ est le nombre de quantiles} \\ p \text{ est le } p\text{-ième quantile} \end{cases}$$

Les quantiles sont plus robustes quand la distribution possède des valeurs aberrantes contrairement aux descripteurs relatifs au moment. La médiane (ou  $Q_{(1/2)}$ ) divise la distribution en 2, ainsi 50% de la distribution est en deçà de la médiane (Figure 4.5b). Elle est souvent utilisée à la place de la moyenne quand la distribution possède des valeurs aberrantes. Le minimum (Figure 4.5c) et le maximum (Figure 4.5d) sont quant à eux respectivement  $Q_{(0/q)}$  et  $Q_{(q/q)}$ . Ils permettent de connaître les limites de chaque point de la surface. Une des utilités des quantiles est de comprendre si un point de la surface a un comportement constant ou exceptionnel. En effet, en observant la médiane, nous constatons que certaines anomalies ne sont toujours pas apparentes alors que les rayures normalisées le sont. Or cela signifie que les autres anomalies ne sont visibles que lors d'une exposition avec une source de lumière pour moins de 50% des positions de l'acquisition. Ce pourcentage peut être affiné en utilisant différents types de quantile.

- Le ratio dynamique est le ratio entre le maximum et le minimum tel que décrit dans l'équation 4.10.

$$D_R[X] \equiv \begin{cases} \text{si } Q_{(q/q)}[X] > 0 \text{ alors} & \frac{Q_{(0/q)}[X]}{Q_{(q/q)}[X]} \\ \text{sinon} & 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

Ce coefficient permet de connaître l'amplitude de la réponse angulaire d'un point de la surface (Figure 4.5e). Ainsi deux distributions peuvent avoir un minimum et un maximum différents mais un même ratio dynamique. Plus le ratio dynamique d'un point de la surface est grand, plus l'échelle des valeurs de sa réflectance angulaire sera grande.

- Le mode représente la valeur dont l'occurrence est la plus forte dans un ensemble de données. Le calcul du mode est donné dans l'équation 4.11.

$$Mo[X] \equiv X(P(X) = \max(P(X))) \quad (4.11)$$

$$\text{Où } \begin{cases} P(X) \text{ est la probabilité de } X \\ X(\text{condition}) \text{ correspond à la valeur de } X \text{ qui remplit la condition} \end{cases}$$

Dans le cas de la surface d'application (cadran de montre - Figure 4.5f), aucun point n'a de fortes valeurs de  $Mo$ . Nous en déduisons que la surface renvoie peu de lumière. Ceci est en partie dû à la propriété poli-miroir de la surface, où peu de lumière est réfléchi sauf aux angles de réflexion spéculaire (valeurs de  $\phi$  très élevées ( $\simeq 90^\circ$ )).

- L'énergie permet d'augmenter le contraste des données en effectuant une somme des valeurs élevées à la puissance deux (Equation 4.12).

$$En[X] \equiv \sum_{i=1}^N X^2 \quad (4.12)$$

La Figure 4.5g montre que les anomalies de surfaces sont, à travers ce descripteur, plus visibles et discriminables du reste de la surface.

- L'entropie (de Shannon) permet de mesurer le niveau de "désordre" ou de "chaos" dans une distribution. Si la réflectance angulaire locale des points d'une surface est chaotique, ils sont alors susceptibles d'être plus difficiles à modéliser car ils ne peuvent pas être représentés

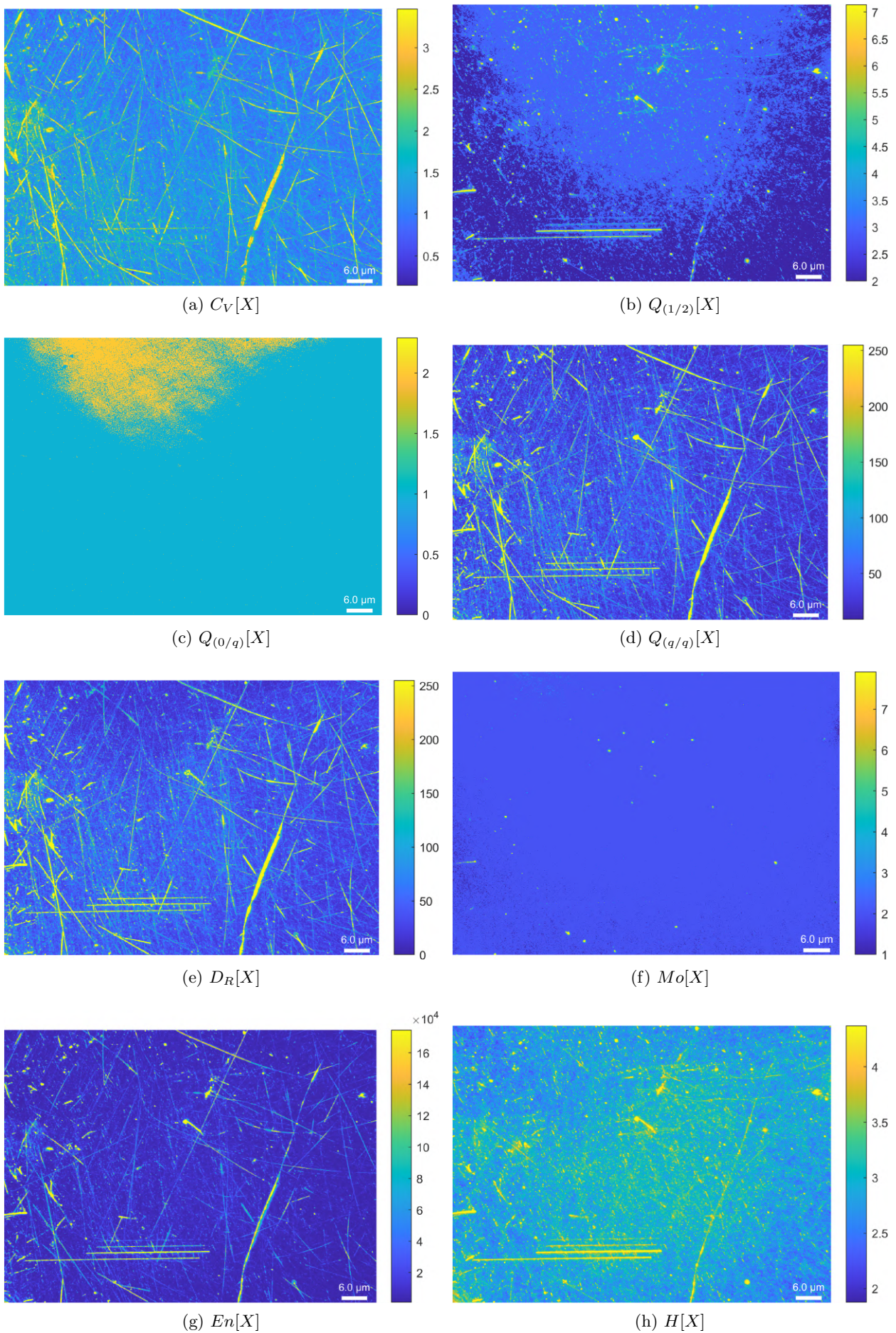


Figure 4.5 – Cartes des descripteurs de réflectance angulaire locaux dérivés à partir des données brutes d'une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ )

par des fonctions simples sans perte d'information. L'estimation de l'entropie est faite sur la probabilité d'apparition de chaque valeur de la réflectance angulaire locale tel que décrit dans l'équation 4.13.

$$H[X] \equiv - \sum_{i=1}^N P(X_i) \log_2 P(X_i) \quad (4.13)$$

Nous utilisons dans ce document le logarithme de base 2 mais il est possible de convertir l'entropie calculée dans une autre base par un simple facteur. Si  $a$  est la base de départ et  $b$  la base dans laquelle on souhaite convertir, alors le facteur vaut  $\log_a b$  [Cover 06]. Nous constatons dans la Figure 4.5h que les points ayant l'entropie la plus élevée sont ceux appartenant à des anomalies locales, telles que des rayures ou des piqures, qui possèdent des propriétés géométriques qui induisent une distribution de réflectance angulaire chaotique, difficile à modéliser simplement. Tandis que le reste de la surface possède une entropie plus faible donc susceptible d'être plus simple à modéliser.

## 2.2 Descripteurs dérivés des modèles de réflectance

A partir d'une acquisition RTI, il est possible d'estimer un modèle afin de passer de l'ensemble de mesure de réflectance angulaires discrètes à une paramétrisation continue de l'information. Selon le modèle utilisé, différents coefficients sont obtenus. Ils décrivent une fonction permettant d'approximer la réflectance angulaire d'un point/pixel de la surface. Il est alors possible de reconstruire le rendu visuel de la surface, de façon statique pour un angle d'éclairage virtuel, ou de façon dynamique, c'est à dire en suivant un chemin d'éclairage préalablement défini dans l'espace angulaire d'acquisition  $(\phi, \theta)$ . Ainsi, pour tous les pixels de l'acquisition est associé un vecteur de coefficient qui varient selon le comportement du pixel lors de la mesure, donc ces coefficients peuvent être utilisés en tant que descripteurs. Il existe différentes méthodes pour modéliser les données RTI. Nous les présentons ci-dessous.

- La méthode *Polynomial Texture Mapping* (PTM) est une méthode qui permet d'approximer l'information discrète avec des fonctions polynomiales d'ordre 2 [Malzbender 01]. La surface d'approximation est ainsi décrite par 6 coefficients ( $a_0 - a_5$ ) comme défini dans l'équation 4.14 ci-dessous.

$$PTM[l_u, l_v] \equiv a_0 l_u^2 + a_1 l_v^2 + a_2 l_u l_v + a_3 l_u + a_4 l_v + a_5 \quad (4.14)$$

Où  $\begin{cases} l_u \text{ est la composante x de la position cartésienne de la lumière} \\ l_v \text{ est la composante y de la position cartésienne de la lumière} \end{cases}$

$$\begin{bmatrix} l_{u0}^2 & l_{v0}^2 & l_{u0}l_{v0} & l_{u0} & l_{v0} & 1 \\ l_{u1}^2 & l_{v1}^2 & l_{u1}l_{v1} & l_{u1} & l_{v1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{uN}^2 & l_{vN}^2 & l_{uN}l_{vN} & l_{uN} & l_{vN} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Comme indiqué précédemment, ce principe méthodologique constitue l'usage initial *conventionnel* de la méthode RTI. Ces coefficients associés à des modèles de réflectance constituent également des valeurs caractéristiques, et donc potentiellement des descripteurs pertinents de la réflectance angulaire des surfaces. Une représentation des cartographies associées aux descripteurs polynomiaux estimés sur la surface d'application (cadran poli avec micro-scratches)

est présentée en figure 4.6. On peut observer que l'information mise en évidence à travers ces descripteurs dérivés du modèle expérimental polynomial de réflectance angulaire locale est intéressante. Nous observons, par exemple, que  $a_5$  (Figure 4.6f) permet la discrimination des anomalies de surfaces, par rapport à l'environnement mais aussi entre elles, alors que  $a_2$  (Figure 4.6c) semble par exemple sensible à l'orientation des anomalies (les rayures de vieillissement n'ont pas le même niveau selon leur orientation). Le coefficient  $a_5$  correspond par ailleurs au terme de moyenne. Il indique donc ici que la réponse est en moyenne plus forte au niveau des micro-scratches, ce qui peut être associé à des valeurs de luminances plus importantes pour de plus nombreux angles, c'est à dire une distribution angulaire de la rugosité plus importante.

- La méthode HemiSpherical Harmonics (HSH) est un moyen de représenter l'information de réflectance angulaire à partir de fonctions hémisphériques associées aux polynômes de Legendre. La base de décomposition étant définie uniquement sur l'hémisphère supérieur (Equations 4.16 et 4.17) [Gautron 04].

$$\tilde{P}_n^m(\cos\theta) = P_n^m(2\cos\theta - 1) \quad (4.16)$$

Où  $P_n^m$  correspond aux polynomes de Legendre

$$HSH_n^m[\theta, \phi] \equiv \begin{cases} \sqrt{2}\tilde{N}_n^m \tilde{P}_n^m(\cos\theta)\cos(m\phi) & m > 0 \\ \tilde{N}_n^0 \tilde{P}_n^0(\cos\theta) & m = 0 \\ \sqrt{2}\tilde{N}_n^m \tilde{P}_n^{-m}(\cos\theta)\sin(-m\phi) & m < 0 \end{cases} \quad (4.17)$$

Où  $n \geq 0, m \in [-n, n], \theta \in [0, \frac{\pi}{2}], \phi \in [0, 2\pi]$  et  $\tilde{N}_n^m = \sqrt{\frac{(2n+1)(n-|m|)!}{2\pi(n+|m|)!}}$

Cette méthode est dérivée de la méthode Spherical Harmonics (SH) qui est elle même une évolution de la méthode PTM. En effet les fonctions basées sur les harmoniques sphériques ont des formes pertinentes pour décrire la réflectance angulaire, et permettent ainsi d'obtenir des modèles performants à l'aide d'un nombre réduits de coefficients. Des cartographies de coefficients obtenus à partir d'une modélisation expérimentale basée sur la technique HSH sont présentées dans la figures 4.7.

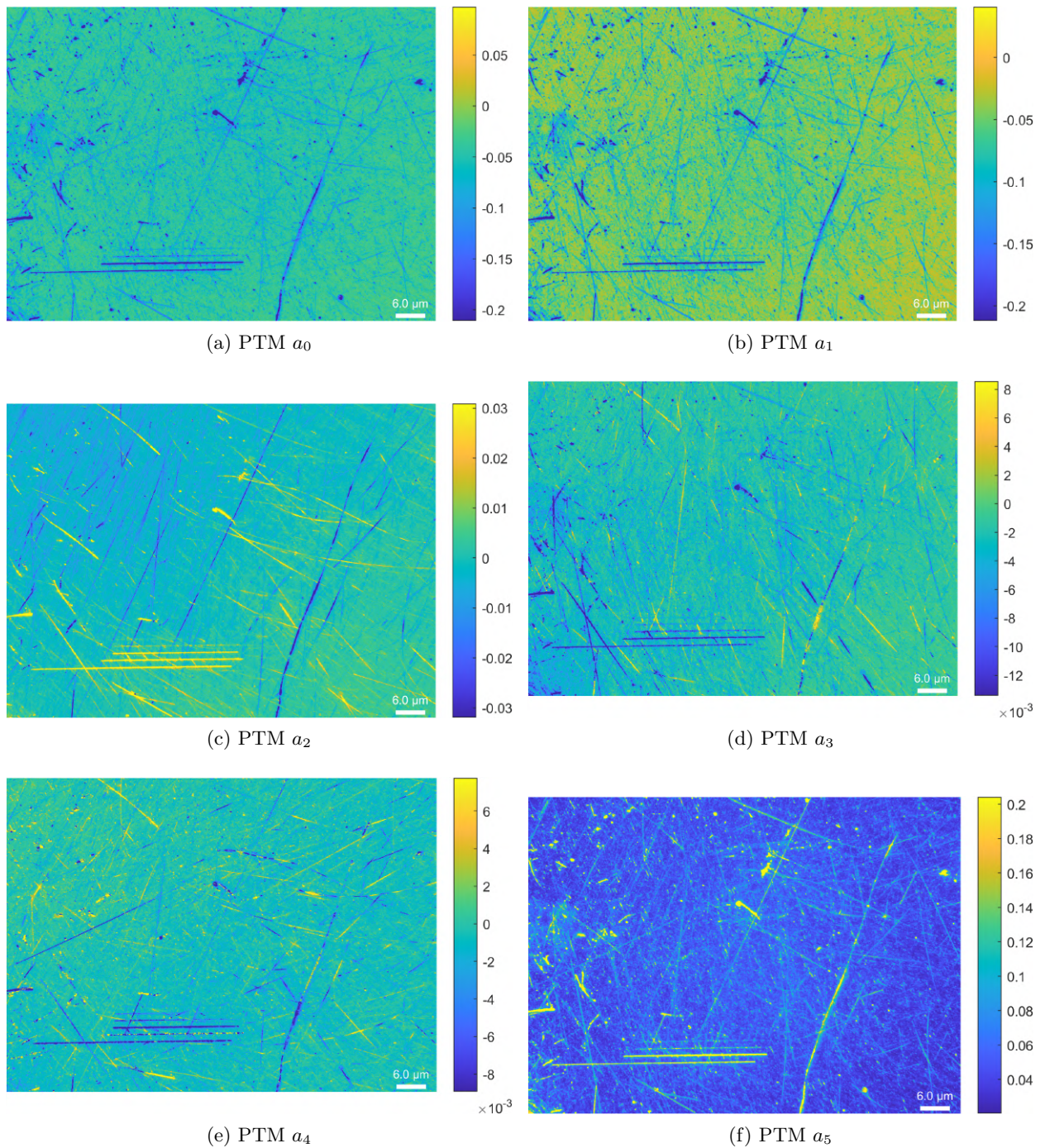


Figure 4.6 – Cartes des coefficients modaux PTM à partir d'une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ ).

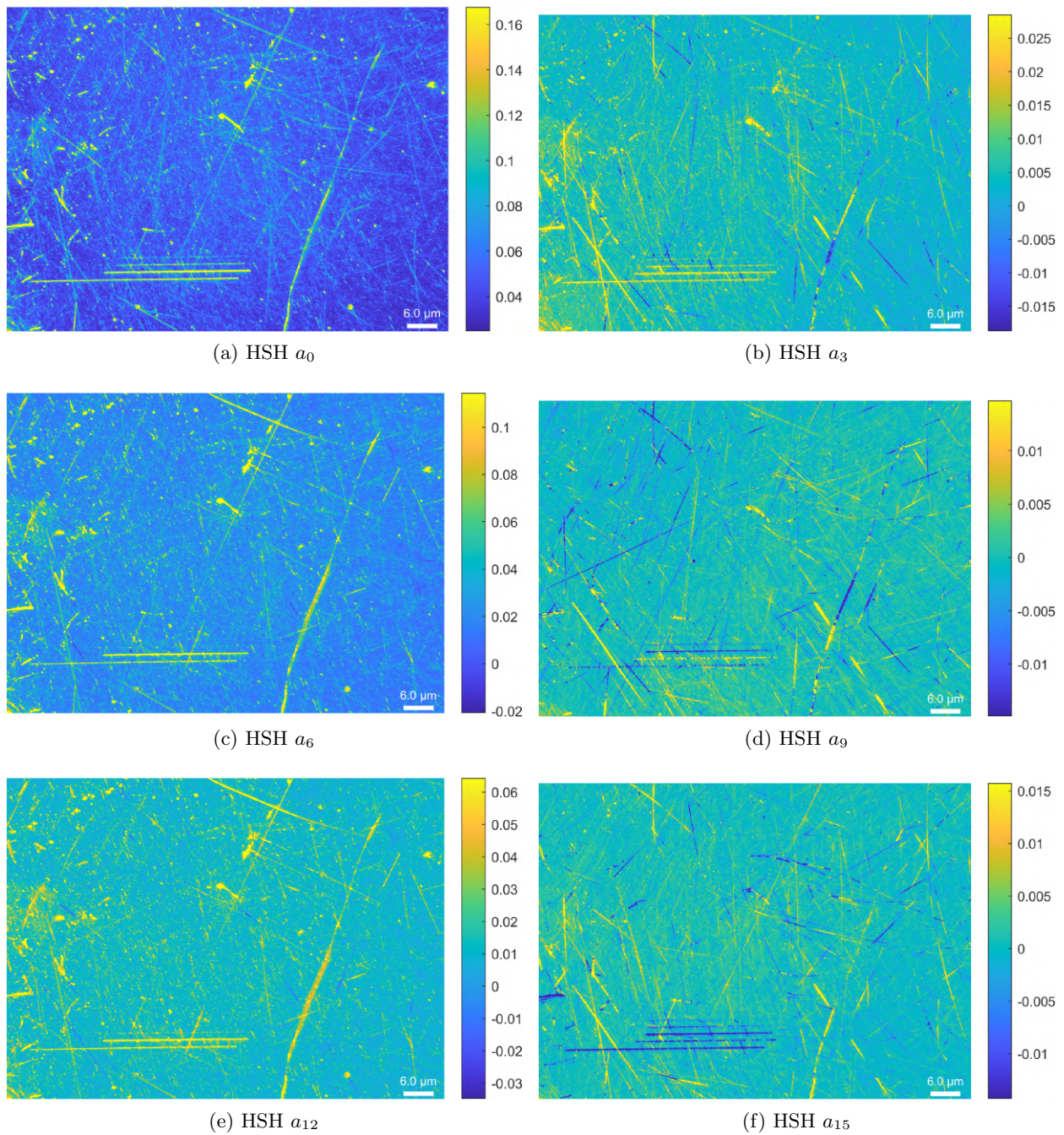


Figure 4.7 – Cartes des coefficients modaux HSH à partir d'une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ ).

- La technique RBF (Radial Basis Function) est l'une des méthodes de RTI les plus récentes [Ponchio 19]. Contrairement aux méthodes de décomposition linéaire précédemment présentées, cette approche est une méthode d'interpolation locale. Différentes fonctions d'interpolations peuvent être mises en œuvre : Gaussienne, Multi-Quadratique (normal et inverse), Quadratique Inverse, Splines ou Polyharmoniques. La technique RBF correspond à une somme pondérée de fonction de base radiale dont les paramètres sont la distance entre les différents points de la surface et une origine (Equation 4.18). La distance mise en œuvre est usuellement Euclidienne mais d'autres métriques peuvent également être utilisées. Cette approche présente l'avantage de permettre la reconstruction de l'apparence des surfaces avec de très bonnes performances, mais elle est moins appropriée (car basée sur une interpolation locale) pour décrire et caractériser globalement le comportement d'un point en terme de réflectance angulaire.

$$RBF[X, y] \equiv \sum_{i=1}^N w_i \varphi(\|X - y\|) \quad (4.18)$$

Où  $\left\{ \begin{array}{l} y \text{ est le point d'origine (point fixe).} \\ \varphi \text{ est la fonction de base radiale.} \\ w_i \text{ est un coefficient de poids.} \end{array} \right.$

Différentes cartographies de coefficients associés à la méthode RBF sont présentées, à titre d'exemple, dans la figure 4.8 (fonction d'interpolation gaussienne).



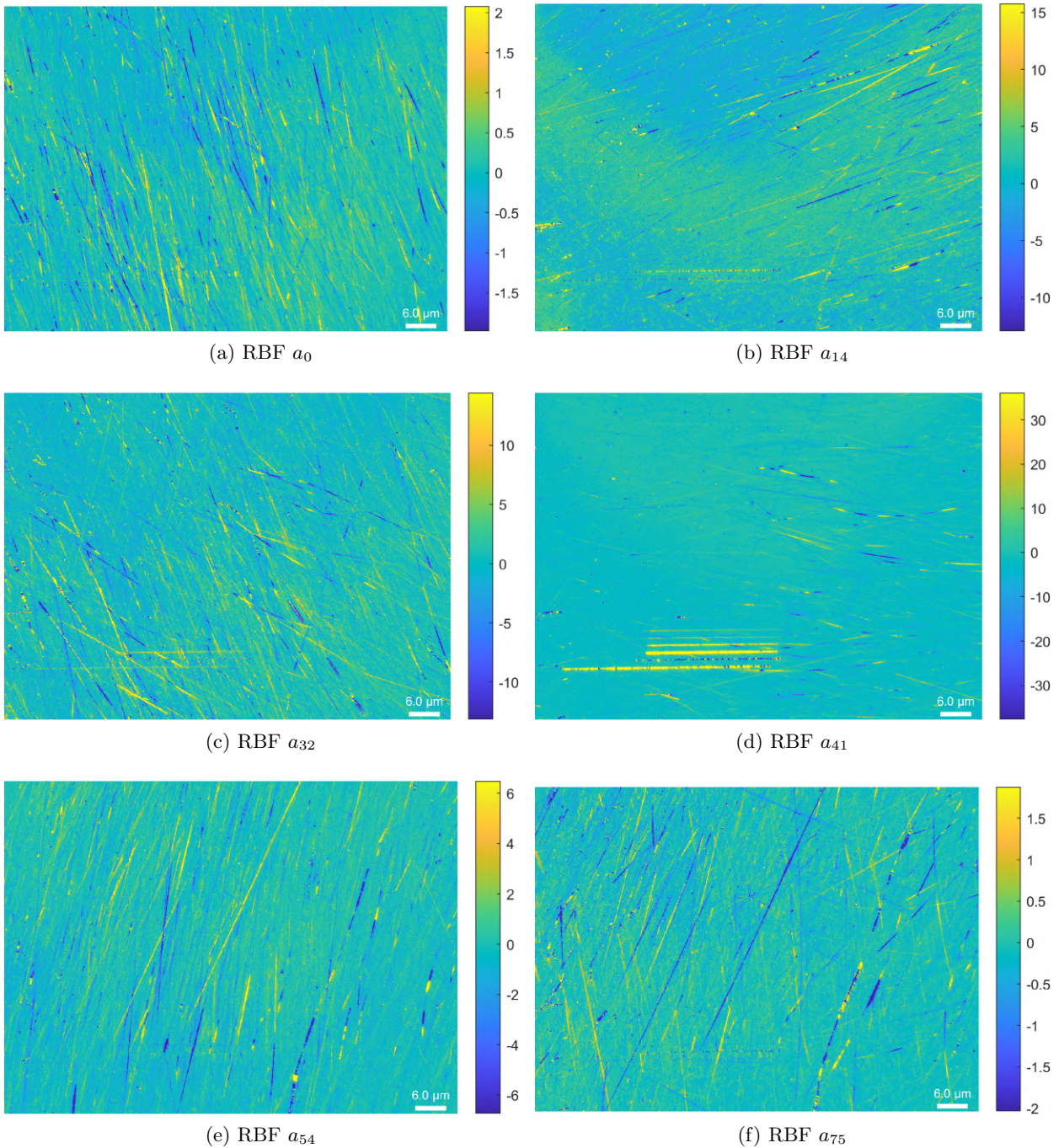


Figure 4.8 – Cartes des coefficients RBF (Fonction radiale gaussienne) à partir d'une acquisition RTI sur la surface horlogère d'illustration ( $E_t = 125ms$ ).

- La Discret Modal Decomposition (DMD) est similaire à une transformation discrète de Fourier. Cette décomposition permet d'évaluer le contenu spectral d'un signal discret, à partir d'un espace de projection issu de la mécanique vibratoire. La base de projection est composée de vecteurs propres résultant d'un problème de dynamique des structures. Le problème de dynamique des structures part d'une géométrie d'une surface hémisphérique où le cercle de base est contraint à un déplacement nul. La définition du problème est comme suit (Equation 4.19) :

$$M.\ddot{q} + K.q = 0, \text{ avec } q = q(\theta, \phi, t) \quad (4.19)$$

où  $M$  représente la matrice de masse, et  $K$ , la matrice de raideur. Tandis que  $q(\theta, \phi, t)$  est le vecteur déplacement qui caractérise les formes modales. Dans l'Equation 4.20 sont décrit les solutions à un tel problème.

$$q(\theta, \phi, t) = \sum_{k=1}^{+\text{inf}} Q_k \cos(w_k t) \quad (4.20)$$

où  $Q_k$  est le vecteur d'amplitude associé à la pulsation  $w_k$ . Afin de déterminer les modes propres définis par  $(Q_k, w_k)$  il faut résoudre le système linéaire de l'Equation 4.21.

$$(M^{-1}K - \frac{1}{w_k^2}I)Q_k = 0 \quad (4.21)$$

où  $I$  est la matrice identité et  $M^{-1}K$  est supposée être diagonalisable. La solution discrète est calculée par une analyse en éléments finis. La solution forme la base de projection, ou base modale,  $(Q_0, Q_1, \dots, Q_{n-1})$ , où  $n$  désigne le nombre de mode calculé (Figure 4.9). Cette approche présente l'avantage de décrire la répartition de la luminance à partir d'une base de fonctions géométriques plus variées, et conduit ainsi à une description plus fine, et donc plus réaliste, en terme de perception, comme nous le verrons dans le Chapitre 5.

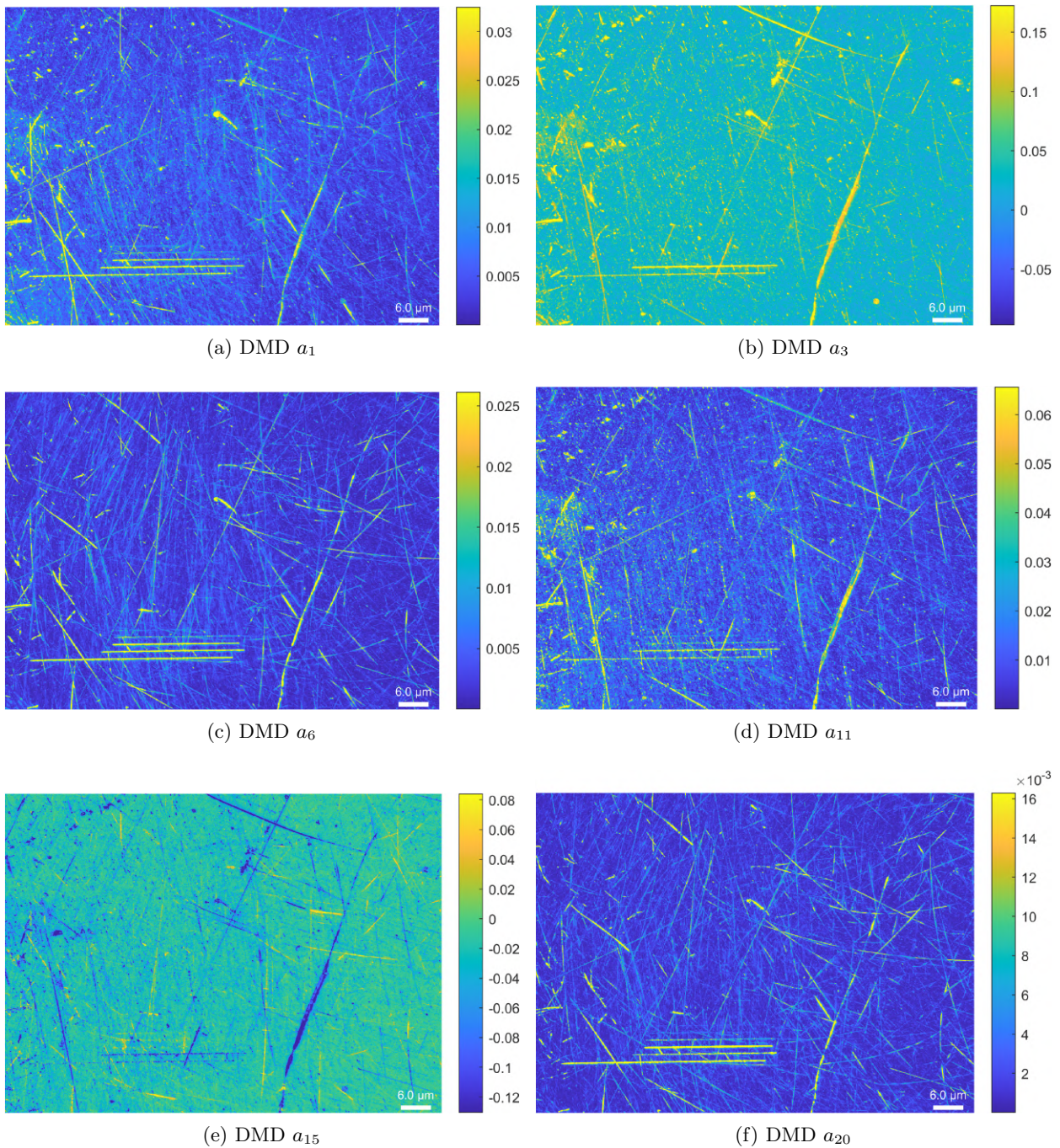


Figure 4.9 – Cartes des coefficients issus de la modélisation DMD à partir d'une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ )

### 2.3 Descripteurs géométriques

Les acquisitions RTI forment une ensemble d'images stereo-photométriques de la surface, c'est à dire un ensemble pour lequel seule la direction d'éclairage varie, le référentiel capteur de vision/pièce restant fixe. La mise en œuvre de la technique Stéreo-photométrie (PS) permet d'accéder à l'information géométrique de surfaces en estimant le champs de normales. A partir des normales peuvent être estimés, par intégration, l'information 3D (altitudes), et par dérivation, les pentes des points de la surface imagée. Les normales d'une surface peuvent être estimées de plusieurs façons à partir des données RTI avec l'aide de méthodes utilisant des modèles d'approximation ou des

réseaux de neurones [Dulecha 20b]. Les méthodes basées sur les modèles d'approximation sont : le Least Squares fitting Lambertian model (LS) [Woodham 80], le Least Median of Squares (LMS) [Drew 12, Pintus 17], le Bayesian Regression (BR) [Ikehata 12], le Low-rank matrix completion and recovery (LMR) [Wu 11], et le Spare Regression [Ikehata 14]. Les méthodes basées sur les réseaux de neurones sont : le PS-FCN [Chen 18], le CNN-PS [Ikehata 18] et le SDPS-Net [Chen 19]. La méthode, que nous appliquons dans ce document est la méthode LS telle que décrite dans l'équation 4.22. Elle est basée sur l'hypothèse d'une réflexion diffuse (surfaces lambertiennes).

$$\vec{N}[X] \equiv LP^{-1} \cdot X \quad (4.22)$$

Où  $LP$  est la matrice  $3 \times N$  des positions cartésiennes de l'acquisition

Nous montrons ici comment, à partir de l'estimation du champs de normales des surfaces différents descripteurs associés à la micro-géométrie des surfaces peuvent être extraits.

- Chacune des composantes de  $\vec{N}[X]$ , c'est à dire  $\vec{N}_x[X]$ ,  $\vec{N}_y[X]$  et  $\vec{N}_z[X]$ , peut être isolée afin de décrire la géométrie de la surface (Figure 4.10). Cependant, il convient de noter que  $\vec{N}_x[X]$  et  $\vec{N}_y[X]$  sont variants à la rotation, contrairement à  $\vec{N}_z[X]$  qui est la projection du vecteur normal sur l'axe Z et qui est donc uniquement lié à l'angle d'incidence de l'éclairage sur la surface. Ainsi, les valeurs de  $\vec{N}_x[X]$  et  $\vec{N}_y[X]$  seront modifiées par la rotation de la surface lors de la mesure (posage).
- Le champs des normales est décrit dans l'espace cartésien ( $X, Y$  et  $Z$ ). Il peut alors être traduit dans l'espace sphérique. Ainsi, l'angle azimutal (azimuth angle,  $N_\theta$ ) dont la détermination est décrite dans l'équation 4.23 correspondant à l'orientation  $\theta$  de la facette, et l'angle d'elevation (dip angle),  $N_\phi$  (Equation 4.24) correspondant à la différence entre l'angle  $\phi$  et l'axe vertical. L'angle d'elevation est donc une autre expression de l'information contenue dans  $\vec{N}_z[X]$ , à un rapport de sinus près. A titre d'exemple, une représentation du champs de normales et de ses composantes extraites tel que décrit dans cette section est proposée dans la Figure 4.11. Pour la représentation des normales angulaires, une carte de couleur (colormap)  $TSV$  est utilisée. A la composante  $T$  (Teinte) est associé le résultat de  $N_\theta/360$ , à la composante  $S$  (Saturation) est associé le résultat de  $N_\phi/90$  enfin la composante  $V$  (Valeur) est à 1 [Sahar 21]. Dans le cas de la représentation de  $N_\theta$  dans la Figure 4.11b la composante  $S$  est mise à 1. Par essence  $N_\theta$  est variant à la rotation de la surface (posage) contrairement à  $N_\phi$ .

$$\begin{aligned} N_\theta[X] &\equiv \text{atan2}(\vec{N}_y[X], \vec{N}_x[X]) \cdot \frac{180}{\pi} \\ &\equiv \text{si } N_\theta[X] < 0 \text{ alors } N_\theta[X] + 360 \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$N_\phi[X] \equiv 90 - \text{asin} \left( \frac{\vec{N}_z}{\sqrt{\vec{N}_x^2 + \vec{N}_y^2 + \vec{N}_z^2}} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4.24)$$

- A partir de l'estimation du champs de normales de la surface, sont déterminées directement les pentes directionnelles locales. On notera  $D_x$  les pentes estimées selon l'axe  $x$  (Equations 4.25) et  $D_y$  les pentes estimées selon l'axe  $y$  (Equations 4.26),  $P_{taille}^x$  et  $P_{taille}^y$  représentant respectivement la taille des pixels selon l'axe  $X$  et la tailles selon l'axe  $Y$  (en millimètres). Nous observons dans la Figure 4.12 que les rayures normalisées de la surface n'apparaissent pas sur la carte  $D_x$  mais apparaissent sur la carte  $D_y$ . Ces cartographies peuvent donc être d'une grande pertinence, lorsque les surfaces sont anisotropiques, pour isoler les différentes composantes de l'information surfacique en fonction de leur orientation. Enfin le descripteurs

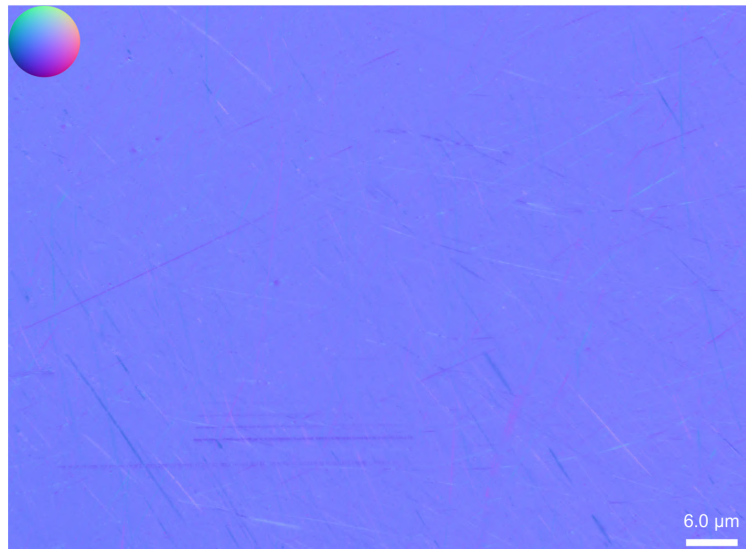
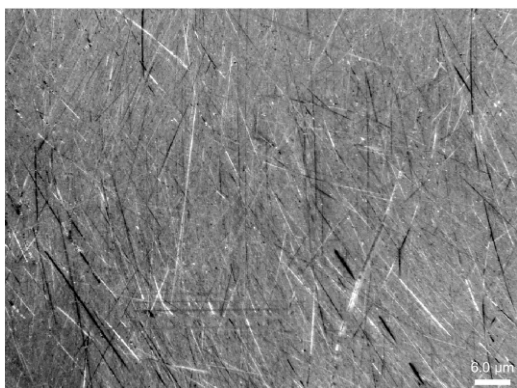
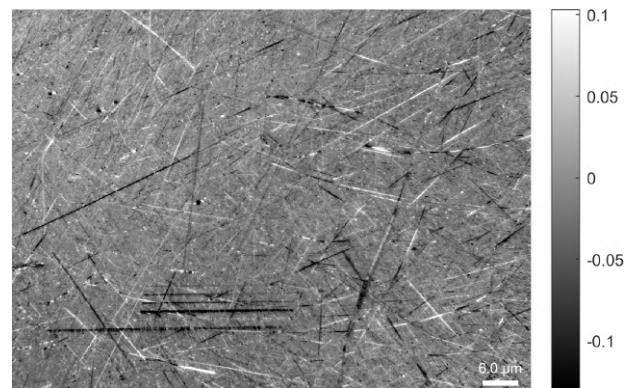
(a)  $\vec{N}[X]$ (b)  $\vec{N}_x[X]$ (c)  $\vec{N}_y[X]$ (d)  $\vec{N}_z[X]$ 

Figure 4.10 – Cartes des normales locales (cartésienne) d'une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ )

$D$  permet de caractériser l'intensité de la pente locale, sa valeur atteint 100% quand l'angle de la pente est de  $45^\circ$ .

$$D_x[X] \equiv P_{taille}^x \frac{\vec{N}_x[X]}{\vec{N}_z[X]} \quad (4.25)$$

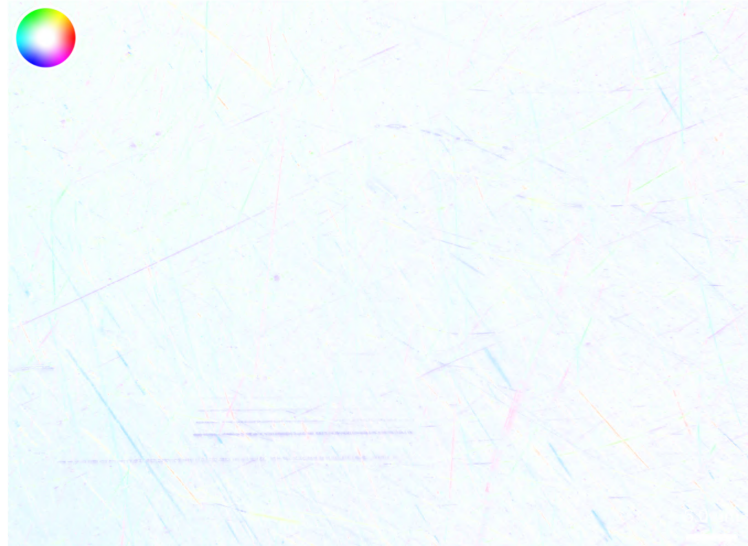
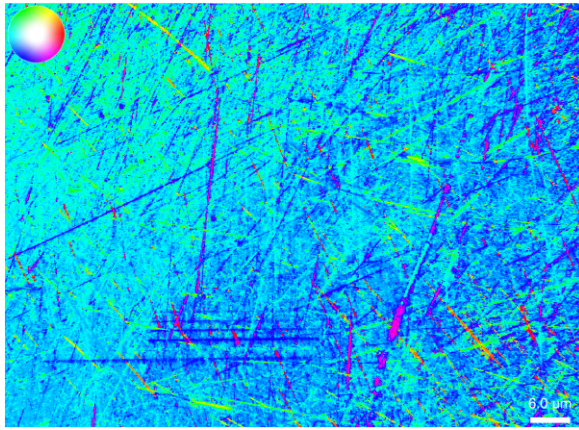
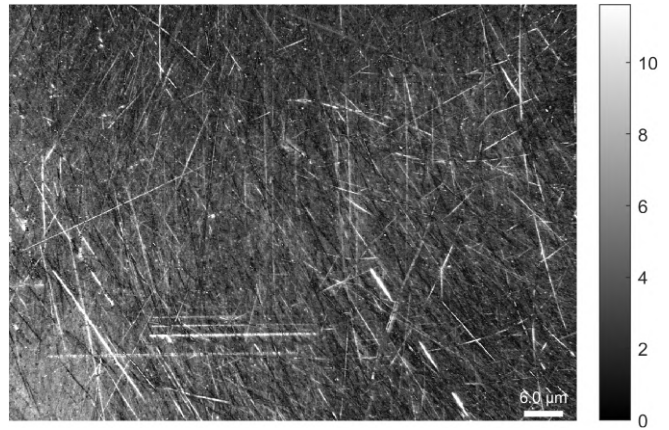
(a)  $\hat{N}[X]$ (b)  $N_\theta[X]$ (c)  $N_\phi[X]$ 

Figure 4.11 – Cartes des normales locales angulaire d'une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ )

$$D_y[X] \equiv P_{taille}^y \frac{\vec{N}_y[X]}{\vec{N}_z[X]} \quad (4.26)$$

$$D[X] \equiv 100 \frac{\sqrt{\vec{N}_x[X]^2 + \vec{N}_y[X]^2}}{\vec{N}_z[X]} \quad (4.27)$$

- Les courbures permettent de mettre en évidence des variations géométriques hautes fréquences dans la micro-géométrie de surface. Elles peuvent ainsi constituer une information spécialement pertinente pour la détection et la quantification de la criticité d'anomalies d'aspect locales. Les courbures  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  et  $K_{xy}$  correspondent respectivement à la dérivée de  $D_x$  en  $X$  (Equation 4.28), de  $D_y$  en  $Y$  (Equations 4.29) et de  $D_x$  en  $Y$  ou  $D_y$  en  $X$  (Equation 4.30). La valeur de la courbure est négative quand la géométrie locale a une caractéristique synclinale (plis concaves vers le bas), positive si elle est anticlinale (plis convexe vers le haut) et égale à 0 quand elle est plane. On peut observer dans la Figure 4.13 que les valeurs de courbures importantes étant associées aux variations hautes fréquences locales, dans le signal surfacique, les cartographies de courbure donne une impression d'aplanissement de l'information 3D. Cette

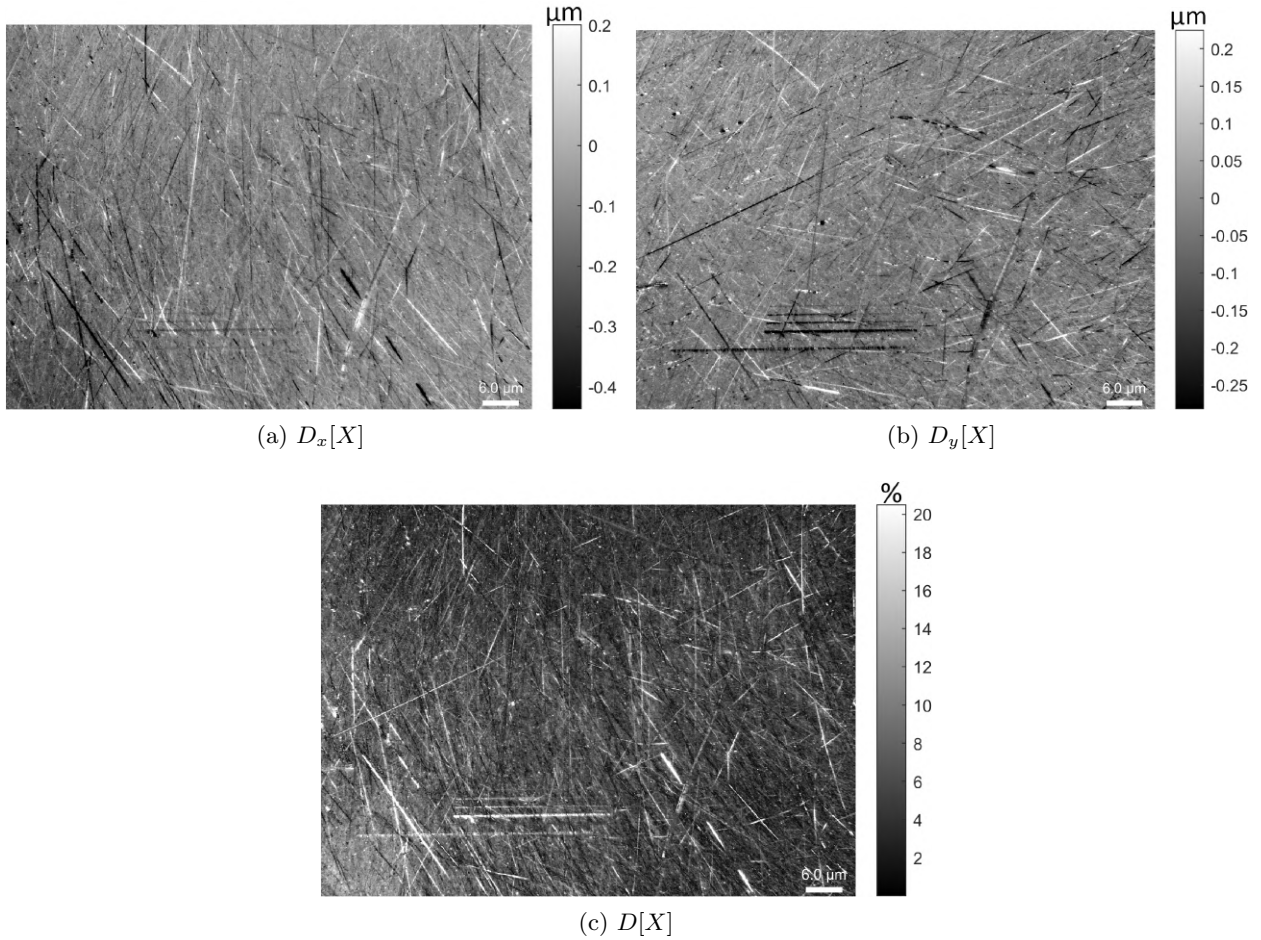


Figure 4.12 – Cartes des pentes locales d’une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ )

effet d’aplanissement permet de mieux mettre en évidence les anomalies locales de surface associées à des variations spatiales rapide de la géométrie locale. Nous remarquons au niveau des micro-scratch de cet échantillon, une successions de courbure anticlinale et synclinale (Figure 4.14).

$$K_{xx}[X] \equiv \frac{\delta D_x[X]}{\delta x} \quad (4.28)$$

$$K_{yy}[X] \equiv \frac{\delta D_y[X]}{\delta y} \quad (4.29)$$

$$K_{xy}[X] \equiv \begin{cases} \frac{\delta D_y[X]}{\delta x} \\ \frac{\delta D_x[X]}{\delta y} \end{cases} \quad (4.30)$$

- Les courbures  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  et  $K_{xy}$  sont les composantes du *tenseur de courbure*. Ainsi, il est possible d’exprimer cette information en chaque point de la surface dans un repère particulier appelé repère principal pour lequel le tenseur de courbure est symétrique ( les termes non diagonaux sont nuls) et pour lequel les termes diagonaux sont extrémaux. Ces valeurs extrémales sont appelées courbures principales et sont notées respectivement  $K_{min}$  et  $K_{max}$ . Les directions de courbure principales sont donc orthogonales en chaque point de la surface.  $\vec{K}_{min}$  et  $\vec{K}_{max}$  représentent respectivement les directions des courbures  $K_{min}$  et  $K_{max}$ . Ces valeurs constituent des grandeurs pertinentes car elles ne dépendent pas de l’orientation et du

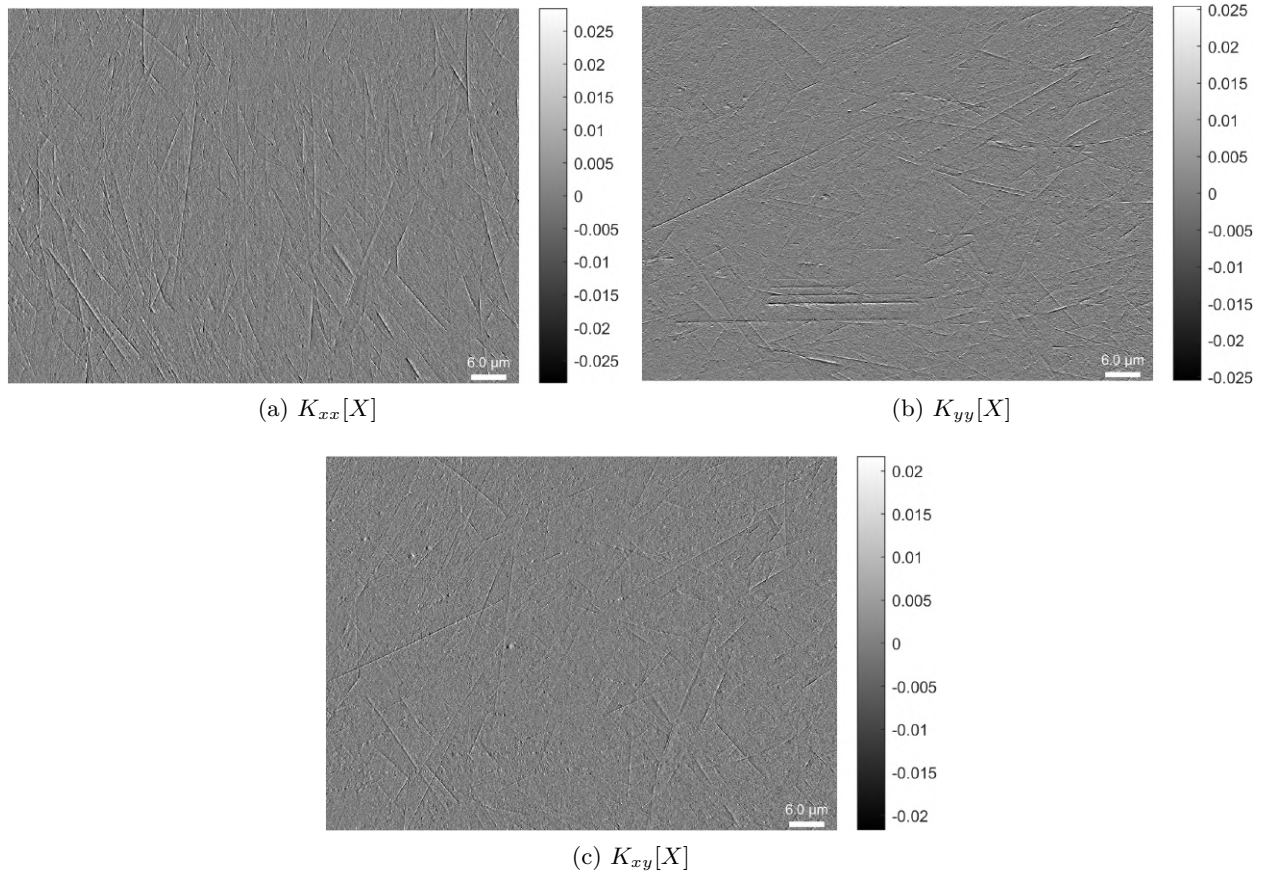


Figure 4.13 – Cartes des courbures locales directionnelles d’une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ )

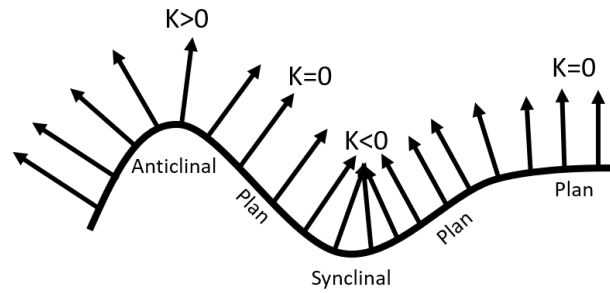


Figure 4.14 – Schéma des formes des courbures directionnelles

posage de la pièce lors de l’acquisition, et caractérisent les valeurs “critiques” de courbures. Par analogie avec l’inspection sensorielle, la courbure maximale correspond à la synthèse en chaque point de la configuration de la scène d’inspection pour laquelle la micro-géométrie est la mieux mise en évidence. Ces valeurs de courbures sont estimées à partir du calcul des valeurs propres et vecteurs propres du tenseur des courbures directionnelles comme décrit dans l’Equation 4.31.

$$\begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{xy} & K_{yy} \end{bmatrix} \vec{K}_{eig} = K_{eig} \vec{K}_{eig} \quad (4.31)$$

Où  $\begin{cases} \vec{K}_{eig} \text{ correspond aux vecteurs propres} \\ K_{eig} \text{ correspond aux valeurs propres} \end{cases}$



$K_{max}$  et  $\vec{K}_{max}$  correspondent alors à la partie réelle de la valeur propre  $K_{eig}$  la plus grande et de son vecteur propre associé  $\vec{K}_{eig}$ . La valeur propre et le vecteur propre restant sont alors  $K_{min}$  et  $\vec{K}_{min}$ . Des exemples de cartographies de descripteurs  $K_{min}$  et  $K_{max}$  sont présentées dans la figure 4.15. Nous observons que ces descripteurs permettent la mise en valeurs et la délimitation des anomalies géométriques de surface. Contrairement à  $N_\phi$  par exemple,  $K_{min}$  et  $K_{max}$  ne varie qu'aux frontières des variations géométriques.

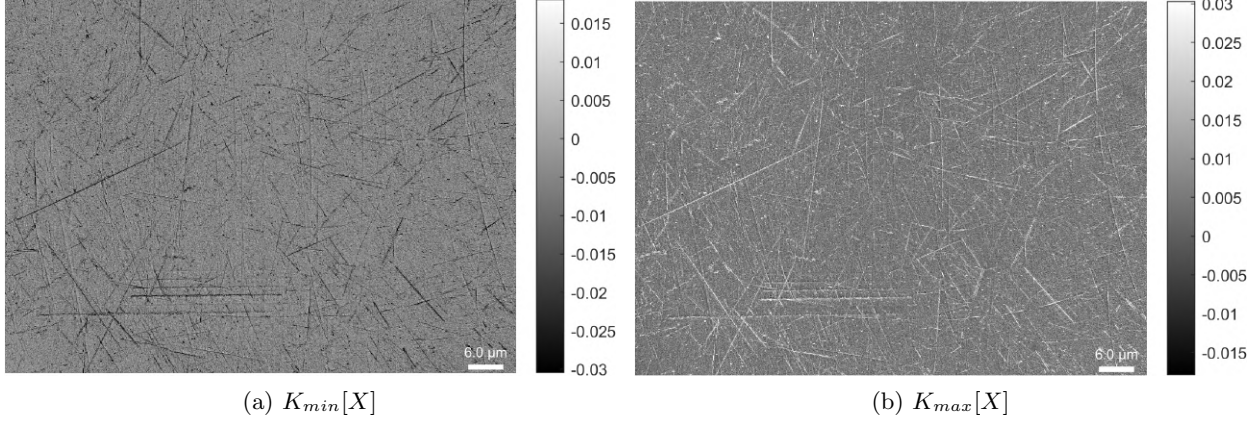


Figure 4.15 – Cartes des courbures minimales et maximales locales d'une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ )

- A partir des courbures principales, des invariants de courbure peuvent être construits. La courbure moyenne  $K_\mu$  (Equation 4.32) et la courbure Gaussienne  $K_G$  (Equation 4.33) sont ainsi estimées à partir des descripteurs  $K_{min}$  et  $K_{max}$  et plus particulièrement de la trace du tenseur de courbure. Ensemble, ils décrivent la forme de la courbure locale comme illustré dans la Figure 4.16.

$$K_\mu[X] \equiv \frac{K_{min}[X] + K_{max}[X]}{2} \quad (4.32)$$

$$K_G[X] \equiv K_{min}[X] \times K_{max}[X] \quad (4.33)$$

- La courbure de Mehlum  $K_M$ , est aussi une description de la courbure invariante à la rotation qui est définie par  $K_\mu$  et  $K_G$  comme décrit dans l'Equation 4.34 [Mehlum 98, Lemesle 20]. Dans la Figure 4.17 sont présentées à titre d'illustration des cartes de  $K_\mu$ ,  $K_G$  et  $K_M$ .

$$K_M[X] \equiv 3 \frac{K_\mu[X]^2}{2} - \frac{K_G[X]}{2} \quad (4.34)$$

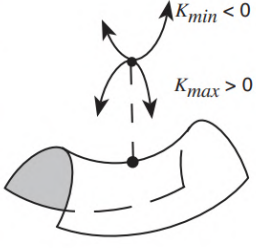
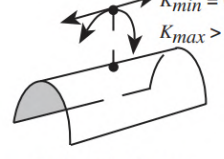

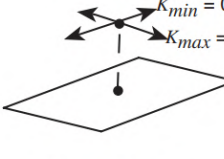
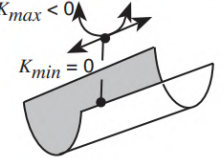
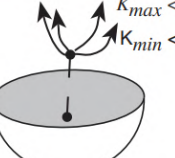
		GAUSSIAN CURVATURE		
		$K_g < 0$	$K_g = 0$	$K_g > 0$
MEAN CURVATURE	$K_m > 0$	 Saddle	 Ridge (Cylinder)	 Dome (Ellipsoid)
	$K_m = 0$		 Flat or Planar	
	$K_m < 0$		 Valley (Cylinder)	 Bowl (Ellipsoid)

Figure 4.16 – Classification des formes de courbure selon [Roberts 01]

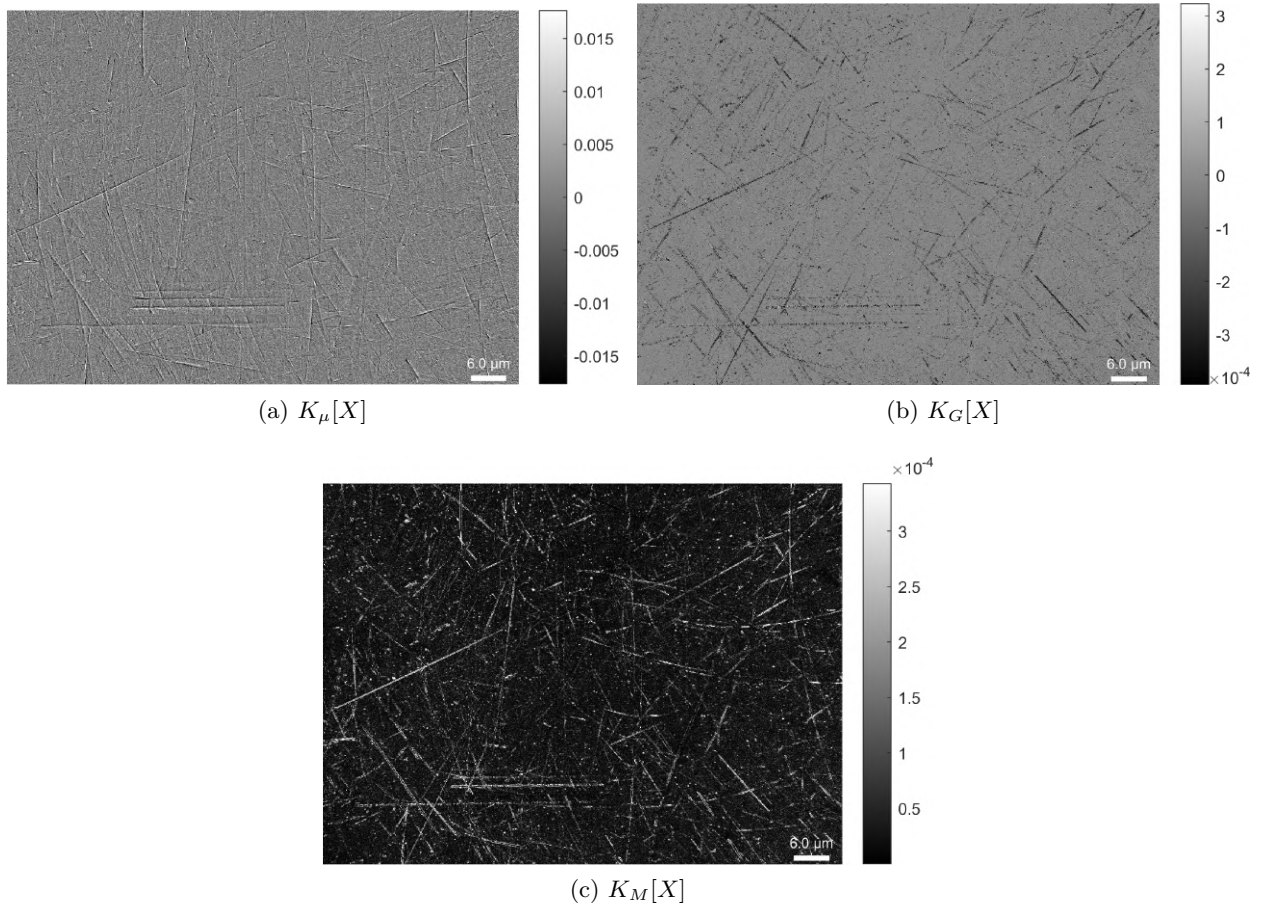


Figure 4.17 – Cartes des courbures locales d’une acquisition RTI sur le cadran de montre ( $E_t = 125ms$ )

- Le *curvedness* et le *shape index* sont les indicateurs de magnitude et de forme de la courbure et sont une alternative à  $K_\mu$  et  $K_G$  [Koenderink 92]. Le *curvedness*, calculé à partir de  $K_{min}$  et  $K_{max}$  (Equation 4.36), est une mesure de l'intensité de courbure d'un point (Figure 4.18). Un point qui n'a pas de courbure a une valeur de *curvedness* nulle. Le *shape index*, décrit dans l'équation 4.35, est une valeur comprise entre -1 et 1 qui décrit la forme de la courbure et fournit une gradation continue des formes locales comme illustré dans la figure 4.18.

$$K_S[X] \equiv \frac{2}{\pi} \arctan \left( \frac{K_{max}[X] + K_{min}[X]}{K_{max}[X] - K_{min}[X]} \right) \quad (4.35)$$

$$K_C[X] \equiv \sqrt{\frac{K_{min}[X]^2 + K_{max}[X]^2}{2}} \quad (4.36)$$

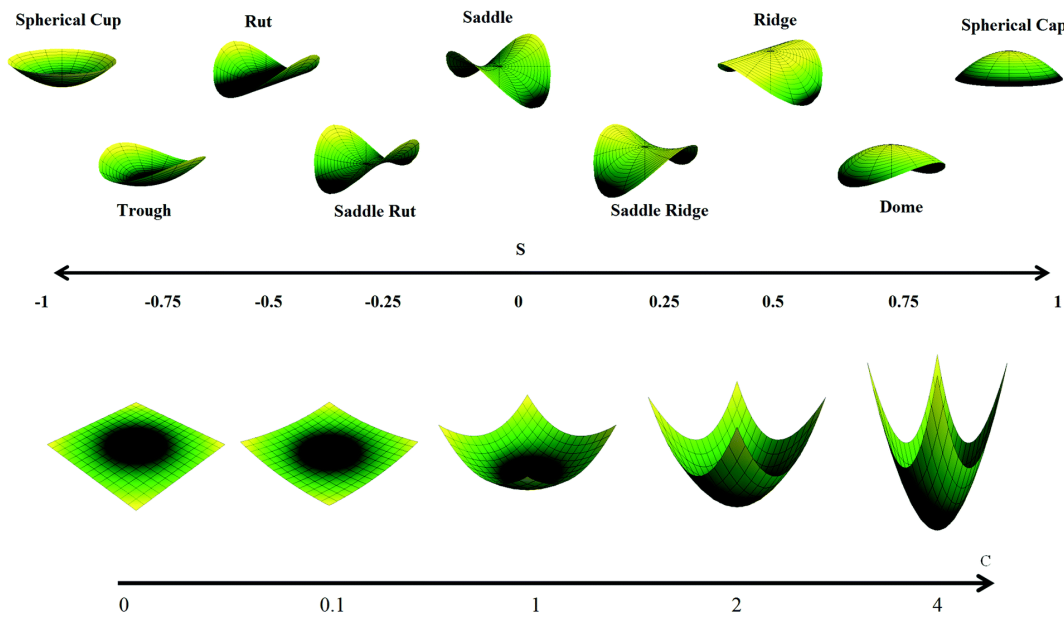
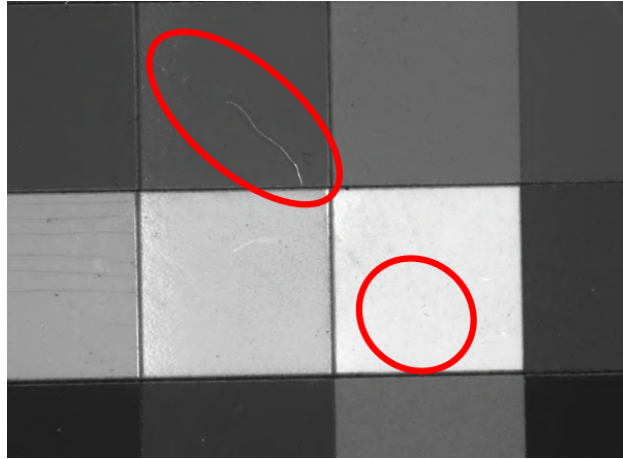
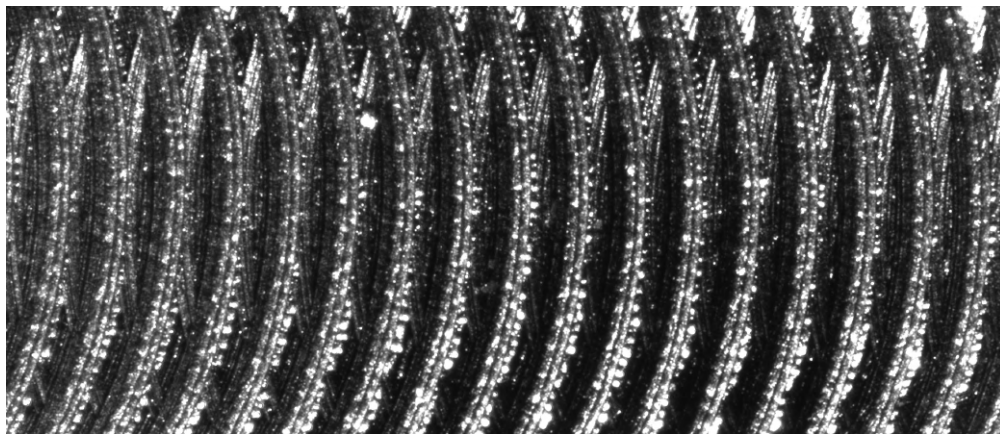


Figure 4.18 – Classification des formes de courbures selon  $K_S$  et  $K_C$  [Aguilar Gutierrez 18]

### 3 Exemples d'application

Nous avons montré (section 2) que la technique RTI permet d'estimer un ensemble de descripteurs locaux variés afin de caractériser l'apparence des surfaces. Pour illustrer cette approche, nous développons ici deux exemples d'application associés à deux états de surfaces produits par des processus de fabrication très différents. Ces deux échantillons de surface d'application sont illustrés dans la Figure 4.19.

La première surface est une micro matrice de Macbeth, obtenu par dépôt de polymère de différentes couleurs et micro-sablage. Les différents patches de la matrices sont des feuilles de couleur *Munsell*, provenant de *X-RITE*, monté sur de l'aluminium anodisé. Quelques anomalies de surfaces sont entourées en rouge dans la Figure 4.19a. La seconde surface, présentée dans la section précédente, est une surface fabriquée à partir de nickel électroformé sans corrosion avec une géométrie produite par un procédé de fraisage dont la rugosité est caractérisé par un  $Rz$  de  $50\mu m$  et un  $Ra$  de  $12.5\mu m$ . Elle fait partie d'un ensemble de surface *Rubert n°130* utilisé dans le contrôle de la rugosité. Les deux surfaces sont acquises avec 192 positions angulaires réparties de façon homogène dans l'espace angulaire  $(\phi, \theta)$ . Nous présentons dans les figures 4.20 et 4.21 quelques cartographies de descripteurs estimés à partir des acquisitions RTI des deux surfaces. Le coefficient

(a) *Surf-1* : Macbeth(b) *Surf-2* : NickelFigure 4.19 – Images des surfaces *Surf-[1-2]* qui composent la base de donnée

de variation de *Surf-1* montre une cohérence dans la variation de l'intensité lumineuse sur chaque patch de la matrice mais différentes entre chacune d'elles. Or le taux d'absorption de lumière de chacune des cases doit être uniforme pour une même cellule pour que celle-ci serve d'étalon mais différent entre deux cellules car chacune d'elles présentent des caractéristiques différentes en terme soit de couleur, soit d'intensité. Deux anomalies de surfaces sont présentes sur deux des patches et semble être d'une part une rayure et une pique selon leur formes. Avec le 10<sup>ème</sup> coefficient de la DMD nous constatons la duplication et rotation des deux anomalies de surface. Pour observer un tel résultat il faut alors que l'anomalie présente une ombre portée qui est conséquente pour les positions angulaire de la source de lumière opposée à la direction de l'ombre. Donc les anomalies ici sont différentes des autres anomalies qui ne présente pas d'ombre portée mais des ombres propres telle que les rayures par exemple. On peut alors considérer que cet effet est dû, d'une part, à une fibre, et d'autre part, à un grain de poussière présents sur la surface lors de l'acquisition RTI. Enfin le dip angle permet de constater que certaines des cellules de la matrice présentent une géométrie différentes des autres. Certaines anomalies géométriques apparaissent aussi comme des lignes horizontales, sur un patch, et peuvent correspondre à des pliures dans le papier appliqué sur la matrice. Pour l'échantillon *Surf-2*, nous n'observons aucune différence d'intensité lumineuse, ni en moyenne ni avec le 16<sup>ème</sup> coefficient du HSH, et certains descripteurs dont par exemple  $K_{max}$  semblent permettre de mieux appréhender la micro-géométrie de la surface. Ainsi on peut constater que la surface ne présente pas de crête, en chaque sommet. A la place des crêtes, il y a des surfaces planes

dont la largeur peut être estimée mais aussi la distance entre deux sommets. Enfin, un deuxième motif est présent, il correspond au motif du fraisage en bout mais inversé, qui semble correspondre à la trace du passage de la fraise.

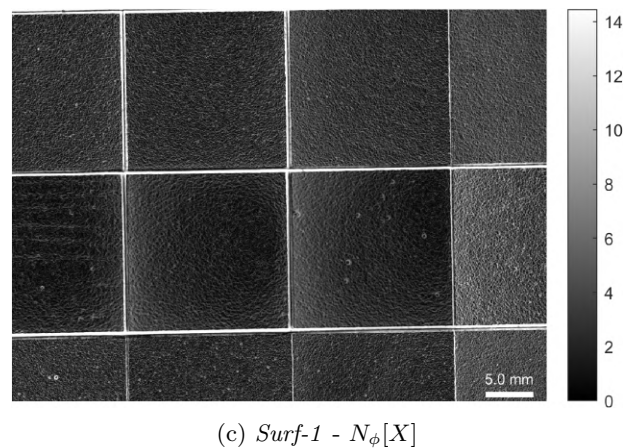
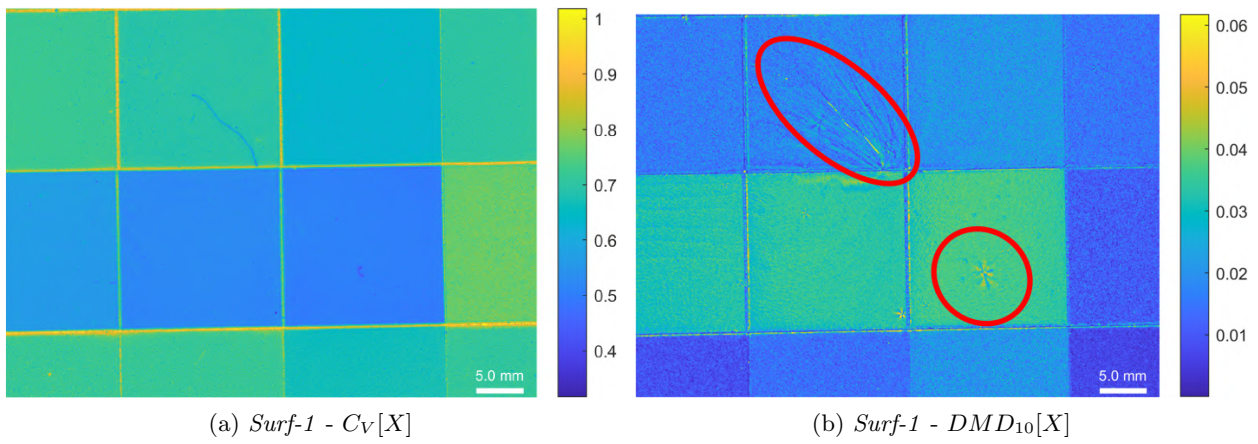
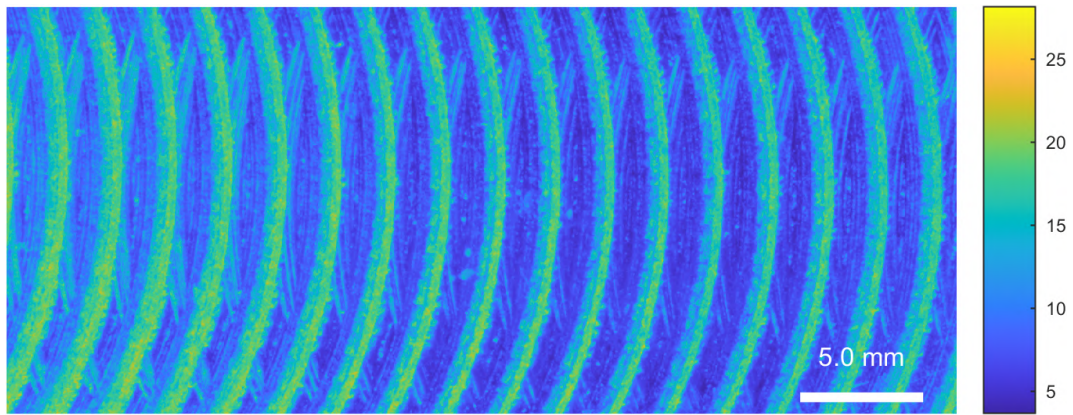
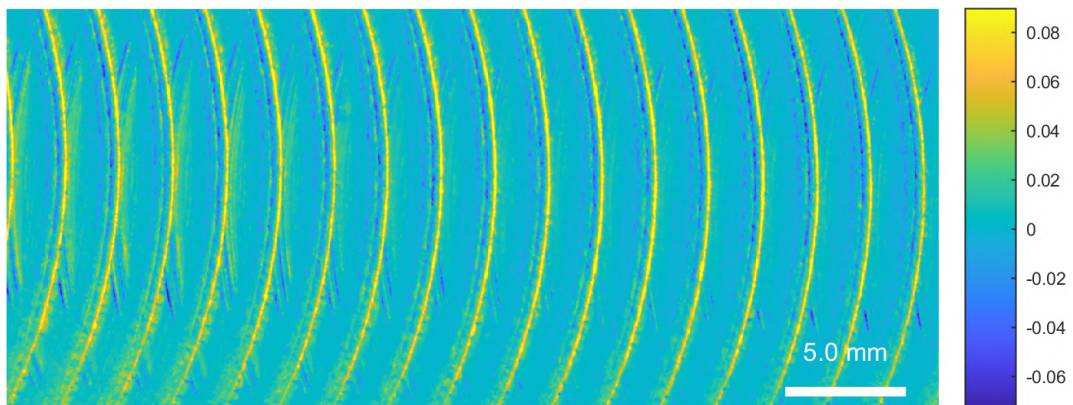
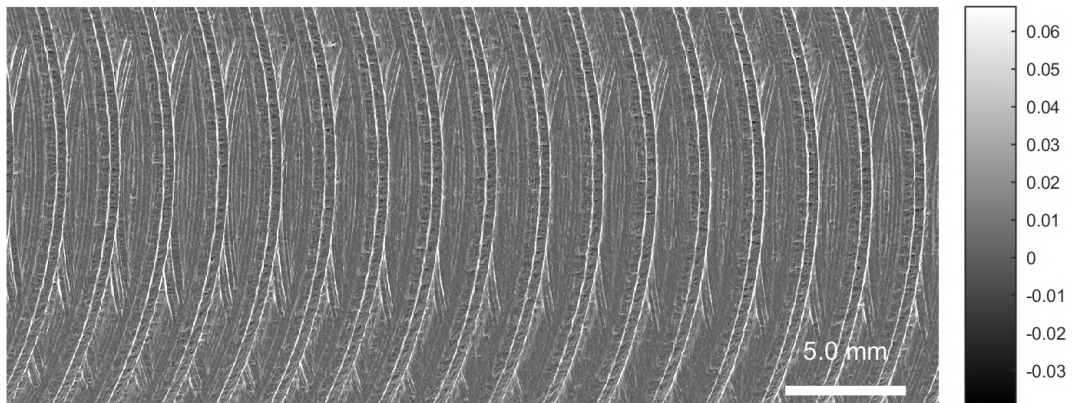


Figure 4.20 – Descripteurs locaux estimés à partir des acquisitions RTI sur l'échantillon *Surf-1*

(a)  $Surf-2 - \mu[X]$ (b)  $Surf-2 - HSH_{16}[X]$ (c)  $Surf-2 - K_{max}[X]$ Figure 4.21 – Descripteurs locaux estimés à partir des acquisitions RTI sur l'échantillon *Surf-2*

## 4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé une méthodologie pour analyser les données provenant d'une acquisition RTI basée sur la construction d'un ensemble de descripteurs surfaciques, associés à la réflectance angulaire locale et à la géométrie des surfaces inspectées. Cette méthodologie est illustrée sur des échantillons de surfaces distincts en termes de rugosité et de réflectance permettant de couvrir plusieurs cas d'applications. Les résultats montrent que la variété des descripteurs estimés à partir de données d'acquisition RTI peut permettre de caractériser de façon fine les différents états de surface tant du point de vue de leur géométrie que de leur interaction avec l'environnement

lumineux (réflectance angulaire). Nous montrons dans le chapitre suivant comment ces descripteurs peuvent être utilisés et synthétisés à travers une analyse multivariée afin de permettre, notamment, l'estimation de la saillance visuelle locale, et de discriminer de façon performante l'apparence entre deux états de surface.

### Résumé

- ☞ Les descripteurs permettent d'analyser les données RTI
- ☞ Les descripteurs de réflectance locale RTI brutes permettent de décrire la luminance d'un pixel sans prendre en compte l'aspect angulaire des données.
- ☞ Les descripteurs dérivés des modèles de réflectance correspondent aux coefficients des modèles et prennent donc en compte le comportement de réflectance angulaire des pixels décrits.
- ☞ Les descripteurs géométriques sont dérivés du champs de normales, estimé à partir des données stéréo-photométriques, et permettent l'analyse de la topographie des surfaces.
- ☞ Les descripteurs sont variés et peuvent être utilisé selon les propriétés que l'on souhaite extraire des données RTI.

L'étude menée dans ce chapitre, ainsi que ses résultats, ont été valorisés dans les publications suivantes :

- Marvin NURIT, Gaëtan LE GOÏC, David LEWIS, Yuly CASTRO, Abir ZENDAGUI, Hermine CHATOUX, Hugues FAVRELIÈRE, Stéphane MANIGLIER, Pierre JOCHUM, et Alamin MANSOURI. « HD-RTI : An adaptive multi-light imaging approach for the quality assessment of manufactured surfaces ». *Computers in Industry*, 2021.
- Marvin NURIT, Gaëtan LE GOÏC, Stéphane MANIGLIER, Pierre JOCHUM, Hermine CHATOUX et Alamin MANSOURI. « Improved visual saliency estimation on manufactured surfaces using high-dynamic réflectance transformation imaging ». *Proceedings Volume 11794, 15th International Conference On Quality Control By Artificial Vision QCAV 2021, Tokushima, Japon, 2021*.
- Marvin NURIT, Yuly CASTRO, Abir ZENDAGUI, Gaëtan LE GOÏC, Hugues FAVRELIÈRE et Alamin MANSOURI. « High Dynamic Range réflectance Transformation Imaging : an adaptive multi-light approach for visual surface quality assessment ». *Proceedings Volume 11172, 14th International Conference On Quality Control By Artificial Vision QCAV 2019, Mulhouse, France, 2019*.

## RTI & Saillance visuelle : Approches locale et globale pour l'évaluation de l'apparence des surfaces

### **Résumé du chapitre**

*Nous avons présenté dans le chapitre précédent une méthodologie de caractérisation des surfaces à partir des données RTI, basée sur l'extraction de différents types de descripteurs. Nous présentons dans ce chapitre une méthode d'analyse multivariée de ces caractéristiques locales dans l'objectif d'estimer et de cartographier la saillance visuelle sur les surfaces inspectées. Deux approches sont développées. L'approche locale met en oeuvre un calcul de saillance par rapport au voisinage du point considéré, et vise à répondre aux enjeux de détection et d'évaluation des défauts d'aspects. L'approche globale vise à évaluer et quantifier l'écart en terme d'apparence avec une surface (ou état de surface) référence.*

## 1 Introduction

La technique d'acquisition peut conduire, selon la densité des angles d'acquisition et les modalités choisies, à obtenir un ensemble de données volumineux. Nous avons montré dans le chapitre 4 comment à partir de ces données il est possible d'extraire différents types de descripteurs, c'est à dire de valeurs caractéristiques du comportement de réflectance angulaire et/ou de la microgéométrie des surfaces inspectées. L'estimation de ces descripteurs constitue une première étape de réduction des données, qui permet de mieux appréhender les caractéristiques surfaciques locales, et facilite l'analyse et les post-traitements réalisées à partir de ce type d'acquisition. Cependant, ces descripteurs varient en terme d'unité, d'amplitude ou encore de dispersion, et analysés indépendamment, ils ne permettent généralement pas de répondre aux différents enjeux d'analyse dans le cadre de la maîtrise de l'apparence des surfaces manufacturées. Nous proposons dans ce chapitre une contribution méthodologique afin de répondre à cette problématique. La méthode



proposée consiste à estimer de façon locale (*intra-surface* - section 2) ou globale (*inter-surface* - section 4) la saillance visuelle à partir des données et des descripteurs extraits des acquisitions RTI. La méthode proposée est appliquée sur différents échantillons de surfaces manufacturées, et nous montrons comment cette approche permet notamment d'apporter une réponse à l'enjeu de l'évaluation de la criticité des anomalies d'aspect locales. Nous développons ensuite un autre cas d'application de cette approche dans le domaine de la mécanique des matériaux, dans le cadre de l'analyse des facies de rupture d'assemblages collés (section 3). Nous montrons dans ce cadre applicatif comment à partir d'une analyse multivariée il est possible de segmenter à partir des données RTI une surface comportant des points/zones avec différentes populations (en terme de comportement et/ou de micro géométrie), ce qui est une problématique fréquente dans le cas de l'analyse de l'apparence des surfaces notamment des surfaces composites ou multi-matériaux. Pour choisir quels descripteurs utiliser lors de la segmentation, nous proposons une méthode permettant d'estimer un critère pour classer les descripteurs selon leurs pertinence. Enfin, nous détaillons dans la section 4 de ce chapitre une approche dite *globale*, c'est à dire permettant d'évaluer l'écart l'apparence d'un état de surface (ou d'une surface) par rapport à un état de surface référence. Nous montrons comment cette approche peut aussi permettre de comparer les modèles RTI en terme de qualité de reconstruction de l'apparence.

## 2 Estimation de la saillance visuelle

La saillance visuelle d'un pixel d'une image correspond à sa propriété à attirer l'attention par rapport aux autres points de la surface et notamment relativement à son voisinage. Lorsque qu'un humain observe un ensemble, il concentre la plupart de ses ressources perceptives et cognitives sur le sous-ensemble le plus saillant. L'estimation de la saillance visuelle constitue donc un enjeu important dans l'analyse et la caractérisation de l'apparence des surfaces, la cartographie des points dont les attributs d'apparence sont différents de ceux de leur environnement, et la quantification de ces écarts est essentielle et permet d'apporter une aide objective à de nombreuses tâches d'inspection et d'analyse des surfaces. Dans la littérature, une approche de calcul de saillance à partir de données RTI a déjà été proposée par Pitard *et. al* [Pitard 17b], à partir de l'analyse des coefficients de la Décomposition Modale Discrète (modèle expérimental pour le relighting). Nous proposons ici d'élargir cette approche en utilisant l'ensemble des descripteurs extraits des données RTI (détaillés dans le chapitre 4), et d'améliorer la performance de l'estimation de la saillance visuelle en proposant un critère d'optimisation multi-niveaux, ainsi qu'en prenant en compte dans le calcul les aspects multi-échelles.

### 2.1 Méthodologie proposée

Afin de repérer et d'évaluer les anomalies de surface dans le cadre d'un contrôle qualité de l'apparence, il est nécessaire de pouvoir comparer avec un critère objectif les points de la surface entre eux. En effet, un point est une anomalie quand son comportement est différent de son voisinage ou de la fonction recherchée. La comparaison ne pouvant être absolue mais relative, elle revient à calculer une distance entre les points de surface. Cette distance, appelée saillance dans le cas d'une distance intra-surface, est estimée à partir d'une analyse multi-variée des descripteurs du pixel observé  $y$  relativement aux valeurs moyennes de descripteurs des pixels de référence  $X$  associée au voisinage considéré. La méthode choisie ici est basée sur la distance de Mahalanobis comme décrit dans l'équation 5.1 et illustré dans la Figure 5.1.

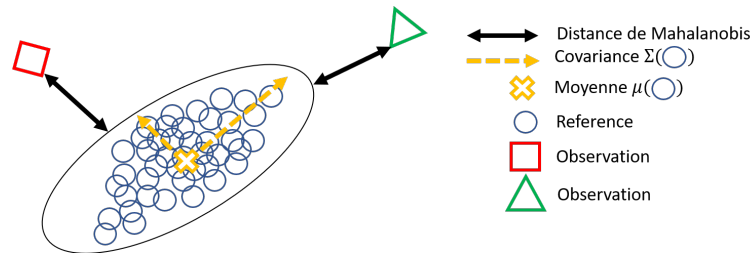
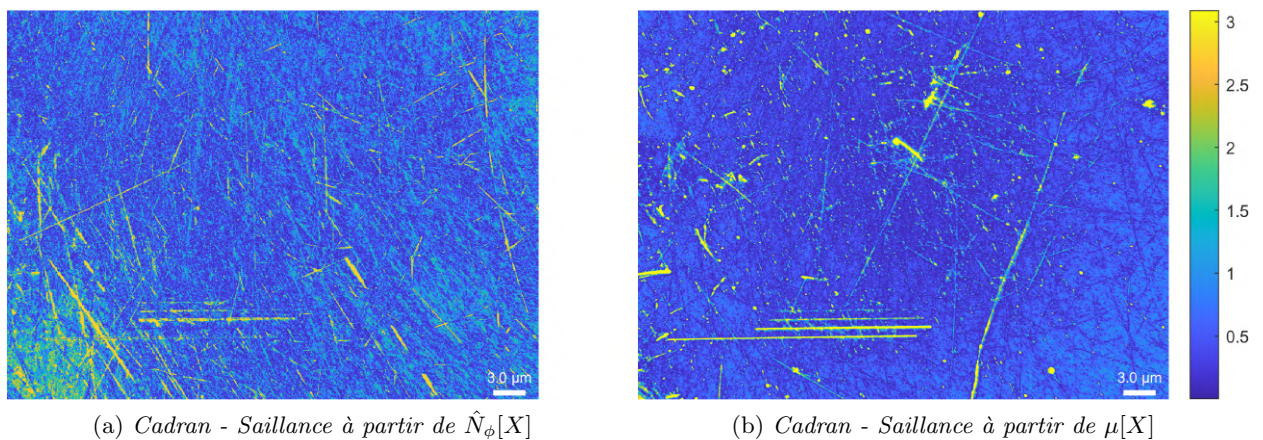


Figure 5.1 – Schéma de la distance de Mahalanobis

$$Mahal^*(y, X) = \sqrt{[y - \mu(X)]^T \Sigma(X)^{-1} [y - \mu(X)]} \quad (5.1)$$

Où le vecteur  $y$  est composé des  $k$  descripteurs de l'observation et la matrice  $X = [X_1, X_2, \dots, X_m]$  correspond aux vecteurs descripteurs de longueur  $k$  des  $m$  pixels de référence utilisés pour l'estimation de la distance.  $\Sigma$  et  $\mu$  sont respectivement associés à la matrice de covariance et la moyenne, sur la dimension des descripteurs, de  $X$ . Le calcul peut être effectué sur plusieurs observations à la fois en utilisant une matrice d'observation  $Y = [Y_1, Y_2, \dots, Y_n]$  composée des vecteurs descripteurs de longueur  $k$  des  $n$  pixels d'observation à la place de  $y$ . Alors, durant le calcul de la distance, le centrage  $Y - \mu(X)$  se fait sur la dimension des descripteurs.

La distance de Mahalanobis a l'avantage d'être une méthode d'analyse multivariée sans unité, invariante à l'échelle des données, et elle prend en compte la dispersion et la corrélation des données. Ainsi dans le calcul de la distance de Mahalanobis, plusieurs descripteurs différents peuvent être utilisés en terme d'unité et d'échelle. De plus, elle pondère les différents descripteurs selon leurs dispersions respectives. Cependant, le choix des descripteurs utilisés lors de l'estimation de la saillance est important car chacun permet la discrimination de différents comportements, et ils peuvent éventuellement être antagoniques. Il est donc nécessaire d'estimer, ou de choisir par expérience ou connaissance préalable, quels descripteurs sont les plus pertinents pour caractérisation d'un comportement recherché, ou d'un type anomalies d'aspect par exemple. Un exemple est présenté dans la figure 5.2, qui met en évidence que les cartographies de saillance (mono-variées dans ce cas) obtenues sont significativement différentes selon le choix du/des descripteurs, ici respectivement le *dip angle*  $\hat{N}_\phi[X]$  et la moyenne de reflectance angulaire ( $\mu[X]$ ).

(a) Cadran - Saillance à partir de  $\hat{N}_\phi[X]$ (b) Cadran - Saillance à partir de  $\mu[X]$ Figure 5.2 – Cartes de saillance dérivées d'une acquisition RTI ( $E_t = 125ms$ ) sur un cadran horloger poli avec micro-scratches de différentes amplitudes

## 2.2 Critère d'optimisation multi-niveau

Lors de l'estimation de la saillance, les pixels les plus saillants recherchés sont compris aussi parmi ceux de référence. Or inclure des pixels saillants dans les pixels de référence peut modifier significativement la valeur moyenne des descripteurs (*i.e.* la valeur de référence). La saillance estimée en chaque point peut alors selon les cas être sur ou sous estimée par le nombre et l'intensité des points saillants dans la zone considérée. Par exemple, les points de la surface saillants auront leurs niveaux de saillance sous-estimés car ils seront comparés, en terme de distance, avec des points de la surface aussi saillants qu'eux. Or si ces points sont saillants, ils possèdent probablement des caractéristiques, et donc des descripteurs, semblables. D'autre part, les points de la surface non saillants auront leurs niveaux de saillance augmentés car leurs caractéristiques sont éloignées de ceux saillants mais utilisés comme référence. Pour pallier à cette problématique, nous proposons une méthode d'optimisation multi-niveau de la saillance décrite dans l'Equation 5.2. La méthode, illustrée dans la Figure 5.3, commence par une étape d'initialisation où il faut estimer une première fois la saillance des pixels étudiés. On retire ensuite un pourcentage de pixels, basé sur un écart à la moyenne d'une distribution des points considérée comme normale, correspondant aux points les plus saillants des pixels de référence avant de réitérer de façon itérative le calcul de la distance avec les pixels de référence restants.

$$\begin{aligned}
 F(X, Y, Z) &\equiv X(P_c(Y) \leq Z) \\
 X^{SPz} &\equiv F(X, Mahal(X, X), Z) \\
 Mahal^{SPz}(y, X) &\equiv Mahal(y, X^{SPz})
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

Où  $\left\{ \begin{array}{l} P_c(Y) \text{ est la probabilité cumulé de } Y \\ X(\textit{condition}) \text{ correspond aux valeurs de } X \text{ pour lesquels } Y \text{ remplit la condition} \\ F \text{ est la fonction de filtrage} \\ X \text{ et } Y \text{ sont deux vecteurs donc les éléments sont associés un à un} \\ Z \text{ est le pourcentage de valeur à filtrer} \end{array} \right.$

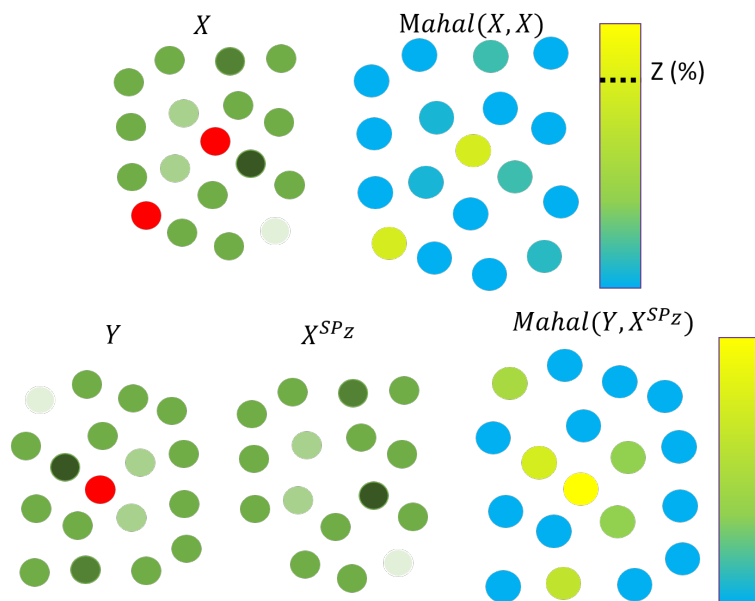


Figure 5.3 – Schéma de la saillance visuelle multi-niveau

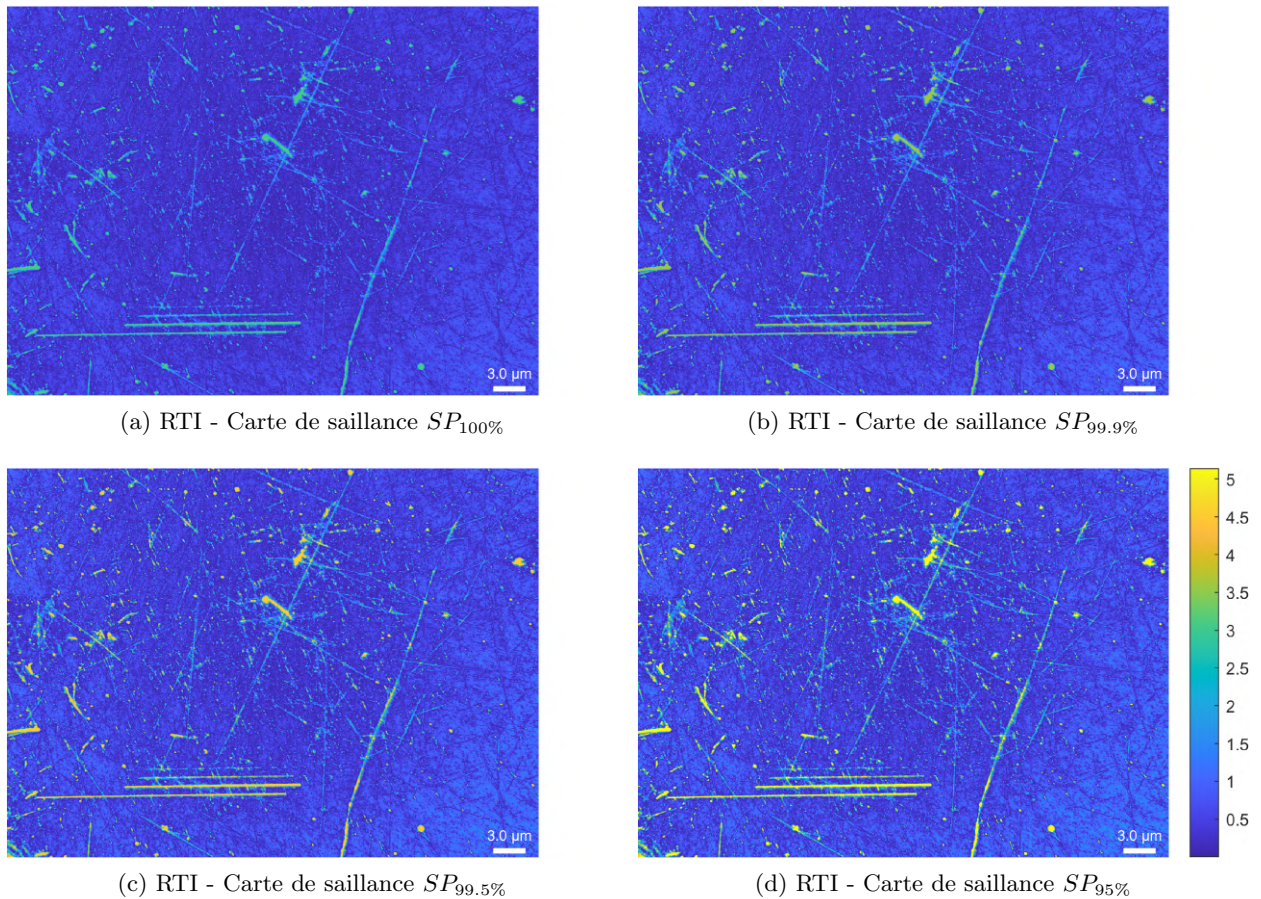


Figure 5.4 – Carte de saillance multi-niveaux estimé avec  $\mu[X]$  calculé à partir d’une acquisition RTI d’un cadran horloger avec micro-scratches

Le pourcentage de pixels à retirer est un paramètre de la méthode, à définir par l’utilisateur au préalable. Ce paramètre peut aussi être défini automatiquement de telle sorte que l’écart-type de la saillance des pixels de référence soit proche d’une valeur souhaitée. Nous pouvons observer dans la Figure 5.4 l’effet du choix du pourcentage lors de l’utilisation de la méthode d’estimation de la saillance multi-niveau. Plus le pourcentage est élevé, plus la dynamique de la saillance augmente. Cette augmentation de la dynamique permet à la fois visuellement de mieux observer les anomalies de surfaces sur les cartes de saillance mais aussi d’aider à la segmentation et à la classification des anomalies de surfaces.

### 2.3 Prise en compte des aspects d’échelle

L’estimation de la saillance visuelle d’un point de la surface dépend des points utilisés comme référence, et notamment de la présence éventuelle de points saillants dans la référence considérée, comme évoqué dans la section précédente. Un autre paramètre important est l’échelle d’observation, d’autant plus dans le cas de l’analyse de l’apparence des surfaces, où l’on sait que les effets d’échelles sont particulièrement importants dans la perception. Ainsi, une anomalie peut paraître plus ou moins saillante quand on observe la surface dans sa globalité ou localement et la saillance doit donc intégrer ces facteurs d’échelle. Par exemple, beaucoup de petites et faibles anomalies de surfaces peuvent être atténuées par la présence d’anomalies importantes dans le voisinage, où si celles-ci sont présentes parmi les points de surfaces de référence. Inversement, en changeant l’échelle d’observation (c’est à dire en faisant varier la taille du voisinage autour du point de calcul) on peut

augmenter la valeur de saillance des plus faibles anomalies et faciliter leur détection/évaluation. Le calcul de la saillance multi-échelle permet de répondre à cette problématique en utilisant une fenêtre glissante comme décrit dans l'équation 5.3 et illustré dans la Figure 5.5.

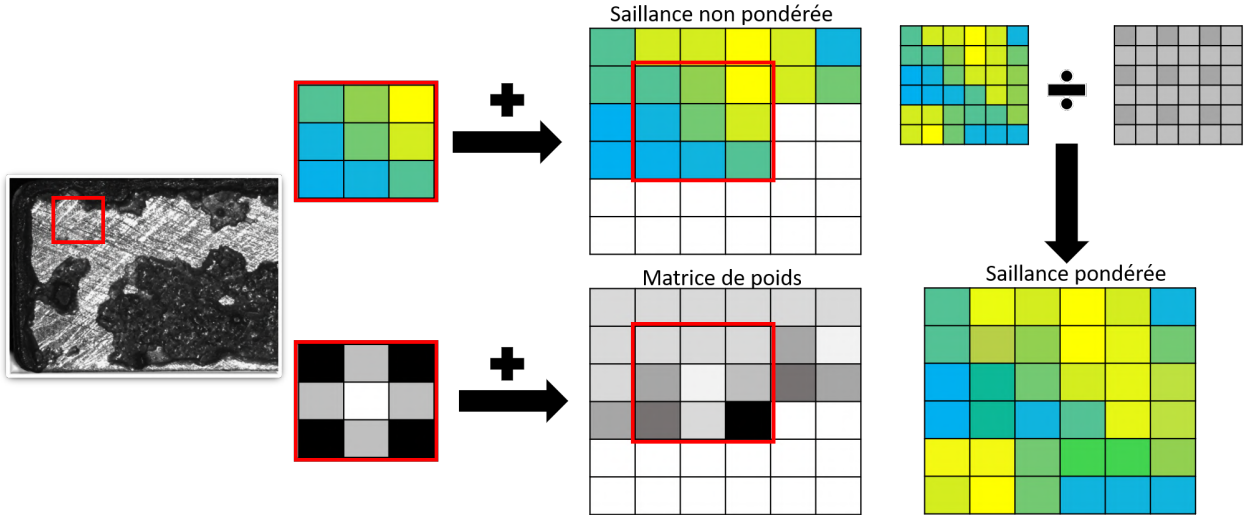


Figure 5.5 – Schéma de la saillance visuelle multi-échelle

$$X_{(T,i,j)} = X_{(i',j')}, i' \in [i - T/2; i + T/2], j' \in [j - T/2; j + T/2] \quad (5.3)$$

$$Mahal_{(T,i,j)}^*(y, X) \equiv Mahal^*(y_{(T,i,j)}, X_{(T,i,j)})$$

Où  $X_{(r,i,j)}$  correspond à la fenêtre glissante centrée sur le pixel  $(i, j)$  de taille  $T \times T$  pixels, et  $(i', j')$  sont les coordonnées des pixels dans la fenêtre glissante.

A chaque position de fenêtre glissante, la saillance des points contenus dans la fenêtre est calculée en prenant comme référence ces même points. Cependant, afin de prendre en compte que la saillance varie avec la distance du voisinage considéré, le calcul est pondéré par une fonction Gaussienne 2D, attribuant ainsi plus de poids dans l'estimation de la saillance aux points proches du point de calcul. A chaque calcul de saillance, lors du déplacement de la fenêtre glissante, une matrice de poids est remplie avec la fonction gaussienne. Les différents paramètres de l'algorithme sont alors la taille de la fenêtre,  $T$ , le pas de translation de la fenêtre,  $P$ , et l'écart type de la fonction Gaussienne,  $S$ .

Le résultat de la saillance multi-échelle peut être observé dans la Figure 5.6. On peut constater que le nombre d'anomalies de petite taille augmente quand la taille de la fenêtre glissante diminue. De plus, on observe que l'aire et le niveau de saillance des anomalies détectées avec une fenêtre globale semblent diminuer aussi. Cette diminution est due à la proportionnalité de points saillants ou non à l'intérieur de la fenêtre glissante. En effet, en prenant la globalité de la surface, les anomalies de surfaces sont proportionnellement moins nombreuses que les autres points de la surface. Cependant, en diminuant l'échelle d'observation, les anomalies de surfaces sont alors proportionnellement plus nombreuses quand elles sont à l'intérieur de la fenêtre d'observation.

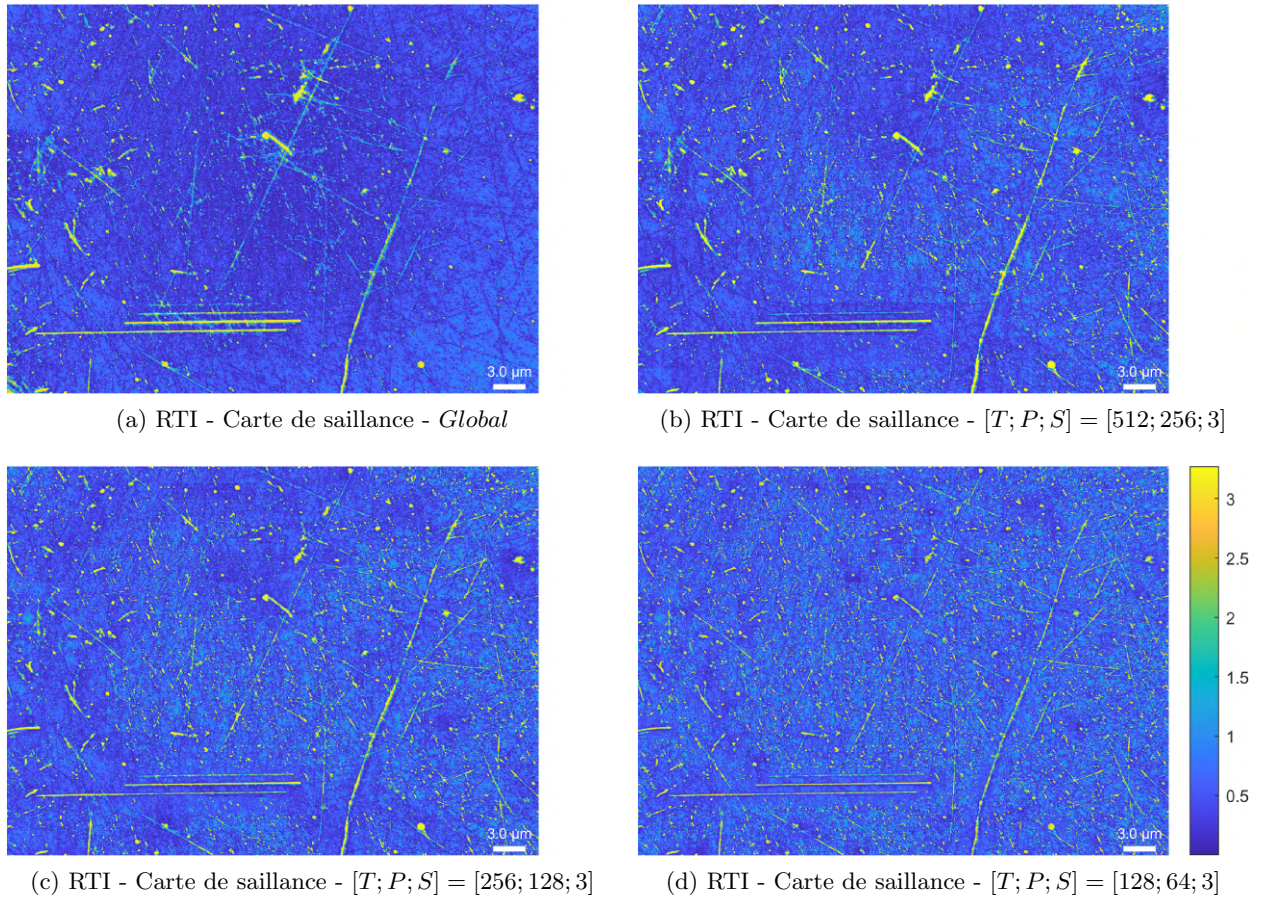


Figure 5.6 – Cartes de saillance multi-échelle estimées avec  $\mu[X]$  calculé à partir d’une acquisition RTI du cadran de montre.

## 2.4 Synthèse d’une saillance multi-niveau & multi-échelle

Dans la section 2.2, il était constaté avec la saillance multi-niveau que le niveau de saillance des points diminue quand des points semblables sont pris comme références. Or, en diminuant la taille de la fenêtre glissante lors de l’estimation d’une saillance multi-échelle, (section 2.3), on augmente la proportionnalité de points saillants observés et de référence, quand ils sont à l’intérieur de la fenêtre glissante, diminuant ainsi le niveau de saillance. Nous évitons alors cette baisse du niveau de la saillance en couplant la méthode multi-échelle (Equation 5.3) à la méthode multi-niveau (Equation 5.2) comme décrit dans l’Equation 5.4. Nous observons dans la figure 5.7 que les anomalies de surfaces de petite taille sont toujours visibles grâce à l’approche multi-échelle mais aussi la dynamique de la saillance est augmentée grâce à l’approche multi-niveau. Ainsi le couplage des deux approches permet de concilier la discrimination de plus petit défaut tout en gardant une grande dynamique afin de pouvoir, par exemple, les classifier, et d’extraire des valeurs synthétiques de saillance intégrant les aspects d’échelle.

$$Mahal_{(T,i,j)}^{SP_Z}(y, X) \equiv Mahal(y_{(T,i,j)}, X_{(T,i,j)}^{SP_Z}) \quad (5.4)$$

Où  $SP_Z$  correspond au paramètre de la saillance multi-niveau tandis que  $T, i$ , et  $j$  sont les paramètres de la saillance multi-échelle.

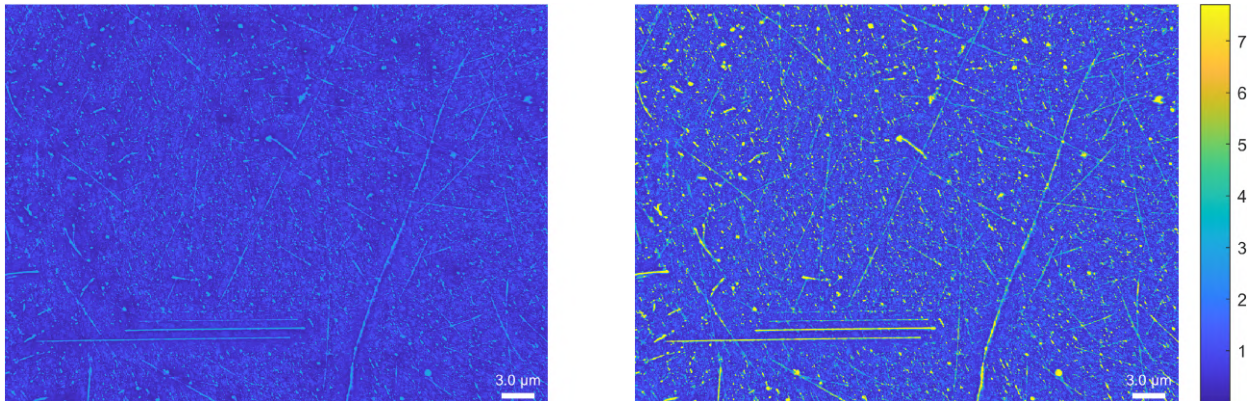
(a) RTI - Carte de saillance -  $SP_{100\%}$  - [128; 64; 3](b) RTI - Carte de saillance -  $SP_{90\%}$  - [128; 64; 3]

Figure 5.7 – Cartes de saillance multi-niveau et multi-échelle estimé avec  $\mu[X]$  calculé à partir d'une acquisition RTI du cadran de montre

### 3 Segmentation à partir du calcul la saillance

Lors de l'application de la distance de Mahalanobis, nous avons montré que le choix des descripteurs à utiliser pour le calcul était important. En effet, tous les descripteurs ne caractérisent pas de la même façon une surface ou une fonction, or si l'on souhaite discriminer certains points de la surface il est intéressant de savoir quels descripteurs permettent de répondre au mieux au problème, c'est à dire quels sont les descripteurs pertinents. Il est d'autant plus important d'avoir une sélection méthodologique des descripteurs que certains d'entre eux peuvent rendre saillant des pixels qui ne devraient pas l'être, ou inversement atténuer le niveau de saillance de points de la surface recherchés. Dans cette section, pour aider à la selection des descripteurs, une méthode est proposée grâce à laquelle deux critères sont définis permettant de classer les descripteurs selon leur efficacité à discriminer les caractères voulus.

Le cas d'application utilisé dans cette partie est lié à la problématique de l'identification des modes de rupture d'un assemblage collé. La maîtrise des modes de rupture est un enjeu important pour le développement de ces assemblages multi-matériaux dans l'industrie. L'analyse des modes de rupture, et en particulier l'évaluation du taux de rupture adhésif/cohésif, est un enjeu important. En effet, il est généralement considéré dans les applications industrielles que l'obtention d'une rupture cohésive permet de mieux prédire la rupture des joints adhésifs. Actuellement, ces évaluations sont réalisées par des experts au moyen d'une analyse visuelle, soit directement sur les surfaces de fracture, soit parfois avec un microscope à haute résolution. Les différents modes de ruptures sont illustrés dans la Figure 5.8.

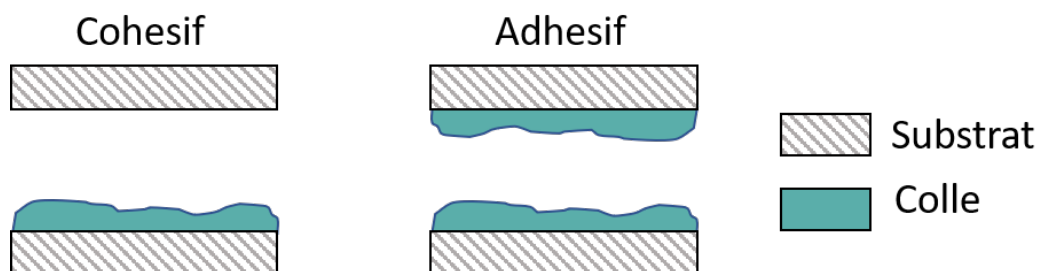


Figure 5.8 – Schéma des différents types de rupture

Les étapes de définition des critères de discrimination et d'homogénéité sont appliqués sur une surface provenant d'un assemblage collé de deux substrats métalliques, qui après séparation, présentent des faciès de ruptures cohésive et adhesive. Ainsi, dans la Figure 5.9, on peut observé les images de l'acquisition HD-RTI des surfaces. En effet, le HD-RTI permet la pleine mesure des surfaces brillante tel que le substrat métallique dans ce cas-ci. La surface présente à la fois des pixels appartenant au substrat métallique et des pixels appartenant à la colle. Le but est de classer les descripteurs, à l'aide des deux critères, selon leurs pertinence afin de segmenter le métal et la colle.

L'objectif spécifique recherché ici est de segmenter les Surfaces de Fracture Expérimentales (SFE) afin de visualiser la distribution spatiale des modes de rupture distincts, et de permettre de calculer un taux de mode de rupture sur les surfaces analysées de manière fiable à partir des données RTI. En effet, ces taux constituent souvent un critère objectif important pour analyser les performances mécaniques des assemblages collés dans les conditions de charges mécaniques testées expérimentalement. La méthode proposée est détaillée dans l'algorithme 2 et les principales étapes de cette méthodologie sont décrites ci-dessous.

**S0 Conditionnement des données.** Il est nécessaire préalablement aux étapes de processus de segmentation d'effectuer un recalage des paires de SFE. Ce recalage peut être réalisé à partir d'une ou plusieurs images d'acquisition brutes, ou de préférence à partir de cartes de caractéristiques dérivées de RTI qui intègrent toutes les images du cycle d'acquisition et peuvent ainsi être plus robustes pour la calibration. La transformation entre les deux surfaces est ensuite calculée et appliquée à toutes les données (images et descripteurs) du SFE à recalcr.

**S1 Initialisation de la segmentation.** La segmentation est initialisée par une sélection manuelle (segmentation supervisée par un opérateur) de zones (pixels) appartenant à chacune des classes à segmenter, c'est-à-dire les différents modes de fracture. Une illustration de cette étape d'initialisation est présentée dans la figure 5.10.

**S2 Critère basé sur la saillance pour le tri par pertinence des descripteurs.** Cette étape consiste à déterminer un critère pour classer automatiquement les descripteurs de surface issus des acquisitions RTI selon leur pertinence. La saillance de chacun des pixels appartenant aux classes initialisées à l'étape précédente est estimée grâce à la distance de Mahalanobis entre la valeur du pixel de calcul ( $y$ ) et la valeur moyenne des pixels appartenant aux points de référence ( $X$ ). Un critère de pertinence  $K_g$  basé sur la capacité du descripteur à discriminer ( $K_1$ ) et sa stabilité ( $K_2$ ) est alors estimé en multipliant les coefficients  $K_1$  et  $K_2$ . Le résultat de l'estimation de  $K_g$ , dans ce cas d'application, peut être observé dans les Tableaux 5.1 et 5.2, ainsi que quelques exemples de cartes de saillance estimées à partir descripteurs avec les meilleurs et les moins bonnes valeurs de  $k_g$  (Figure 5.11).

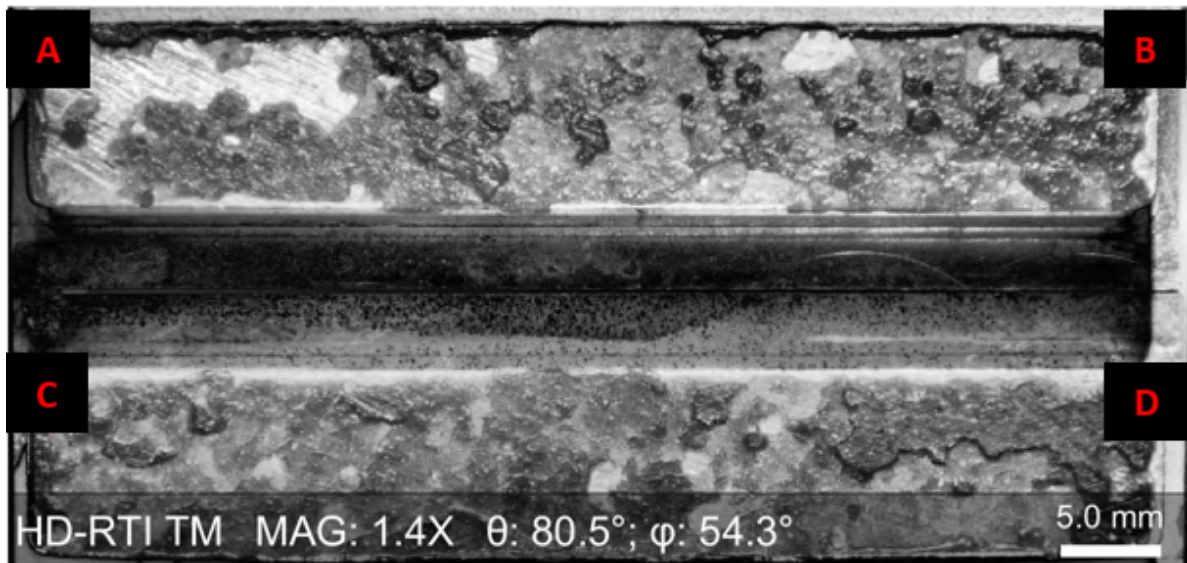
Descripteur	$H$	$\mu$	PTM	HSH	$\sigma$
$K_g (\times 10^3)$	9.6	11.5	12.4	14.4	17.9

Tableau 5.1 – Les 5 meilleurs valeurs de  $K_g$  dans le cas du SFE

Descripteur	$K_G$	$K_M$	$K_\mu$	$K_{min}$	$K_{max}$
$K_g (\times 10^3)$	1821.7	1287.2	1088.3	1018.9	958.5

Tableau 5.2 – Les 5 moins bonnes valeurs de  $K_g$  dans le cas du SFE

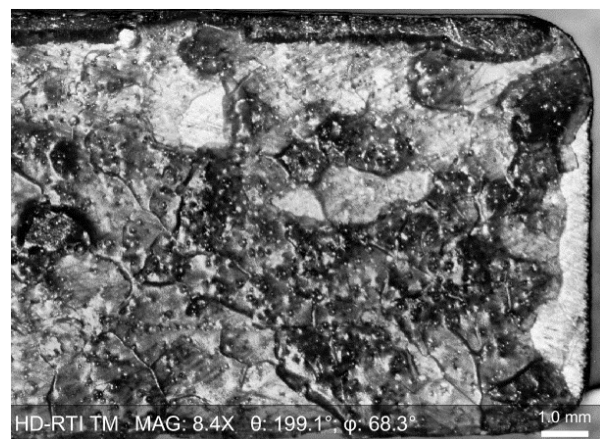




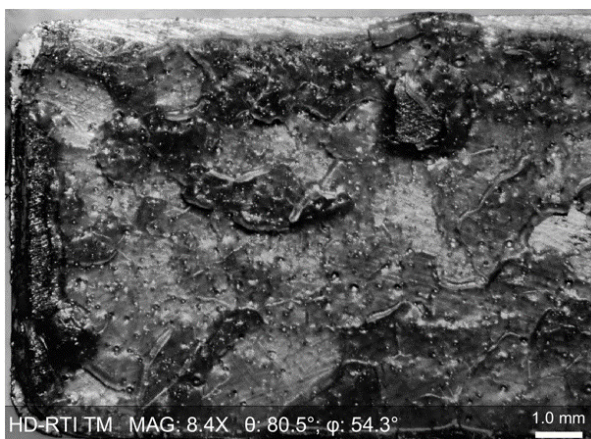
(a) Acquisition macro



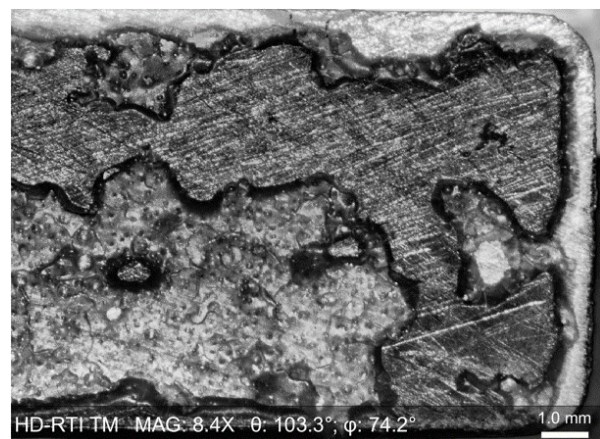
(b) Région A zoomée



(c) Région B zoomée



(d) Région C zoomée



(e) Région D zoomée

Figure 5.9 – Acquisitions macro et micro HD-RTI d'une paire de surfaces de rupture d'assemblages collés expérimental

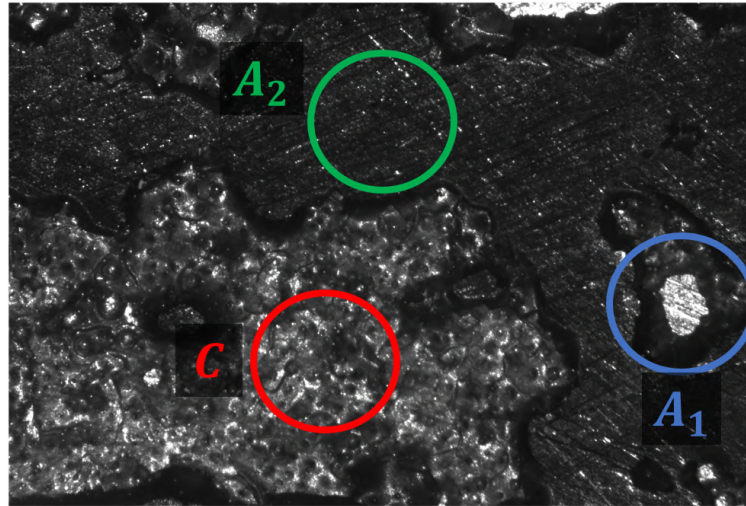


Figure 5.10 – Initialisation de la segmentation : Les classes bleues et vertes sont associées à un faciès de rupture adhésive ( $A_1$  est identifié comme substrat métallique et  $A_2$  comme matériau adhésif).  $C$  correspond à un mode de rupture cohésif

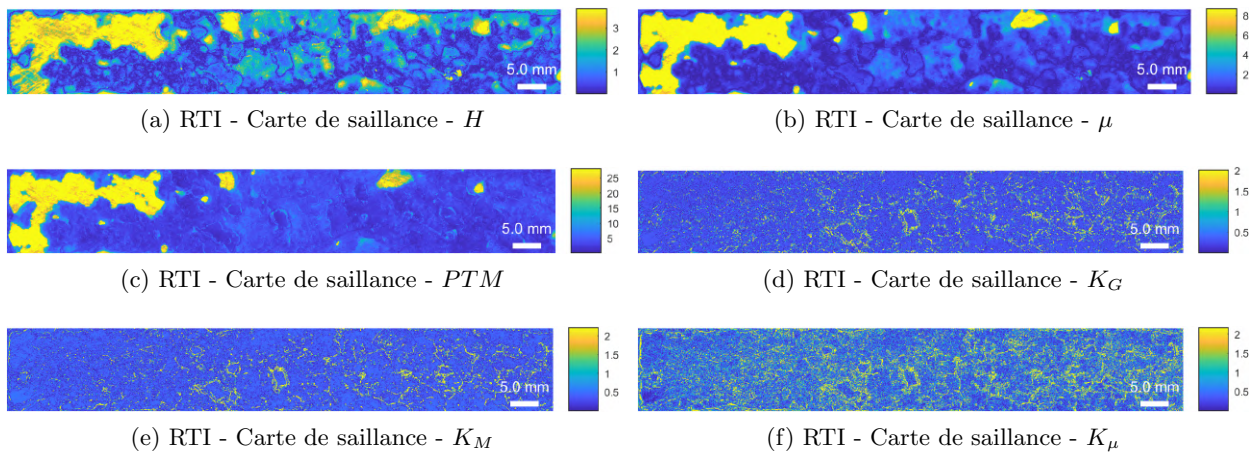


Figure 5.11 – Cartes de saillance estimées à partir des descripteurs locaux d'une acquisition HD-RTI sur la surface de rupture d'un assemblage collé

**S3 Estimation de la saillance multivariée** Une saillance multivariée est estimée à chaque pixel des deux paires de surfaces  $S_T$  et  $S_B$  en utilisant les 5 descripteurs les plus pertinents (5 valeurs les plus basses de  $K_g$ ).

**S4 Segmentation** Les deux cartes de saillance obtenues en S3 sont utilisées pour segmenter le SFE en 4 classes. La classe  $C_1$  est associée à des pixels appartenant au substrat métallique (fracture adhésive) sur le SFE considéré, et  $C_2$ , par symétrie, correspond à une identification de classe  $C_1$  sur la surface complémentaire.  $C_3$  correspond à une fracture cohésive. La dernière classe ( $C_4$ ) correspond à des points qui n'appartiennent pas aux autres classes, ou qui sont incohérents avec la segmentation précédente. Ces points sont potentiellement des aberrations de segmentation, mais plus vraisemblablement ils peuvent être provoqués par de l'air emprisonné lors du collage de l'assemblage (interne au matériau adhésif), voire un morceau de matériau adhésif qui se serait détaché du substrat métallique après la charge expérimentale, lors d'une défaillance mécanique ou lors de manipulations ultérieures des échantillons.

**Algorithme 2** Segmentation d'un SFE**Variables d'entrées:**

% (Acquisition des SFE) imagerie des Surfaces de Fracture Expérimentales

$L_T \leftarrow$  Images de l'acquisition HD-RTI des SFE  $S_T$  (Surface en haut)

$L_B \leftarrow$  Images de l'acquisition HD-RTI des SFE  $S_B$  (Surface en bas)

$n \leftarrow$  nombre de descripteurs

$D_T(i); D_B(i) \leftarrow i^{eme}$  Descripteur dérivé du RTI estimé à partir de  $L_T$  et  $L_B$

% S0 (Conditionnement) Recalage des acquisitions SFE

Choix du  $i^*$  carte de descripteur  $D_T(i^*)$  de  $L_B$  comme référence pour le recalage

$F_{B \leftarrow T} \leftarrow$  Estimation de la transformation entre les cartes  $D_T(i^*)$  et  $D_B(i^*)$

$L_{B_{reg}} \leftarrow$  Application de  $F_{B \leftarrow T}$  sur les images  $L_B$

$D_{B_{reg}}(i) \leftarrow$  Application de  $F_{B \leftarrow T}$  sur les cartes de descripteur de  $D_B(i)$  ( $i = 1 : n$ )

% S1 (Initialisation de la segmentation)

$A_T \leftarrow$  Sélection par l'utilisateur de la zone de pixels  $\in$  Substrat dans  $L_T$

$\overline{A_T} \leftarrow$  Sélection par l'utilisateur de la zone de pixels  $\notin$  Substrat dans  $L_T$

% S2 (Estimation de la saillance sur les cartes de descripteurs et critère de tri par pertinence des descripteurs)

$S(X(i)) \leftarrow S(X(i), D_{\overline{A_T}}(i))$  (Référence pour les estimations de la saillance suivantes)

**for**  $i = 1$  **to**  $n$  **do**

$S(D_{A_T}(i)) \leftarrow$  Estimation de saillance pour chaque pixel  $\in A_T$

$S(D_{\overline{A_T}}(i)) \leftarrow$  Estimation de saillance pour chaque pixel  $\in \overline{A_T}$

$K_1(i) \leftarrow \frac{\text{mean}(S(D_{\overline{A_T}}(i)))}{\text{mean}(S(D_{A_T}(i)))}$  (Critère de discrimination entre  $A_T$  et  $\overline{A_T}$ )

$K_2(i) = \text{RSD} \leftarrow \frac{\text{std}(S(D_{A_T}(i)))}{\text{mean}(S(D_{A_T}(i)))}$  (Critère d'homogénéité)

$K_g(i) = K_1 \times K_2$  (Critère de classement global pour  $D(i)$ )

**end for**

% S3 (Estimation de la saillance multivariée à l'aide des 5 descripteurs les plus pertinents (selon les valeurs de  $K_g$ ))

$D^5 \leftarrow$  Les 5 descripteurs les plus pertinents

$Sal_T \leftarrow S(D_T^5, D_{\overline{A_T}}^5)$  (Estimation de la saillance multivariée sur  $L_T$ )

$Sal_{B_{reg}} \leftarrow S(D_{B_{reg}}^5, D_{\overline{A_T}}^5)$  (Estimation de la saillance multivariée sur  $L_{B_{reg}}$ )

% S4 (Segmentation selon les classes de type de rupture  $C_{1-4}$ )

$T_T$  and  $T_B \leftarrow$  Seuils automatiques estimés à partir de  $Sal_T$  et  $Sal_{B_{reg}}$

$C_1 \leftarrow Sal_T > T_T \vee Sal_{B_{reg}} > T_B$  (Fracture adhésive - substrat métallique)

$C_2 \leftarrow L_T \in C_1 \wedge L_B \in C_1 \vee L_B \in L_B \notin C_1 \wedge L_T \in C_1$  (Fracture adhésive - Matériau adhésif)

$C_3 \leftarrow L_T \in \{L_T \in C_1 \wedge L_B \in C_1\} \vee L_B \in \{L_T \in C_1 \wedge L_B C_1\}$  (Cohésif)

$C_4 \leftarrow L_T \notin \{L_T \in C_1 \vee L_T \in C_2 \vee L_T \in C_3\} \vee L_B \notin \{L_B \in C_1 \vee L_B \in C_2 \vee L_B \in C_3\}$

(Segmentation de la classe porosité/chute)

Dans le cas d'application de cette étude, les deux SFE  $S_T$  et  $S_B$  ont été recalées avec les fonctions de *Matlab* [Wells 96, Styner 00] en utilisant le descripteur  $D_z$  dérivé du RTI. En effet, ce descripteur géométrique est apparu approprié dans ce cas car il n'était pas sensible aux variations de réflectivité (associées aux différents matériaux), et parce que sa cartographie a révélé de nombreux points d'intérêt potentiels pour effectuer le recalage. Les pixels appartenant à la classe  $C_1$  sont ensuite segmentés sur les 2 surfaces  $S_T$  et  $S_B$ , comme illustré sur la figure 5.12 et 5.13), et donc, par symétrie, les points appartenant à  $C_2$ . Ensuite, les pixels de  $S_T$  et  $S_B$  qui appartiennent tous les deux à la classe  $C_1$  sont identifiés comme appartenant à la classe  $C_4$ . Enfin, les pixels non classés à ce stade sont associés à la classe  $C_3$  (rupture cohésive du joint collé). Les résultats de segmentation obtenus sur ces surfaces de fracture expérimentales sont présentés dans la Figure 5.14.

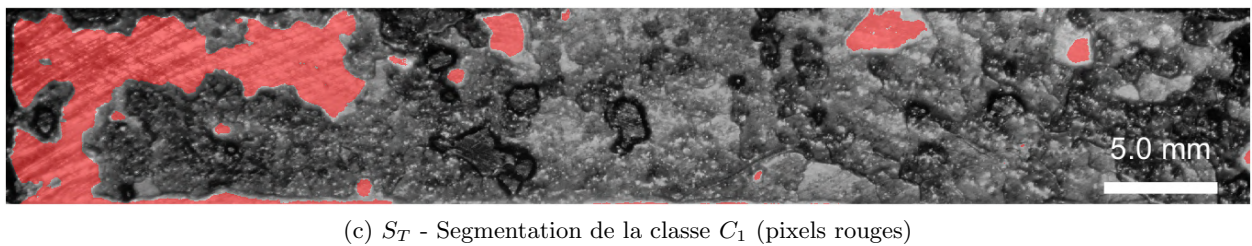
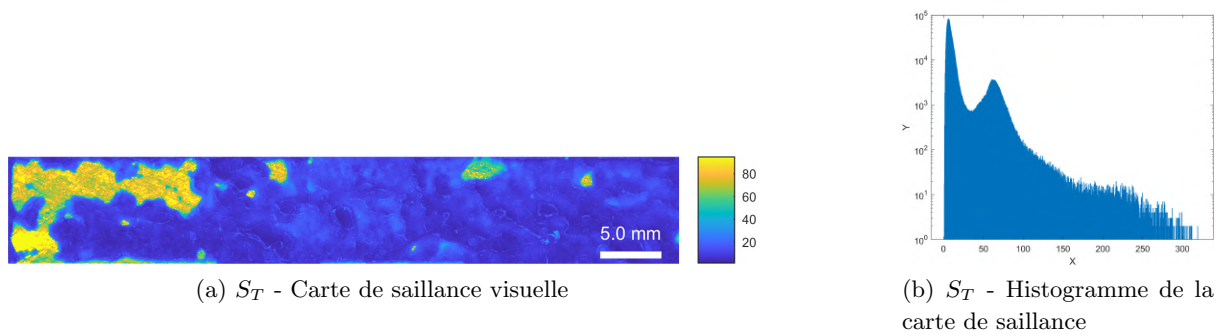


Figure 5.12 – Segmentation de la classe  $C_1$  sur  $S_T$  (Substrat métallique - Fracture adhésive)

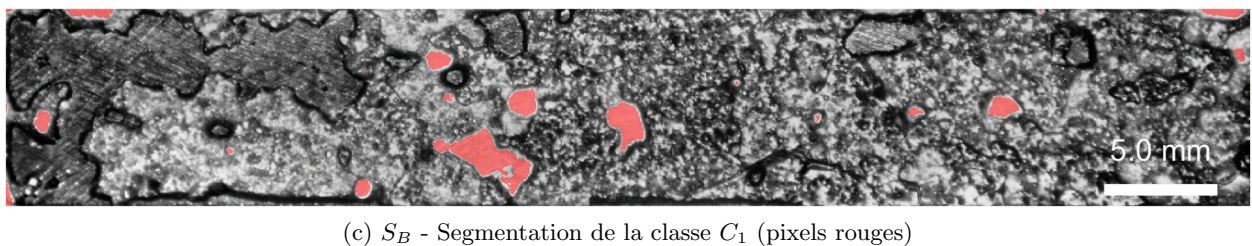
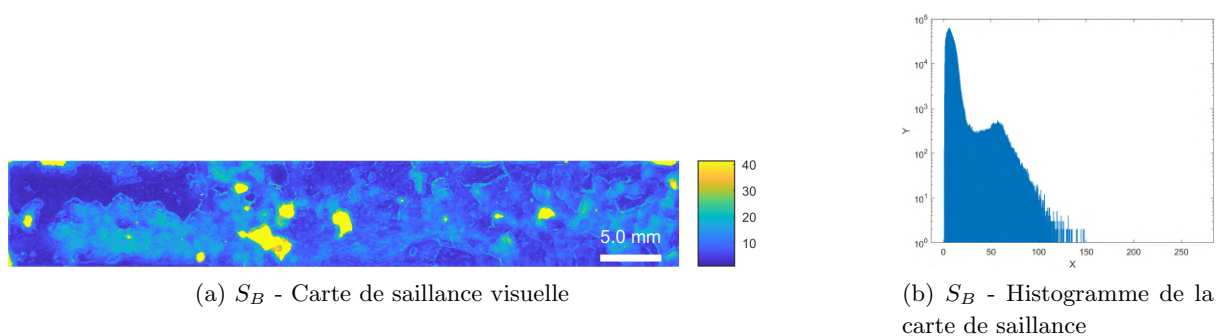
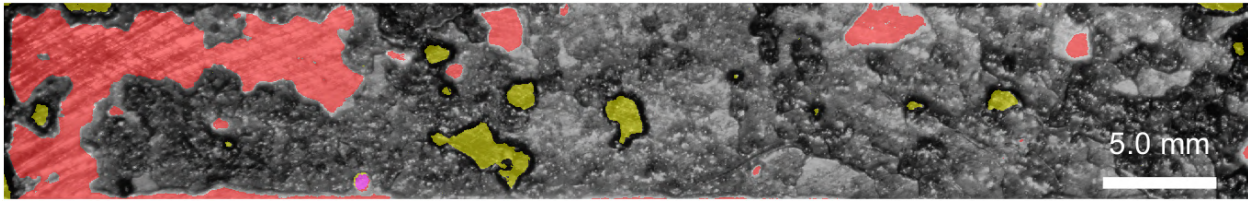
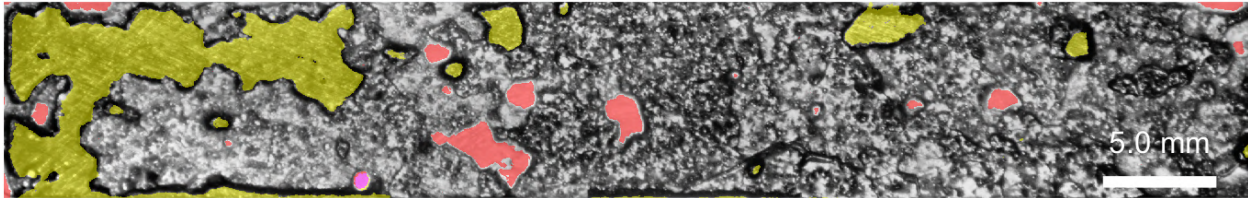


Figure 5.13 – Segmentation de la classe  $C_1$  sur  $S_B$  (Substrat métallique - Fracture adhésive)



(a)  $S_T$  ( $C_1 = 13.44\%$  -  $C_2 = 2.42\%$  -  $C_1 + C_2 = 15.86\%$  -  $C_3 = 84.08\%$  -  $C_4 = 0.6\%$ )



(b)  $S_B$  ( $C_1 = 2.42\%$  -  $C_2 = 13.44\%$  -  $C_1 + C_2 = 15.86\%$  -  $C_3 = 84.08\%$  -  $C_4 = 0.6\%$ )

Figure 5.14 – Segmentation, basée sur le RTI, sur *Surf-Top* et *Surf-Bottom* ; Les pixels rouges sont associés à la classe  $C_1$  (substrat métallique-fracture adhésive), les jaunes à  $C_2$  (matériau adhésif-fracture adhésive), violets à  $C_4$  (poche d'air/perte de matériau) et les pixels non colorés à  $C_3$  (fracture cohésive)

## 4 Approche globale : Saillance inter-surfaces à partir de données RTI

La distance de Mahalanobis est généralement utilisé avec le RTI pour estimer la saillance visuelle en chaque point de la surface. Or la distance de Mahalanobis compare des observation avec un échantillon de référence. Les observations et l'échantillon de référence peuvent donc correspondre à d'autres données obtenues par la méthode RTI. Dans la section 4.1 une méthode est proposée afin d'estimer une distance entre plusieurs surfaces. Cette méthode permet par exemple le monitoring temporel de l'apparence d'une surface afin de comprendre et/ou prévenir une altération de l'état de surface ou encore d'explorer les paramètres de fabrication d'état de surface afin de s'approcher d'une apparence référence. Nous montrons ensuite comment cette approche peut être généralisée pour l'analyse de la qualité de reconstruction, en terme de descripteurs d'apparence, des modèles de Reflectance Transformation Imaging.

### 4.1 Distance entre états de surface

Dans cette partie nous proposons d'étendre l'utilisation de la distance de Mahalanobis non seulement aux pixels mais aussi aux acquisition RTI elles mêmes. Ainsi nous ne ne comparons plus les attributs d'apparence des points d'une surface mais les états de surface entre eux. La comparaison de surfaces permet soit la détection d'un changement dans l'état de surface et pouvoir prévenir les anomalies ou les constater, ou bien explorer les paramètres de fabrication d'état de surface pour se rapprocher d'une apparence de surface de référence. Pour comparer plusieurs surfaces entre elles, une distance doit être estimé entre les descripteurs locaux de la surface de référence et les surfaces étudiées par la méthode de Mahalanobis. Lors de l'utilisation de l'équation 5.1,  $X$  correspond alors

aux descripteurs locaux de la surface de référence, tandis que  $Y$  correspond aux descripteurs locaux de la surface dont nous souhaitons connaître la distance. Si l'on possède plusieurs surfaces à comparer avec une référence, on obtient plusieurs cartes de saillance qui discriminent les changements locaux avec une intensité corrélée au degré de changement par rapport à la référence. Ainsi, comme illustré dans la Figure 5.15, on peut observer plusieurs surfaces de nickel dont l'une est présentée et utilisée dans le chapitre 4 dans la section 3. Ces états de surface ont une rugosité moyenne ( $Rz$ ) et une rugosité maximal ( $Ra$ ) données par le fabricant. Ces degrés de rugosité sont différentes pour chaque échantillon, or nous constatons alors dans la Figure 5.16 que la distance de Mahalanobis entre les surfaces est alors corrélée avec l'écart de  $Ra$  et  $Rz$  entre la surface de référence et la surface étudiée.

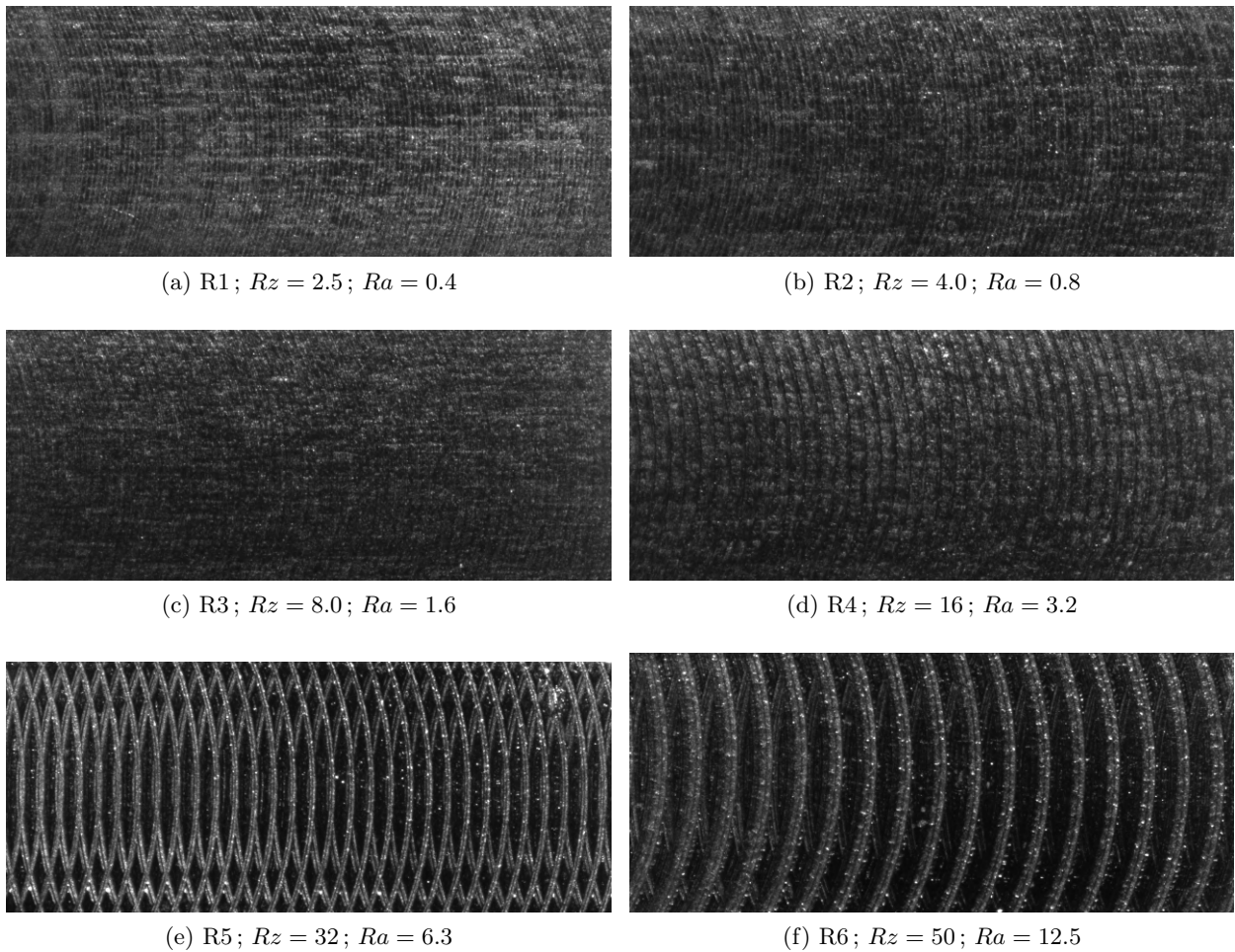


Figure 5.15 – Données RTI brutes des états de surface obtenus par un procédé de fraisage en bout provenant d'un ensemble de surface pour le contrôle de la rugosité (Rubert n°130) ;  $\theta = 80^\circ$  ;  $\phi = 72^\circ$

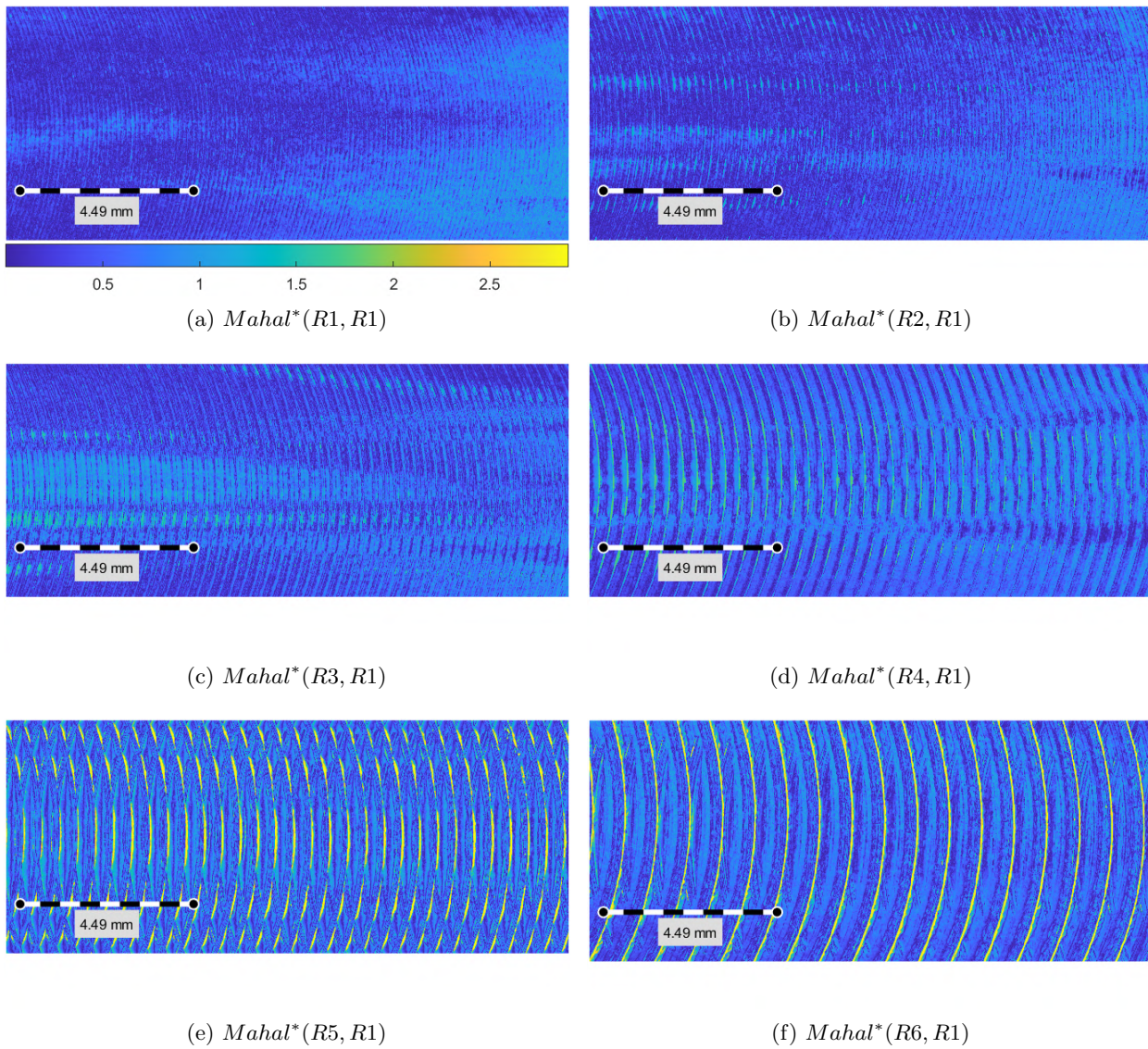


Figure 5.16 – Carte de distance de Mahalanobis calculée avec les descripteurs géométriques entre les surfaces provenant de l'ensemble Rubert n°130

## 4.2 Distance entre les modèles de reconstruction de l'apparence

Il est difficile de comparer objectivement la fidélité d'une reconstruction de la reflectance angulaire locale avec une vérité terrain. L'une des méthodes actuelles de comparaison est d'utiliser le caractère ponctuel de la reflectance angulaire des anomalies de surface afin de déterminer l'efficacité d'un modèle de reconstruction. Pour évaluer ce caractère ponctuel des points de la surface, le kurtosis, ou le couple PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) et SSIM (Structural Similarity), est calculé en chaque pixels de l'acquisition RTI mesurés et sur les images reconstruites à partir des modèles de reconstruction [Pitard 17a, Pintus 18, Kitanovski 21]. Le modèle possédant les valeurs de kurtosis le plus proche, de celui de la mesure, est déterminé comme étant le plus robuste. Une des limites de cette méthode est que l'origine du kurtosis ne correspond pas à la vérité terrain, cet estimateur n'est donc pas relatif comme attendu d'une comparaison. Ainsi, on ne sait pas dire si le niveau de kurtosis est proche de celui correspondant à la mesure si celui-ci est inférieur ou supérieur, mais à différence égale. De plus, le kurtosis n'est qu'un descripteur parmi tant d'autres qui peuvent aussi contribuer à la comparaison des modèles. Nous proposons donc une méthode basée sur la saillance afin d'estimer une distance entre les modèles de reconstruction de la reflectance angulaire ayant comme origine une acquisition RTI servant de vérité terrain. Afin d'estimer cette distance il faut au préalable deux acquisitions RTI, une qui correspond à la vérité terrain,  $RTI_{Ref}$  et une deuxième qui sera utilisé lors de la reconstruction de la reflectance,  $RTI_{Mod}$ . Les deux acquisitions doivent avoir toutes deux des positions angulaires homogènes différentes afin d'estimer la reconstruction sur des positions non acquises, qui appartiennent à un domaine infini, contrairement aux positions acquises qui appartiennent à un domaine fini. A partir de  $RTI_{Mod}$ , nous reconstruisons des acquisitions virtuelles avec les modèles PTM, ( $RTI_{PTM}$ ), HSH, ( $RTI_{HSH}$ ) et DMD, ( $RTI_{DMD}$ ), ayant comme positions angulaires ceux de  $RTI_{Ref}$ . Nous estimons alors des descripteurs à partir des acquisitions virtuelles reconstruites et de  $RTI_{Ref}$  afin d'estimer la distance de Mahalanobis comme décrit dans l'Equation 5.5, 5.6 et 5.7.

$$D_{PTM} = Mahal^*(RTI_{PTM}, RTI_{Ref}) \quad (5.5)$$

$$D_{HSH} = Mahal^*(RTI_{HSH}, RTI_{Ref}) \quad (5.6)$$

$$D_{DMD} = Mahal^*(RTI_{DMD}, RTI_{Ref}) \quad (5.7)$$

Les deux surfaces d'application utilisées ici sont la mire de calibrage couleur de Macbeth présentée précédemment dans le chapitre 4 à la section 3, et une surface de metal brossée brillante. Ces deux surfaces sont différentes en terme de reflectance et en terme de texture, la première est isotropique et la seconde anisotropique. On peut constater que le PTM est le modèle qui reconstruit le moins fidèlement la reflectance angulaire contrairement au DMD dont la distance globale de sa reconstruction est la plus faible avec la mesure. Ce résultat est cohérent avec la littérature [Zendagui 19, Zendagui 21]. Cependant le resultat est moins observable concernant la matrice de Macbeth car celle-ci est diffuse. Or le PTM est déjà adapté au surface Lambertienne. Seules quelques cellules de la matrice voient leurs reconstructions améliorées car ce sont des patches de couleur proche du blanc avec une forte luminance. Ces patches sature donc rapidement le capteur. Donc le DMD semble mieux reconstruire les points lumineux d'une surface que les autres modèles, or beaucoup d'anomalies peuvent être lumineux, par leurs géométries par exemple, donc le DMD peut aider à la reconstruction et la visualisation des anomalies de surface. Les résultats sont présentés dans les figures 5.17 et 5.18.



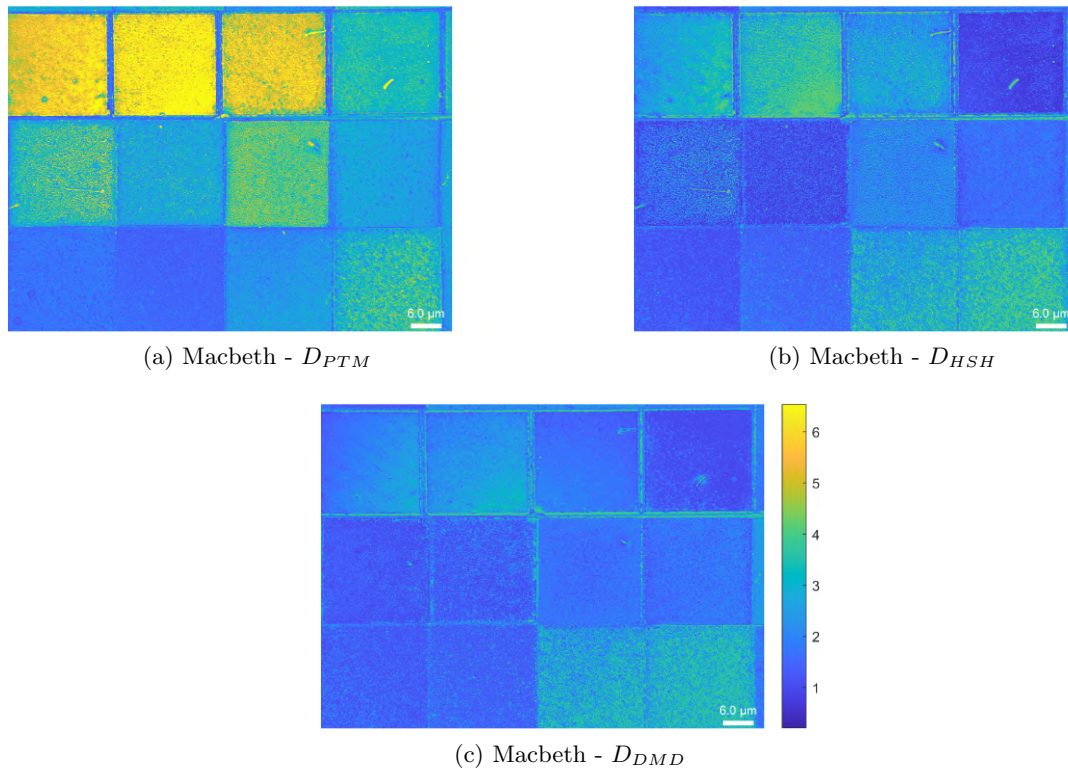


Figure 5.17 – Cartes de distances estimées avec  $\mu, \sigma, \beta_1, \beta_2$  et  $H$  calculées à partir des reconstructions de reflectance angulaire d’une acquisition RTI (matrice de Macbeth)

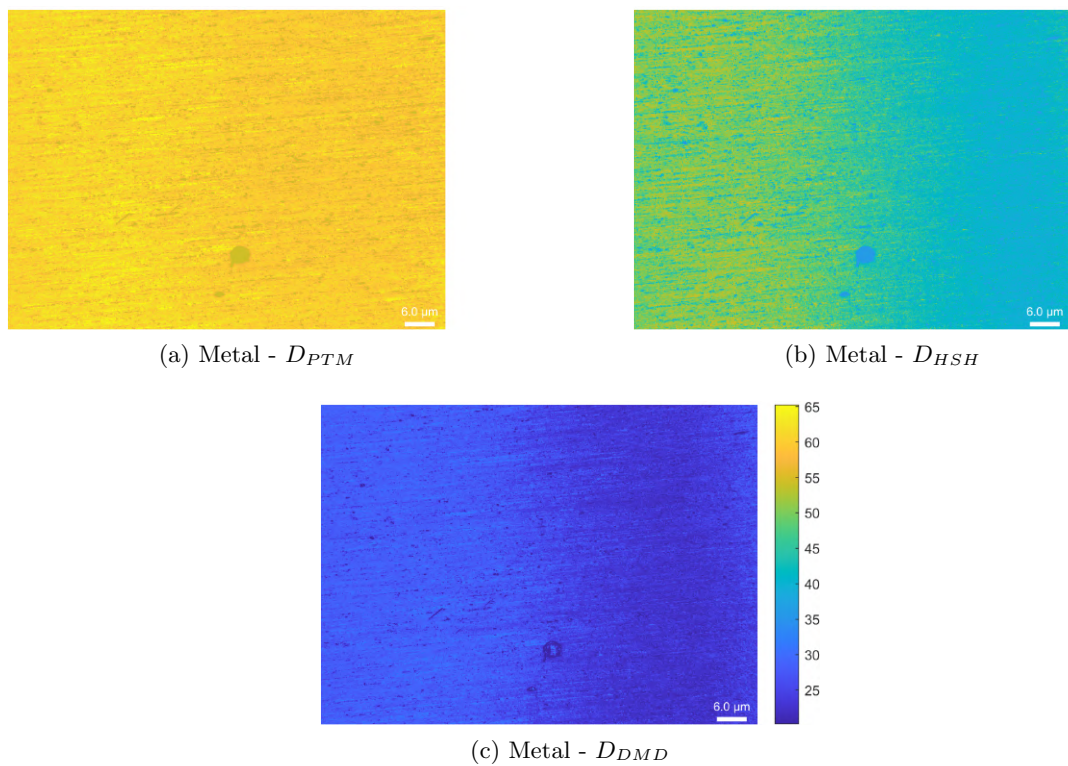


Figure 5.18 – Cartes de distances estimées avec  $\mu, \sigma, \beta_1, \beta_2$  et  $H$  calculées à partir des reconstructions de reflectance angulaire d’une acquisition RTI (surface métal brossé)

## 5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé une méthodologie afin de discriminer les surfaces entre elles et les points d'une surface entre eux. Cette discrimination est réalisée à partir de l'analyse des données RTI en couplant les descripteurs sur les données RTI avec le calcul de la distance de Mahalanobis. Nous avons donné une nouvelle définition à la saillance calculée à partir des données RTI. La méthode est multi-échelle donc adaptée à différentes échelles d'anomalies. Ainsi on ne considère que le proche voisinage pour définir le niveau de saillance d'un pixel. La méthode proposée est multi-niveau, permettant de filtrer les points trop saillants et donc d'augmenter la dynamique du niveau de saillance des pixels. Avec l'aide de la saillance couplé aux descripteurs il est aussi possible de segmenter une surface en plusieurs population. Le choix des descripteurs optimaux, pour la segmentation de deux populations, peut être déterminé en définissant un critère global qui permet le classement des descripteurs selon leurs pertinence. Enfin la méthode est applicable à différent objectif d'inspection des surfaces telle que le suivi d'état de surface et la comparaison des modèles de reconstruction de la reflectance angulaire en calculant la distance de Mahalanobis entre les acquisitions RTI. La méthode proposée est appliquée sur différentes surfaces en terme de matériaux, de rugosité et d'objectif d'analyse. Les résultats montrent que la méthode est efficace pour mettre en évidence les différences entre les états de surface, dans une même surface, entre plusieurs surfaces ou entre les modèles de reconstructions de la reflectance angulaire. De plus la méthode est corrélé avec le degré de différence des attributs de surface et permet une classification des différentes populations observées.

### Résumé

- La saillance visuelle des pixels est calculé à partir des descripteurs locaux
- La saillance visuelle des pixels est calculé et est meilleur à partir des données HD-RTI
- La saillance visuelle peut être calculé à différentes échelles (multi-échelle) afin de détecter les anomalies de surfaces de tailles différentes.
- La saillance visuelle peut voir sa dynamique augmenter si les pixels saillant parmi les pixels de référence sont filtrés (multi-niveau).
- La saillance visuelle peut servir d'outil pour la segmentation des pixels.
- La saillance visuelle peut être optimisé, pour la détection de certains pixels, en classant les descripteurs selon leurs pertinence à l'aide de plusieurs critères.
- La saillance visuelle peut être étendu aux acquisitions RTI (distance entre les états de surface)
- La distance entre états de surface est corrélé avec les variations de paramètres de fabrication ou d'altération des surfaces.
- La distance entre états de surface permet de comparer les reconstructions réalisées avec les modèles de reconstruction de l'apparence.

Les contributions présentées dans ce chapitre ont été valorisées dans les publications suivantes :

- Marvin NURIT, Gaëtan LE GOÏC, David LEWIS, Yuly CASTRO, Abir ZENDAGUI, Hermine CHATOUX, Hugues FAVRELIÈRE, Stéphane MANIGLIER, Pierre JOCHUM, et Alamin MANSOURI. « HD-RTI : An adaptive multi-light imaging approach for the quality assessment of manufactured surfaces ». *Computers in Industry*, 2021.
- Marvin NURIT, Gaëtan LE GOÏC, Stéphane MANIGLIER, Pierre JOCHUM, Hermine CHATOUX et Alamin MANSOURI. « Improved visual saliency estimation on manufactured surfaces using high-dynamic reflectance transformation imaging ». *Proceedings Volume 11794, 15th International Conference On Quality Control By Artificial Vision QCAV 2021, Tokushima, Japon, 2021*.

## Conclusion et perspectives

Dès la conception d'un produit, il est essentiel pour l'industrie, de prendre en compte la perception visuelle de l'apparence en tant que valeur ajoutée au produit. En effet, les entreprises relativement matures sur les plans des techniques et technologiques, doivent se démarquer des concurrents en maîtrisant le ressenti et la perception de leurs produits. Ceci est d'autant plus important que le consommateur est de plus en plus attentif à l'aspect des produits. En effet, il ne peut pas juger de la valeur technologique et technique d'un produit de façon objective, il base alors son jugement sur la qualité esthétique perçue du produit. Dans le cadre industriel, plusieurs méthodes ont été mises en œuvre afin de maîtriser l'apparence des surfaces tout au long du cycle de production. L'approche la plus fréquente consiste à évaluer la qualité perçue des produits par des techniques d'analyse sensorielle basée sur l'évaluation visuelle par des experts. Malgré la flexibilité de cette méthode, la variabilité des résultats obtenus, inhérentes au contrôle humain, est souvent élevée. L'approche instrumentale tente de répondre à l'enjeu de la perception de l'apparence en mettant en œuvre des mesures physiques d'attributs de l'apparence des surfaces. L'enjeu de cette approche est de numériser l'apparence des surfaces, et donc d'envisager de quantifier objectivement les attributs d'apparence, afin de permettre le pilotage fonctionnel des processus de fabrication et de finition de surface. Cette approche, s'inscrit dans la philosophie de l'industrie 4.0 et est en constant développement. Notamment une technique d'imagerie de la réflectance appelée Reflectance Transformation Imaging qui se déploie progressivement dans le domaine industriel après avoir connu un développement important dans le domaine du patrimoine culturel et historique. Les travaux présentés dans ce manuscrit ont permis d'apporter des réponses et de proposer des évolutions par rapport aux limites de la technique RTI afin de permettre une caractérisation fine et robuste de l'apparence des surfaces et des états de surface.

Dans le cadre du projet NAPS plusieurs axes de recherches ont été développés pour répondre à ces limites :

Le premier axe de recherche est lié à l'acquisition des données RTI. En effet, nous avons montré que les systèmes RTI actuels présentent des limitations et ne peuvent offrir la modularité et la contrôlabilité nécessaire pour développer et tester des modalités et méthodes en lien avec le RTI. Ainsi, afin de répondre aux besoins expérimentaux et de test/validation de nos approches, nous avons développé un dispositif innovant de numérisation de l'apparence. Le système RTI 5 axes motorisés est piloté par un logiciel conçu spécifiquement pour ce système afin de répondre aux besoins des différents contributeurs du projet. L'architecture mécanique du système est conçue pour être robuste afin de rendre les acquisitions réalisées répétables. De plus, le système est modulaire

en terme de matériel, permettant une modification et une évolution du système selon les besoins en développement et expérimentation. Enfin, le logiciel de pilotage permet le contrôle fin de chacun des paramètres du système. De plus, la structure du code est pensée pour un travail en équipe afin que chacun puisse implémenter ses développements concernant les modalités et méthodes en lien avec le RTI. Ainsi, les différentes méthodes et modalités proposées dans ce document ont pu être intégrées, testées et validées grâce à ce système RTI.

Le deuxième axe de recherche est liée à l'ajout d'une nouvelle modalité d'acquisition RTI appelée HD-RTI. Elle consiste en un couplage entre le High Dynamic Range (HDR) et le RTI. Cette méthode permet de mesurer la pleine dynamique de la réponse en luminance des surfaces inspectées. En effet, nous avons montré que le temps d'exposition influe sur l'extraction des caractéristiques des surfaces et donc leur analyse. Or, ce choix du temps d'exposition par l'opérateur est arbitraire, et ne peut pas être optimisé pour tout angle d'éclairage. Le capteur a une plage dynamique limitée ne permettant pas de mesurer correctement les pixels lors d'une acquisition RTI (pixels sous-exposés et sur-exposés). La méthode proposée est auto-adaptative en fonction de l'amplitude de la réponse aux différents angles d'acquisition de la surface observée. La méthode a été appliquée sur plusieurs surfaces différentes en terme de topographie et de luminance. Nous montrons que la méthode proposée est particulièrement appropriée pour les surfaces hétérogènes et brillantes qui ne permettent, souvent, pas de définir un temps d'exposition approprié pour tout les angles d'éclairage lors d'une acquisition RTI. De plus, nous avons démontré que les données HD-RTI sont cohérentes entre elles en terme d'intensité mesurée. Nous avons calculé le coefficient d'intensité entre les acquisitions HD-RTI de deux surfaces qui réfléchissent en moyenne chacun un pourcentage différents de la lumière. En effet, si les données mesurées sont robuste et fidèles à la réalité, le coefficient d'intensité doit correspondre au ratio entre les pourcentage de chacune des deux surfaces. Or on retrouve avec les données HD-RTI, en moyenne, le coefficient de luminance correspondant aux deux surfaces, contrairement au RTI classique. Le HD-RTI conduit aussi à des reconstructions plus précises de la réponse angulaire dans la zone d'intérêt, mais aussi, permet d'adapter dynamiquement l'exposition lumineuse, de la reconstruction, en fonction de l'amplitude de la région observée. Enfin, nous montrons que la méthode proposée permet une meilleure caractérisation des données RTI en appliquant un calcul de saillance sur les descripteurs des données HD-RTI et RTI. La saillance du HD-RTI présente une meilleure discrimination des anomalies de surface car généralement les anomalies de surface sont liées à une réflectance angulaire élevée donc ne pouvant être mesurée correctement avec une acquisition RTI conventionnelle.

Le troisième enjeu est lié à l'usage de la technique RTI pour la caractérisation de l'apparence des surfaces. Usuellement le RTI est uniquement utilisé afin de permettre la reconstruction de l'apparence. Afin d'aller plus loin et d'extraire des caractéristiques objectives de la surface (géométrie) et/ou de son comportement photométrique, nous avons proposé la génération et la cartographie de descripteurs à partir des données RTI. La variété des descripteurs permet de caractériser de façon fine les différents états de surface tant du point de vue de leur géométrie que de leur interaction avec l'environnement lumineux. De plus la cartographie de ces descripteurs offre un outil d'analyse visuel des différentes caractéristiques des surfaces. Des descripteurs ont été calculés sur deux surfaces distinctes, l'une par son comportement photométrique et la seconde par sa géométrie. Nous avons montré qu'en utilisant les descripteurs adaptés il est alors possible de détecter visuellement des anomalies de surfaces ou encore mieux analyser la géométrie d'une surface.

Enfin la dernière contribution consiste à estimer la saillance visuelle à partir des données RTI. En effet, il est un enjeu important pour les industriels de pouvoir mieux détecter et évaluer la criticité des anomalies d'aspect. Nous proposons une analyse multi-variée, multi-échelle et multi-niveau des descripteurs afin de déterminer la saillance locales des surfaces inspectées, et étendu

à l'analyse des anomalies globales, en terme d'apparence, entre un ou plusieurs états de surfaces et un état de surface de référence. L'aspect multi-échelle de la méthode permet de discriminer les anomalies de surfaces de différentes tailles. Nous avons montré, en comparant les différentes échelles de calcul de la saillance, que plus l'échelle est petite plus la saillance des petites anomalies augmente. L'aspect multi-niveau de la méthode permet d'augmenter la dynamique de la saillance en filtrant les pixels trop saillants de la référence lors du calcul de la saillance. De même, en comparant différents niveaux de seuillage, nous avons montré que la dynamique de la saillance augmente avec le pourcentage de pixels filtrés. De plus, il est possible de fusionner la méthode multi-niveau et multi-échelle afin de rendre saillante les anomalies de surface de différentes tailles mais en gardant une assez grande dynamique. Nous montrons, par un cas d'application d'analyse des faciès de rupture, qu'il est possible de segmenter des population de pixels avec la saillance. Nous avons segmenté les pixels correspondants à des ruptures adhésives de ceux correspondants à des ruptures cohésives. Pour optimiser et faciliter la segmentation, nous avons optimisé le choix des descripteurs en définissant un critère global qui permet de les classer selon leur pertinence. Nous avons montré que la saillance peut être utilisée pour différents objectifs d'inspection telle que le monitoring des états de surface. Les résultats montrent que la méthode est corrélée avec le degré de différence entre les caractéristiques des états de surfaces. Enfin, nous avons appliqué ce calcul de distance d'état de surface aux modèles de reconstruction. Nous avons reconstruit des acquisitions RTI virtuelle, à partir de différents modèles, au mêmes positions angulaires qu'une acquisition RTI servant de vérité terrain. La distance entre la vérité terrain et les reconstruction sont corrélés avec différents travaux sur le sujet.

Cette ensemble de modalités et méthodes que nous avons proposées permettent d'améliorer la technique RTI et une meilleure numérisation et analyse de l'apparence des surfaces. Elles ouvrent aussi la voie vers d'autres améliorations et outils afin d'aider à maîtriser la fabrication de l'apparence des surfaces dans l'industrie.

## Nos contributions

Les contributions en recherche et développement sont :

↔ *Système RTI* ↔

- ☞ Implémentation des modalités d'acquisition dans le logiciel de pilotage.
- ☞ Contrôle de tout les paramètres d'acquisition du système en vue d'expérimentation.
- ☞ Logiciel complet de pilotage associé au système RTI motorisé.

↔ *Acquisition HD-RTI* ↔

- ☞ Couplage intelligent entre le HDR et le RTI.
- ☞ Acquisitions HD-RTI automatiques, auto-adaptatives, et cohérentes entre elles.
- ☞ Extension de la reconstruction de la réflectance locale avec une acquisition HD-RTI.
- ☞ Caractérisation des surfaces améliorée à partir d'une acquisition HD-RTI.

↔ *Caractérisation à partir des données RTI* ↔

- ☞ Caractérisation des pixels d'une acquisition RTI avec des descripteurs.
- ☞ Définition de descripteurs dérivés de la réflectance locale RTI brute.
- ☞ Définition de descripteurs dérivés la géométrie.
- ☞ Définition de descripteurs dérivés des modèles de la réflectance locale.

↔ *Saillance visuelle des données RTI* ↔

- ☞ Estimation de la saillance visuelle en chaque pixels en utilisant les descripteurs.
- ☞ Estimation de la saillance visuelle multi-niveau.
- ☞ Estimation de la saillance visuelle multi-échelle.
- ☞ Sélection des descripteurs les plus pertinents pour le calcul de la saillance visuelle.
- ☞ Estimation d'une distance entre les états de surface.
- ☞ Estimation d'une distance entre les reconstruction des modèles de la réflectance locale.

## Les perspectives

Plusieurs pistes de recherche nous apparaissent aujourd'hui intéressantes à investiguer comme suite à nos travaux. Tout d'abord, et comme chacun le constate, l'intelligence artificielle, et notamment dans le domaine de l'image, est en pleine expansion offrant des outils et performances alléchants. Il serait alors intéressant d'intégrer les techniques issues de l'intelligence artificielle dans plusieurs tâches en lien avec l'exploitation de données multimodales-RTI. On pense par exemple à l'optimisation du processus d'acquisition selon la surface acquise, en prédisant le nombre de positions d'éclairages et leur répartition. L'IA pourrait aussi être avantageusement utilisée pour la modélisation des données RTI (relighting) ou encore pour la détection d'anomalies dans les états de surface.

Une autre perspective concerne l'ajout de nouvelles possibilités d'acquisition à notre dispositif RTI. A titre d'exemple, l'ajout d'un axe X et Y au système permettant de déplacer, par translation, l'objet étudié afin d'acquérir de grandes surfaces tout en gardant une échelle de mesure fine. S'ensuit la reconstruction par stitching adaptée aux données RTI. Une deuxième amélioration concernant l'acquisition consisterait à substituer la lumière blanche par un éclairage multispectral. L'éclairage multispectral permettrait l'acquisition de surfaces complexes (multi-matériaux) et une analyse plus fine des surfaces en adaptant la longueur d'onde aux caractéristiques d'états de surface que l'on recherche. A partir des acquisitions RTI-multispectrales pourront être extraits des descripteurs pour chaque longueur d'onde. Il pourrait aussi être intéressant de développer des descripteurs liés à des attributs d'apparence telle que celui de la couleur estimée à partir des données multispectrales et un illuminant canonique. Mais aussi, il serait intéressant d'investiguer quelles caractéristiques des états de surface sont mesurables selon la longueur d'onde et la géométrie d'éclairage.

Enfin, la saillance pourrait être calculée en incluant la dimension spectrale des pixels. De plus, à partir de la saillance, il pourrait être déterminé les meilleures longueurs d'onde pour mesurer, et donc caractériser, les états de surfaces et leurs anomalies.

## Bibliographie

- [Aguilar Gutierrez 18] Oscar F. Aguilar Gutierrez et Alejandro D. Rey. *Extracting shape from curvature evolution in moving surfaces*. Soft Matter, vol. 14, pages 1465–1473, 2018.
- [Akyüz 07] Ahmet Oğuz Akyüz et Erik Reinhard. *Noise reduction in high dynamic range imaging*. Journal of Visual Communication and Image Representation, vol. 18, no. 5, pages 366–376, 2007.
- [Aluze 98] Denis Aluze. *Système de détection et de caractérisation de défauts d'aspect sur des surfaces parfaitement spéculaires et non planes : application au contrôle qualité de produits destinés à l'emballage cosmétique*. Thèse de Doctorat, 1998.
- [Bagot 99] Jean-Didier Bagot. *Information, sensation et perception*. Armand Colin, 1999.
- [Banterle 17] Francesco Banterle, Alessandro Artusi, Kurt Debattista et Alan Chalmers. *Advanced high dynamic range imaging, second edition*. A. K. Peters, Ltd., 2nd edition, 2017.
- [Barakat 08] Neil Barakat, A. Nicholas Hone et Thomas E. Darcie. *Minimal-Bracketing Sets for High-Dynamic-Range Image Capture*. IEEE Transactions on Image Processing, vol. 17, no. 10, pages 1864–1875, 2008.
- [Baudet 11] Nathalie Baudet, Maurice Pillet et Jean Luc Maire. *Visual inspection of products : a comparison of the methods used to evaluate surface anomalies*. International Journal of Metrology and Quality Engineering, 2011.
- [Baudet 12] Nathalie Baudet, Maurice Pillet et Jean-Luc Maire. *Proposition d'une approche méthodologique pour réduire la variabilité dans le contrôle visuel à but esthétique*. In ICSM2012, pages pp.1–11., 2012.
- [Bilcu 08] Radu Bilcu, Adrian Burian, Aleksu Knuutila et Markku Vehvilainen. *High Dynamic Range Imaging on Mobile Devices*. pages 1312 – 1315, 2008.
- [Blackwell 59] H R Blackwell. *Specification of interior illumination levels*. Illuminating Engineering, vol. 54, no. 6, page 317–353, 1959.
- [BPX 06] *Caractérisation sensorielle des matériaux - Recommandations pratiques pour l'analyse visuelle de la matière première au produit fini*. Standard, Association Française de Normalisation (AFNOR), 2006.



- [Busin 12] Laurent Busin, Nicolas Vandenbroucke et Ludovic Macaire. *Contrôle d'aspect par vision linéaire couleur*. In Techniques de l'Ingénieur, volume 7603 of *Techniques de l'Ingénieur*, pages 1–16. 2012.
- [Castro 19a] Y Castro, G Pitard, A Zendagui et G Le Goic. *Light spatial distribution calibration based on local density estimation for reflectance transformation imaging*. Proc. SPIE QCAV, Quality Control by Artificial Vision, vol. 11172, pages 65–73, 2019.
- [Castro 19b] Yuly Castro, Gilles Pitard, Gaëtan Le Goïc et Vincent Brost. A new method for calibration of the spatial distribution of light positions in free-form rti acquisitions. Proc. O3A, Optics for Arts, Architecture, and Archaeology, 2019.
- [Castro 20] Yuly Castro, M Nurit, G Pitard et A Zendagui. *Calibration of spatial distribution of light sources in reflectance transformation imaging based on adaptive local density estimation*. Journal of Electronic Imaging, vol. 29, pages 1–18, 2020.
- [Chen 18] Guanying Chen, Kai Han et Kwan-Yee K. Wong. *PS-FCN : A Flexible Learning Framework for Photometric Stereo*. In ECCV, 2018.
- [Chen 19] Guanying Chen, Kai Han, Boxin Shi, Yasuyuki Matsushita et Kwan-Yee K. Wong. *SDPS-Net : Self-calibrating Deep Photometric Stereo Networks*. In CVPR, 2019.
- [Christian 17] Degriigny Christian et Francesca Piqué. *Wall Paintings in the Château de Germolles : An Interdisciplinary Project for the Rediscovery of a Unique Fourteenth-Century Decoration*. In Anna Bentkowska-Kafel et Lindsay Mac Donald, éditeurs, Digital Techniques for Documenting and Preserving Cultural Heritage. Library of Congress Cataloging in Publication Data, 2017.
- [Ciortan 16] Irina Mihaela Ciortan, Ruggero Pintus, Giacomo Marchioro, Claudia Dafara, Andrea Giachetti et Enrico Gobetti. *A Practical Reflectance Transformation Imaging Pipeline for Surface Characterization in Cultural Heritage*. In Chiara Eva Catalano et Livio De Luca, éditeurs, Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage. The Eurographics Association, 2016.
- [Colquhoun 64] W. P. Colquhoun. *Recent research in the psychology of inspection*. Textile Institute and Industry, vol. 2, pages 252–255, 1964.
- [Corbé, C. 04] Corbé, C. *La vision*. Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes (J3eA), vol. 3, page 1, 2004.
- [Corregidor 20] Victoria Corregidor, Renato Dias, Norberto Catarino, Carlos Cruz, Luís C. Alves et João Cruz. *Arduino-controlled Reflectance Transformation Imaging to the study of cultural heritage objects*. SN Applied Sciences, vol. 2, page 1586, 2020.
- [Coules 19] H.E. Coules, P.J. Orrock et C.E. Seow. *Reflectance Transformation Imaging as a tool for engineering failure analysis*. Engineering Failure Analysis, vol. 105, pages 1006 – 1017, 2019.
- [Courtier 03] J. C. Courtier et P. Giacomo. *Vocabulaire de la mesure*. Techniques de l'ingénieur. Mesures et contrôle, vol. RB1, 2003.

- [Cover 06] Thomas M. Cover et Joy A. Thomas. Elements of information theory (wiley series in telecommunications and signal processing). Wiley-Interscience, 2006.
- [Dana 99] Kristin J. Dana, Bram van Ginneken, Shree K. Nayar et Jan J. Koenderink. *Reflectance and Texture of Real-World Surfaces*. ACM Trans. Graph., vol. 18, no. 1, page 1–34, 1999.
- [Darson 17] David Darson, Julien Dubois, Mustapha Bourdernane, Barthélémy Heyrman, Pascal Morfin, Abdelali Douiyek et Dominique Ginhac. *Real-Time High Dynamic Range Based on Multiple Non Destructive ReadOut during a Single Exposure : Application to IR Imaging*. In Proceedings of the 11th International Conference on Distributed Smart Cameras, page 21–28. Association for Computing Machinery, 2017.
- [Debevec 97] Paul E. Debevec et Jitendra Malik. *Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs*. In Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '97, page 369–378. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997.
- [Debrosse 10] Thomas Debrosse, Maurice Pillet, Jean Luc Maire et Nathalie Baudet. *Sensory perception of surfaces quality - Industrial practices and prospects*. the Proceedings of the Kansei Engineering and Emotion Research, 2010.
- [Degrigny 16] Christian Degrigny, Francesca Piqué, Nutsa Papiashvili, Julien Guery, Alamin Mansouri, Gaëtan Le Goïc, Vincent Detalle, Dominique Martos-Levif, Aurélie Mounier, Stefanie Wefers, Cristina Tedeschi, Marco Cucchi, Jean-Marc Vallet, Anthony Pamart et Matthieu Pinette. *Technical study of Germolles' wall paintings : the input of imaging technique*. Virtual Archaeology Review, vol. 7, no. 15, pages 1–8, 2016.
- [Drew 12] Mark S. Drew, Yacov Hel-Or, Tom Malzbender et Nasim Hajari. *Robust estimation of surface properties and interpolation of shadow/specularity components*. Image and Vision Computing, vol. 30, no. 4, pages 317–331, 2012.
- [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, pages 159–169, 1973.
- [Drury 75] C. G. Drury et J. G. Fox. *Human reliability in quality control*. 1975.
- [Drury 92] C. G. Drury. *Inspection performance*. Handbook of industrial engineering, 1992.
- [Duffy 10] S.M. Duffy. *Polynomial texture mapping at Roughting Linn rock art site*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, vol. 38, pages 213–217, 2010.
- [Dulecha 20a] Tinsae G. Dulecha, Filippo A. Fanni, Federico Ponchio, Fabio Pellacini et Andrea Giachetti. *Neural reflectance transformation imaging*. The Visual Computer, vol. 36, no. 10, pages 2161–2174, 2020.
- [Dulecha 20b] Tinsae Gebrechristos Dulecha, Ruggero Pintus, Enrico Gobbetti et Andrea Giachetti. *Synthps : a benchmark for evaluation of photometric stereo algorithms for cultural heritage applications*. Proc. EG GCH, Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage, 2020.

- [Durou 07] J. D. Durou. Shape from shading – éclairages, réflexions et perspectives. Rapport technique, 2007.
- [Earl 12] Graeme Earl, Gareth Beale, Kirk Martinez et Hembo Pagi. *Polynomial texture mapping and related imaging technologies for the recording, analysis and presentation of archaeological materials*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, vol. 38, 2012.
- [Eilertsen 17] Gabriel Eilertsen, Joel Kronander, Gyorgy Denes, Rafal Mantiuk et Jonas Unger. *HDR image reconstruction from a single exposure using deep CNNs*. ACM Transactions on Graphics, vol. 36, 2017.
- [Ferguson 74] D A Ferguson, G Major et T Keldoulis. *Vision at work visual defect and the visual demand of tasks*. Appl Ergon, vol. 5, no. 2, pages 84–93, 1974.
- [Fontanot 20] Tommaso Fontanot, Jan Audenaert, Peter Hanselaer, Ilaria Pecorari, Vanni Lughì, Erik Vesselli, Sara Paroni et Frédéric B. Leloup. *BRDF characterization of Al-coated thermoplastic polymer surfaces*. Journal of Coatings Technology and Research, vol. 17, no. 5, pages 1195–1205, 2020.
- [Fowler 20] Montana Fowler, James Davis et Angus G. Forbes. *Capturing Large-Scale Artifacts via Reflectance Transformation Imaging with a Drone*. MW20, 2020.
- [Gallo 12] Orazio Gallo, Marius Tico, Roberto Manduchi, N. Gelfand et Kari Pulli. *Metering for Exposure Stacks*. volume 31, 2012.
- [Gallwey 82] T. J. Gallwey. *Selection tests for visual inspection on a multiple fault type task*. Ergonomics, vol. 25, no. 11, pages 1077–1092, 1982.
- [Gautron 04] Pascal Gautron, Jaroslav Krivanek, Sumanta Pattanaik et Kadi Bouatouch. *A Novel Hemispherical Basis for Accurate and Efficient Rendering*. Proc. ESGR’04 Papers, Eurographics conference on Rendering Techniques, pages 321–330, 2004.
- [Giachetti 17] Andrea Giachetti, Irina Ciortan, Claudia Daffara et Ruggero Pintus. *Multispectral rti analysis of heterogeneous artworks*. Proc. EG GCH, Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage, 2017.
- [Giachetti 18] Andrea Giachetti, Irina Mihaela Ciortan, Claudia Daffara, Giacomo Marchioro, Ruggero Pintus et Enrico Gobbetti. *A novel framework for highlight reflectance transformation imaging*. Computer Vision and Image Understanding, vol. 168, pages 118–131, 2018.
- [Granados 10] Miguel Granados, Boris Ajdin, Michael Wand, Christian Theobalt, Hans-Peter Seidel et Hendrik Lensch. *Optimal HDR Reconstruction with Linear Digital Cameras*. pages 215–222, 2010.
- [Grossberg 04] Michael Grossberg et Shree Nayar. *Modeling the space of camera response functions*. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, vol. 26, pages 1272 – 1282, 2004.
- [Guerra 08] Anne Sophie Guerra. *Métriologie sensorielle dans le cadre du contrôle qualité visuel*. Thèse de Doctorat, Université de Savoie, 2008.
- [Guerra 09] Anne Sophie Guerra. *Outils statistiques de l’analyse sensorielle*. Rapport technique, 2009.

- [Haindl 13] Michal Haindl et Jiri Filip. *Visual texture : Accurate material appearance measurement, representation and modeling*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [Hasinoff 10] Samuel Hasinoff, Fredo Durand et William Freeman. *Noise-Optimal Capture for High Dynamic Range Photography*. pages 553–560, 2010.
- [Hepp 17] Benjamin Hepp, Matthias Nießner et Otmar Hilliges. *Plan3D : Viewpoint and Trajectory Optimization for Aerial Multi-View Stereo Reconstruction*. ACM Transactions on Graphics, vol. 38, 2017.
- [Hirakawa 10] Keigo Hirakawa et Patrick J. Wolfe. *Optimal exposure control for high dynamic range imaging*. In 2010 IEEE International Conference on Image Processing, pages 3137–3140, 2010.
- [Huang 15] Xiang Huang, Marc Walton, Greg Bearman et Oliver Cossairt. *Near light correction for image relighting and 3D shape recovery*. In 2015 Digital Heritage, volume 1, pages 215–222, 2015.
- [Ikehata 12] Satoshi Ikehata, David Wipf, Yasuyuki Matsushita et Kiyoharu Aizawa. *Robust photometric stereo using sparse regression*. In 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 318–325, 2012.
- [Ikehata 14] Satoshi Ikehata, David Wipf, Yasuyuki Matsushita et Kiyoharu Aizawa. *Photometric Stereo Using Sparse Bayesian Regression for General Diffuse Surfaces*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 36, no. 9, pages 1816–1831, 2014.
- [Ikehata 18] S. Ikehata. *CNN-PS : CNN-based Photometric Stereo for General Non-Convex Surfaces*. In ECCV, 2018.
- [Khan 19] Zeeshan Khan, Mukul Khanna et Shanmuganathan Raman. *FHDR : HDR Image Reconstruction from a Single LDR Image using Feedback Network*. 2019 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), pages 1–5, 2019.
- [Kitanovski 21] Vlado Kitanovski et Jon Yngve Hardeberg. *Objective evaluation of relighting models on translucent materials from multispectral RTI images*. Electronic Imaging, 2021.
- [Koenderink 92] Jan J Koenderink et Andrea J van Doorn. *Surface shape and curvature scales*. Image and Vision Computing, vol. 10, pages 557–564, 1992.
- [Koenderink 96] Jan J. Koenderink, Andrea J. van Doorn et Marigo Stavridi. *Bidirectional reflection distribution function expressed in terms of surface scattering modes*. In Bernard Buxton et Roberto Cipolla, éditeurs, Computer Vision — ECCV '96, pages 28–39. Springer Berlin Heidelberg, 1996.
- [Kraemer 06] M. Kraemer. *Using polynomial texture maps for micro-scale occlusions*. 2006.
- [Krátký 20] Vít Krátký, Pavel Petráček, Vojtěch Spurný et Martin Saska. *Autonomous Reflectance Transformation Imaging by a Team of Unmanned Aerial Vehicles*. IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, pages 2302–2309, 2020.
- [Lafortune 97] Eric P. F. Lafortune, Sing-Choong Foo, Kenneth E. Torrance et Donald P. Greenberg. *Non-Linear Approximation of Reflectance Functions*. In Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive

- Techniques, SIGGRAPH '97, page 117–126. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997.
- [Lambert 60] J. H. Lambert. *Photometria sive de mensura de gratibus luminis, colorum umbrae*. Eberhard Klett, 1760.
- [Le Goïc 12] Gaëtan Le Goïc. *Qualité géométrique & aspect des surfaces : approches locales et globales*. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2012.
- [Lee 18] Siyeong Lee, Gwon Hwan An et Suk-Ju Kang. *Deep Recursive HDRI : Inverse Tone Mapping using Generative Adversarial Networks*. In Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018.
- [Lemesle 20] Julie Lemesle, Frederic Robache, Gaëtan Le Goïc, Alamin Mansouri, Christopher Brown et Maxence Bigerelle. *Surface Reflectance : An Optical Method for Multiscale Curvature Characterization of Wear on Ceramic–Metal Composites*. *Materials*, vol. 13, 2020.
- [Lewis 21] David Andrew Lewis, Marvin Nurit, Hermine Chatoux, Fabrice Meriaudeau et Alamin Mansouri. *An Automated Adaptive Focus Pipeline for Reflectance Transformation Imaging*. *Electronic Imaging*, vol. 2021, pages 63–1–63–7, 2021.
- [Liu 20] Yu-Lun Liu, Wei-Sheng Lai, Yu-Sheng Chen, Yi-Lung Kao, Ming-Hsuan Yang, Yung-Yu Chuang et Jia-Bin Huang. *Single-Image HDR Reconstruction by Learning to Reverse the Camera Pipeline*. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 2020.
- [Luxman 21] Ramamoorthy Luxman, Marvin Nurit, Gaëtan Le Goïc, Franck Marzani et Alamin Mansouri. *Next Best Light Position : A self configuring approach for the Reflectance Transformation Imaging acquisition process*. *Electronic Imaging*, vol. 2021, no. 5, pages 132–1–132–7, 2021.
- [Mac Leod 09] P. Mac Leod, F. Sauvageot et E. P. Köster. *Les caractéristiques d'une réponse sensorielle*. In Collection Sciences & techniques agroalimentaire, éditeur, Évaluation sensorielle : manuel méthodologique, chapitre 1. Lavoisier, 2009.
- [Malzbender 00] Thomas Malzbender, Dan Gelb, Hans Wolters et Bruce Zuckerman. *Enhancement of Shape Perception by Surface Reflectance Transformation*. Rapport technique, 2000.
- [Malzbender 01] Thomas Malzbender, Dan Gelb et Hans Wolters. *Polynomial texture maps*. Proc. SIGGRAPH'01, Computer graphics and interactive techniques, pages 519–528, 2001.
- [Mann 95] S. Mann et R. W. Picard. *On Being 'Undigital' With Digital Cameras : Extending Dynamic Range By Combining Differently Exposed Pictures*. In Proceedings of IS&T, pages 442–448, 1995.
- [Martínez 15] Miguel A. Martínez, Eva M. Valero et Javier Hernández-Andrés. *Adaptive exposure estimation for high dynamic range imaging applied to natural scenes and daylight skies*. *Appl. Opt.*, vol. 54, no. 4, pages B241–B250, 2015.
- [McGuigan 20] Matthew McGuigan et Jacqueline Christmas. *Automating RTI : Automatic light direction detection and correcting non-uniform lighting for more accu-*

- rate surface normals*. Computer Vision and Image Understanding, vol. 192, page 102880, 2020.
- [Megaw 79] E.D. Megaw. *Factors affecting visual inspection accuracy*. Applied Ergonomics, vol. 10, no. 1, pages 27–32, 1979.
- [Mehlum 98] Even Mehlum et Christian Tarrou. *Invariant smoothness measures for surfaces*. Advances in Computational Mathematics, vol. 8, pages 49–63, 1998.
- [Miles 14] James Miles, Mike Pitts, Hembo Pagi et Graeme Earl. *New applications of photogrammetry and reflectance transformation imaging to an Easter Island statue*. Antiquity, vol. 88, pages 596–605, 2014.
- [Mitsunaga 99] T. Mitsunaga et S.K. Nayar. *Radiometric self calibration*. In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, volume 1, pages 374–380, 1999.
- [Mudge 05] Mark Mudge, Jean-Pierre Voutaz, Carla Schroer et Marlin Lum. *Reflection Transformation Imaging and Virtual Representations of Coins from the Hospice of the Grand St. Bernard*. pages 29–39, 2005.
- [Mudge 06] Mark Mudge, Thomas Malzbender, Carla Schroer et Marlin Lum. *New Reflection Transformation Imaging Methods for Rock Art and Multiple-Viewpoint Display*. pages 195–202, 2006.
- [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, no. 1, pages 87–99, 1990.
- [Mytum 18] Harold Mytum et J. R. Peterson. *The Application of Reflectance Transformation Imaging (RTI) in Historical Archaeology*. Historical Archaeology, vol. 52, pages 489–503, 2018.
- [Nayar 00] S.K. Nayar et T. Mitsunaga. *High dynamic range imaging : spatially varying pixel exposures*. In Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2000 (Cat. No.PR00662), volume 1, pages 472–479 vol.1, 2000.
- [Nelson 69] J. Byron Nelson et Barany James W. *A Dynamic Visual Recognition Test for Paced Inspection Tasks*. A I I E Transactions, vol. 1, no. 4, pages 327–332, 1969.
- [Nickles 03] George Nickles, Brian Melloy et Anand Gramopadhye. *A comparison of three levels of training designed to promote systematic search behavior in visual inspection*. International Journal of Industrial Ergonomics - INT J IND ERGONOMIC, vol. 32, pages 331–339, 2003.
- [Ning 18] Shiyu Ning, Hongteng Xu, Li Song, Rong Xie et Wenjun Zhang. *Learning an Inverse Tone Mapping Network with a Generative Adversarial Regularizer*. In 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pages 1383–1387, 2018.
- [Nurit 21] Marvin Nurit, Gaëtan Le Goïc, David Lewis, Yuly Castro, Abir Zendagui, Hermine Chatoux, Hugues Favrelière, Stéphane Maniglier, Pierre Jochum et Alamin Mansouri. *HD-RTI : An adaptive multi-light imaging approach for the quality assessment of manufactured surfaces*. Computers in Industry, vol. 132, page 103500, 2021.

- [Obein 15] G Obein, J Audenaert, G Ged et F Leloup. Metrological issues related to brdf measurements around the specular direction in the particular case of glossy surfaces. Proc. SPIE 9398, Measuring, Modeling, and Reproducing Material Appearance, 2015.
- [Obein 18] G Obein. Thèse de Doctorat, CNAM, 2018.
- [Pertuz 13] Said Pertuz, Domenec Puig et Miguel Angel Garcia. *Analysis of focus measure operators for shape-from-focus*. Pattern Recognition, vol. 46, no. 5, pages 1415–1432, 2013.
- [Peterson 12] Gary L. Peterson. *A BRDF model for scratches and digs*. In Leonard M. Hanssen, editeur, Reflection, Scattering, and Diffraction from Surfaces III, volume 8495, pages 107 – 116. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2012.
- [Pintus 17] R. Pintus, A. Giachetti, G. Pintore et E. Gobbetti. *Guided Robust Matte-Model Fitting for Accelerating Multi-light Reflectance Processing Techniques*. In Proc. British Machine Vision Conference, 2017.
- [Pintus 18] Ruggero Pintus, Tinsae Dulecha, Alberto Jaspe et Andrea Giachetti. Objective and subjective evaluation of virtual relighting from reflectance transformation imaging data. Proc. EG GCH, Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage, 2018.
- [Pitard 15] Gilles Pitard, Gaetan Le Goic, Hugues Favreliere et Serge Samper. Discrete modal decomposition for surface appearance modelling and rendering. Proc. SPIE 9525, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX, 952523, 2015.
- [Pitard 16] Gilles Pitard. *Métrologie et modélisation de l’aspect pour l’inspection qualité des surfaces*. Thèse de Doctorat, Université Grenoble Alpes, 2016.
- [Pitard 17a] Gilles Pitard, Gaëtan Le Goic, Alamin Mansouri et Hugues Favreliere. *Discrete Modal Decomposition : a new approach for the reflectance modeling and rendering of real surfaces*. Machine Vision and Applications, vol. 28, pages 607–621, 2017.
- [Pitard 17b] Gilles Pitard, Gaëtan Le Goic, Alamin Mansouri et Hugues Favreliere. *Robust Anomaly Detection Using Reflectance Transformation Imaging for Surface Quality Inspection*. Proc. SCIA, Scandinavian Conference on Image Analysis, vol. 10269, pages 550–561, 2017.
- [Ponchio 19] Federico Ponchio, Massimiliano Corsini et Roberto Scopigno. *Relight : a compact and accurate RTI representation for the Web*. Graphical Models, vol. 105, page 101040, 2019.
- [Raphet 06] Bernard Raphet. *États de surface - Mesure*. Techniques de l’ingénieur Frottement, usure et lubrification, 2006.
- [Rebsamen 10] M. Rebsamen, J.-M. 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.
- [Rensink 97] Ronald A. Rensink, J. Kevin O’Regan et James J. Clark. *To See or not to See : The Need for Attention to Perceive Changes in Scenes*. Psychological Science, vol. 8, no. 5, pages 368–373, 1997.

- [Roberts 01] Andy Roberts. *Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons*. First Break, vol. 19, no. 2, pages 85–100, 2001.
- [Robertson 00a] Mark Robertson, Sean Borman et Robert Stevenson. *Dynamic Range Improvement Through Multiple Exposures*. volume 3, pages 159–163, 2000.
- [Robertson 00b] Mark Robertson, Sean Borman et Robert Stevenson. *Estimation-Theoretic Approach to Dynamic Range Enhancement Using Multiple Exposures*. Journal of Electronic Imaging, vol. 12, 2000.
- [Sahar 21] Ahmadi Sahar et Hubbard Ted. *3D Illumination For Inspection Of Mechanical Parts*. Canadian Mechanical Engineering, vol. 4, 2021.
- [Selmo 17] David Selmo, Fraser Sturt, James Miles, Philip Basford, Tom Malzbender, Kirk Martinez, Charlie Thompson, Graeme Earl et George Bevan. *Underwater reflectance transformation imaging : a technology for in situ underwater cultural heritage object-level recording*. Journal of Electronic Imaging, vol. 26, pages 1 – 18, 2017.
- [Seulin 00] Ralph Seulin, G. Delcroix et Frédéric Merienne. *Comparative performance for isolated points detection operators : application on surface defects extraction*. Vision Interface, pages 14–17, 2000.
- [Stumpf 04] Jessi Stumpf, Andreas Wenger, Chris Tchou, Tim Hawkins et Paul Debevec. *Direct HDR capture of the sun and sky*. 2004.
- [Styner 00] Martin Styner, Christian Brechbühler, Gábor Székely et Guido Gerig. *Parametric Estimate of Intensity Inhomogeneities Applied to MRI*. IEEE Trans. Med. Imaging, vol. 19, pages 153–165, 2000.
- [Tiwari 15] Gaurav Tiwari et Pushpi Rani. *A Review On High-Dynamic-Range Imaging With Its Technique*. International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, vol. 8, pages 93–100, 2015.
- [Tursun 15] O. Tursun, Ahmet Oğuz Akyüz, Aykut Erdem et Erkut Erdem. *The State of the Art in HDR Deghosting : A Survey and Evaluation*. Computer Graphics Forum, vol. 34, 2015.
- [Wang 83] Yaujen Wang et William L. Wolfe. *Use Of BRDF Data In Determining Surface Roughness*. In Robert P. Breault, editeur, Generation, Measurement and Control of Stray Radiation III, volume 0384, pages 27 – 31. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 1983.
- [Wang 97] Mao-Jiun Wang, Shu-Chiang Lin et Colin Drury. *Training for strategy in visual search*. International Journal of Industrial Ergonomics, vol. 20, pages 101–108, 1997.
- [Wang 19] Lin Wang et Kuk jin Yoon. *Co-DesignMR : A MR-based Interactive Workstation Design System Supporting Collaboration*. ArXiv, vol. abs/1907.03107, 2019.
- [Wells 96] William M. Wells, Paul Viola, Hideki Atsumi, Shin Nakajima et Ron Kikinis. *Multi-modal volume registration by maximization of mutual information*. Medical Image Analysis, vol. 1, pages 35–51, 1996.
- [Westin 92] Stephen H. Westin, James R. Arvo et Kenneth E. Torrance. *Predicting Reflectance Functions from Complex Surfaces*. SIGGRAPH Comput. Graph., vol. 26, no. 2, page 255–264, 1992.



- [Woodham 80] Robert J. Woodham. *Photometric Method For Determining Surface Orientation From Multiple Images*. Optical Engineering, vol. 19, no. 1, pages 139 – 144, 1980.
- [Woodham 94] Robert J. Woodham. *Gradient and curvature from the photometric-stereo method, including local confidence estimation*. J. Opt. Soc. Am. A, vol. 11, pages 3050–3068, 1994.
- [Wu 11] Lun Wu, Arvind Ganesh, Boxin Shi, Yasuyuki Matsushita, Yongtian Wang et Yi Ma. *Robust Photometric Stereo via Low-Rank Matrix Completion and Recovery*. In Computer Vision ACCV 2010, pages 703–717. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [Zendagui 19] A Zendagui, JB Thomas, G Le Goic et Y Castro. *Quality Assessment of Reconstruction and Relighting from RTI Images : Application to Manufactured Surfaces*. Proc. SITIS, Signal-Image Technology Internet-Based Systems, pages 746–753, 2019.
- [Zendagui 21] Abir Zendagui, Gaëtan Le Goïc, Hermine Chatoux, Jean-Baptiste Thomas, Yuly Castro, Marvin Nurit et Alamin Mansouri. *Quality assessment of dynamic virtual relighting from RTI data : application to the inspection of engineering surfaces*. In Fifteenth International Conference on Quality Control by Artificial Vision, volume 11794, pages 94 – 102. SPIE, 2021.

## Publications associées à ces travaux

### Revue internationale à comité de lecture

- 2021 Marvin NURIT, Gaëtan LE GOÏC, David LEWIS, Yuly CASTRO, Abir ZENDAGUI, Hermine CHATOX, Hugues FAVRELIÈRE, Stéphane MANIGLIER, Pierre JOCHUM, et Alamin MANSOURI. « HD-RTI : An adaptive multi-light imaging approach for the quality assessment of manufactured surfaces ». *Computers in Industry*, 2021.

## Communications orales et colloques à comité de lecture

2021 Marvin NURIT, Gaëtan LE GOÏC, Stéphane MANIGLIER, Pierre JOCHUM, Hermine CHATOUX et Alamin MANSOURI. « Improved visual saliency estimation on manufactured surfaces using high-dynamic reflectance transformation imaging ». *Proceedings Volume 11794, 15th International Conference On Quality Control By Artificial Vision QCAV 2021, Tokushima, Japon, 2021.*

Abir ZENDAGUI, Gaëtan LE GOÏC, Hermine CHATOUX, Jean-Baptiste THOMAS, Yuly CASTRO, Marvin NURIT et Alamin MANSOURI. « Quality assessment of dynamic virtual relighting from RTI data : application to the inspection of engineering surfaces ». *Proceedings Volume 11794, 15th International Conference On Quality Control By Artificial Vision QCAV 2021, Tokushima, Japon, 2021.*

Ramamoorthy LUXMAN, Marvin NURIT, Gaëtan LE GOÏC, Franck MARZANI et Alamin MANSOURI. « Next Best Light Position : A self configuring approach for the Reflectance Transformation Imaging acquisition process ». *Electronic Imaging, 2021.*

David LEWIS, Marvin NURIT, Hermine CHATOUX, Fabrice MERIAUDEAUX et Alamin MANSOURI. « An Automated Adaptive Focus Pipeline for Reflectance Transformation Imaging ». *Electronic Imaging, 2021.*

2020 Yuly CASTRO, Marvin NURIT, Gilles PITARD, Abir ZENDAGUI, Gaëtan LE GOÏC, Vincent BROST, Arnaud BOUCHER, Alamin MANSOURI et Anthony PAMART. « Calibration of spatial distribution of light sources in Reflectance Transformation Imaging based on adaptive local density estimation ». *Journal of Electronic Imaging, 2020.*

2019 Marvin NURIT, Yuly CASTRO, Abir ZENDAGUI, Gaëtan LE GOÏC, Hugues FAVRELIÈRE et Alamin MANSOURI. « High Dynamic Range Reflectance Transformation Imaging : an adaptive multi-light approach for visual surface quality assessment ». *Proceedings Volume 11172, 14th International Conference On Quality Control By Artificial Vision QCAV 2019, Mulhouse, France, 2019.*

Abir ZENDAGUI, Jean-Baptiste THOMAS, Gaëtan LE GOÏC, Yuly CASTRO, Marvin NURIT, Alamin MANSOURI, Alamin MANSOURI et Marius PEDERSEN. « Quality Assessment of Reconstruction and Relighting from RTI Images : Application to Manufactured Surfaces ». *15th International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS), Sorrento, Italie, 2019.*







## Résumé

### Numérisation et caractérisation de l'apparence pour l'inspection visuelle des surfaces manufacturées

La maîtrise de la perception visuelle des surfaces des produits manufacturés est un enjeu central pour l'industrie. Or, en entreprise, la qualité des surfaces est souvent évaluée par des contrôleurs humains. Seul quelques cas spécifiques utilisent une approche instrumentale ou photométrique. Parmi les approches photométriques, l'une d'elle connaît un essor important : le Reflectance Transformation Imaging (RTI). Cependant cette technique présente des limites au niveau de l'acquisition et du traitement des données. L'objectif est donc de corriger certaines de ces limites afin d'améliorer le RTI et, par conséquent, le contrôle qualité visuel des états de surfaces dans l'industrie.

Les systèmes RTI actuels sont limités et ne peuvent répondre à nos besoins en terme d'implémentation et d'expérimentation des modalités et méthodes liées au RTI. Nous avons donc développé un système de mesure RTI couplé à un logiciel de pilotage. Cette ensemble nous permet l'accès au matériel et au code du logiciel pour ajouter, modifier, et contrôler, les paramètres et modalités d'acquisitions. Un des développements a consisté à implémenter une nouvelle modalité d'acquisition qui consiste à coupler le High Dynamic Range (HDR) au RTI (HD-RTI). Ce couplage permet de corriger un biais de mesure lié au temps d'exposition de la caméra et à la limite du capteur en terme de plage dynamique. Le HD-RTI mesure la pleine dynamique de la réponse en luminance des surfaces inspectées. Avec les données stéréo-photométrique HD-RTI, nous pouvons reconstruire virtuellement la scène en simulant un temps d'exposition arbitraire, mais aussi, mieux caractériser et donc discriminer les anomalies de surfaces.

Le RTI génère de grande quantité de données, qui se complexifie selon les modalités d'acquisition utilisées tel que le HD-RTI. Nous proposons une méthodologie afin de caractériser l'apparence des surfaces, à partir mesures RTI, basée sur l'utilisation de descripteurs de la géométrie et du comportement photométrique des surfaces. La variété des descripteurs permet une caractérisation fine des différents états de surface. A partir des descripteurs extraits des acquisitions RTI nous proposons une méthode afin d'estimer la saillance visuelle multi-échelle et multi-niveau en chaque pixel et permettre ainsi de discriminer les anomalies de surfaces. Une méthodologie, pour segmenter les données RTI en utilisant la saillance, et déterminer les descripteurs les plus pertinents à utiliser selon un critère global, est ensuite appliqué sur un cas d'application. Ensuite, le calcul de distance est étendue aux acquisitions RTI afin de comparer les états de surface. La distance est corrélée avec le degré de différence entre les caractéristiques des états de surfaces. Enfin, une distance est aussi calculée entre les modèles de reconstruction de l'apparence.

---

## Mots clés

Apparence des matériaux, Vision artificielle, Inspection qualité, Reflectance Transformation Imaging

---

## Abstract

### Appearance digitization and characterization for visual inspection of manufactured surfaces

Mastering the visual perception of the surfaces of manufactured products is a central issue for industry. However, in industry, the quality of surfaces is often assessed by human inspectors. Only a few specific cases use an instrumental or photometric approach. Among the photometric approaches, one of them is experiencing significant growth : Reflectance Transformation Imaging (RTI). However, this technique has limitations in terms of data acquisition and processing. The objective is therefore to correct some of these limitations in order to improve the RTI and, consequently, the visual quality control of surface conditions in industry.

The current RTI systems are limited and cannot meet our needs in terms of implementation and experimentation of the modalities and methods related to RTI. We therefore developed an RTI measurement system coupled with a control software. This set allows us access to hardware and software code to add, modify, and control the parameters and acquisition methods. One of the developments consisted in implementing a new modality of acquisition which consists in coupling the High Dynamic Range (HDR) to the RTI (HD-RTI). This coupling makes it possible to correct a measurement bias linked to the exposure time of the camera and to the limit of the sensor in terms of dynamic range. The HD-RTI measure the full dynamic range of the luminance response of the inspected surfaces. With HD-RTI stereo-photometric data, we can virtually reconstruct the scene by simulating an arbitrary exposure time, but also better characterize and therefore discriminate surface anomalies.

RTI generates large amounts of data, which becomes more complex depending on the acquisition methods used, such as HD-RTI. We propose a methodology to characterize the appearance of surfaces from RTI measurements. The characterization of surface states is based on the use of geometry descriptors and the photometric behavior of surfaces. The variety of descriptors allows a fine characterization of the different surface states. From the descriptors extracted, from the RTI acquisitions, we propose a method to estimate the multi-scale and multi-level visual saliency in each pixel and thus make it possible to discriminate surface anomalies. A methodology, to segment RTI data using saliency, and determine the most relevant descriptors to use according to a global criterion, is then applied to an application case. Then, distance calculation is extended to RTI acquisitions in order to compare surface states. The distance is correlated with the degree of difference between the characteristics of the surface finishes. Finally, a distance is also calculated between the appearance reconstruction models.

---

## Keywords

Material Appearance, Artificial Vision, Quality Inspection, Reflectance Transformation Imaging